Luftfahrtforschung und –technologie

Abschlussbericht

Verdichterauslegung mit verbesserter Stabilität - passive und aktive Maßnahmen (VerdiSta)

Förderkennzeichen 20T1922A

Laufzeit: 01.01.2020 bis 31.12.2024

Berichterstatter: Cornelia Rohn

MTU Aero Engines AG

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

München, Juni 2025

Copyright © MTU Aero Engines AG Public

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

2 Zusammenfassung 4

2.1 Projektstrukturplan 4

2.2 Erreichte Ergebnisse 6

2.2.1 HAP1 Mechanismen zur Verdichterstabilität 6

2.2.2 HAP2 Werkzeuge & Tools zur Verdichterstabilität 7

2.2.3 HAP3 Maßnahmen zur Verbesserung der Verdichterstabilität 11

3 Technische Darstellung der Arbeitspakete 12

3.1 HAP1 Mechanismen zur Verdichterstabilität 12

3.1.1 AP1.1 Einflussfaktoren & Mechanismen zur Verdichterstabilität 12

3.2 HAP2 Werkzeuge & Tools zur Verdichterstabilität 17

3.2.1 AP2.1 Verbesserte Berechnung von Nebenstromgeometrien 17

3.2.2 AP2.2 Verbesserte Stabilitätssimulation durch automatisierten Abgleich CFD-Messung 23

3.2.3 AP2.3 Verbesserte Berechnung der Radialspaltströmung 24

3.3 HAP3 Maßnahmen zur Verbesserung der Verdichterstabilität 29

3.3.1 AP3.1 Stabilitätsverbesserung durch neue Designkonzepte (passiv) 29

4 Literaturverzeichnis 33

1 Einleitung

Ausreichende Stabilität (Pumpgrenzabstand) im gesamten Betriebsbereich ist – insbesondere vor dem Hintergrund zunehmend kleiner werdender Kerntriebwerke – ein herausragendes Designmerkmal für einen „world class“-Hochdruckverdichter. Hierzu sind treffsichere Tools, die die maßgeblichen Stabilitätsmechanismen abbilden, und gezielte Design-Maßnahmen erforderlich, um aufwändige Re-Designs während der Produktentwicklung zu vermeiden.

Im Rahmen des Verbundes VerdiSta haben die Partner MTU, DLR und RWTH entlang der Prozesskette die zugehörigen Mechanismen (HAP1), Tools (HAP2) sowie passive Maßnahmen (HAP3) zur Verbesserung der Verdichterstabilität technologisch entwickelt.

Hierzu wurden in HAP1 relevante Einflussfaktoren und Mechanismen basierend auf Messdaten für repräsentative Verdichterkonfigurationen identifiziert und (lokale) Kriterien und Korrelationen durch MTU analysiert.

Darauf aufbauend wurden in HAP2 (alle Partner) die Tools zur Berechnung der Verdichterstabilität in den Bereichen Nebenstromgeometrien, automatischer Abgleich CFD mit Messung sowie Radialspaltströmung bzgl. Berechenbarkeit und Treffsicherheit entscheidend verbessert. Die zugehörige Validierung erfolgte auf Grundlage bereits vorliegender bzw. gezielter zusätzlicher Tests (RWTH in AP2.3).

Schließlich sollten in HAP3 (MTU, RWTH) konkrete passive Maßnahmen zur Stabilitätsverbesserung entwickelt werden. Dazu wurden verbesserte Designs (z.B. durch neuartige Oberflächenstrukturen und Seitenwandgestaltung) untersucht.

2 Zusammenfassung

Der Verbund unterstützt Ziel 1 der Ausschreibung „Umweltfreundliche Luftfahrt“. Die hier vorgeschlagenen aktiven und passiven Maßnahmen aus HAP3 sollen den Wirkungsgrad des Verdichters direkt um bis zu 0,5% verbessern. Darüber hinaus ergibt sich eine indirekte Verbesserung durch eine präzise Vorhersage der Pumpgrenze (Tools gemäß HAP2) – oft muss im Designprozess die fehlende Pumpgrenze über eine Wirkungsgradverschlechterung „erkauft“ werden.

Nebenziel (Ziel 3 der Ausschreibung) ist eine deutliche Effizienzsteigerung des Auslegungsprozesses zur Verdichterstabilität durch erweiterte und validierte Tools in HAP2. So sind heute z.B. Nebenstromgeometrien, wie Kavitäten und Casing Treatment, und Clockingeffekte im Harmonic-Balance-Verfahren (AP2.1) nur sehr eingeschränkt und aufwändig modellierbar. Der Geschwindigkeitsvorteil kann bis zu mehreren Größenordnungen betragen.

2.1 Projektstrukturplan

Abbildung 1 zeigt den Projektstrukturplan des Vorhabens.

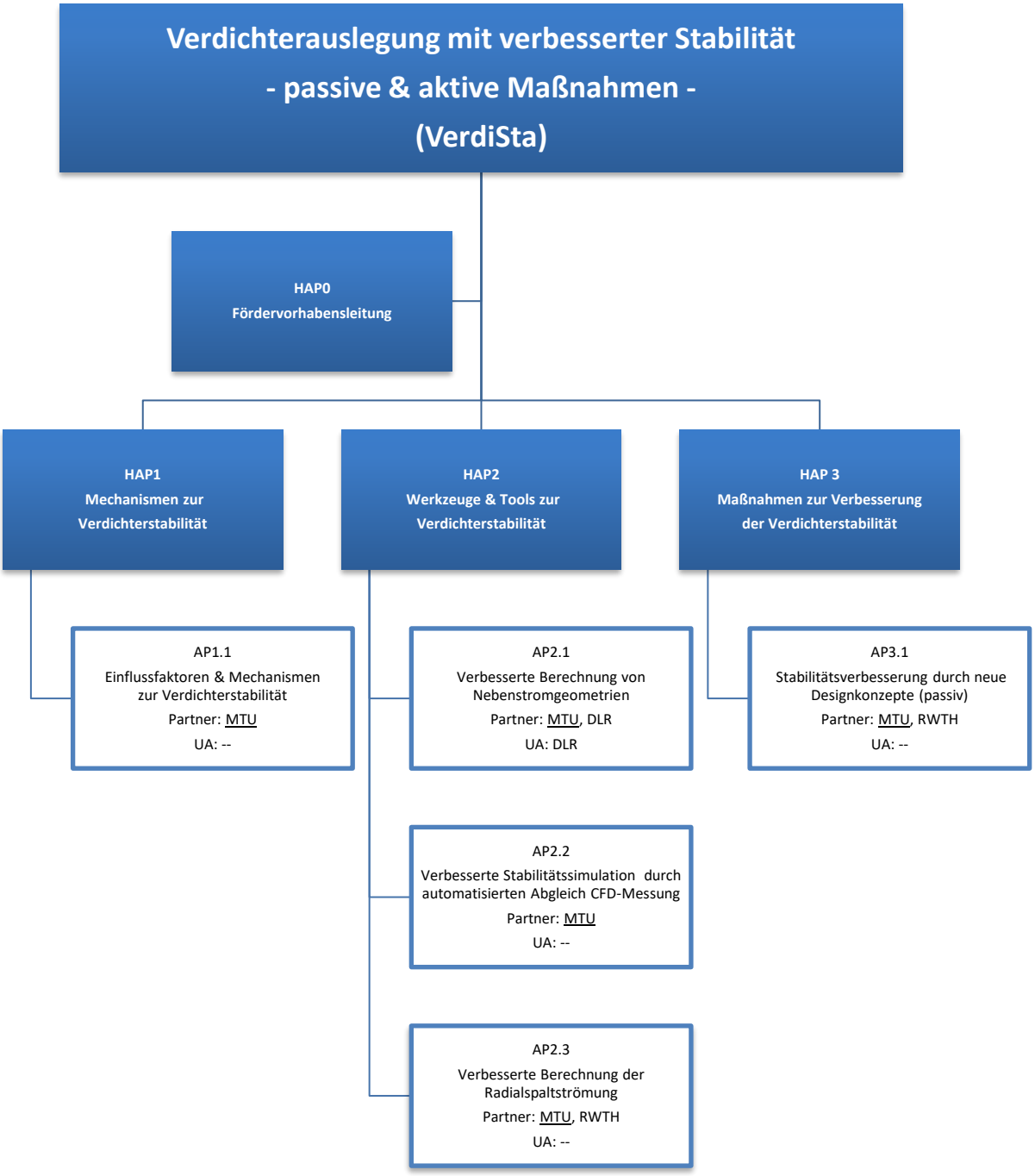


Abbildung 1: Projektstrukturplan VerdiSta

2.2 Erreichte Ergebnisse

2.2.1 HAP1 Mechanismen zur Verdichterstabilität

Erreichte Ergebnisse

AP1.1.2 Modellierung und Vergleichskriterien
Innerhalb des Projektes wurden basierend auf einer Literaturrecherche eine Vielzahl von aerodynamischen Stabilitätskriterien auf ihre Eignung zur Vorhersage der Pumpgrenze untersucht. Diese Eignungsbewertung erfolgte anhand einer Auswahl an Verdichter-Testfällen.

AP1.1.3 Ableiten von CFD-Korrelationen und SGV-Vergleichskriterien
Anhand von stationären als auch instationären CFD-Simulationen wurde u.a. das dynamische Stabilitätsverhalten von unterschiedlichen Verdichtern unter Berücksichtigung des umgebenden Systems analysiert. Das beobachtete Verhalten lt. Modell wurde in Übereinstimmung mit theoretischen, analytischen Überlegungen genutzt, um ein Stabilitätskriterium basierend auf dem Überrollverhalten abzuleiten.

AP1.1.4 Weiterentwicklung und Validierung
Basierend auf den Ergebnissen des AP1.1.3 wurde das bestimmte Stabilitätskriterium auf eine Auswahl an Versuchsverdichtern angewandt und gegenüber den vorliegenden Messdaten validiert.

