



Abschlussbericht

Forschungsvorhaben 03ET7040R
Verbundvorhaben COOREFLEX-turbo
Teilvorhaben 1.2.4d

Entwicklung und Anwendung von modernen
optimierungsfähigen Auslegungsverfahren unter
Berücksichtigung des Realgaseinflusses

Zeitraum: 1.1.2015 – 31.12.2017

Georgios Goinis
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Antriebstechnik

Juni 2018

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

1 EINLEITUNG.....	4
1.1 GESAMTZIELE DES VORHABENS	4
1.2 BEZUG ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN	5
1.3 AUFGABENSTELLUNG UND WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ARBEITSZIELE DES VORHABENS	6
1.4 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....	6
1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT DEN TEILPROJEKTEN A,B,C.....	7
1.5.1 <i>Austausch mit Teilprojekten a,b.....</i>	7
1.5.2 <i>Austausch mit Teilprojekt c.....</i>	7
2 STAND DER TECHNIK.....	9
2.1 VORGEHENSWEISE BEI DER AERODYNAMISCHEN VERDICHTERAUSLEGUNG	9
2.2 3D-GEOMETRIEOPTIMIERUNG	10
2.3 RANDZONEVERLUSTE.....	10
2.4 STUFENINTERAKTIONSEFFEKTE	11
2.5 REALGASEFFEKTE	12
3 METHODEN.....	13
3.1 DER OPTIMIERER	13
3.2 PARAMETRISIERUNG	14
3.3 PARAMETERREDUKTION	15
3.3.1 <i>Parameterkopplung über Bernstein-Polynome.....</i>	15
3.3.2 <i>Master-Slave-Ansatz zur Parameterkopplung.....</i>	15
3.3.3 <i>Parameterauswahl</i>	16
3.4 GEOMETRIECHECK.....	16
4 TESTVERDICHTER UND NUMERISCHER SETUP.....	18
4.1 TESTVERDICHTER	18
4.2 NUMERISCHER SETUP.....	18
4.2.1 <i>Vernetzung.....</i>	18
4.2.2 <i>CFD-Setup.....</i>	19
5 NUMERISCHE STUDIEN	20
5.1 AUFBAU DER OPTIMIERUNGEN	20
5.1.1 <i>Ziele und Zielfunktionen</i>	20
5.1.2 <i>Nebenbedingungen</i>	21
5.1.3 <i>Notwendige Simulationen zur Ermittlung der Zielfunktionswerte.....</i>	21
5.1.4 <i>Prozesskette</i>	21
5.1.5 <i>Parametrisierung Beschaufelung</i>	22
5.1.6 <i>Parametrisierung Naben- und Gehäusekontur.....</i>	23
5.2 EINZELSTUFOPTIMIERUNGEN.....	23
5.2.1 <i>Ziel.....</i>	23
5.2.2 <i>Aufbau</i>	24
5.2.3 <i>Gehäusekonturoptimierung</i>	25
5.2.4 <i>Schaufeloptimierung</i>	30
5.2.5 <i>Kombinierte Seitenwandprofil- und Schaufeloptimierung.....</i>	31
5.2.6 <i>Parameterstudie zur Gehäusekonturierung.....</i>	33
5.2.7 <i>Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse</i>	36
5.2.8 <i>Schlussfolgerungen</i>	38
5.3 MEHRSTUFOPTIMIERUNGEN	39
5.3.1 <i>Aufbau</i>	39
5.3.2 <i>Optimierung von Beschaufelung und Konturierung mit Parameterkopplung</i>	42
5.3.3 <i>Optimierung der Beschaufelung ohne Parameterkopplung.....</i>	49
5.3.4 <i>Optimierung der Beschaufelung mit Parameterkopplung</i>	51
5.3.5 <i>Gegenüberstellung der Vielstufenoptimierungen</i>	52
6 REALGASRECHNUNG.....	53
7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND DESIGNREGELN.....	55
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	56
9 LITERATURVERZEICHNIS.....	58

10	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	59
11	TABELLENVERZEICHNIS.....	60

1 Einleitung

Zur aerodynamischen Auslegung von Gasturbinenverdichtern werden heutzutage umfangreiche CFD-basierte Optimierungen durchgeführt. Die CFD-Tools werden dafür mit Optimierungsalgorithmen und weiteren Auslegungstools gekoppelt, um einzelne Schaufelreihen bis hin zu mehreren Stufen der Turbomaschine zu verbessern. Um weitere Fortschritte im Vergleich zum Stand der Technik zu realisieren wird es notwendig größere Bereiche des Verdichters simultan zu betrachten. Nur so können Interaktions- und Wechselwirkungseffekte berücksichtigt werden. Dies führt zu aufwändigeren CFD-Simulationen und, trotz kontinuierlich steigenden Rechenkapazitäten, zu der Notwendigkeit von effizienteren Optimierungsverfahren.

Bei vielstufigen Axialverdichtern kann ein Großteil der Strömungsverluste auf die wandnahen Bereiche zurückgeführt werden, in denen dreidimensionale Sekundärströmungseffekte besonders ausgeprägt sind, insbesondere im Bereich von Spalten zwischen rotierenden und feststehenden Teilen der Maschine.

In diesem Vorhaben werden Optimierungsverfahren entwickelt, die es ermöglichen Vielstufenoptimierungen durchzuführen und anhand von Randzoneneoptimierungen der hinteren Stufen eines stationären Gasturbinenverdichters erprobt.

Dazu kommen Multi-Fidelity-Optimierungsstrategien mit CoKriging-Modellen zum Einsatz sowie verschiedenen Möglichkeiten der Parameterreduktion über gezielte Parameterkopplungen durch Polynome. Neben den Rotor- und Statorgeometrien wird auch eine Modifikation der Nabengeometrie zugelassen.

Aerodynamisches Ziel ist eine Wirkungsgradsteigerung ohne Reduktion der Kennfeldbreite bei Einhaltung weiterer Randbedingungen. Aus den Ergebnissen können zudem nützliche Auslegungsrichtlinien abgeleitet werden, so dass bei zukünftigen Auslegungen direkt von diesen Ergebnissen profitiert werden kann.

1.1 Gesamtziele des Vorhabens

Dieses Vorhaben ist Teil des Verbundprojektes AG Turbo COOREFLEX-turbo und liefert Beiträge zur Sicherstellung der erforderlichen aerodynamischen und mechanischen Eigenschaften bei einem hoch flexiblen Kraftwerksbetrieb. Konkret werden folgende Punkte adressiert:

- Mittels numerischer Simulationen und automatisierter Optimierungsmethoden werden alle strömungsführenden Wände (Schaufeln sowie Nabe und Gehäuse) so gestaltet, dass die Anforderungen hinsichtlich Effizienz und Arbeitsbereich bestmöglich erfüllt werden.
- Besonderes Augenmerk wird den Randzonen der hinteren Schaufelreihen gewidmet, da dort die Sekundärströmung große Strömungsbereiche, insbesondere außerhalb des nominellen Arbeitspunktes, dominiert.

Hauptziel dieses Vorhabens ist es, eine hoch belastete, für hohen Wirkungsgrad und hohe Stabilität optimierte Konfiguration eines Gasturbinenverdichters zu untersuchen und für dessen hintere Stufen Designerkenntnisse, -Regeln und -Richtlinien zu erarbeitet. Bei den Druckverhältnissen derzeitiger und zukünftiger

Gasturbinenverdichter müssen bereits die realen Stoffwerte berücksichtigt werden. Diesem Punkt wird durch eine enge Verknüpfung zu den weiteren 1.2.4-Teilprojekten (a, b und c [1]) Rechnung getragen. Neue Verfahrensweisen bei der Realgasmodellierung im CFD-Verfahren werden hier pilothaft eingesetzt und getestet. Neben den zu berücksichtigten Realgaseffekten zeichnen sich die Schaufelreihen der hinteren Stufen – bedingt durch die abnehmende Schaufelhöhe – durch relativ dicke Randzonengebiete aus. In der Vergangenheit wurden diese in einer Vielzahl von Forschungsarbeiten bereits untersucht. Das Wissen über die auftretenden Effekte ist daher bereits relativ hoch. Weiterhin ist bekannt, dass Verbesserungen der Strömung in den Randzonen einer Schaufelreihe die Strömung in den Randzonen der stromauf- und ab liegenden Schaufelreihen mitbeeinflussen. Hier fehlen aber allgemeingültige Erkenntnisse, dies in der Auslegung zu berücksichtigen. Genau an diesem Punkt will das hier beschriebene Projekt deutliche Fortschritte erzielen. Neben Erkenntnissen zu den Wechselwirkungen zwischen den Schaufelreihen, bei der Beeinflussung von Randzoneströmungen mit den benachbarten Schaufelreihen und Stufen werden geeignete Parametrisierungskonzepte zur Beschreibung der Schaufelrandzonen und des Strömungskanals entwickelt, die eine robuste und effiziente Verdichterauslegung unter Berücksichtigung der bereits genannten Designregeln ermöglichen. Mit den Arbeiten soll die Zuverlässigkeit der Auslegung der hinteren Stufen und besonderes deren Randzonen deutlich verbessert werden. Durch eine genaue Abstimmung der Arbeiten zwischen den Teilprojekten 1.2.4d (DLR) und 1.2.4c (Siemens) [1], besonders bei dem CFD-Verfahren sowie der Optimierungssoftware und -strategie, als auch den verwendeten Werkzeugen, stehen die Erkenntnisse direkt für eine praktische Umsetzung in der Industrie zur Verfügung.

1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Ziel des Forschungsprogramm COOREFLEX-turbo ist die drastische Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von Kraftwerken bis hin zum CO₂-freien Kraftwerk. Im Arbeitsschwerpunkt „Verdichtung“ werden die Auslegungsverfahren entwickelt, welche für die Komponenten eines CO₂-freien Kraftwerkes erforderlich sind.

Um strömungsphysikalisch optimierte Verdichterstufen entwickeln zu können, müssen die Auslegungswerkzeuge die realitätsnahe Strömung und Struktur modellieren können. Mit diesem Projekt soll eine weitere Leistungssteigerung bei der Entwicklung von Turbomaschinen mit der Verbesserung des Schaufelentwurfes und des strömungsführenden Kanals in der industriellen Praxis erreicht werden. Der Ingenieur soll bei zeitintensiven Simulationen unterstützt werden und Designregeln und -Richtlinien aufgezeigt bekommen, um das Auslegungsziel schnell und zielgenau zu erreichen.

Mit den entwickelten Methoden und den in den Parallelvorhaben 1.2.4a+b verbesserten CFD-Verfahren können neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Verdichteraerodynamik direkt umgesetzt werden bzw. mit hoher Zuverlässigkeit das mögliche Verbesserungspotential abgeschätzt werden. Hierbei wird unter anderem darauf geachtet neben komplett neuen Lösungen auch Möglichkeiten der Verbesserung bestehender Anlagen (retrofitfähige Lösungen) zu berücksichtigen. Die Erhöhung der Flexibilität beim Betrieb von Gasturbinen und neuen komplexen Kraftwerksprozessen erfordern möglichst zuverlässige Aussagen zum Verdichterkennfeld mit einem hohen Wirkungsgrad entlang des gesamten Arbeitsbereiches – also auch bei Teillastbedingungen. Die enge Kooperation mit dem Industriepartner stellt sicher, dass die Potentialabschätzungen mit hoher Qualität und

Zuverlässigkeit erfolgt sind, so dass die Marktrelevanz ebenfalls zeitnah beurteilt und anschließend neue Produkte am Markt platziert werden können.

Mit den Methoden zur Entwicklung leistungsgesteigerter bzw. wirkungsgradoptimaler Komponenten wurden wichtige Voraussetzungen für den Aufbau von Kraftwerksprozessen mit maximalem Systemwirkungsgrad und minimiertem CO₂-Ausstoß geschaffen, welche zusätzlich über einen hinreichend großen Arbeitsbereich verfügen.

1.3 Aufgabenstellung und wissenschaftlich technische Arbeitsziele des Vorhabens

Das Wissen über die Sekundärströmung sowie über Möglichkeiten deren Beeinflussung durch entsprechende Schaufelformen in den Randzonen sowie entsprechende Naben- und Gehäuseverläufe – besonders relevant in den hinteren Verdichterstufen – wird gezielt für das Design ganzer Stufengruppen angewendet. Dabei werden die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Stufen und Schaufelreihen mittels entsprechender CFD-Simulationen systematisch aufgezeigt, um so verbesserte Designs des Gasturbinenverdichters zu erhalten, die den neuen Anforderungen an die abzusehenden Betriebsregime entsprechen.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Hauptarbeitspaket des Vorhabens bestand in dem Aufbau und der Durchführung von Optimierungen mehrerer Stufen im Verbund, mit dem Ziel die Randzonenverluste zu reduzieren und den Wirkungsgrad zu steigern.

Da solch komplexe Optimierungen mit Hinblick auf die vorhandenen Rechenressourcen und Produktentwicklungszyklen bisher noch an die Grenzen des technisch sinnvoll umsetzbaren stoßen bestand der erste Schritt auf dem Weg in Richtung Vielstufenoptimierungen darin, umfangreiche Vorstudien anhand von weniger aufwändigen Einzelstufenoptimierungen durchzuführen. Hierbei sollte gezielt Wissen für den Aufbau einer sinnvollen Prozesskette für die Vielstufenoptimierung gesammelt und die mögliche Optimierungsstrategie entwickelt werden.

Die durchgeführten Vielstufenoptimierungen haben weitere Erkenntnisse zum Aufbau und der nötigen Strategie solcher Optimierungen generiert, die sukzessive umgesetzt wurden.