AP1.1.5 Implementierung der PG-Korrektur in das CFD-Post-Processing und das SGV
Aufgrund der Beschaffenheit des Kriteriums bestand kein weitergehender Implementierungsbedarf innerhalb des CFD-Post-Processing bzw. innerhalb des SGV.

2.2.2 HAP2 Werkzeuge & Tools zur Verdichterstabilität

2.2.2.1 AP 2.1 Verbesserte Berechnung von Nebenstromgeometrien

Erreichte Ergebnisse

Im Rahmen des Arbeitspakets 2.1 wurde das Frequenzbereichsverfahren Harmonic Balance (HB) signifikant weiterentwickelt. Vor Projektbeginn wurden in der Aeroelastik hauptsächlich lineare Verfahren eingesetzt, die nicht in der Lage sind, nichtlineare Phänomene abzubilden. Das weiterentwickelte HB-Verfahren kann grundsätzlich nichtlineare Effekte erfassen und bietet gleichzeitig sehr deutlich reduzierte Rechenkosten im Vergleich zu herkömmlichen, nichtlinearen Simulationen im Zeitbereich. Diese Effizienzsteigerung macht das Verfahren besonders attraktiv für instationäre Aerodynamiksimulationen in der Breite, die bisher aufgrund der hohen Rechenaufwände nur punktuell eingesetzt werden konnten. Ein bedeutendes Ergebnis des Projekts ist daher die Etablierung des Harmonic Balance Verfahrens als Standardverfahren in der Aeroelastik. Darüber hinaus steht es nun auch flächendeckend für aerodynamische Anwendungen zur Verfügung.

Ein wesentlicher Beitrag dazu ist die in diesem Arbeitspaket entwickelte Fähigkeit sogenannte Nebenstromgeometrieelemente, wie Casing Treatments (CT) und Dichtungskavitäten, in das HB-Verfahren zu integrieren. Diese Integration wurde durch die Überarbeitung des sogenannten Zonal Interfaces beim Partner DLR ermöglicht, welches hierdurch das HB-Verfahren hinreichend effizient und robust ist. Zusätzlich wurde das Zonal Interface ertüchtigt, Moden gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Umfangsperiodizität zu verarbeiten. Diese Verbesserungen sind entscheidend für die erfolgreiche Anbindung von Nebenstromgeometrieelementen.

Im Rahmen des Projekts wurde neben der Code-Entwicklung eine spezielle Netztopologie erarbeitet, welche die Anbindung von nicht-umfangssymmetrischen Casing Treatments in Verbindung mit der weiter entwickelten HB-Methode ermöglicht. Diese neue Methodik wurde sowohl für die aerodynamische Bewertung mehrstufiger Verdichter

als auch für die aeroelastische Bewertung einzelner Schaufeln validiert. Die Validierung erfolgte anhand erheblich aufwändigerer Zeitbereichssimulationen, wobei die neue Methodik mit einer sehr guten Übereinstimmung zu den Referenzergebnissen überzeugen konnte. Gleichzeitig offenbart der Vergleich mit Simulationen ohne CT, dass der CT-Einfluss signifikant sein kann, wodurch die Notwendigkeit jene zu berücksichtigen unterstrichen wird.

2.2.2.2 AP2.2 Verbesserte Stabilitätssimulation durch automatisierten Abgleich CFD-Messung

Es wurde ein einheitliches Standardvorgehen erarbeitet, mit welchem die ersten Basisdaten generiert wurden. Nach einer gründlichen Sichtung des ersten Rigs wurde, dessen standardisierte Aufbereitung mit dem Ziel verfolgt, AP1.1 rechtzeitig zu beliefern. Parallel wurde die Datensichtung weiterer Rigs angestoßen und damit auch die Aufbereitung der Triebwerksdatenbanken.
Zusätzlich wurde ein Konzept erarbeitet, wie Messdaten gefiltert, dem CFD- und SGV-Modell zugeordnet, sowie den einzelnen Prozess-Schritten entlang der automatisierten Prozesskette übergeben werden können.
Die Messdatensichtung und standardisierte Aufbereitung konzept-relevanter Rigs wurde abgeschlossen. Auch konnte mit dieser Datenbasis das Kern-Konzept einer automatisierten Bias-Bestimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten, sowie das Konzept einer anschließenden Verdichterbewertung, erarbeitet und erfolgreich abgenommen werden.

Weiterhin wurde das erarbeitete Grobkonzept, wie eine Bias-Testsuite spezifiziert und anschließend automatisiert abgespielt werden kann, weiter detailliert. Ein Prozess zur Spezifikation der Bias-Testsuite und Mitnahme aller notwendigen Daten und Informationen für die automatisierte Aufbereitung der Modelle wurde umgesetzt. Um die hohe Komplexität in der Spezifikation zu minimieren, wurde im Rahmen der Prozessumsetzung auch eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt. Ein Prozess zum automatisierten Abspielen (Modellierung+Simulation) der Bias-Testsuite wurde ebenso be-

trachtet. Eine generisch kodierte Schnittstelle an die Integrationsplattform für automatisierte Prozessketten wurde dafür etabliert. An einem Prozess zur Generierung der Bias-Datenbank aus Messdaten und Simulationsergebnissen, sowie zur Bias-Anwendung auf ein Simulationsergebnis (z.B. Neudesign) wurde ebenso gearbeitet.
Der Prozess zur Spezifikation der Bias-Testsuite und Mitgabe aller notwendigen Daten und Informationen für die automatisierte Aufbereitung der Modelle wurde finalisiert und erfolgreich abgenommen. Dazu zählt auch die grafische Benutzeroberfläche, welche im Rahmen der Prozessumsetzung eingeführt wurde, um die hohe Komplexität in der Spezifikation und die damit einhergehende Fehleranfälligkeit zu minimieren.

Die Prozessumsetzung zum automatisierten Abspielen (Modellierung+Simulation) der Bias-Testsuite wurde abgeschlossen. Auch wurde der Prozess zur Generierung der Bias-Datenbank aus Messdaten und Simulationsergebnissen, sowie zur Bias-Anwendung auf ein Simulationsergebnis (z.B. Neudesign) wurde fortgesetzt.

2.2.2.3 AP2.3 Verbesserte Berechnung der Radialspaltströmung

Der Fokus in diesem AP lag auf der Identifikation der Hauptstellgrößen, welche Spalte günstig zu beeinflussen (Ziel: bester erreichbarer Zielspalt).
Dazu wurde die Auswirkung der jeweiligen Stellgröße auf den besten erreichbaren Spalt quantifiziert und danach entschieden, ob diese Größe als Eingangsgröße für das zu erstellende Berechnungstool berücksichtigt werden muss.

Ein HPC-Testfall wurde (entsprechend den Anforderungen für die Bewertung des Radialspalts) ausgewählt. Anschließend wurde eine Bewertung eines ausgewählten Verdichters, bei welchem unter Verwendung von CFD-RANS-Berechnungen durchgeführt wurden, durchgeführt.
Desweiteren wurde mit der konstruktiven Analyse zum „besten erreichbaren Zielspalt“ und der Konzeptstudie zur Entwicklung eines BSSM-basierten Verfahrens begonnen.

Die Sensitivitätsstudien wurden auf Basis des Testfalls eines 8-stufigen axialen Verdichters durchgeführt, um eine Modellierungsrichtlinie abzuleiten, die die Vorhersage der Leistungsparameter im Vergleich zum Experiment verbessert. Der verwendete Modellierungsansatz zeigt im Durchschnitt aller betrachteten Bedingungen eine Verbesserung von 50 % hinsichtlich der Vorhersage der Parameter Effizienz, Massenstromrate und Überschussmarge im Vergleich zur getesteten Sensitivität der radialen Spaltfreiheit. Der Prozess wurde dokumentiert und erfolgreich verifiziert, um die Reaktion des zur Validierung verwendeten 8-stufigen axialen Verdichters zu bestätigen.

Zusammen mit dem Fraunhofer IZM in Berlin wurde außerdem ein Konzept für ein autarkes Messsystem zur ortsaufgelösten Vermessung des radialen Aufbauspalts erarbeitet. Das angewendete Messprinzip ist das der optischen Triangulation. Dafür besteht das System aus mindestens einem optischen Sensor und einem oder mehreren optischen Emittern zur Projektion der für die Triangulation notwendigen Mustern. Die technischen Rahmenbedingungen, die Anforderungen und auch erste Lösungsansätze wurden in einem Workshop in den Räumlichkeiten des Fraunhofer IZM diskutiert.

Nach Erarbeitung der benötigten Komponenten wurde ein Konzept erstellt. Dieses Konzept basiert auf der Integrationstechnologie des Module Stacking. Dabei werden die Funktionen des Gesamtsystems auf mehre Leiterplattenmodule aufgeteilt, welche bei der Systemmontage axial verbunden werden. Das modulare Konzept ermöglicht eine parallele Entwicklung und ggf. Überarbeitung der Systembestandteile, welche den Modulen entsprechen.

2.2.3 HAP3 Maßnahmen zur Verbesserung der Verdichterstabilität

2.2.3.1 AP3.1 Stabilitätsverbesserung durch neue Designkonzepte (passiv)

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden verschiedene geometrische Maßnahmen (= passive Maßnahmen) hinsichtlich ihres Potentials untersucht, die Verdichterstabilität und/oder den Wirkungsgrad von Axialverdichtern verbessern. Aus einer anfänglich großen Anzahl potentieller Maßnahmen haben sich am Ende 4 Maßnahmen als geeignet herauskristallisiert, die näher untersucht wurden. Die attraktivste Maßnahme sind gewellte Vorderkanten an den Schaufeln. Diese beeinflussen das Ablöseverhalten im Off-Design positiv. Die nächst-attraktive Maßnahme ist eine lokale Schaufelmodifikation im Bereich des Passagenstoßes (shock control bump). Die dritte Maßnahme, die auf das Laminarhalten der Saugseitenströmung abzielt, ist nur in den vordersten beiden Stufen bei Turbomaschinen einsatzbar und daher nur beschränkt anwendbar. Die Wirksamkeit der vierten Maßnahme, die durch lokale Gestaltungsmodifikationen des Schaufelfilletbereiches die Entwicklung des Nabenwirbels beeinflusst, hängt sehr von den aktuellen Gegebenheiten der betreffenden Schaufel ab und kann nur sehr beschränkt verallgemeinert werden.
Daher wurde der Schwerpunkt auf beide ersten Maßnahmen gelegt. Alle Abbildungen in diesem Abschlussbericht sind der ASME-Publikation [1] entnommen.