AP	Beschreibung	2015	2016	2017
1	Validierungsrechnung und Aufbau des Optimierungsprozesses			
2	Vorstudien an einer Referenzstufe			
3	Vorbereitung der Mehrstufenoptimierung			
4	Optimierung mehrerer Stufen			
5	Erstellen von Designregeln			

Tabelle 1.1: Übersicht der Arbeitspakete

Tabelle 1.1 zeigt den zeitlichen Ablauf des Projektes und die Aufteilung in folgende Arbeitspakete:

- AP1) Validierungsrechnung und Aufbau des Optimierungsprozesses: Der Industriepartner Siemens stellt einen Verdichter als Arbeitsgrundlage für dieses Projekt zur Verfügung. Weiterhin erfolgt der Austausch von Werkzeugen zur Sicherung der Kompatibilität. Abschluss des AP ist die Überprüfung der Lauffähigkeit der gesamten Prozesskette.
- AP2) Vorstudien an einer Referenzstufe: Im Rahmen von Vorstudien, werden die wesentlichen Parameter identifiziert, welche zur spezifischen Beschreibung der Schaufelrandzonen verwendet werden. Es wird überprüft, ob eine gewisse Superposition von Beeinflussungsmaßnahmen gegeben ist.
- AP3) Vorbereitung der Mehrstufenoptimierung einschließlich der entsprechenden Parametrisierung und der Prozesskette: Mit diesem Arbeitspaket wird die hochkomplexe und aufwändige (Zeit, Personal und Rechnerkapazität) Mehrstufenoptimierung vorbereitet.
- AP4) Optimierung mehrerer Stufen: Das ist der Kernarbeitspunkt. Hier werden die entscheidenden Ergebnisse erarbeitet, die über den wissenschaftlichen Erfolg des Projekts entscheiden.
- AP5) Erstellen von Designregeln und Anwendung auf einen weiteren Verdichter: Auswertung und Verallgemeinerung der Ergebnisse aus AP4 zur Formulierung von Designregeln und Richtlinien. Deren Pilotanwendung auf einen weiteren Verdichter wird von Siemens im Rahmen von 1.2.4c durchgeführt.

1.5 Zusammenarbeit mit den Teilprojekten a,b,c

1.5.1 Austausch mit Teilprojekten a,b

Die Ergebnisse der parallel erfolgten Entwicklung von Realgasmodellen für die Strömungssimulationen sind wichtig, da das Verbesserungspotential (z.B. Wirkungsgradsteigerung) kleiner ist, als die Vorhersagegüte der CFD mit Idealgasannahmen.

Da grundlegende Erkenntnisse über die Änderungen zu Projektstart bereits bekannt waren, konnte eine Bearbeitung parallel erfolgen.

1.5.2 Austausch mit Teilprojekt c

Zwischen den Bearbeitern der Projekte 1.2.4c (Siemens AG) [1] und 1.2.4d (DLR) erfolgte eine enge Verzahnung der Arbeiten sowohl inhaltlich als auch zeitlich. Beide Forschungsstellen benutzten weitgehend die gleichen Werkzeuge.

Hervorzuheben ist die Verwendung desselben Parametermodells zur Beschreibung der Schaufeloberfläche und des Strömungskanals. So kann nicht nur die bereits erwähnte Wechselwirkung zwischen den Stufen und Schaufelreihen herausgearbeitet werden, sondern auch die Abhängigkeit der einzelnen Geometrieparameter, um zielgerichtet eine robuste und effektive Verdichterauslegung mit optimaler Randzonenströmung in den hinteren Schaufelreihen zu erreichen. Zudem wird eine bestmögliche Vergleichbarkeit und Austauschbarkeit der Ergebnisse erzielt.

Die Verdichter, anhand derer die Untersuchungen durchgeführt wurden, stammen von Siemens. Es wird folgende Bezeichnung verwendet:

- Konfiguration 1 (**K1**): Teilprojekt 1.2.4d (DLR)
- Konfiguration 2 (**K2**): Teilprojekt 1.2.4c (Siemens AG)
- Konfiguration 3 (**K3**): Teilprojekt 1.2.4c (Siemens AG)

Die Verdichter verwenden alle eine HPA (High Performance Airfoil) Beschaufelung [2] [3] [4].

Durch die Untersuchung anhand verschiedener Konfigurationen lassen sich die gefundenen Ergebnisse direkt vergleichen und auf Plausibilität überprüfen. Gleichzeitig werden verschiedene Aspekte des Einsatzes einer Randzoneneoptimierung mitberücksichtigt. Bei Konfiguration K1 steht dabei eher ein Retrofit im Fokus, bei Konfiguration K2 die Universalität und Nutzbarkeit für neue Auslegungen. Konfiguration K3 wird zum überprüfen gefundener Auslegungsregeln der Teilprojekte 1.2.4c und 1.2.4d herangezogen.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über die typische Vorgehensweise bei der Auslegung von Gasturbinenverdichtern gegeben, und das sich hieraus ergebende Optimierungspotential erläutert. Dieses beruht vor allem auf einer nicht vollständigen Berücksichtigung von 3D-Strömungseffekten sowie Stufeninteraktionseffekten und Realgaseffekten in frühen Auslegungsschritten.

Zudem wird der Stand der Technik bei 3D-Geometrieoptimierung im Bereich der Verdichterauslegung erörtert.

2.1 Vorgehensweise bei der Aerodynamischen Verdichterauslegung

Aufgrund der Komplexität von Verdichtern beginnt der Auslegungsprozess mit schnellen 1D- und 2D-Verfahren. Erst zu einem fortgeschrittenen Stadium kommen 3D-Simulationen und Optimierungen zur Anwendung (Abbildung 2.1).

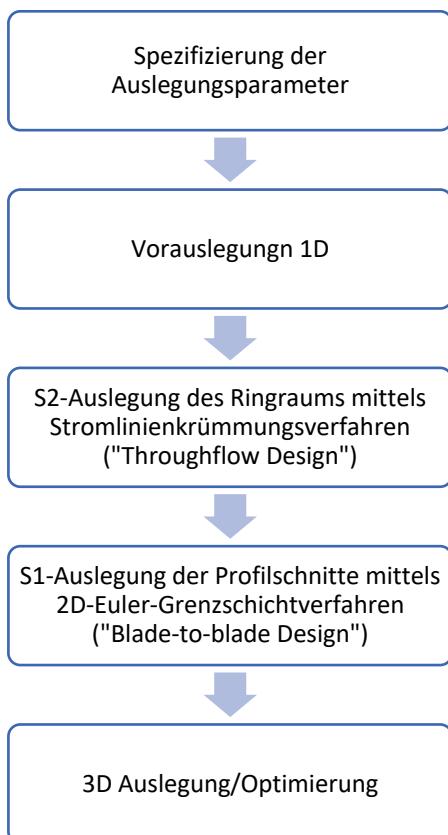


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Verdichterauslegung

Ein erster Entwurf der Strömungsdreiecke findet im "Throughflow Design" statt. In der konventionellen Auslegung erfolgt auch die Auslegung der gesamten Beschaufelung inklusiver der Randzonenbereiche mit 2D Verfahren. Die Berücksichtigung der im Wandbereich hochkomplexe 3D-Strömungsphänomene findet erst anschließend durch CFD-Simulation statt. So kann eine Feinjustierung der Schaufeln im Randzonenbereich beispielsweise durch Anpassung der Metallwinkel, sowie dem Einsatz von "lean" und "sweep" erfolgen.

Diese Vorgehensweise kann jedoch nicht das volle Potential zur Maximierung des Wirkungsgrades durch eine Beeinflussung der Randzonengeometrien ausschöpfen. Eine weitere Verlustreduktion wird erst durch eine komplexere Beeinflussung der Randzonengeometrien und gleichzeitige aerodynamische 3D-CFD Optimierung vieler Stufen möglich.

2.2 3D-Geometrieoptimierung

Automatisierte 3D Optimierungen werden derzeit noch stark durch die verfügbare Rechenleistung und dem damit verbundenen Zeit- und Kostenaufwand limitiert. Bisher werden typischerweise nur einzelne Schaufel- oder Stufengeometrien nachoptimiert, um 3D-Strömungseffekte zu optimieren, die während des 2D-Auslegungsprozesses nur unzureichend vorhergesagt werden konnten.

Sollen Verbunde aus vielen Stufen gleichzeitig optimiert werden, so werden schnell die Grenzen des technisch möglichen erreicht. Zum einen steigen durch die größeren Simulationsdomänen die Rechenzeiten erheblich, es können demnach in gleicher Zeit weniger Geometrien während einer Optimierung durch Simulationen überprüft werden, wodurch der Optimierungsfortschritt deutlich reduziert wird. Zum anderen erreicht Anzahl zu optimierender Geometrieparameter schnell Dimensionen, die eine sinnvolle Optimierung nicht mehr gestatten.

Dies führt insgesamt dazu, dass die Optimierungsstrategie eine essentielle Rolle spielt. Dazu gehört eine sinnvolle Auswahl von Parametern, gegebenenfalls eine zusätzliche Reduktion des Parameterraumes durch eine sinnvolle Koppelung von Parametern und zudem fortschrittliche Optimierungstechniken, in denen wirkungsvolle Beschleunigungstechniken zum Einsatz kommen.

2.3 Randzonenverluste

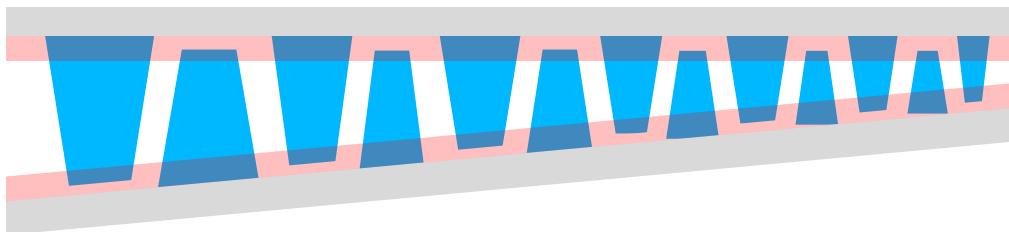


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Randzonenverluste in einer Vielstufenkonfiguration

Abbildung 2.2 zeigt schematisch, die Bereiche der Sekundärströmungen und Randzonenverluste. Insbesondere in den hinteren Verdichterstufen, in denen die Schaufelhöhen abnehmen, bestimmen die Sekundärströmungen einen deutlichen Teil der Kanalströmung.

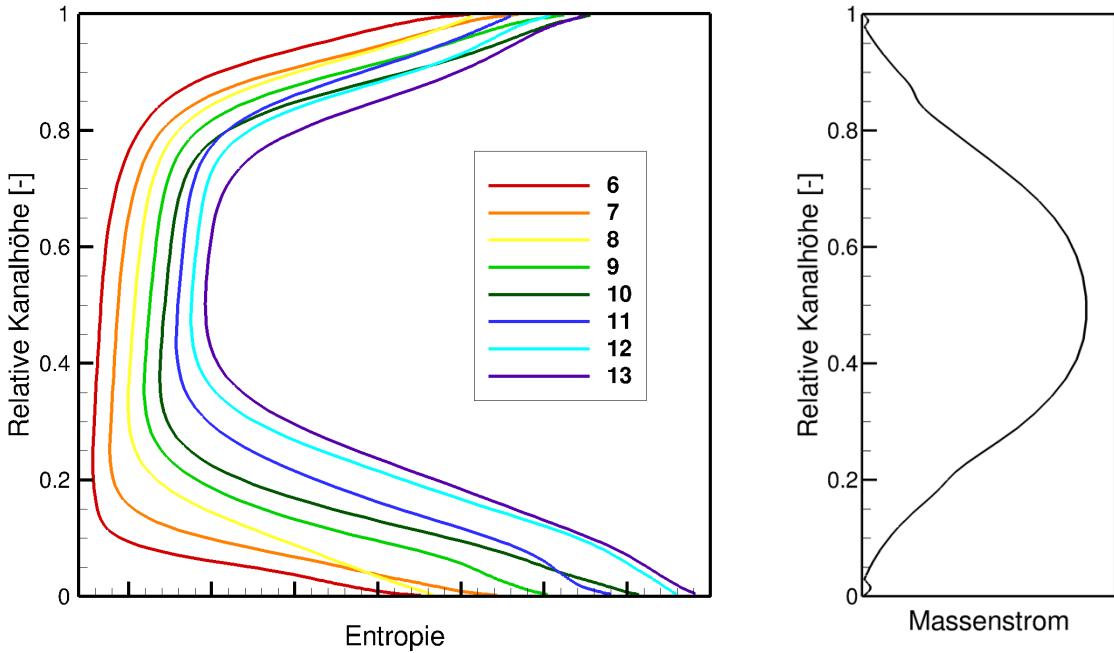


Abbildung 2.3: Entwicklung der Entropie an den Stufenaustritten als Maß für die Verluste (links). Beispiel einer Massenstromverteilung entlang der Kanalhöhe in einer hinteren Stufe (rechts).

Abbildung 2.3 (links) zeigt anhand der Entropie am Stufenaustritt, wie sich die Verluste entlang der Maschine entwickeln. Neben dem grundsätzlichen Anstieg der Entropie ist eine relative Ausdehnung der Randzonen deutlich zu erkennen.

In Abbildung 2.3 (rechts) ist beispielhaft die Massenstromverteilung in einer hinteren Stufe dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass ein deutlich größerer Massenanteil durch die Kanalmitte strömt, wozu Sekundärströmungen nicht unerheblich beitragen.

Wie im vorherigen Abschnitt 2.1 dargestellt erfolgt die Auslegung von Verdichtern noch zu einem großen Teil durch 2D-Verfahren, die die Sekundärströmungen nur unzureichend berücksichtigen. Hervorzuheben ist insbesondere die Blockage durch die Spaltströmungen. Hierdurch entstehen Verluste, die durch eine gezielte Randzonenmodifikation und Verlustreduktion ein Potential für eine Wirkungsgradsteigerung bieten.