3 Technische Darstellung der Arbeitspakete

3.1 HAP1 Mechanismen zur Verdichterstabilität

3.1.1 AP1.1 Einflussfaktoren & Mechanismen zur Verdichterstabilität

Die Modellierungstätigkeiten im Arbeitspaket AP 1.1 umfassten die numerische Wiedergabe der Kennfeldmessungen für eine repräsentative Gruppe von Verdichtern. Sie beinhaltete Verdichter unterschiedlichster Größen- bzw. Leistungsklassen (Niederdruck-, Mitteldruck- und Hochdruckverdichter). Zur Sicherstellung einer einheitlichen Bewertungsgrundlage erfolgte die numerische Nachbildung aller Verdichter in identischer Art und Weise unter Verwendung des 3D RANS CFD Solvers TRACE (Netzfeinheit, Turbulenzmodellierung, geometrische Nachbildung). Durch die numerische Nachbildung des Strömung in den Verdichtern konnte eine vollständiger, in sich geschlossener Satz an thermodynamischen Strömungsgrößen für die jeweils betrachteten Verdichter gewonnen werden. Dies stellt notwendige Bedingung für die Definition von Belastungskenngrößen dar. Letztere sind in der Regel nicht alleinig via Messdaten zu ermitteln. Für den jeweiligen Verdichter erfolgte eine Einordnung der numerischen Berechnungsergebnisse gegenüber den Messdaten (Kennfeld-Vergleich).

Basierend auf einer initialen Literaturstudie wurde eine Auswahl von verschiedene Belastungs-Kriterien bzw. Bewertungsmethodiken für aerodynamische Verdichter-Stabilität bzgl. ihres Verhaltens innerhalb der betrachteten Verdichtertypen analysiert. Die Analyse beinhaltete dabei stets die Betrachtung der etwaigen Untersuchungsgröße innerhalb des gesamten Verdichterkennfeldes, d.h. deren Entwicklung in Richtung Pumpgrenze für verschiedene Durchsätze bzw. Betriebspunkte.

Diese Auswahl beinhaltete dabei:

- Entwicklung der mittleren bzw. lokalen DeHaller-Zahl pro Gitterreihe
- Entwicklung der mittleren bzw. lokalen Diffusionszahl nach Lieblein pro Gitterreihe

- Koch[1]-Kriterium bzw. max. Diffusionsvermögen einzelner Gitterreihen im Vergleich zu Diffuser-Geometrien
- Schweitzer[2]-Pumpgrenz-Kriterium für Axialverdichter
- Überroll-Kriterium bzgl. max., mittleren statischen bzw. totalem Druckaufbau einzelner Stufen bzw. Stufenverbänden.
- 1D Stabilitätsbetrachtung nach A. Stenning[3] – Analogiebetrachtung Verdichtungssystem als gedämpftes, schwingungsfähiges System

Im Folgenden werden die Ergebnisse ausgewählter Belastungskriterien dargestellt.

Das folgende Bild stellt die Entwicklung von mittlerer DeHaller-Zahl und mittlerer Diffusionszahl für verschiedene Gitterreihen eines Verdichters innerhalb eines Kennfeldes dar. Man erkennt eine Abnahme der De-Haller Zahl bzw. Zunahme der Diffusionszahl mit zunehmender Androsselung für die jeweiligen Gitterreihen.

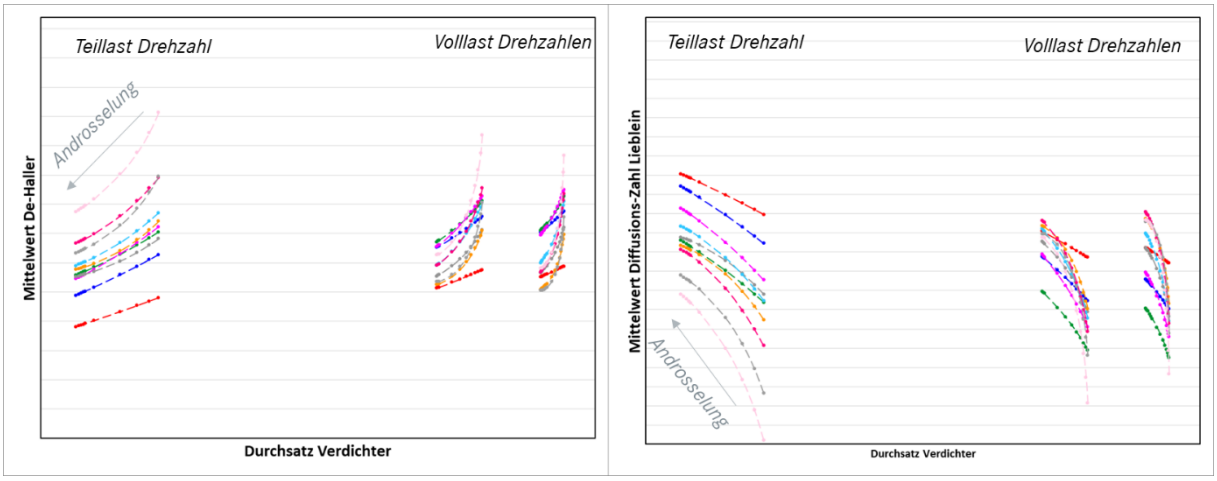


Abbildung 2: Diffusionszahl mit zunehmender Androsselung für die jeweiligen Gitterreihen

[1] ASME 81-GT-3 „Stalling Pressure Rise Capability of Axial Flow Compressor Stages“, C.C. Koch

[2] AIAA-83-1163, „Maximum Loading Capability of Axial Flow Compressors“, J.K. Schweitzer, J.E. Garberoglio

[3] „Rotating Stall and Surge“, Journal of Fluid Engineering Vol 102, 1980, A. Stenning

Leider zeigt sich, dass selbst innerhalb eines Verdichters kein gemeinsamer Grenzwert für die betrachteten Belastungsgrößen nahe des aerodynamischen Stabilitätslimits (Pumpgrenze) erkennbar ist. Diese Beobachtung lässt sich ebenso auf den Vergleich von verschiedenen Verdichtern untereinander übertragen.

Des Weiteren wurde u.a. das Koch-Kriterium und dessen Verhalten untersucht. Hierbei wird basierend auf einer Analogiebetrachtung zu Diffuserkennfeldern das max. Verzögerungsvermögen der Verdichtergitter beurteilt. Es erfolgt eine Korrektur für Reynolds-Zahl, Laufspaltniveau, Axialspaltniveau und Staffelungswinkel. Nachfolgendes Diagramm stellt das Ergebnis dieser Untersuchung für die betrachteten Verdichter und deren Einzelgitter dar:

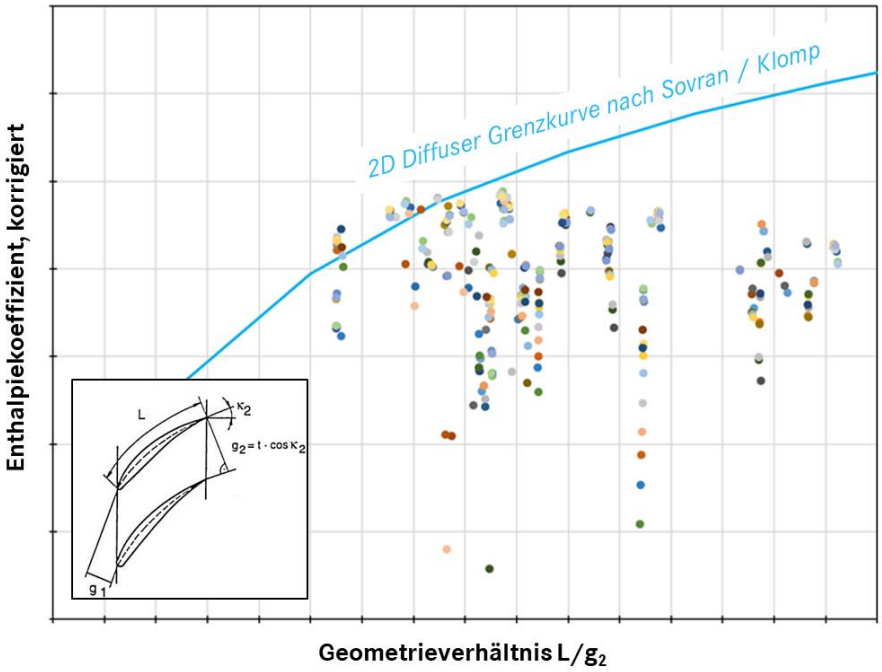


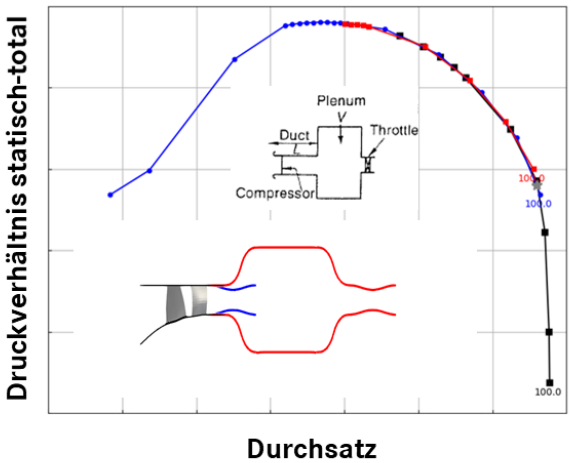
Abbildung 3: Untersuchung für die betrachteten Verdichter und deren Einzelgitter

Im Fall der Androsselung steigt das Niveau des sog. Enthalpiekoeffizienten. Man erkennt dass, die beobachteten Maximalwerte des Enthalpiekoeffizienten deutlich von der Grenzkurve nach Sovran & Klomp abweichen. Dieses Kriterium wurde daher nicht weiter als einheitliches Stabilitätskriterium verfolgt.