Da keine genaue Vorhersage der Randzonenverluste mit 2D-Verfahren erfolgen kann, sind 3D-Simulationen notwendig, um diese zu quantifizieren. Sollen Verbesserungen umgesetzt werden, so muss beachtet werden, dass die Änderung des Strömungszustandes in einer Stufe unweigerlich Auswirkungen auf die anderen Stufen hat.

2.4 Stufeninteraktionseffekte

Wird eine Stufe allein optimiert, so werden die Geometrien in den Randzonen auf die möglicherweise suboptimale Abströmung der vorhergehenden Stufe angepasst. Zudem führt die Geometrieänderung einer Stufe immer auch zu einer Änderung der Strömungszustände in den benachbarten Stufen.

Wird eine Stufe isoliert betrachtet und bei konstanten Randbedingungen aus der Gesamtverdichtersimulation modifiziert, so kann die optimierte Stufe beim Einbau in den Gesamtverdichter zu einer radialen oder axialen Umverteilung der Last führen, da sich ein neues "Strömungsgleichgewicht" einstellt. Dies Phänomen lässt sich nur bedingt durch Vorgabe weitere Nebenbedingungen in Grenzen halten.

Nur durch eine gleichzeitige Optimierung aller Randzonenbereiche über viele Stufen hinweg, kann die Interaktion zwischen den Stufen berücksichtigt werden. Ziel der Teilprojekte 1.2.4c und d ist es daher Optimierungen von Vielstufenverbünden zu etablieren.

2.5 Realgaseffekte

Finden in den Simulationen große Temperaturänderungen statt, so wird es zunehmend wichtiger die Temperaturabhängigkeit der Stoffgrößen zu berücksichtigen. Bei Simulationen einzelner bis weniger Stufen kann diese Temperaturabhängigkeit noch ohne weiteres vernachlässigt werden, da die Temperatursteigerung über die Einzelstufe gering ist. Werden hingegen zunehmend mehr Stufen im Verbund simuliert und optimiert wird es wichtig die Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen [5].

In den Projektteilen 1.2.4a und b wird ein entsprechendes Modul für den CFD Löser TRACE entwickelt und in diesem Projektteil zum Einsatz gebracht.

3 Methoden

In diesem Kapitel werden die in diesem Vorhaben verwendeten und entwickelten Methoden beschrieben. Die Methodenentwicklung und -auswahl wurde insbesondere von dem Ziel getrieben eine effiziente und schnelle Optimierung zu ermöglichen.

3.1 Der Optimierer

In diesem Projekt kommt das am DLR Institut für Antriebstechnik entwickelte Programmpaket zur automatisierten multidisziplinären Optimierung von Turbomaschinenkomponenten *AutoOpti* zum Einsatz.

Der Kern der Optimierungsalgorithmen beruht auf der Evolutionsstrategie, die eine simultane Verbesserung mehrerer Zielfunktionen und die Einhaltung vieler Nebenbedingungen erlaubt. Damit werden die Robustheit und die Möglichkeit, lokale Minima zu überwinden, erlangt. Die mäßige Konvergenzgeschwindigkeit wird mit hardwarenahen Beschleunigungsmethoden und besonders durch Antwortflächen (Metamodelle) auf ein für die industrielle und Forschungspraxis notwendiges Niveau angehoben.

Die Neuronalen Netze und/oder Kriging-Modelle approximieren, basierend auf den in der Datenbank vorliegenden Ergebnissen, die Zusammenhänge zwischen Zielfunktionen und den freien Designparametern. Anschließend erfolgt eine temporäre Optimierung auf diesen Antwortflächen und nur die vielversprechendsten Datensätze werden an die numerisch aufwendige Prozesskette versendet.

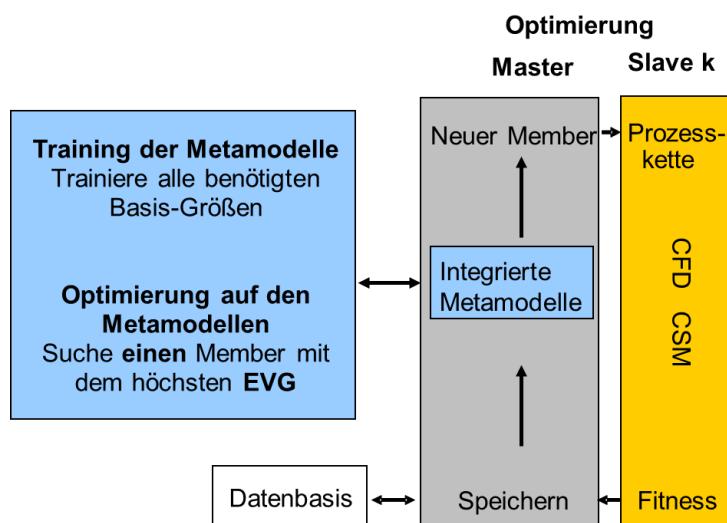


Abbildung 3.1: Flussdiagramm von *AutoOpti*

Für die anwenderfreundliche Nutzung der Ersatzmodelle sind die Metamodelle in den Root-Prozess des Kernoptimierers integriert (Abbildung 3.1). Man benötigt so jedoch ein einheitliches Optimalitätskriterium für alle Optimierungen auf den Ersatzmodellen (unabhängig von der Anzahl an Zielfunktionen/Nebenbedingungen), welches durch die Entwicklung des „Erwarteten Volumengewinns“ (Expected Volume Gain: EVG) gegeben ist. Dabei wird ein neuer Member (Satz von freien Variablen) gesucht der,

gemeinsam mit den gerade noch in Bewertung befindlichen Membern, den erwarteten Volumengewinn im Zielfunktionsraum zur aktuellen Paretofront maximiert (siehe Abbildung 3.2). Mit diesem Kriterium kann unter Datensätzen mit gleichem Paretorang der Datensatz mit maximal erwartetem Optimierungsfortschritt identifiziert werden. Ein weiterer großer Vorteil des EVG-Kriteriums ist die Verwendung von zusätzlichen Informationen. So fließen die Unsicherheiten für die Zielfunktionswerte eines Datensatzes, welche von den Antwortflächen geliefert werden, sowie die Information welche Datensätze aktuell bewertet werden in das EVG-Kriterium mit ein.

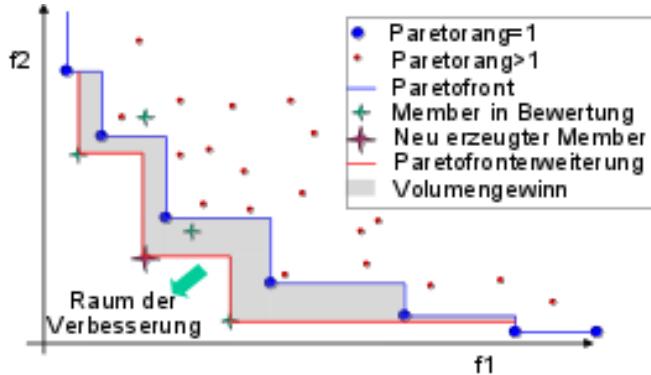


Abbildung 3.2: Erläuterung des EVG

Genau wie in der manuellen Auslegung, in der man je nach Designphase numerische Werkzeuge unterschiedlicher Gütestufen und Laufzeiten nutzt, kann man auch automatisierte Optimierungen durch solche Multi-Fidelity-Prozesse beschleunigen. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn die höchste zu beachtende Gütestufe sehr lange (>24 Stunden) für die numerische Auswertung eines einzelnen Designs benötigt und die Anzahl freier Optimierungsvariablen gleichzeitig sehr hoch ist (>100). In solchen Fällen versucht man die enorm zeitaufwendige High-Fidelity-Optimierung durch ungenauere aber deutlich schnellere Prozesse zu beschleunigen.

In *AutoOpti* wird ein Co-Kriging Ersatzmodell verwendet, welches in der Lage ist Informationen aus Prozessen unterschiedlicher Gütestufen miteinander zu kombinieren. Zusätzlich stehen mehrere Entscheidungsfunktionen zur Verfügung, die während der Optimierungskonvergenz für jedes Ersatzmodell-optimale Design neu abschätzen, welche Fidelity-Stufe voraussichtlich den meisten Informationsgewinn pro Zeit liefert. Diese Information wird dann an die Slave-Prozesse kommuniziert und die jeweilige Prozesskette ausgeführt.

3.2 Parametrisierung

Die Schaufelparametrisierung erfolgte mit dem von Siemens eingesetzten Geometrietool in Übereinstimmung mit Projektteil 1.2.4.c [1]. Zur Anwendung werden übliche Profil- und Schaufelkonstruktionsparameter vorgegeben.

Für die Gehäusekonturierung wurde zunächst ein beim DLR entwickeltes Tool verwendet. Später kam auch hier ein Tool von Siemens zum Einsatz. Beide ermöglichen es Konstruktionspunkte von Gehäuse und Nabe radial zu verschieben und somit das Seitenwandprofil festzulegen.

3.3 Parameterreduktion

Für die Optimierung einer Schaufelreihe können bis weit über 100 Parameter variiert werden. Werden mehrere Stufen betrachtet so wird schnell eine Größenordnung von mehr als 1000 Parametern erreicht. Dies übersteigt heutzutage noch den sinnvollen Rahmen für eine auf 3D-CFD basierende Verdichteroptimierung. Es ist daher sinnvoll die Anzahl der während der Optimierung freien Parameter zu reduzieren. Hierzu bieten sich verschiedene Möglichkeiten an.

Parameter, von denen erwartet wird, dass sie ähnlich wirken, lassen sich koppeln. Dies kann durch Splines oder einen "Master-Slave"-Ansatz geschehen.

3.3.1 Parameterkopplung über Bernstein-Polynome

Werden beispielsweise die Vorderkantenwinkel aller Rotoren eines Verdichters betrachtet, so lässt sich anstelle der Freigabe aller einzelnen Vorderkantenwinkel ein Spline definieren aus dem die letztendliche Winkeländerung abgeleitet wird. Die Anzahl der freien Parameter wird so durch den Grad des Splines festgelegt und nicht die Anzahl der eigentlichen Parameter. Ist der Splinegrad geringer als die Anzahl der Vorderkantenparameter (gegeben durch die Anzahl der zu optimierenden Rotoren), so werden Parameter gespart. Die Einschränkungen des Parameterraumes, die hierdurch hingenommen werden müssen scheinen legitim, da für viele Parameter eine kontinuierliche Änderung der Parameter entlang der Schaufelreihen als ausreichend angesehen wird. Es kann beispielsweise erwartet werden, dass die Änderung der Vorderkantenwinkel eines optimierten Verdichters im Vergleich zu einem Referenzverdichter in annähernd kontinuierlicher Form entlang der Rotoren/Statoren geschieht und sich mit einem Spline von geringerer Ordnung als Anzahl an Parametern ausreichend gut wiedergeben lässt. Inwiefern dies zutrifft soll anhand der Optimierungsstudien überprüft werden.

3.3.2 Master-Slave-Ansatz zur Parameterkopplung

Eine andere hier untersuchte Form der Parameterkopplung stellt ein "Master-Slave"-Ansatz dar (Abbildung 3.3). Hierbei werden mehrere Parameter, die ein bestimmtes Geometrimerkmal definieren, von einer "Master"-Stufe auf die anderen "Slave"-Stufen übertragen. So kann beispielsweise eine Gehäusekonturierung über dem Rotor einmal definiert werden und auf alle Rotoren übertragen werden. Dabei können zusätzliche Skalierungsfaktoren zum Einsatz kommen.

Auch auf diese Weise lassen sich eine Vielzahl von Parametern einsparen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass eine Geometrieänderung, die bei der "Master"-Stufe von Vorteil ist, in ähnlicher Form auch bei den Slave-Stufen einen positiven Einfluss ausüben wird.

Zeigt eine spezielle Form der Gehäusekonturierung über einem Rotor einen positiven Effekt, so ist dies auch über den anderen benachbarten Rotoren zu erwarten, zumal sich diese häufig ähneln. Dies gilt insbesondere für die in diesem Vorhaben betrachteten hinteren Stufen stationärer Gasturbinenverdichter.

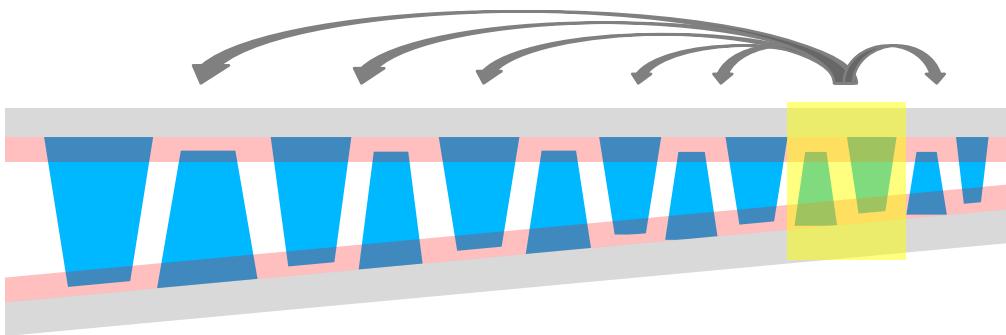


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Master-Slave-Ansatzes zur Parameterkoppelung

3.3.3 Parameterauswahl

Neben den oben beschriebenen Ansätzen ist es sinnvoll zu untersuchen, welche, welche Parameter es sich bei der gegebenen Aufgabenstellung lohnt zu verändern. Hierfür wird eine statistische Auswertung der Optimierungsergebnisse vorgenommen, mit dem Ziel die wichtigsten Parameter für die betrachtete Problemstellung zu identifizieren.