Ein wesentlicher Anteil der Arbeiten fokussierte sich auf die Analyse des Stabilitätsverhaltens nach A. Stenning. Hierbei wird der Verdichter und das umgebende System (inkl. Brennkammer und gesperrter Drossel) als schwingungsfähiges System bzgl. Stabilität betrachtet / analysiert. Dabei lässt sich das Verdichtungssystem in Analogie zu einem Feder-Masse-Dämpfer System beschreiben, wo bei das Volumen stromab des Verdichters bis zur Drossel bzw. die Systemlänge bis zur Drossel berücksichtigt werden müssen. Anhand eines einstufigen Technologieverdichters konnte unter Verwendung von zeitgenauen CFD Simulationen die Gültigkeit der Betrachtungsweise nach A. Stenning via Simulation aufgezeigt werden.

Im Fall einer Konfiguration ohne signifikantes Volumen stromab des Verdichters klingt die Störung ab. Der Massenstrom konvergiert auf einen stationären Betriebszustand. Sofern jedoch ein ausreichendes Volumen vorhanden ist, verliert das System an Dämpfung und die Störung schwingt sich auf, d.h. der Verdichter kann nicht mehr stationär betrieben werden, insbesondere nicht im übergerollten Bereich der Charakteristik.

Dieses Verhalten wurde anhand der beschreibenden Differentialgleichung (siehe Abbildung 4) analysiert.



$$\frac{LV}{Aa_4^2}g \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + \left(\frac{L}{A} - \frac{cgV}{a_4^2}\right) \cdot \frac{dz}{dt} + (g - c) \cdot z = 0$$

Abbildung 4: Das oben beschriebene Verhalten des Verdichters wurde anhand dieser beschreibenden Differentialgleichung analysiert

Das Systemverhalten lässt sich in stabil, dynamisch instabil bzw. statisch instabil klassifizieren. In Abhängigkeit von Volumen, Länge, Verdichtercharakteristik-Steigung und Drosselcharakteristik-Steigung des ist insbesondere die Grenze zwischen stabil und dynamisch instabil von Interesse. Sofern die Verdichtercharakteristik eine positive Steigung aufweist, d.h. im übergerollten Bereich arbeitet, kann ein dynamisch instabiler Zustand eintreten.

Diese Differentialgleichung wurde auf einstufige bzw. mehrstufige Verdichter angewandt und bzw. Stabilität analysiert. Hierbei wurden die Freiheitsgrade Volumen bzw. Länge variiert und die Veränderung des Massenstroms für den Übergang zu „dynamisch instabil“ ausgewertet, siehe nachfolgende Abbildung 5.

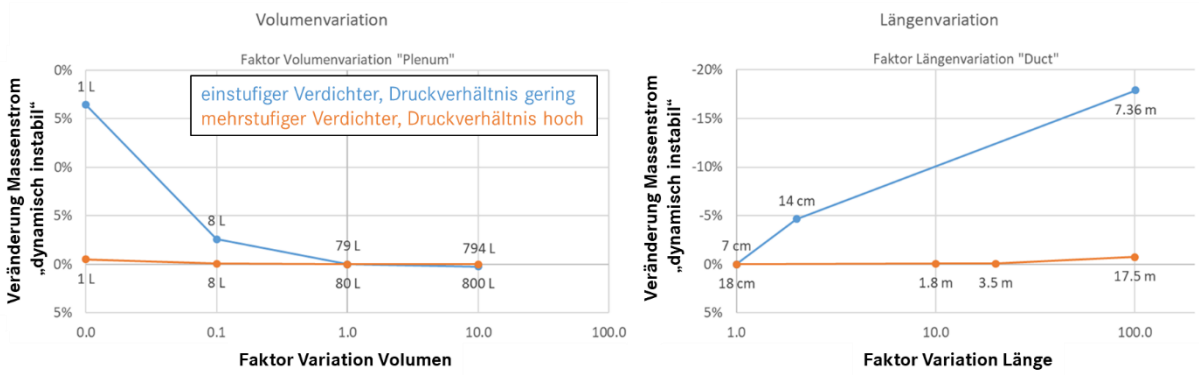


Abbildung 5: Veränderung des Massenstroms für den Übergang zu „dynamisch instabil“

Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Steigungen der Verdichtercharakteristik bzw. Drosselcharakteristik g wird für den mehrstufigen Fall eine signifikant geringere Sensitivität bzgl. Volumen. bzw. Längenvariation festgestellt.

Basierend auf diesen Analysen wurde daher ein Kriterium als Stabilitätslimit definiert, das mit verfügbaren Versuchsdaten gut übereinstimmt. Dabei erfolgt die Anwendung sowohl auf CFD als auch s2m Berechnungsergebnisse. Da die Methodik mit vorhandenen Softwaremitteln angewandt werden kann, resultiert kein zusätzlicher Implementierungsaufwand.

3.2 HAP2 Werkzeuge & Tools zur Verdichterstabilität

3.2.1 AP2.1 Verbesserte Berechnung von Nebenstromgeometrien

Unterarbeitspakte

AP 2.1.2: Den Schwerpunkt in der notwendigen Code Entwicklung für die Anbindung von Nebenstromgeometrieelementen bildet die Verbesserung des sogenannten Zonal Interfaces für die HB-Methode in TRACE. Die Arbeiten wurden erfolgreich zusammen von MTU und DLR durchgeführt, wobei MTU die technischen Spezifikationen, Konzepte und Tests definierte.

Insbesondere wurde seitens der MTU eine Netztopologie entwickelt, die Zonal Mixed Interfaces mit Systemwechsel vermeiden (siehe Abschnitt Validierung). Für jene Netztopologie wurde ein Prozess entwickelt, der basierend auf einer Standardvernetzung die Netztopologie modifiziert und dadurch die Anbindung von Casing Treatments (CTs) ermöglicht. Dieser Prozess steht skriptbasiert zur Verfügung und wird derzeit noch industrialisert. MTU plant das Verfahren zukünftig noch weiter zu automatisieren. Außerdem wurden auf diese Weise erstellte Testfälle mit dem Partner DLR geteilt sowie für intensive Validierung bei der MTU genutzt (siehe Abschnitt Validierung).

AP 2.1.3: Neben der Effizienz- und Stabilitätssteigerung des Zonal Interfaces, welches durch die Implementierung in AP2.1.2 erreicht wurde, ist für die praktische Anwendung des HB-Verfahrens hinsichtlich realistischer Turbomaschinenkonfigurationen wichtig, dass Moden gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Umfangsperiodizität korrekt am Zonal Interface erfasst werden können. Diese Fähigkeit wurde beim DLR im engen Austausch mit der MTU entwickelt. Weil die entwickelten Fähigkeiten aus AP2.1.2 und AP2.1.3 beide notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung sind, erfolgten Tests und Validierung bei der MTU an einem realistischen Testfall für beide APs zusammen (siehe Abschnitt Validierung).

AP 2.1.4: Um das HB-Verfahren industriell zu etablieren, sollten zuvor beobachtete Inkonsistenzen zum stationären TRACE-Löser identifiziert und bewertet oder korrigiert werden. Hier konnte vor allem die Formulierung der fortschrittlichen, nichtreflektierenden Randbedingungen in TRACE als Ursache ausgemacht werden. Inzwischen ist

eine zu HB konsistente Formulierung auch im klassischen Löser (RANS und Zeitbereich- RANS) verfügbar und wird seitens MTU noch industrialisiert, wodurch die notwendige Konsistenz sicher gestellt ist und (unter anderem durch diese Verbesserung) das HB-Verfahren industriell eingesetzt werden kann.

Validierung

Aeroelastik: Bei Projektabschluss ist das HB-Verfahren für eine Aeroelastik-Bewertung in Verbindung mit nicht-umfangssymmetrischen CT geeignet und nutzbar. Der Rechenaufwand im Vergleich zu konventionellen zeitdiskreten URANS-Simulationen ist erheblich reduziert. Dies wurde unter anderem mit Hilfe des im folgenden beschriebenen Testfalls demonstriert (Details siehe Hartmann et al., 2024). Der transsonische Verdichter der TU Darmstadt in Abbildung 6diente als offener Testfall. Bei der Designgeschwindigkeit „N100“ liegt ein transsonisches Strömungsfeld vor und der Betriebspunkt OP_B, der auf dieser Charakteristik liegt, wurde für weitere Untersuchungen verwendet.

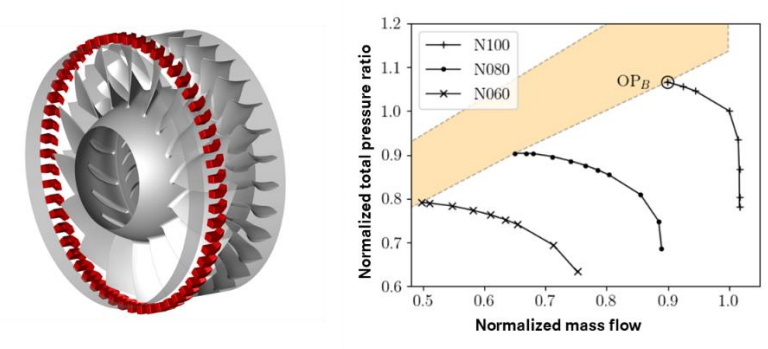


Abbildung 6: Transsonischer Verdichter der TU Darmstadt mit CT

Zur Validierung der neu entwickelten Fähigkeit des HB-Lösers, nicht-umfangssymmetrische CT zu berücksichtigen, wurden aufwändige Rechnungen im Zeitbereich als Referenz erzeugt sowie vereinfachte Simulationen ohne CT im Zeit- und Frequenzbereich durchgeführt. Alle Rechnungen im Zeitbereich erforderten die Berücksichtigung eines 360°-Modells, während alle HB-Rechnungen auf einem Einpassagenmodell durchgeführt werden können (siehe Abbildung 7).

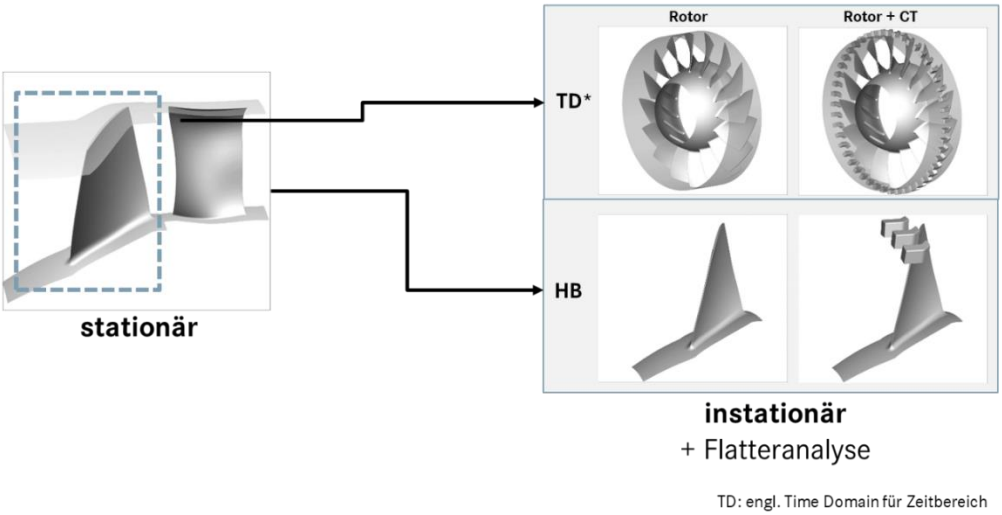


Abbildung 7: Setup für die Flatteranalyse

Die Integration des Casing Treatments erforderte eine spezielle Netztopologie (Abbildung 8). Daher wurde eine Übergangsschicht zur Änderung des Systems hinzugefügt (siehe Abbildung 9). Ziel dessen ist, dass ein sog. Zonal Mixed Interface, d.h. ein Interface, bei dem einzelne Zellflächen oder Teile davon nicht durch Fluidvolumen auf der Gegenseite abgedeckt sind und deshalb als feste Wand interpretiert werden, nur ohne Wechsel des Bezugssystems auftritt. Dadurch wechselt der Zustand einer Zellfläche nicht für verschiedene Zeitpunkte zwischen Wand und durchströmter Interface-Fläche. Das zu erwartende Signal ist dadurch für verschiedene Zeitpunkte hinreichend glatt und damit sinnvoll im HB-Kontext durch Fourier-Reihen niedriger Ordnung darstellbar.

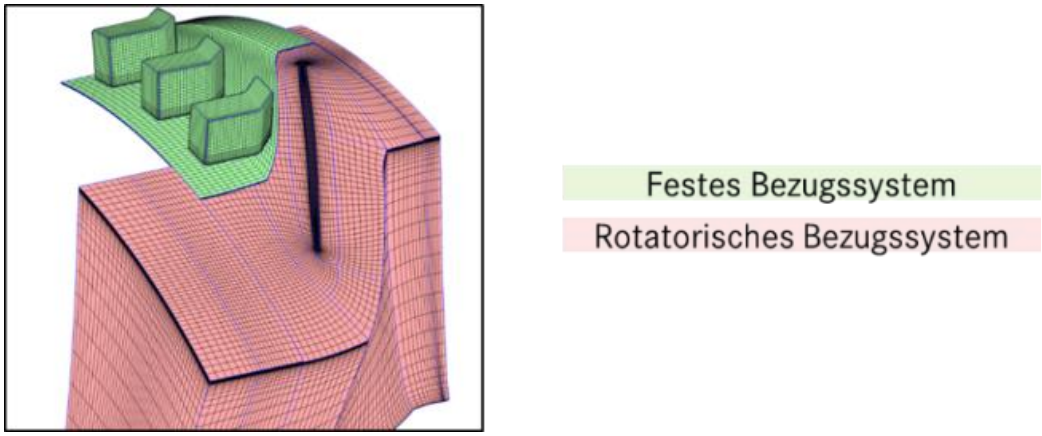


Abbildung 8: Netztopologie am Beispiel des Darmstadtverdichters

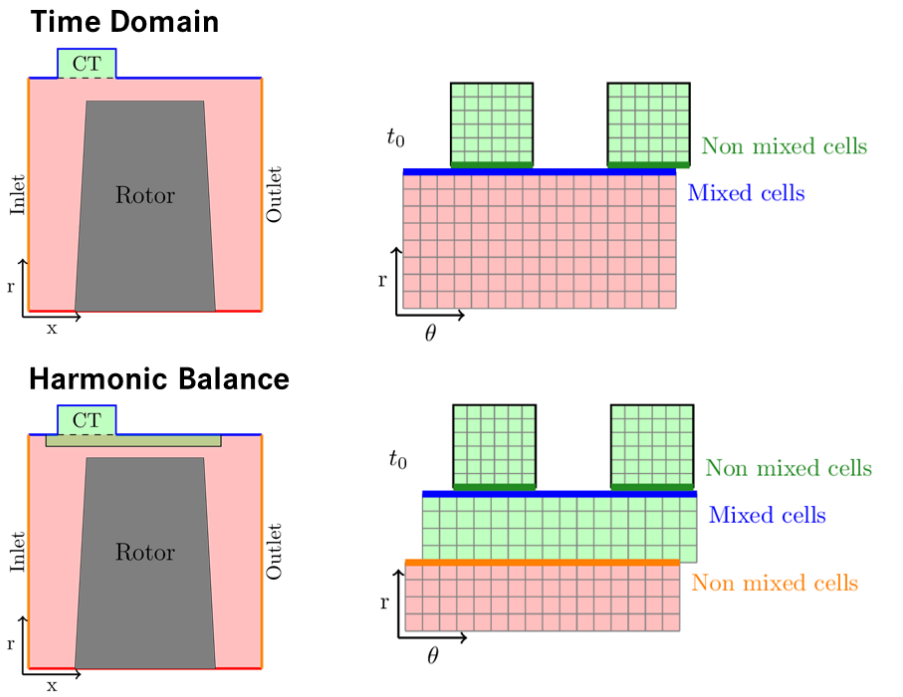


Abbildung 9: Netz-Topologie für die Integration von CTs

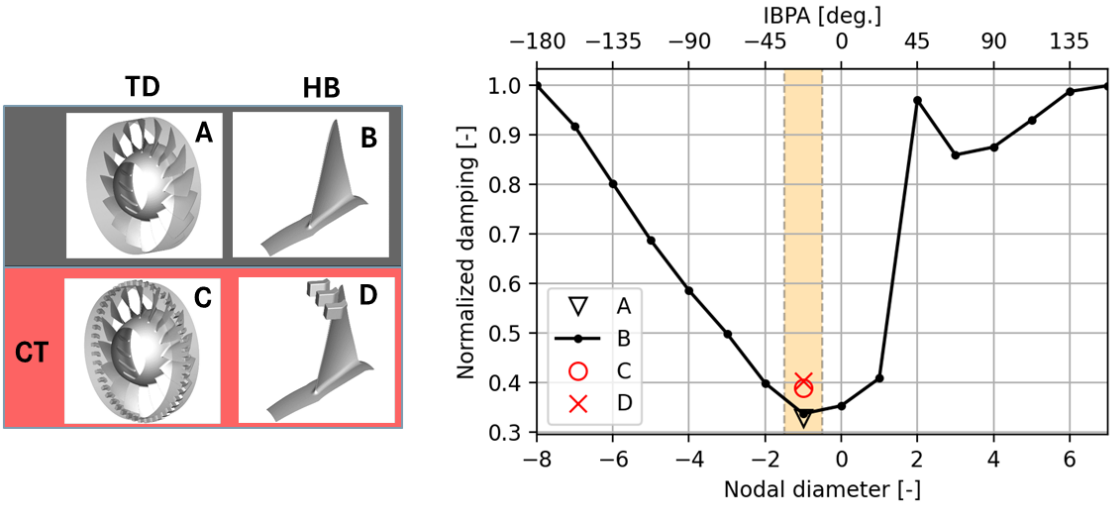


Abbildung 10: Einfluss von CT auf die aerodynamische Dämpfung

Der kritische Knotendurchmesser für die betrachtete Schaufeleigenmode liegt bei minus eins (siehe Abbildung 10). Für diesen zeigt ein detaillierter Vergleich der Modellierungsansätze, dass erstens das CT einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das zeitlich gemittelte Strömungsfeld und die aerodynamische Dämpfung hat. Sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich wird die eine signifikant erhöhte aerodynamische

Dämpfung um ca. 17 % vorhergesagt. Die Verteilung der lokalen aerodynamischen Dämpfung (Abbildung 11) offenbart, dass dies vor allem mit einem wesentlich anders vorhergesagten Stoßsystem im Blattspitzenbereich in Zusammenhang gebracht werden kann, was die Notwendigkeit der Berücksichtigung von CT unterstreicht. Zweitens zeigt die Studie, dass das HB-Verfahren Ergebnisse in sehr guter Übereinstimmung mit der Zeitbereichsreferenz liefert.