3.4 Geometriecheck

Der Geometrie-Check soll überprüfen, welcher minimale Spalt bei einer Axialverschiebung der Schaufelreihe um verschiedene Werte noch gegeben ist. Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 zeigen beispielhaft für einen Fall, wie der Geometrie-Check funktioniert. Neben der Nabengehäusekontur wird die Kontur der Schaufelspitze eingelesen. Dazu wird nicht die eigentliche Schaufel eingelesen, sondern lediglich die Positionen von LE und TE und die um die Spaltgröße verschobene Nabengehäusekontur zwischen die Punkte LE und TE gelegt. Damit entspricht die Auflösung der Geometrien der Auflösung des zugrunde liegenden S2M-Netzes, das hierfür herangezogen wird. Für jeden Schaufelpunkt wird nun der Abstand zu den Strakpunkten berechnet um den minimalen Spalt zu bestimmen. Dies kann für axiale Verschiebungen der Schaufel durchgeführt werden, um einen Plot für den minimalen Spalt abhängig von der axialen Verschiebung zu erhalten. Diese Daten werden in der Optimierung für jede Geometrie berechnet und in der Datenbasis abgelegt und können so herangezogen werden, um während der Optimierung Restriktionen bezüglich eines minimalen Spaltes festzuschreiben.

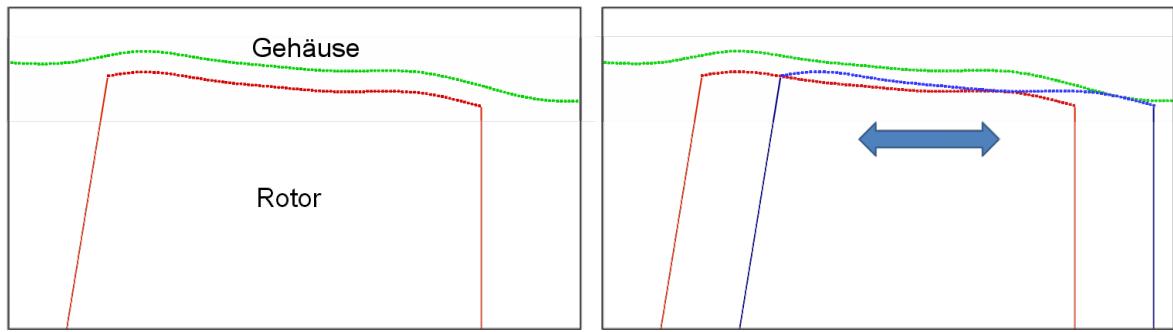


Abbildung 3.4: Verschiebung der Kontur am Radialspalt von Rotor (oben) und Stator (unten) in axialer Richtung bis zum Kontakt mit der profilierten Seitenwand zur Ermittlung der maximalen axialen Verschiebbarkeit.

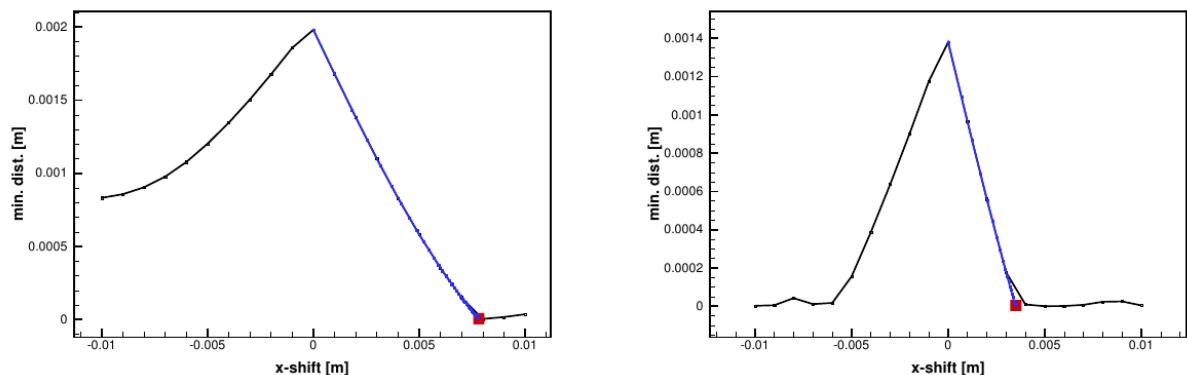


Abbildung 3.5: Minimaler Abstand im Radialspalt zwischen Beschaufelung und Seitenwand bei einer axialen Verschiebung von Beschaufelung und Seitenwand relativ zueinander.

4 Testverdichter und numerischer Setup

4.1 Testverdichter

Als Untersuchungsobjekt dient ein stationärer Gasturbinenverdichter (K1) von Siemens. Dieser setzt sich aus 13 Stufen und einem OGV zusammen und ist für eine Drehzahl von 3600 1/min ausgelegt. Für die hier durchgeführten Untersuchungen stehen die hinteren acht Stufen (6-13) im Fokus und sollen optimiert werden.

4.2 Numerischer Setup

4.2.1 Vernetzung

Es wurde ein Einpassagennetz für den Gesamtverdichter erstellt, das für Rechnungen mit Wandfunktion optimiert wurde. Davon abgeleitet wurde ein Netz für die hinteren Stufen (6-13) erstellt, sowie eines für Stufe 13 (+OGV). Die Wahl der Netzaufteilung und weiterer Netzparameter erfolgte basierend auf Erfahrungswerten.

Neben diesen Netzen wurde für die hinteren Stufen ein Netz mit deutlich reduzierter Auflösung erstellt, welches als Low-Fidelity Netz für Multi-Fidelity-Optimierungen dient. Eine Übersicht aller Netzdimensionen zeigt Tabelle 4.1. Die Schaufelreihen sind mit Mischungsebenen aneinandergekoppelt. Alle Schaufelgeometrien wurden mit vereinfachten Fillet-Geometrien vernetzt.

	Gesamt-verdichter	Hintere Stufen	Hintere Stufen Low-Fi	Stufe 13 +OGV
Zellen gesamt (Mio.)	22,7	14,7	1,8	2,5
k-Linien	73	73	33	73
K-Linien Spalt	11	11	5	11

Tabelle 4.1: Rechennetztopologien

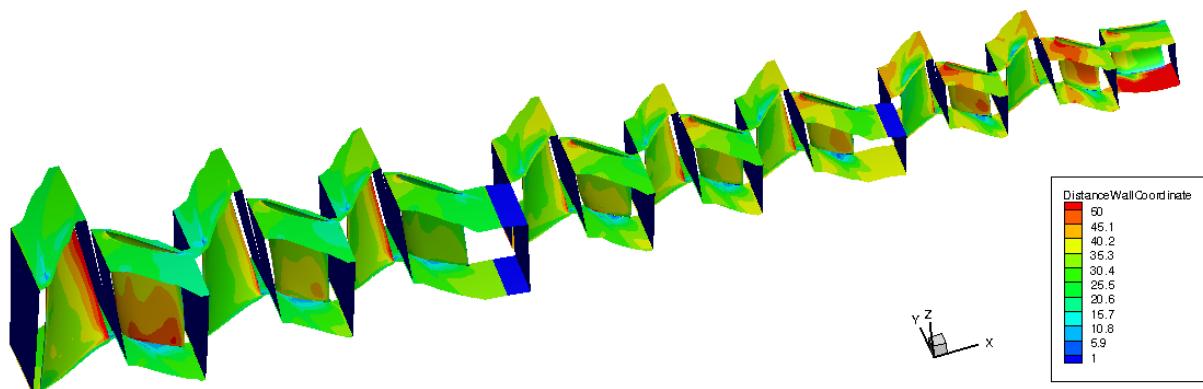


Abbildung 4.1: Dimensionsloser Wandabstand y^+

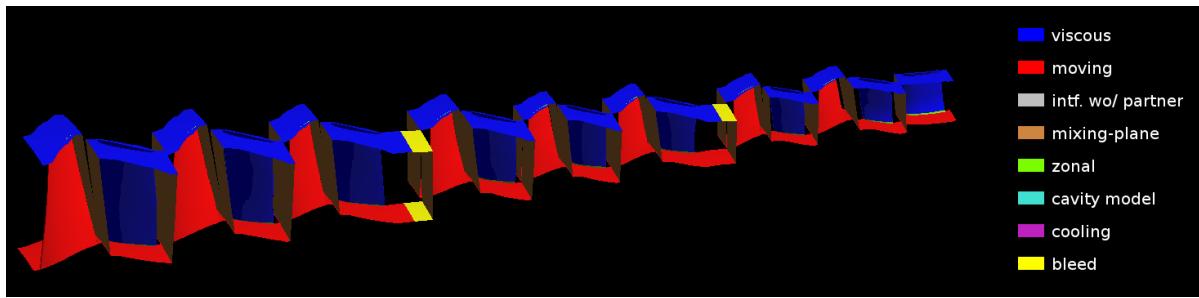


Abbildung 4.2: Numerischer Setup mit Mischungsebenen und Zapfluftentnahmestellen

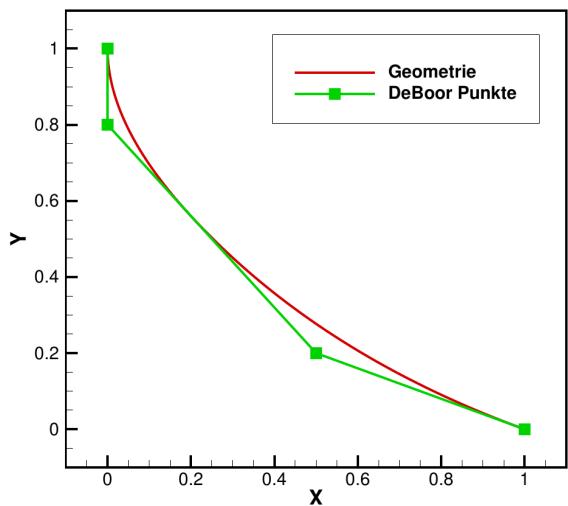


Abbildung 4.3: Konstruktion einer Fillet-Kontur

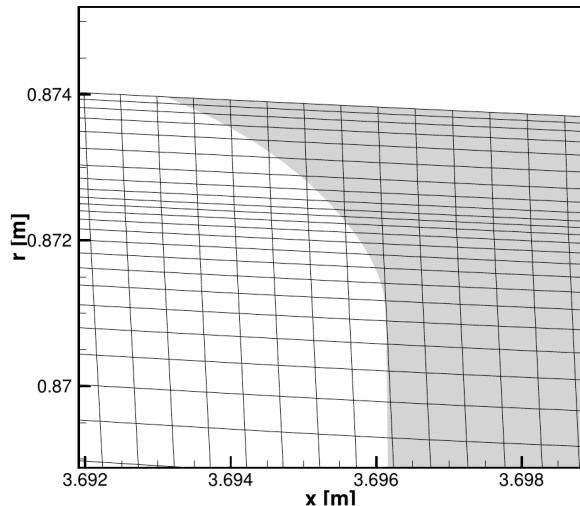


Abbildung 4.4: Beispiel eines Fillets am Stator

4.2.2 CFD-Setup

Die Austrittsrandbedingung ist in Form einer radialen Verteilung des statischen Drucks hinter dem OGV vorgegeben. Angedrosselt wird in der Simulation, indem diese radiale Verteilung skaliert wird. Für die Simulationen wurde der CFD-Löser TRACE mit dem SST Turbulenzmodell verwendet. Zur Validierung wurden Kennlinienrechnungen mit Daten von Siemens abgeglichen.

5 Numerische Studien

In diesem Kapitel werden die durchgeführten numerischen Studien erörtert. Zunächst wird der prinzipielle Aufbau der Optimierungen dargestellt und anschließend die Optimierungsstudien sowie weitere Studien erörtert.

Die Optimierungsstudien wurden zunächst an einer Einzelstufenkonfiguration durchgeführt, um die Optimierungsprozesse zu testen und bereits erste Erkenntnisse zum Einfluss der Geometrieparameter zu erlangen.

Anschließend wurden Optimierungsstudien mit einer Konfiguration bestehend aus 8 Stufen durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Parametrisierungskonzepte getestet und mit Hilfe eines Multi-Fidelity-Verfahrens optimiert.

5.1 Aufbau der Optimierungen

5.1.1 Ziele und Zielfunktionen

Ziel der Optimierung ist es eine Wirkungsgradsteigerung zu erzielen und gleichzeitig den Arbeitsbereich des Verdichters nicht einzuschränken. Es werden folgende Zielfunktionen formuliert:

Zielfunktion 1: Polytopen Wirkungsgrad der optimierten Konfiguration im Arbeitspunkt steigern.

Der Arbeitsbereich kann abgeschätzt werden, indem ein angedrosselter Betriebspunkt berechnet wird für den das Totaldruckverhältnis ermittelt wird. Sofern dieses mindestens dem Wert der Ausgangskonfiguration entspricht kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass der Arbeitsbereich eingehalten wird.

Eine möglichst exakte Bestimmung des Arbeitsbereichs würde eine hochaufgelöste Kennlinienrechnung erforderlich machen, die im Rahmen einer Optimierung zu viele Ressourcen erfordern würde.

Mit der obigen Vorgehensweise wird daher die Überprüfung des Arbeitsbereichs mit angemessenem Ressourcenaufwand ermöglicht. Das Totaldruckverhältnis kann hierbei direkt als Maß für den Arbeitsbereich herangezogen werden. Es kann somit auch in Form einer zweiten Zielfunktion berücksichtigt werden:

Zielfunktion 2: Totaldruckverhältnis in einem angedrosselten Betriebspunkt steigern.