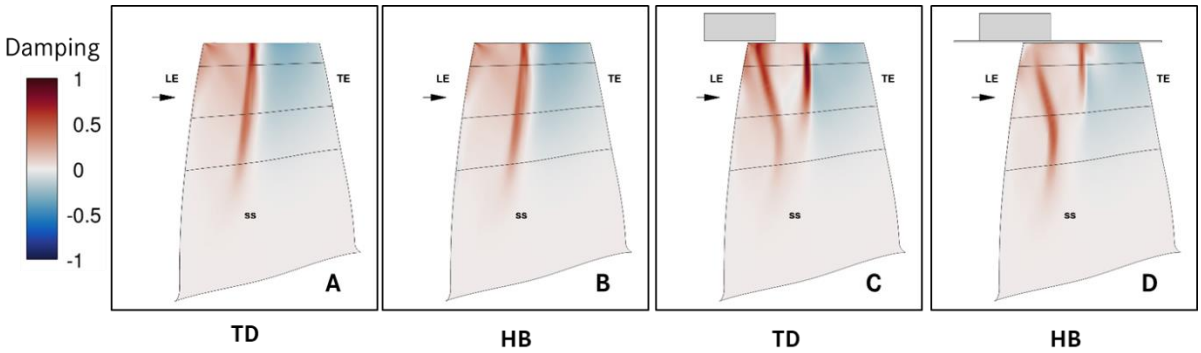


Abbildung 11: Verteilung der normierten, aerodynamischen Arbeit pro Fläche auf der Saugseite.

Das HB-Verfahren ermöglicht eine signifikante Reduktion des Rechenaufwands im Vergleich zu konventionellen URANS-Simulationen im Zeitbereich, hier mit einer Reduktion der Rechenkosten um den Faktor 35.

Aerodynamik: Auch für die Vorhersage des aerodynamischen Verhaltens von Verdichtern konnte das HB-Verfahren zu Projektende erfolgreich eingesetzt werden. In der folgenden Studie wurde ein 4,5-stufiger, transsonischer Verdichter mit CT im Rotor 1 bei Nenndrehzahl untersucht. Erneut dienten die Ergebnisse der URANS-Zeitintegration als Referenz. Zudem wurden die Ergebnisse des HB-Verfahrens mit denen von stationären RANS-Simulationen verglichen, die immer noch als Stand der Technik in der Auslegung zu sehen sind. Die Drosselkurven (siehe Abbildung 12) zeigen Totaldruckverhältnis und isentropen Wirkungsgrad im Verhältnis zum reduzierten Eintrittsmassenstrom. Alle untersuchten Modellierungsansätze beginnen mit demselben Gegendruck, der in der Abbildung als p00 bezeichnet wird. Die Werte sind in Bezug auf die URANS-Zeitintegrations-Referenzlösung nahe der Pumpgrenze normalisiert.

Die Abweichungen zwischen Zeitbereich-URANS (blau) sowie HB (orange) auf der einen Seite im Gegensatz zur stationären RANS-Lösung (schwarz) auf der anderen Seite verdeutlichen die Auswirkungen der Vernachlässigung instationärer Reheninteraktionen im etablierten RANS-Mischungsebenenansatz für die Vorhersage der Gesamtleistung des Verdichters. Wie im obigen Validierungsfall ist eine äußerst zufriedenstellende Übereinstimmung der HB-Ergebnisse mit den Zeitbereichsergebnissen festzustellen. Die in diesem Projekt entwickelten Methoden ermöglichen nichtumfangssymmetrische CT im HB-Verfahren numerisch robust zu berücksichtigen. Dabei wird mit dem HB-Verfahren nur zwischen 5-10% der Rechenleistung der Zeitbereichssimulation auf dem 360°-Modell benötigt.

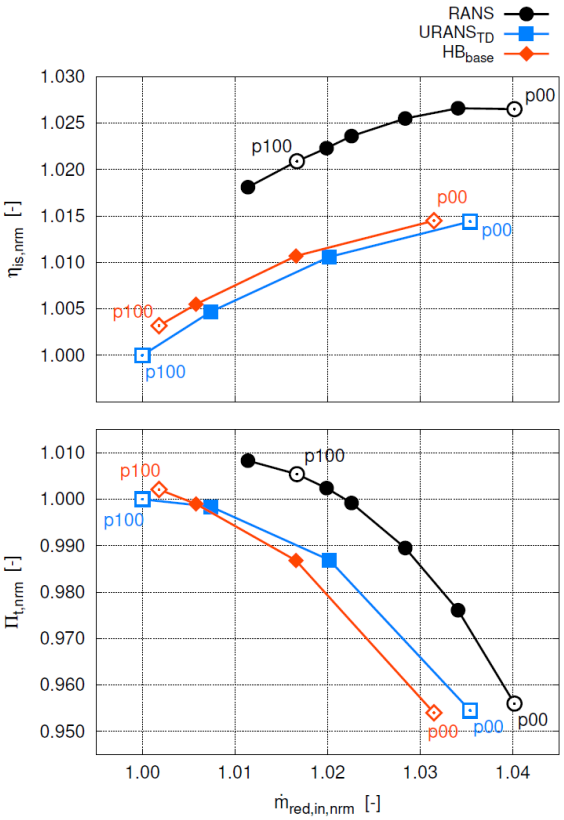


Abbildung 12: Normierte Drosselkurven eines 4,5-stufigen Verdichters mit CT im Rotor 1 bei 100% Drehzahl.

3.2.2 AP2.2 Verbesserte Stabilitätssimulation durch automatisierten Abgleich CFD-Messung

Die Messdatensichtung und standardisierte Aufbereitung weiterer Rigs wurde fortgesetzt, zur Sicherstellung einer Datenbasis, welche für die Erarbeitung des Konzeptes einer automatisierten Bias-Bestimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten benötigt wird. Weiterhin wurde untersucht, wie das Konzept Messdaten aus der Datenbank an die automatisierte Prozesskette weitergegeben werden können.
Auf Basis des erarbeiteten Konzeptes wurde die Schnittstelle zur Datenbank bereits großteils umgesetzt. Weiterhin wurde ein Konzept für die Kalibrierung von SGV an Messdaten entwickelt, um sich daraus erweiterte Strömungsgrößen abzuleiten, welche für die Bias-Bestimmung notwendig sind. Zusätzlich wurde das Kern-Konzept für die Bias-Bestimmung und Verdichterbewertung angegangen.
Es wurde ein Konzept zur Prozessumsetzung der Bias-Bestimmung und Verdichterbewertung aufgestellt und erfolgreich einer IT-Prüfung unterzogen. Einzelne Prozessbausteine davon wurden bereits realisiert, wie z.B. die Schnittstelle zur Messdatenbank, der Prozess für die Steuerung des Messdaten-Imports und die Visualisierung der Messdaten mit gängigen Aero-Tools.

Der Prozess zur Spezifikation der Bias-Testsuite und Mitgabe aller notwendigen Daten und Informationen für die automatisierte Aufbereitung der Modelle wurde finalisiert und erfolgreich abgenommen. Dazu zählt auch die grafische Benutzeroberfläche, welche im Rahmen der Prozessumsetzung eingeführt wurde, um die hohe Komplexität in der Spezifikation zu minimieren.

Die Prozessumsetzung zum automatisierten Abspielen (Modellierung und Simulation) der Bias-Testsuite wurde ebenso fortgeführt und zu großen Teilen umgesetzt. Folgende Randbedingungen können bereits automatisiert aus der Messdatenbank oder wahlweise als User-Input auf das 2D-Modell (SGV = Stromliniengeometrieverfahren) und auf das 3D Modell (TRACE = numerischer Strömungslöser) übertragen werden:

- geometrische Änderungen:
    - Winkel von Verstellstatoren (SGV, TRACE)
    - Spalte im Hauptstrompfad (SGV) → (TRACE)
    - Spalte in der Kavität (TRACE)
- Randbedingungen
    - Eintrittsbedingung (SGV) → (TRACE)
    - Drehzahl (SGV, TRACE)
    - Leckageströme (SGV, TRACE)
    - Wandtemperaturen (TRACE)
    - Austrittsbedingung (SGV, TRACE)

Neben der automatisierten Vernetzung, inkl. einer iterativen Anpassung der Zellhöhe im Wandbereich an das Strömungsergebnis, sowie der anschließende Simulation von Verdichterkennfeldern wurde auch ein Tool zur iterativen Anpassung der Wandtemperaturen innerhalb von Kavitäten umgesetzt.

Eine Fortführung der Prozessentwicklung zur Generierung der Bias-Datenbank aus Messdaten und Simulationsergebnissen, sowie zur Bias-Anwendung auf ein Simulationsergebnis (z.B. Neudesign) ist geplant.

3.2.3 AP2.3 Verbesserte Berechnung der Radialspaltströmung

AP2.3 befasste sich mit der Entwicklung von Modellen für radiale Spaltmaße, um die Sensitivität von CFD RANS-Simulationen im Vergleich zum Experiment zu verbessern. Es müssen mehrere Ziele erreicht werden, um das Phänomen zu verstehen und geeignete Parameter für weitere Verbesserungen bereitzustellen.

Die Bewertung und Vorbereitung eines mehrstufigen Testfalls diente dazu, verfügbare Testfälle zu überprüfen und denjenigen auszuwählen, welcher die Möglichkeit bietet, das angesprochene Problem zu bewerten. Als Ergebnis wurde der 8-stufige Hochdruckverdichter (HPC) als repräsentativer Testfall ausgewählt. Eine der Anforderungen war sicherzustellen, dass die ausgewählte Maschine auf Variationen der radialen Spaltmaße getestet wurde und die Daten verfügbar sind. Der gewählte HPC erfüllte diese Anforderung.

Nachdem der mehrstufige Testfall ausgewählt wurde, bestand der nächste Schritt darin, folgendes Ziel zu erfüllen: Der mehrstufige Testfall wird ausgewählt und vorbereitet, wobei die Vorbereitung der CFD-Darstellung des Verdichters und die Durchführung der ersten Berechnungen im Vordergrund stehen, um den Ausgangszustand der Sensitivität zu definieren.

Die numerische Darstellung wurde vorbereitet und unter Verwendung der Randbedingungen aus dem Experiment für drei Drehzahlen mit Variationen der radialen Spaltmaße berechnet. Die erste Bewertung wurde in Bezug auf drei Parameter durchgeführt: Effizienz, Massenstrom und Überschussmarge.

Die festgestellte Sensitivität zeigt Spielraum für Verbesserungen, und die nächsten Schritte haben sich mit den folgenden Themen befasst. Somit bestand der nächste Schritt im Projekt darin, einen Ansatz zu entwickeln, eine Studie durchzuführen, sodass die Entwicklung von Hilfsprozessen für Parameterstudien stattfanden. Für diesen speziellen Fall wurde die Erstellung eines automatisierten Hilfsprozesses weggelassen. Die Komponenten des CFD-Modells wurden standardisiert, um die Einführung verschiedener Parameter zu vereinfachen. Mit diesem Ansatz konnte der Aufwand zur Vorbereitung eines CFD-Modells reduziert werden, sodass mehr Fokus auf die Definition der Parameter gelegt werden konnte. Nachdem dies vorbereitet war, wurden weitere Hilfsprozesse für Parameterstudien eingerichtet.

Der gewählte 8-stufige Verdichter wurde unter Verwendung einer Vielzahl von Parametern in Bezug auf das CFD-Setup, geometrische Einstellungen und Netzparameter berechnet. Die Ergebnisse wurden mit dem Referenzmodell verglichen, um herausragende Setups zu entdecken, die eine Verbesserung bei der Bewertung quantitativer Maße wie Effizienz, Massenstromrate und Stabilitätsgrenze sowie qualitativer Maße

wie 0D- und 1D-Eigenschaften im Vergleich zum Test zeigen. Um Parameter zu identifizieren, die die Vorhersage verbessern, wurde das folgende Verfahren verwendet (siehe Abbildung 13). Das Ergebnis der Parameterstudien für die Modellierungsprozesse war die Definition von Parametern, die als Eingabe für eine neue Modellierungsrichtlinie dienen.

Abbildung 13: Decision procedure flowchart

Basierend auf den Parameterstudien wurden die Modelleinstellungen für den spezifizierten 8-stufigen HPC-Verdichter verbessert.
Ein Beispiel der Ergebnisse mit den verbesserten Einstellungen ist in Abbildung 14 dargestellt.

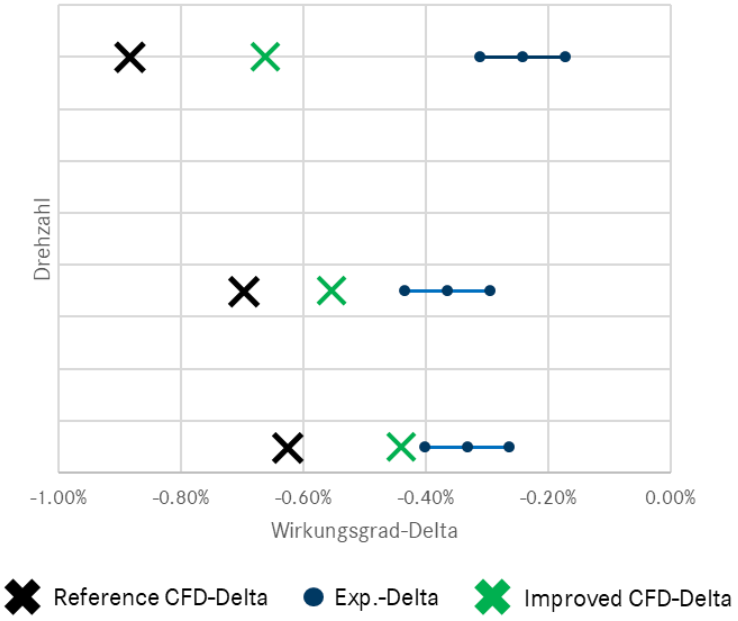


Abbildung 14: Example of an improved parameter

Die durchschnittliche Verbesserung zeigt eine Verringerung der Diskrepanz zwischen dem Experiment und dem abgeleiteten CFD-Modellierungsansatz um 50 %.
Für die Entwicklung von Benutzerleitfäden wurden die Ergebnisse der durchgeführten

Evaluierung analysiert und dokumentiert. Der Prozess der Ableitung der Richtlinien wurde intern durch einen Verifizierungsprozess genehmigt.

Die Rahmenbedingungen des Messsystems wurden wie folgt identifiziert und festgelegt:

- optisches Messsystem:
  - Emitter: Laser / VCSEL
  - Detektor: hochminiaturisierte CMOS-Chipkamera
- Dimensionen:
  - Form: Kapselform (axial längliche Form mit rundem oder abgerundetem Querschnitt)
  - maximaler Durchmesser: D = 8,0 mm.
  - Länge: nicht festgelegt.
- kabelloses System
- integrierte elektrische Energieversorgung (Batterien, Akkumulatoren)
- Integrierter Datenspeicher für Messdaten
- Datenverbindung(en):
  - Funktionen mindestens:
    - Auslesen der Messdaten (nicht in-situ, evtl. im applizierten Zustand-> nach Messung und Bergung)
    - Programmieren und Reprogrammieren des Systems (nicht in-situ, nicht im applizierten Zustand)
- Sensorik: Inertialsensor mit nichtmagnetischem Gyroskop
- Energiespeicher & Spannungsversorgung
  - muss geometrische Anforderungen an Gesamtsystem entsprechen bzw. sich in diese integrieren lassen
  - verschiedene Betriebsspannungen generieren gemäß verwendeter elektronischer Systembestandteile / Bauteile

Für die Realisierung ist die Integrationstechnologie des Module Stacking vorgesehen. Dabei werden die Funktionen des Gesamtsystems auf mehre Leiterplattenmodule auf-

geteilt, welche bei der Systemmontage axial verbunden werden. Das modulare Konzept ermöglicht eine parallele Entwicklung und ggf. Überarbeitung der Systembestandteile, welche den Modulen entsprechen. Die Aufteilung der Systembestandteile auf die verschiedenen Module ist in folgender Abbildung 15 schematisch dargestellt.

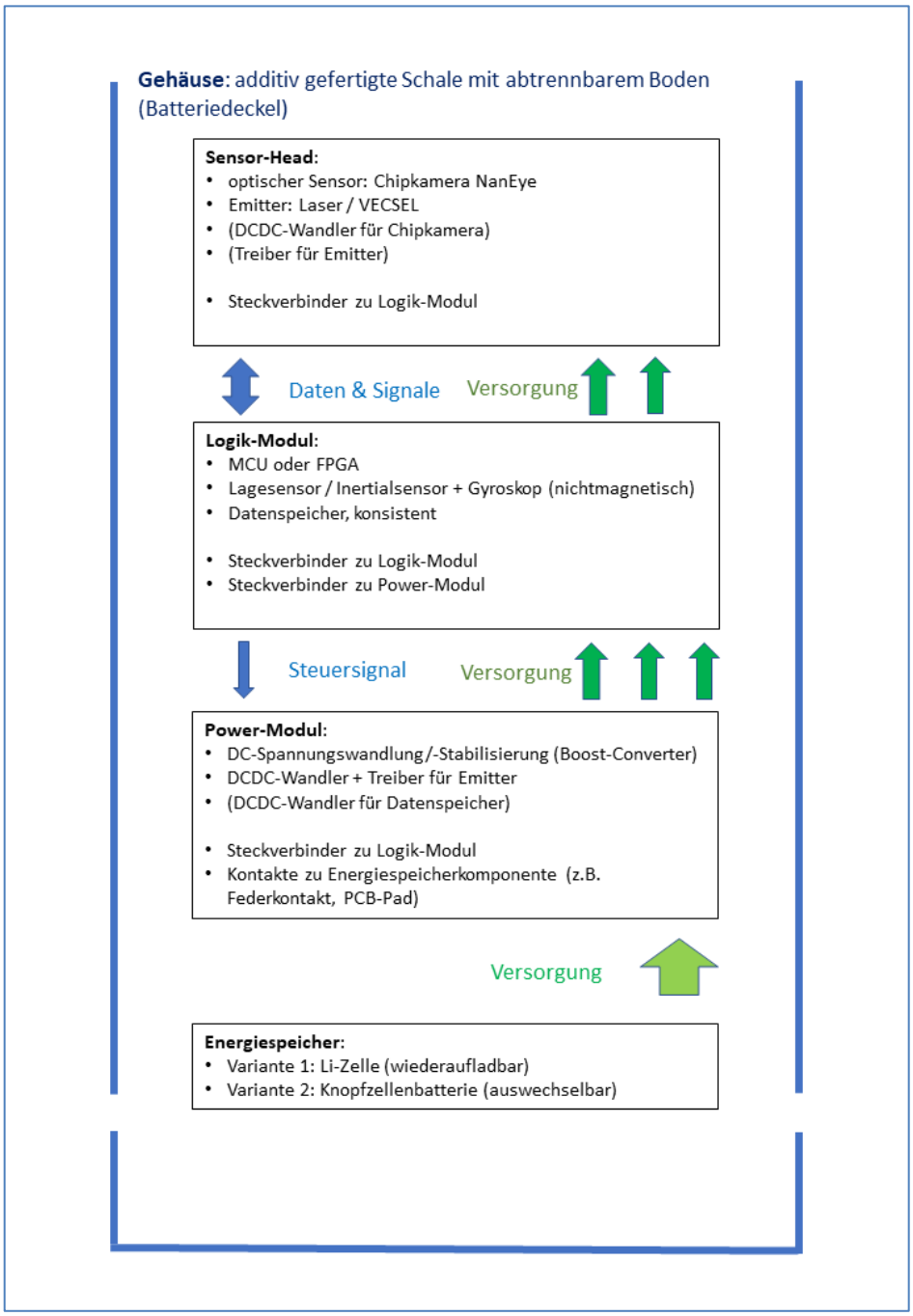


Abbildung 15: Modulares Konzept für parallele Entwicklung

3.3 HAP3 Maßnahmen zur Verbesserung der Verdichterstabilität

3.3.1 AP3.1 Stabilitätsverbesserung durch neue Designkonzepte (passiv)

Gewellte Vorderkanten (Wavy Leading Edges)

Die Schaufeln in axialen Turbomaschinen besitzen üblicherweise eine gerade Vorderkante, wobei leichte und kontinuierliche räumliche Krümmungen (sweep, bow, dehedral) möglich sind. Der gewellten Vorderkante wird eine sinusförmige Modulation überlagert. Dadurch ergibt sich eine radial sinusförmige Variation der Vorderkantenposition. Der sinusförmige Verlauf beeinflusst das Ablöseverhalten der Schaufel im Off-Design, indem durch die Welligkeit lokale Sekundärwirbel entlang der Schaufelsehne erzeugt werden, die die Grenzschicht und deren Ablöseverhalten beeinflusst.