Im Rahmen der Optimierung kann so ein Ergebnis in Form einer Pareto-Front erzielt werden, die alle optimalen Kombinationen aus Wirkungsgrad und (näherungsweise ermitteltem) Arbeitsbereich enthält. Dies ermöglicht es unter verschiedenen Ergebnissen auszuwählen. Sollte sich beispielsweise ein näherungsweise ermittelter Arbeitsbereich bei einer genaueren Nachrechnung als zu gering herausstellen kann eine Geometrie mit höherem Arbeitsbereich aus den Pareto-optimalen Geometrien ausgewählt werden. Auch für die Auswertung und die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Arbeitsbereich und Wirkungsgrad bei der Optimierung einer Geometrie ist es sinnvoll Arbeitsbereich und Wirkungsgrad als Zielfunktionen zu verwenden.

5.1.2 Nebenbedingungen

Zusätzlich ist die Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen erforderlich. Hierzu zählt insbesondere die Einhaltung einer Massenstromvorgabe im Arbeitspunkt, um keine Leistungseinbußen des Verdichters durch eine Absenkung des Massenstroms zu erfahren.

Nebenbedingung 1: Massenstrom im Arbeitspunkt darf nicht fallen

Weiterhin ist es bei einer Modifikation der Rotorgeometrien notwendig die Festigkeit zu berücksichtigen. Dies geschieht durch ein einfaches Kriterium in Form einer maximal zulässigen von Mises Spannung, die nicht über der der Ausgangsgeometrie liegen darf.

Nebenbedingung 2: Strukturmechanische Eigenschaften sollen nicht schlechter werden.

Im Laufe des Projektes wurden zudem weitere aerodynamische Nebenbedingungen eingeführt, auf die an entsprechender Stelle hingewiesen wird.

5.1.3 Notwendige Simulationen zur Ermittlung der Zielfunktionswerte

Um die Zielfunktionen und Nebenbedingungen berechnen zu können müssen CFD-Simulationen der notwendigen Betriebspunkte durchgeführt werden:

Betriebspunkt 1 (BP1): Auslegungspunkt

Betriebspunkt 2 (BP2): Angedrosselter Punkt auf der 100% Drehzahllinie

Im Laufe des Projektes kam für die finalen Optimierungen ein weiterer Betriebspunkt hinzu:

Betriebspunkt 3 (BP3): Angedrosselter Punkt bei geringerer reduzierter Drehzahllinie zur Berücksichtigung von Heißtagbedingungen (50°C).

Hinzu kommen CSM-Simulationen der Beschaufelung zur Bestimmung der strukturmechanischen Eigenschaften.

5.1.4 Prozesskette

Die notwenigen Simulationen werden in Form einer Prozesskette automatisiert (Abbildung 5.1). Diese erhält vom Optimierer den Parametervektor und beginnt mit einer Geometrieerzeugung in Abhängigkeit der Geometrieparameter. Die Geometrien werden in einem automatisierten Prozess vernetzt. Mit diesen Rechennetzen werden die nötigen Betriebspunkte simuliert. Weiterhin findet eine strukturmechanische Analyse der Rotoren statt. Die Ergebnisse der Simulationen ermöglichen die Berechnung der Fitnessfunktionen und Nebenbedingungen.

Geometrie

- Parameterbasierte Geometrieerzeugung
 - Gehäuse/Nabe
 - Beschaufelung inkl. Fillets
- Geometriecheck

CFD Simulationen

- Vernetzung für CFD
- Betriebspunkt 1...n
 - Preprocessing
 - Simulation
 - Auswertung CFD

Strukturmechanik

- Vernetzung
- CSM-Simulation aller Rotoren
- Auswertung

Berechnung der Zielfunktionen und Nebenbedingungen

Abbildung 5.1: Hauptschritte der Optimierungsprozesskette

5.1.5 Parametrisierung Beschaufelung

Die Geometrieerzeugung der Beschaufelung geschieht mit dem Siemens-Schaufelgenerator. Da das Potential zur weiteren Verlustreduktion bei vielstufigen Verdichtern hauptsächlich in den Randzonen gesehen wird, wird die Schaufelparametrisierung auf die naben- und gehäusenahen Bereiche beschränkt. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft für Rotor 13 welche Bereiche von der so gewählten Parametrisierung maßgeblich beeinflusst werden.

Die Parametrisierung ist dabei so aufgebaut, dass ein Delta auf die Parameter der Referenzgeometrie aufgeschlagen wird. In radialer Richtung klingt dieses Delta zum mittleren Schaufelbereich ab. Realisiert wird diese Art der Parametrisierung mit Hilfe von Bernstein-Polynomen (siehe Kapitel 3.3.1).



Abbildung 5.2: Vergleich zweier möglicher Rotorgeometrien durch die eingesetzte Parametrisierung

5.1.6 Parametrisierung Naben- und Gehäusekontur

Die Parametrisierung der Naben- und Gehäusekontur erfolgte zunächst mit einem DLR-Tool und wurde im Laufe des Projektes auf ein Siemens-Tool umgestellt, um eine bessere Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Funktionsweise ist sehr ähnlich.

Für die Parametrisierung mittels DLR-Tool werden definierte Punkte der Naben- und Gehäusekontur in radialer Richtung verschoben und die Kontur mittels eines Splines gebildet.

Das Siemens Tool lässt eine beliebige Angabe von Kontrollpunkten zu, die relativ zur Vorder-/Hinterkante eine Schaufel positioniert werden und erzeugt eine neue Seitenwandkontur unter Berücksichtigung der neuen Kontrollpunkte.

5.2 Einzelstufenoptimierungen

5.2.1 Ziel

Bei der Optimierung einer einzelnen Stufe ist die Randbedingung am Eintritt der Stufe, entnommen aus einer Gesamtverdichterrechnung, fest vorgeschrieben in Form radialer Verläufe von Totaldruck, Totaltemperatur, Strömungswinkeln und Turbulenzgrößen. Dabei ist davon auszugehen, dass in den Randzonenbereichen die Abströmung der vorherigen Stufe suboptimal ist mit Hinblick auf die Performance der zu optimierenden Stufe. Diese wird demnach auf suboptimale Zuströmbedingungen optimiert. Vermeiden ließe sich dies nur durch die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Stufen, wie es Ziel dieses Vorhabens ist. Das Ziel der Einzelstufenoptimierungen liegt daher vornehmlich in der Etablierung der notwendigen Optimierungsprozesse.

Mit Hilfe von Einzelstufenoptimierungen sollte zum einen die Optimierungsprozesskette getestet werden und zum anderen untersucht werden, welche Parameter einen

besonders hohen Einfluss auf die Randzonenverluste aufweisen. Hierbei galt es konkret folgende Fälle zu untersuchen und das Potential der Wirkungsgradsteigerung durch eine Optimierung zu vergleichen:

- Schaufeloptimierung
- Gehäusekonturoptimierung
- Kombinierte Schaufel- & Gehäusekonturoptimierung

Zu optimierende Bereiche waren jeweils die Nabenseitigen Randzonenbereiche des Rotors und Stators der ausgewählten Stufe 13.

Es wurden insgesamt sechs Optimierungen der Stufe 13 mit unterschiedlichen Parameterfreigaben durchgeführt. Eine Übersicht ist Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Bezeichnung	Stufe	Geometriemodifikation		Bereich			
		Beschaufelung	Gehäuse	Rotor		Stator	
				Gehäuse	Nabe	Gehäuse	Nabe
St13_B_RngSng	13	x		x	x	x	x
St13_S_Rn	13		x		x		
St13_S_Rg	13		x	x			
St13_S_Sn	13		x				x
St13_BS_RngSng	13	x	x	x	x	x	x
St13_BS_Rg	13	x	x	x	x		

Tabelle 5.1: Übersicht der Optimierungen von Stufe 13 und der verwendeten Freigaben

5.2.2 Aufbau

Der Rechenbereich für diese Studie umfasste Stufe 13 inklusive anschließendem OGV. Details zum verwendeten Rechennetz sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Der Aufbau der Optimierungen entspricht der Darstellung aus Kapitel 5.1. Für die Seitenwandprofilierung wurde das DLR-Tool verwendet.

Die Eintrittsrandbedingungen wurden Vielstufenrechnungen (Stufen6-13) entnommen. Um eine Randbedingung für einen angedrosselten Fall zu erhalten wurde die Vielstufenkonfiguration angedrosselt (wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben) und für einen deutlich angedrosselten Betriebspunkt die Strömungsgrößen vor Stufe 13 extrahiert.

Abbildung 5.3 zeigt Charakteristiken von Stufe 13 mit unterschiedlichen Eintrittsrandbedingungen, die der Gesamtkonfiguration (Stufen 6-13) entnommen wurden.

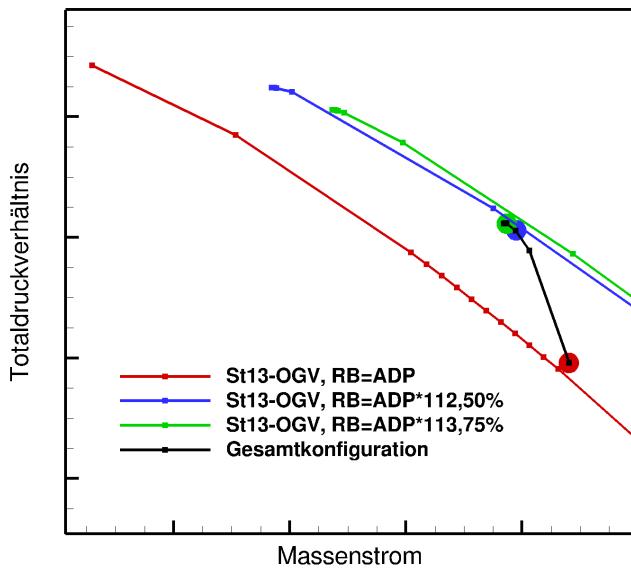


Abbildung 5.3: Charakteristiken der Vielstufenkonfiguration (Stufe 6-13) und von Stufe 13 mit unterschiedlichen Eintrittsrandbedingungen.

5.2.3 Gehäusekonturoptimierung

5.2.3.1 Optimierung mit DLR-Tool

Zunächst wurden Optimierungen mit dem DLR-Tool durchgeführt. Hierfür wurden jeweils acht Punkte am Gehäuse über dem Rotor und an der Nabe unter dem Stator freigegeben. Die maximale zulässige Verschiebung der Konstruktionspunkte beträgt $\pm 0.002\text{m}$.

Hierbei wurde zunächst nicht auf geometrische und konstruktive Gesichtspunkte geachtet und das Problem aus rein aerodynamischer Sicht betrachtet.

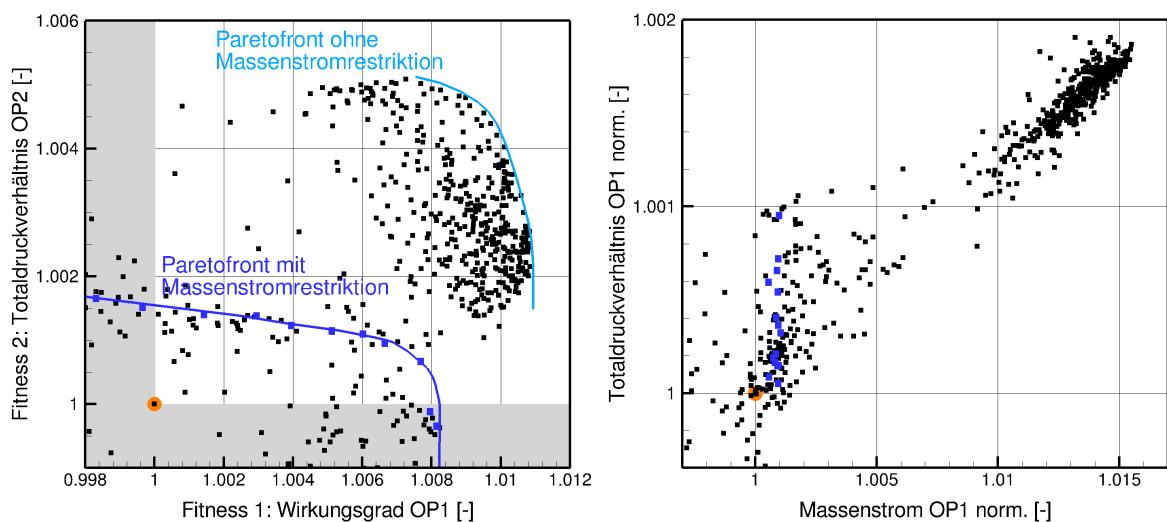


Abbildung 5.4: Optimierungsdatenbasis der Optimierung 1: Seitenwandprofilierung mit DLR Tools

Abbildung 5.4 zeigt die Datenbank der Optimierung anhand mit der Referenz normierter Größen. Ohne aerodynamische Restriktionen kann ein Wirkungsgradgewinn von ca. einem Prozent erzielt werden. Hierbei treten jedoch deutliche Abweichungen des Massenstroms von der Referenz auf.

Soll sichergestellt werden, dass die Stufe weiterhin aerodynamisch zu dem restlichen Verdichter passt, müssen aerodynamische Restriktionen eingeführt werden, die dies sicherstellen. Insbesondere eine deutliche Veränderung des Massenstroms soll vermieden werden.

Abbildung 5.4 zeigt, die Veränderung der Paretofront beim Einführen einer Restriktion auf den Massenstrom, die maximale Abweichung im OP1 von $\pm 0,2\%$ zulässt. Wird die Abweichung des Massenstroms restriktiert und werden lediglich geringe Abweichungen zur Referenz zugelassen, so führt dies zu einem geringeren maximalen Wirkungsgradgewinn. Die zweite Zielfunktion, als Maß für die Kennfeldbreite, wird ebenso beeinflusst.