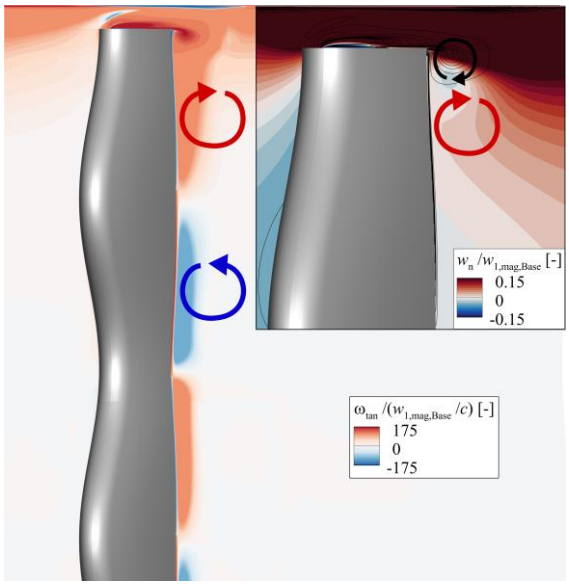


Abbildung 16 Beispiel eines gewellten Schaufelvorderkantenbereiches mit den sich ausbildenden Sekundärwirbeln (GT2025-154003)

Bei den numerischen Untersuchungen in diesem Arbeitspaket wurde festgestellt, dass die Wahl der geeigneten Wellenlänge, Amplitude und Phase an der Schaufelspitze einen entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit der Maßnahme hat. Insbesondere die Phase beeinflusst das Verhalten des Schaufelspitzenwirbels signifikant.

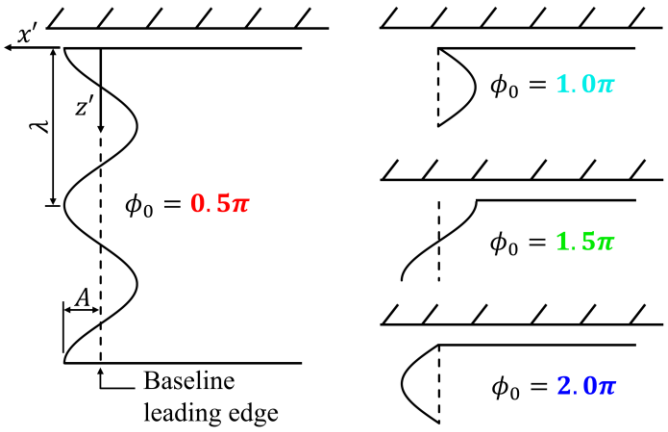


Abbildung 17 Seitenansicht der gewellten Vorderkanten mit verschiedenen Phasen an der Schaufelspitze (ASME GT2025-154003)

Des Weiteren wurde festgestellt, dass eine Amplituden- und Wellenlängenvariation entlang der radialen Schaufelerstreckung vorteilhaft sein kann. Bei einer falschen Wahl dieser Parameter ist jedoch auch eine deutliche Verschlechterung der Schaufelperformance (Verluste, Ablöseverhalten) möglich.

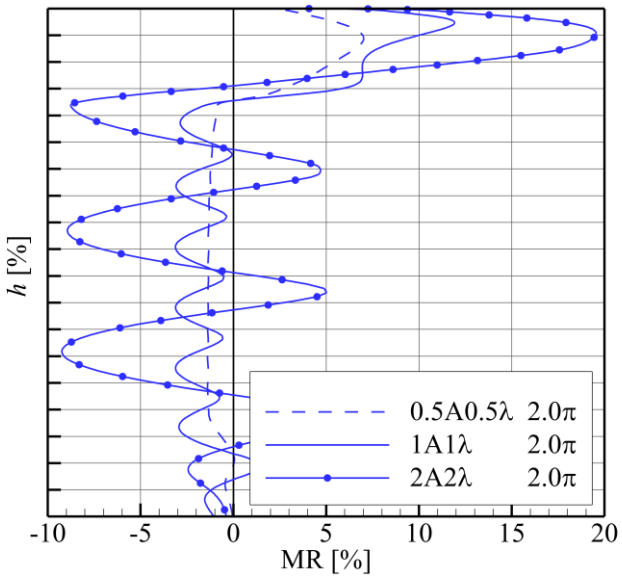


Abbildung 18 Amplituden- und Wellenlängenvariation entlang der Vorderkante (GT2025-154003)

Die Untersuchungen wurden an repräsentativen Schaufeln eines modernen Hochdruckverdichters durchgeführt. Hierzu wurde das zugrundeliegende Schaufelprofil mittels CAD und Geometriegenerierungsskripten entsprechend modifiziert. Dieser Schritt war besonders aufwändig, da nicht-standardisierte Geometrien verarbeitet werden

mussten. Die numerischen Simulationen wurden anschließend auf Basis der etablierten Auslegungsprozesse durchgeführt. Damit konnte sichergestellt werden, dass beim Vergleich der Referenzschaufel mit der modifizierten Schaufel keine numerischen Artefakte bewertet werden.
Die Untersuchung zeigte, dass eine gewellte Vorderkante im Bereich des aerodynamischen Auslegungspunktes die Profilverluste nur minimal erhöhen. Der Pumpgrenzgewinn im angedrosselten Zustand ist jedoch deutlich erhöht (im Bereich mehrere Prozentpunkte gegenüber der Referenz).

Shock Control Bump

Die Technologie der Shock Control Bumps wurde detailliert numerisch untersucht. Hierzu wird ein kleiner flacher Hügel auf der Saugseite einer transonischen Schaufel im Bereich des Stoßpunktes des Passagenstoßes auf der Schaufel platziert. Durch diesen Hügel ist es bei geeigneter Auslegung möglich, die Verluste, die durch den senkrechten Stoß in der Nähe des Profils entstehen, zu reduzieren. Dabei wird der senkrechte Stoß in einen Lambda-Stoß aufgefächert, der geringere Verluste zur Folge hat. Darüber hinaus wird die lokale Grenzschichtbelastung, die durch den großen Druckanstieg des Stoßes entsteht, verringert. Hierdurch ist es möglich, die Grenzschicht stabiler zu halten und das sofortiges Ablösen zu verzögern oder ganz zu unterdrücken.
Dieser Effekt kommt besonders zum Tragen, wenn der Rotor stabilitätslimitierend ist und in Richtung Pumpgrenze angedrosselt wird. In diesem Fall erhöhen sich der Anströmwinkel und die Passagenstoßstärke während des Androsselns. Rechnungen haben gezeigt, dass in solchen Situationen der Hügel (shock control bump) die Steigerung der Grenzschichtbelastung beim Androsseln verzögern kann. So konnte erreicht werden, dass der zur Verfügung stehende Anströmwinkel-Bereich bei gleichem Verlustniveau um ca. 1 Grad gesteigert werden konnte.

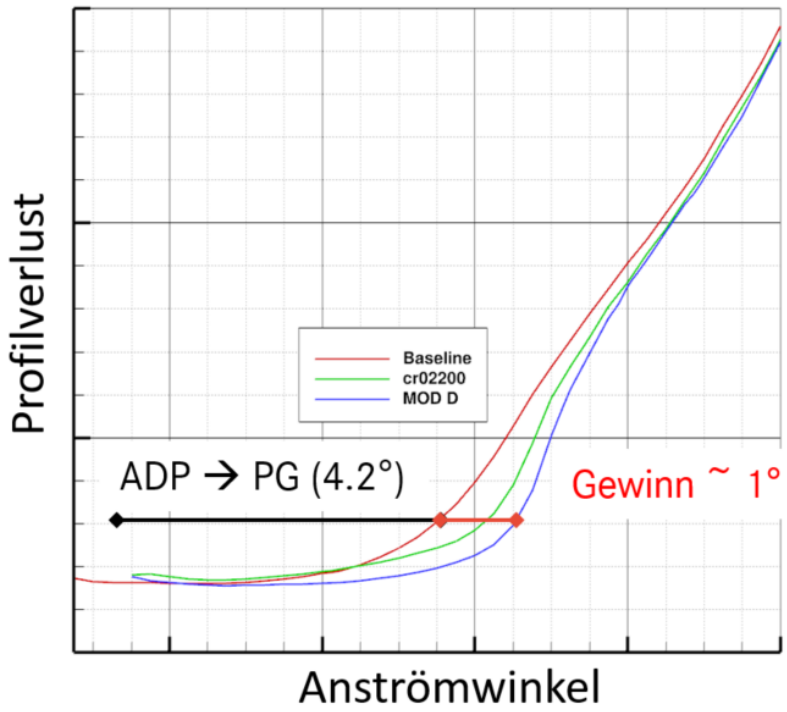


Abbildung 19 Anströmwinkel-Verlust-Kurve von zwei verschiedenen Shock Control Bumps beim Androsseln im Vergleich zur Referenzschaufel (= Baseline)

Damit konnte hinsichtlich Umlenkung bzw. Minderumlenkung in pumpgrenznahen Arbeitspunkten ca. 1 Grad gewonnen werden. Dieser zusätzliche Gewinn kann bei entsprechender Stufenabstimmung in zusätzliche Pumpgrenze umgesetzt werden. Bemerkenswert hierbei ist, dass der minimale Verlust der Schaufel sich nicht bzw. kaum verschlechtert hat.

4 Literaturverzeichnis

[1] Okfen, P., Volgmann, H., Henninger, S., Jeschke, P., Hiller, S.-J., "*Effect of a Sinusoidal Leading Edge Undulation on the Rotor Tip Gap Flow in a Highly Loaded Axial Compressor*", ASME Turbo Expo 2025 Memphis, GT2025-154003