In Abbildung 5.5 sind die Pareto-optimalen Geometrien für die beiden Fälle dargestellt. Ohne Massenstromrestriktion findet eine deutliche Erweiterung des Strömungskanals im Spaltbereich von Rotor und Stator statt, was letztendlich zu einer deutlichen Massenstromzunahme durchführt. Mit Massenstromrestriktion ist diese deutliche Aufweitung des Kanals nicht zu beobachten. In beiden Fällen zu erkennen ist eine deutliche nach außen gerichtete Delle nahe der Vorderkante an Rotor als auch Stator im Bereich der Spaltwirbelentstehung. Stromab dieser ersten Delle ist eine Welligkeit auszumachen.

Eine Ausnahme stellt die Profilierung über dem Rotor ohne Massenstromrestriktion dar. Es kann vermutet werden, dass die Welligkeit hier durch eine Tendenz zur maximalen radialen Auslenkung der Konstruktionsparameter unterbunden wurde.

Dies würde bedeuten, dass die Welligkeit kein erforderliches Merkmal ist, um den gewünschten Effekt der Wirkungsgradsteigerung zu erzielen, sondern hauptsächlich die erste Delle ausschlaggebend ist und der weitere lokale Verlauf der Profilierung nur noch einen sehr geringen Einfluss auf die Zielfunktionen zeigt. Unterstützt wird diese Vermutung, durch die Beobachtung, dass sich, mit Ausnahme des Falles der Profilierung über dem Rotor ohne Massenstromrestriktion, keine eindeutige Tendenz entlang der Paretofront für die Geometrievariation ausmachen lässt. Diese Vermutung wird im Folgenden anhand einer Parameterstudie überprüft.

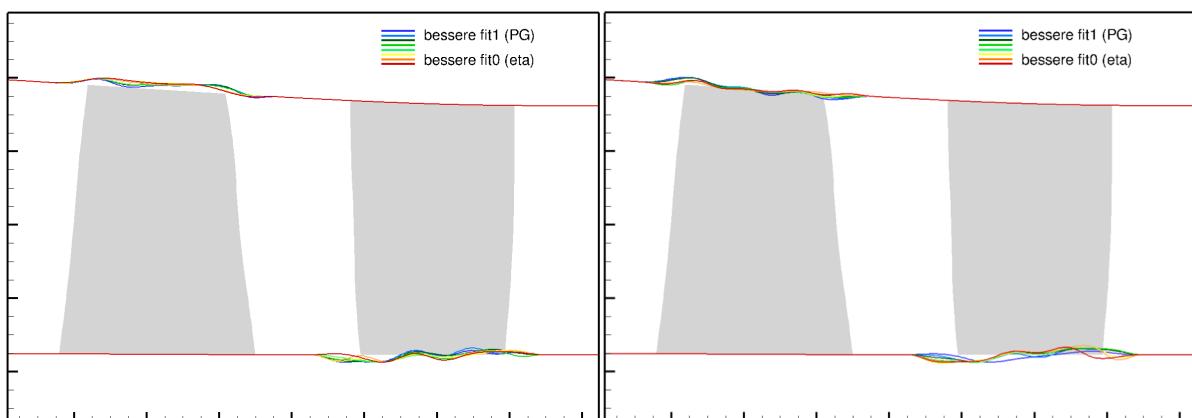


Abbildung 5.5: Pareto-Optimale Geometrien ohne (links) und mit (rechts) Massenstromrestriktion.

Abgesehen davon hat eine Welligkeit deutliche Nachteile, da eine gewisse Verschiebbarkeit der Beschaufelung in axialer Richtung gegeben sein muss, um in der Turbine die Spalte einzustellen. Dies kann je nach Amplitude und Länge der Wellen eine Vergrößerung des Spaltes erfordern um einen sicheren Betrieb weiterhin zu ermöglichen, wie Untersuchungen in Projektteil 1.2.4c [1] gezeigt haben.

In den weiteren Optimierungen wurde daher zum einen die maximal zulässige radiale Verschiebung der Konstruktionspunkte halbiert. Darüber hinaus wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um den Einfluss der Welligkeit aerodynamisch zu analysieren.

Alleine aus aerodynamischer Sicht zeigen die Profilierungen zumindest ein Potential zur Verlustreduktion, wie Abbildung 5.6 zeigt. Ausgewählt wurden drei Geometrien der Paretofront ohne Massenstromrestriktion, um die Effekte möglichst deutlich sichtbar zu machen. Erkennbar ist eine Verlustreduktion insbesondere an den Schaufelenden mit Spalten. So lässt sich der Wirkungsgrad im Seitenwandbereich von Nabe und Gehäuse steigern (Abbildung 5.6, rechts).

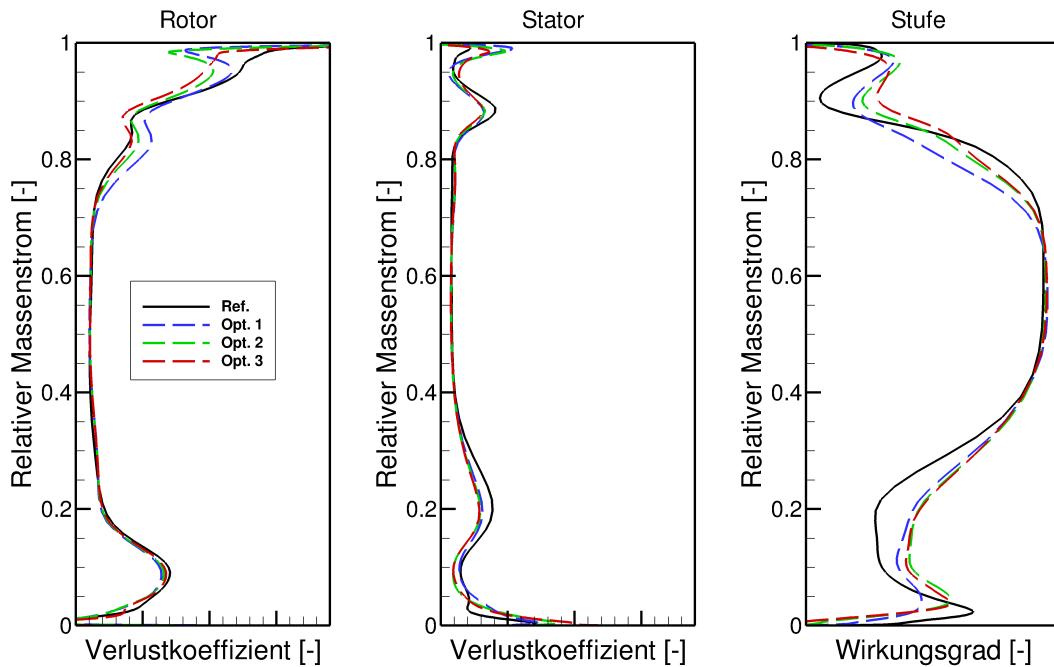


Abbildung 5.6: Verlustkoeffizienten von Rotor und Stator und Wirkungsgrad der Stufe für Referenz und drei ausgewählte Geometrien entlang der Paretofront ohne Massenstromrestriktion.

5.2.3.2 Optimierung mit Siemens Tool

In einem nächsten Test wurde das Siemens-Tool zur Gehäuseprofilierung implementiert. Zwei wesentliche Unterschiede im Vergleich zur vorherigen Optimierung wurden umgesetzt. Die Anzahl der Konstruktionspunkte wurde auf zwölf pro Bereich erhöht, die maximale Verschiebung in radialer Richtung wurde auf $\pm 0.001\text{m}$ reduziert.

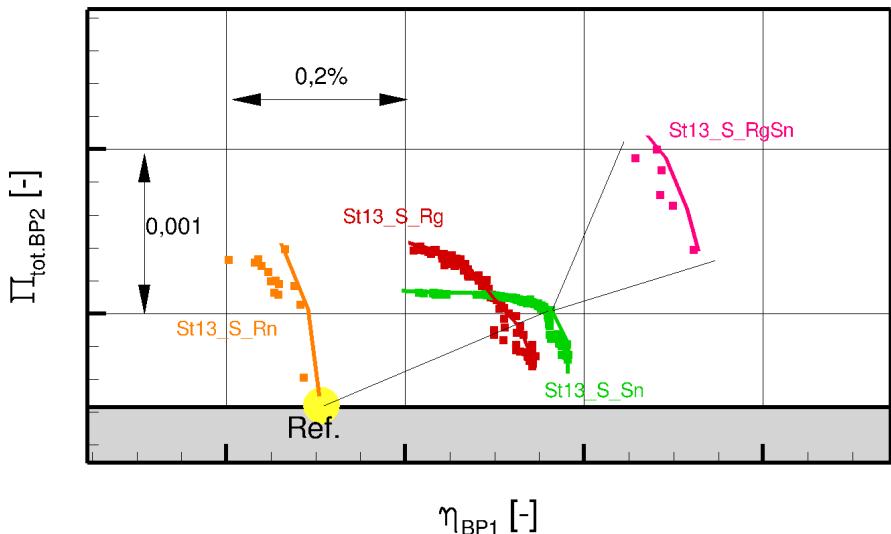


Abbildung 5.7: Paretofronten der Gehäusekonturoptimierungen sowie Ergebnisse einer Kombinationsstudie (St13_S_RgSn).

Es wurden separate Optimierungen für den Bereich am Rotorspalt, an der Rotornabe und am Statorspalt durchgeführt, um den jeweiligen Einfluss auf die Stufenperformance besser quantifizieren zu können. Die Ergebnisse in Form der Pareto-Fronten sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Wirkungsgradgewinne insgesamt relativ gering ausfallen, insbesondere im Vergleich zu den vorherigen Optimierungen mit weiteren geometrischen Freigaben. So kann zunächst festgehalten werden, dass mit einer höheren Amplitude der Profilierung eine stärkere positive Beeinflussung des Wirkungsgrads möglich ist.

Zudem wird deutlich, dass mit einer Naboprofilierung des Rotors kein positiver Einfluss erzielt wurde. Ein ähnliches Ergebnis wird für den eingespannten Bereich des Stators erwartet, wurde an dieser Stelle jedoch nicht durch eine separate Optimierung überprüft. Ergebnisse aus Projekt 1.2.4c [1] bestärken jedoch die Vermutung, dass eine Profilierung im Bereich der Einspannung einen deutlich geringeren Einfluss zeigt, als im Bereich der Spalte.

Das Potential zur Verlustreduktion an der Rotornabe scheint im Auslegungspunkt ohnehin gering. So sind beispielsweise keine deutlichen Ablösegebiete zu erkennen (Abbildung 5.8).

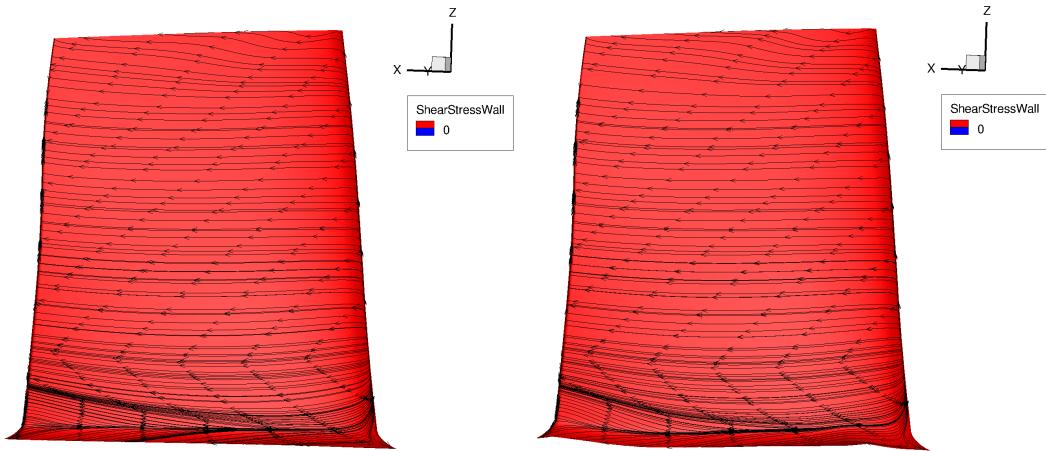


Abbildung 5.8: Streichlinien und Wandschubspannung auf der Saugseite des Referenzrotors (links) und eines Rotors mit Nabenprofilierung (rechts).

Abbildung 5.9 zeigt, dass durch die Rotornabenprofilierung dennoch Verluste im Rotornabenhintergrund geringfügig abnehmen. Im Stator steigen die Verluste jedoch geringfügig an, so dass sich die Verluste insgesamt ausgleichen. Im Gehäusebereich ist der Effekt ebenfalls zu beobachten, in Summe überwiegen jedoch die positiven Effekte, so dass ein Wirkungsgradgewinn zu erkennen ist.

Die Verlustreduktion, die durch eine Optimierung der Rotornaben- bzw. Rotorgehäuseprofilierung im Laufrad erzielt wurde, wird demnach zu großen Teilen durch steigende Verluste im Leitrad wieder zunichte gemacht. Dies verdeutlicht, dass schon geringfügige Modifikationen alleine der Seitenwandprofilierungen des Rotors eine Anpassung des Stators erfordern, um das Potential zur Wirkungsgradsteigerung voll auszuschöpfen.

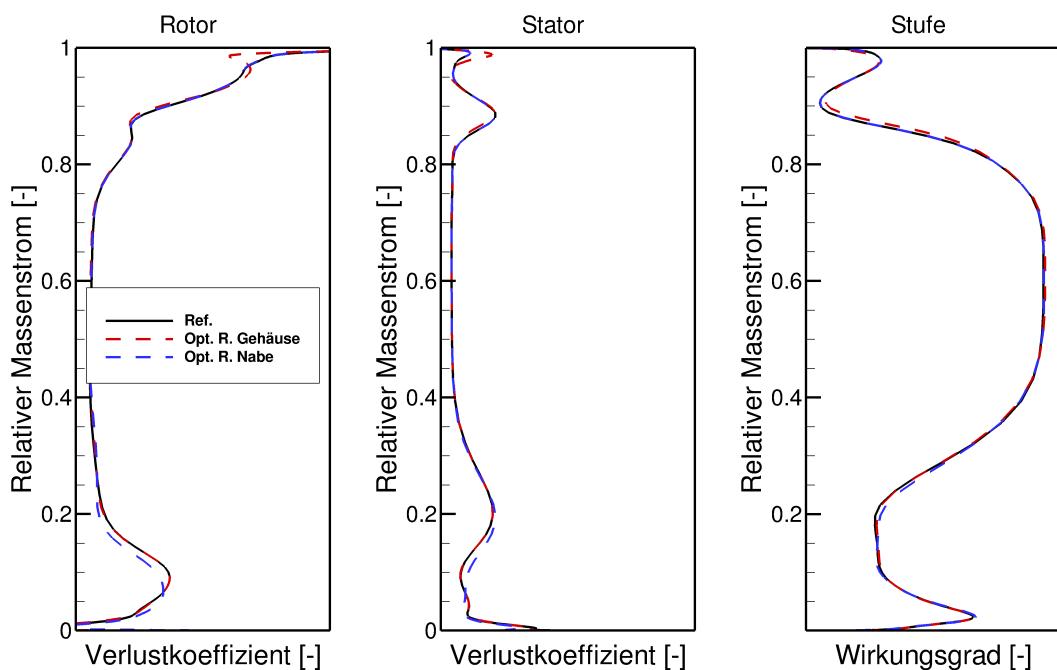


Abbildung 5.9: Änderung der Verluste und des Stufenwirkungsgrads durch eine Naben- und Gehäuseprofilierung am Rotor.

Der Einfluss einer Profilierung im Bereich der Spalte zeigt einen deutlicheren Einfluss auf die Stufenperformance. Dabei sind die Auswirkungen annähernd unabhängig voneinander und können superponiert werden, wie eine Kombination einer Pareto-optimalen Statornabenprofilierung mit Pareto-optimalen Rotorgehäuseprofilierungen zeigt (Abbildung 5.7, St13_S_RgSn).

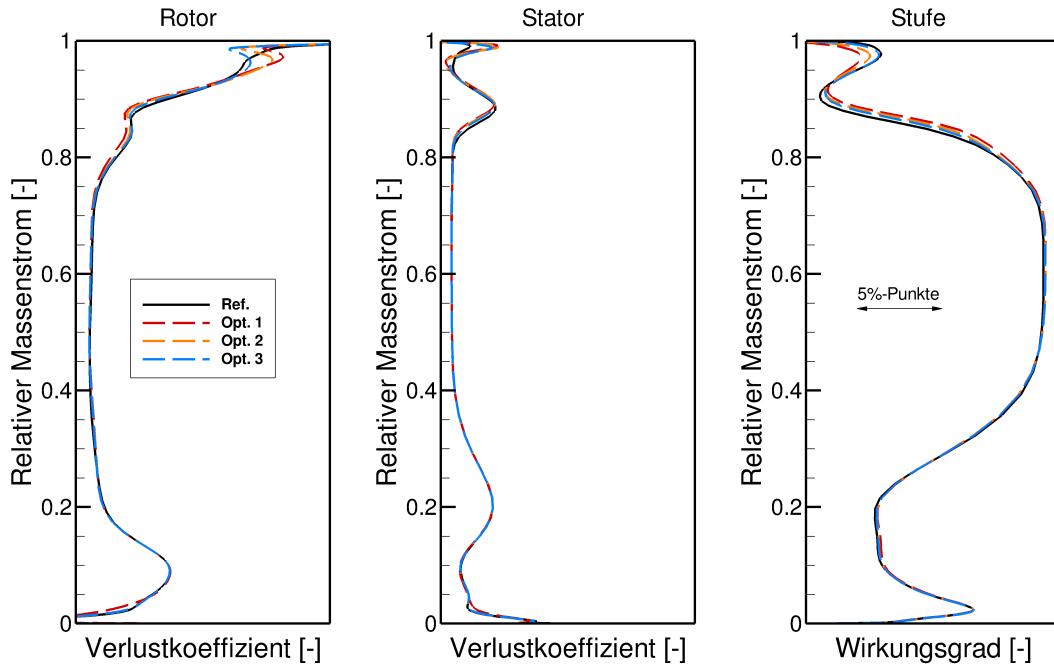


Abbildung 5.10: Änderung der Verluste und des Stufenwirkungsgrads durch Gehäuseprofilierungen am Rotor.

Abbildung 5.10 zeigt Paretooptimale Geometrien der Rotorgehäuseprofilierung. Dabei ist auffällig, dass Geometrie Opt.1, die den Stufenwirkungsgrad am deutlichsten steigert die Verluste im Laufrad nahe dem Gehäuse sogar verstärkt. Durch eine radiale Umverteilung des Massenstroms werden nun jedoch niedriger liegende Schaufelschnitte besser angeströmt und können bei geringeren Verlusten operieren, was sich positiv auf die Gesamtbilanz auswirkt.

5.2.4 Schaufeloptimierung

Die Beschaufelung wurde im Bereich der Seitenwände optimiert (Tabelle 5.1, St13_B_RngSng). Hierfür wurden die in Tabelle 5.2 angegebenen Profilparameter auf Delta-Basis modifiziert. Die Modifikation geschah für einen Seitenwandbereich jeweils durch zwei Parameter und wirkt sich auf 30% der radialen Höhe auf die Schaufel aus. Durch die Parametrisierung wurde ein glatter Übergang zur Referenz sichergestellt. Neben den Profilparametern wurden zusätzliche Parameter für die Fädelung der Schaufel freigegeben. Auf fünf radialen Höhen wurden Verschiebungen in Axial- und Umfangsrichtung zugelassen. Insgesamt summiert sich die Anzahl der freien Parameter so auf 76.

Es wurde eine Restriktion auf den Massenstrom eingeführt, die eine maximale Abweichung im BP1 von $\pm 0,3\%$ zuließ. Die maximal zulässige von Mieses Vergleichsspannung wurde auf den Wert der Referenzschaufel gesetzt.

	Min	Max
Staffelungswinkel	-10	+10
Vorderkantenwinkel	-7	7
Hinterkantenwinkel	-7	7
Spline-Kontrollpunkt SS x	-0.02	+0.02
Spline-Kontrollpunkt SS y	-0.02	+0.02
Spline-Kontrollpunkt DS x	-0.02	+0.02
Sehnenlänge	-0.01	0.01

Tabelle 5.2: Profilparameterfreigaben

Der erzielte maximale Wirkungsgradgewinn liegt bei ca. 0,85%-Punkten. Die Ergebnisgeometrien zeigen eine Veränderung der gesamten freigegebenen Bereiche (Abbildung 5.11 links). Signifikant ist das Aufdrehen der Rotor spitze mit entsprechender Anpassung des Stators am Gehäuse. Die Nabenschnitte von Rotor und Stator zeigen ein leichtes zudrehen. Auffallend ist zudem der Wechsel von Zu-/Aufdrehen bzw. Auf-/Zudrehen in Seitenwandnähe. Die entsprechende Optimierung am Verdichter K2 im Teilprojekt 1.2.4.c führt zu vergleichbaren Modifikationen [1].

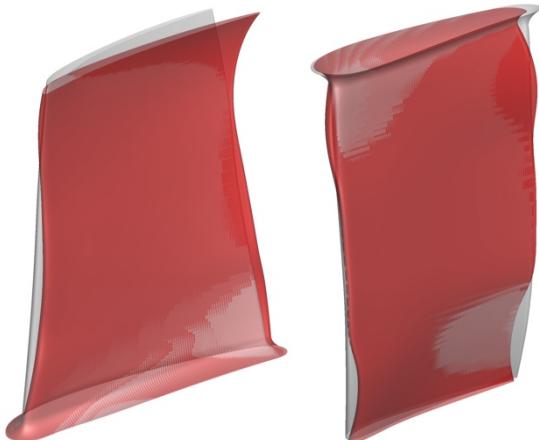


Abbildung 5.11: Optimierte Geometrien im Vergleich zur Referenz. Grau: Referenz, rot: optimiert.

5.2.5 Kombinierte Seitenwandprofil- und Schaufeloptimierung

Mit der gleichzeitigen Optimierung von Seitenwandprofil und Beschaufelung wird untersucht, ob sich bezüglich der Ergebnisse Unterschiede in den Geometrien im Vergleich zu den Einzeloptimierungen ergeben und inwiefern eine Superposition der Wirkungsgradgewinne der Einzeloptimierungen zutrifft.

Die freien Parameter und deren Freigaben entsprechen denen der vorhergehenden Optimierungen von Seitenwand- und Schaufelprofilierung. Zusammen beläuft sich die Anzahl freier Parameter auf 124, wovon 76 für die Schaufelparametrisierung verwendet werden und 48 für die Profilierung.

Der so erzielte maximale Wirkungsgradgewinn liegt bei ca. 1,05%-Punkten. Die Schaufelgeometrien (Abbildung 5.12) zeigen die gleichen Merkmale, wie bereits bei der Optimierung ohne Seitenwandprofilierung. Die Seitenwandprofilierung zeigt ebenfalls das bereits bei den separaten Optimierungen festgestellte signifikante Merkmal in Form einer auswärts gerichteten Delle im Bereich der Vorderkante.

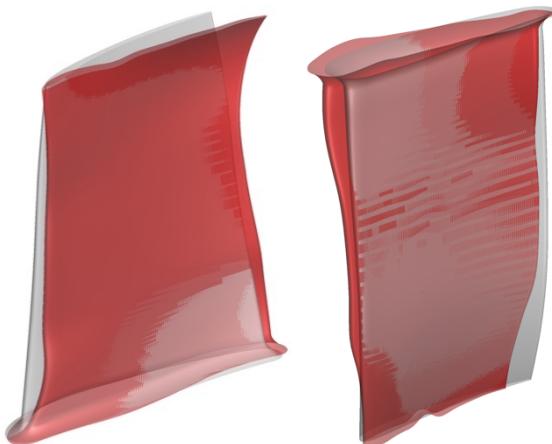


Abbildung 5.12: Optimierte Geometrien im Vergleich zur Referenz. Grau: Referenz, rot: optimiert.

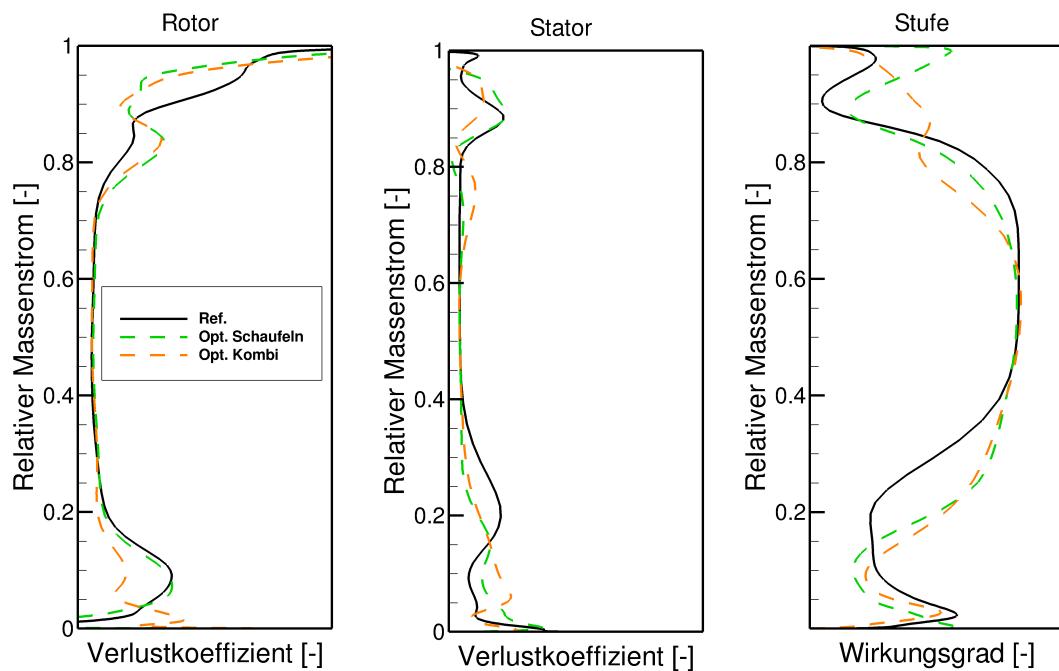


Abbildung 5.13: Änderung der Verluste und des Stufenwirkungsgrads durch Schaufeloptimierung und Kombinierte Schaufel+Seitenwandprofil-Optimierung (Kombi).

Abbildung 5.13 zeigt die Änderung der Verluste bei Optimierung der Beschaufelung als auch Optimierung der Beschaufelung zusammen mit einer Profilierung im Vergleich zur Referenz.

Eine Wirkungsgradsteigerung lässt sich insbesondere in Gehäusenähe oberhalb von 85% relativem Massenstrom beobachten und im Bereich zwischen 20% und 40% relativem Massenstrom.

Für den Nabennahen Bereich kann angemerkt werden, dass die größten Wirkungsgradgewinne nicht in direkter Nähe zur Seitenwand entstehen, sondern weiter zur Kanalmitte. Dies lässt sich durch den höheren Massenstrom Richtung Kanalmitte erklären, wodurch sich eine Verlustreduktion in diesem Bereich stärker auf den Wirkungsgrad auswirkt.

5.2.6 Parameterstudie zur Gehäusekonturierung

Durch die Parameterstudie soll überprüft werden, ob die einzelne Delle im Bereich der Vorderkante das dominierende Merkmal der Profilierung ist. Hierzu wurden verschiedene Profilierungen von Einzel-Dellen im Gehäuse über dem Rotor untersucht.

Hierzu wurde zunächst eine Delle durch einen Kontrollpunkt definiert, dessen axiale Position verschoben wurde, was zu den in Abbildung 5.14 dargestellten Konturierungen führt. Abbildung 5.15 zeigt die dazugehörigen Performancegrößen.

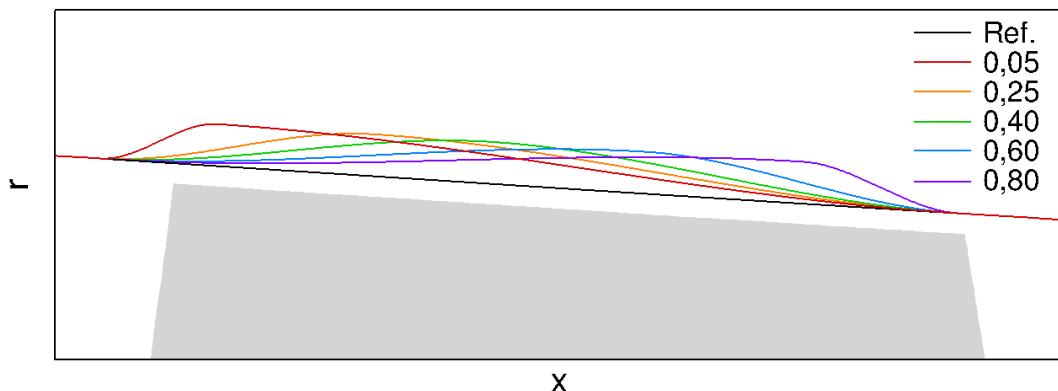


Abbildung 5.14: Erste Parameterstudie - Geometrien

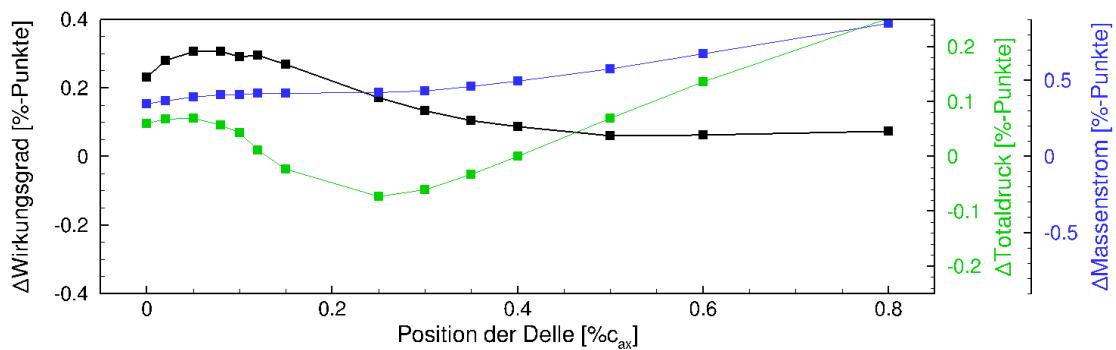


Abbildung 5.15: Erste Parameterstudie - Performancedaten

Es wird deutlich, dass eine Delle im Bereich der Vorderkante, wie vermutet, zu einer Wirkungsgradsteigerung führt. Hierbei sollte jedoch die Änderung des Massenstroms

mitberücksichtigt werden, der zu höheren Werten tendiert. Abbildung 5.16 zeigt die zugehörigen radialen Verteilungen, aus denen noch einmal deutlich wird, wie insbesondere eine Delle im Vorderen Rotorbereich eine Verlustreduktion bewirken kann. Hierbei kann eine Interaktion mit dem Spaltwirbel vermutet werden.

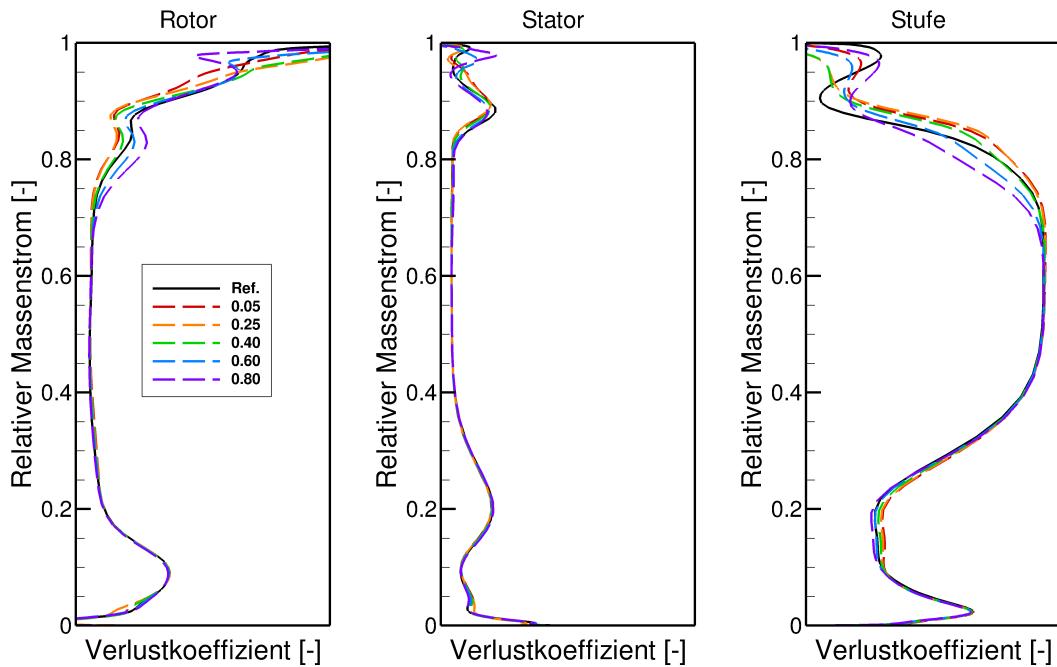


Abbildung 5.16: Erste Parameterstudie – Radial Verteilungen

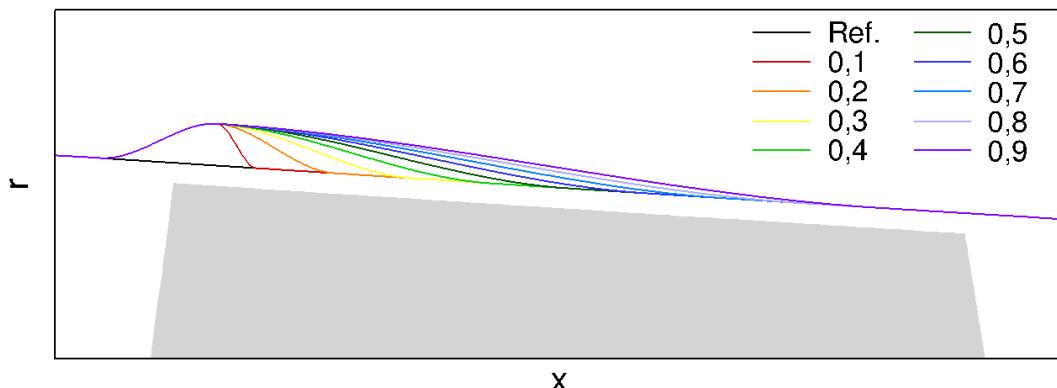


Abbildung 5.17: Zweite Parameterstudie - Geometrien

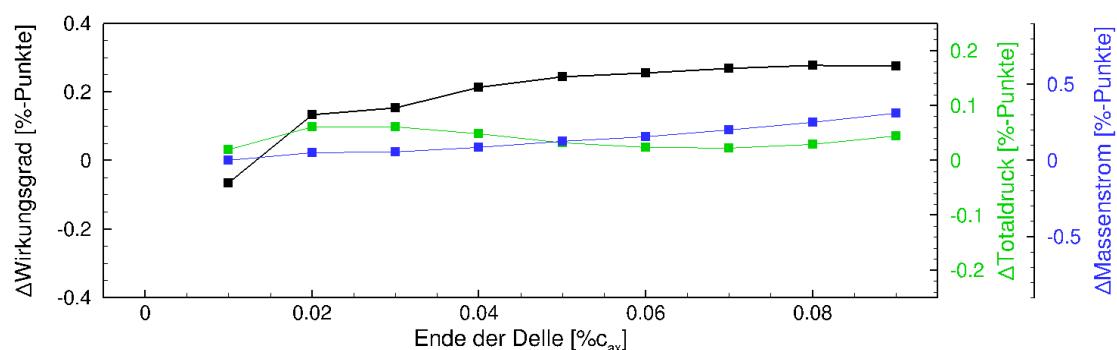


Abbildung 5.18: Zweite Parameterstudie - Performancedaten

In einem zweiten Schritt wurde die Breite der Delle nahe der Vorderkante variiert, wie in Abbildung 5.17 dargestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Erkennbar ist, dass schon eine etwas geringere Breite genügt, um den Massenstromanstieg zu reduzieren, ohne großen Einfluss auf den Wirkungsgradgewinn.

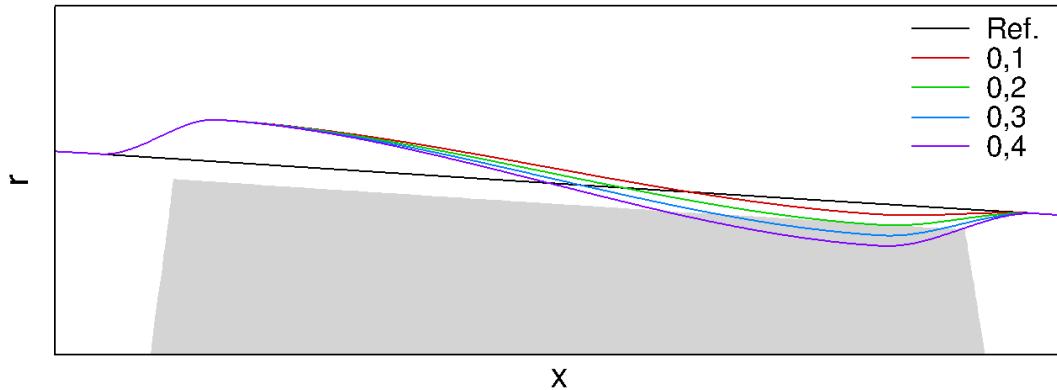


Abbildung 5.19: Dritte Parameterstudie - Geometrien

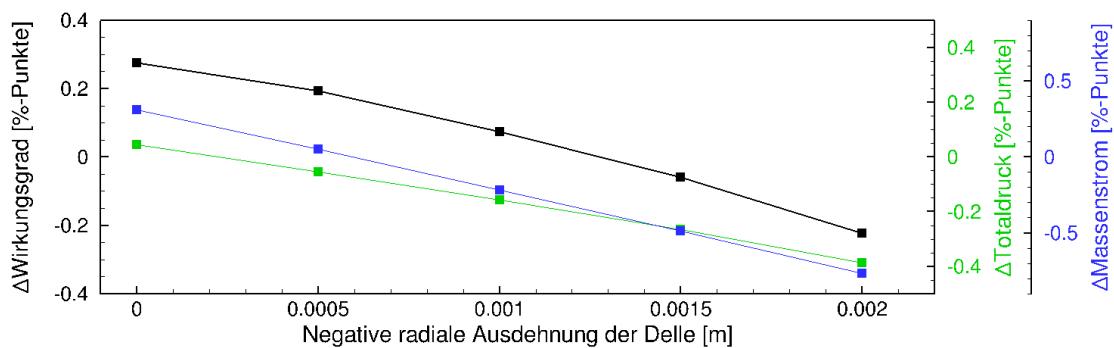


Abbildung 5.20: Dritte Parameterstudie - Performancedaten

In einer dritten Studie wurde untersucht wie der Massenstrom durch eine stärkere Kontraktion zur Hinterkante weiter abgesenkt werden kann (Abbildung 5.19). Es wird ersichtlich, dass hierbei auch Wirkungsgrad im Auslegungspunkt und Totaldruck im angedrosselten Betriebspunkt abnehmen (Abbildung 5.20).

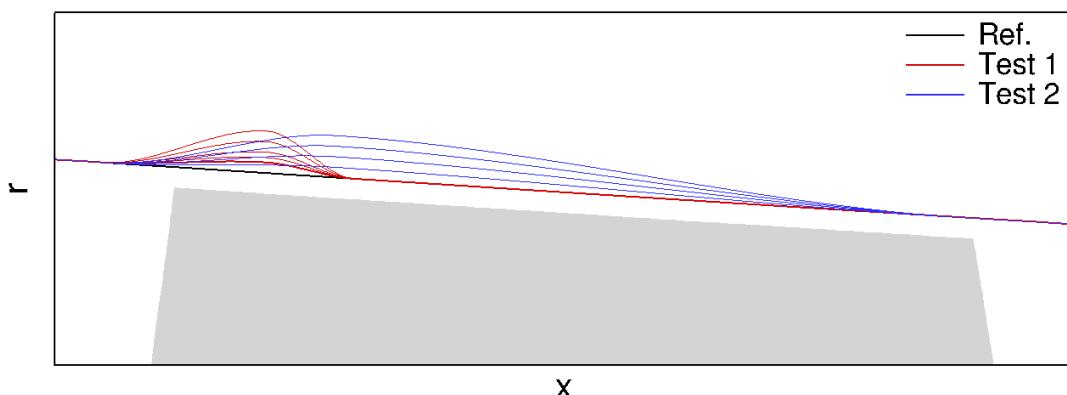


Abbildung 5.21: Vierte Parameterstudie - Geometrien

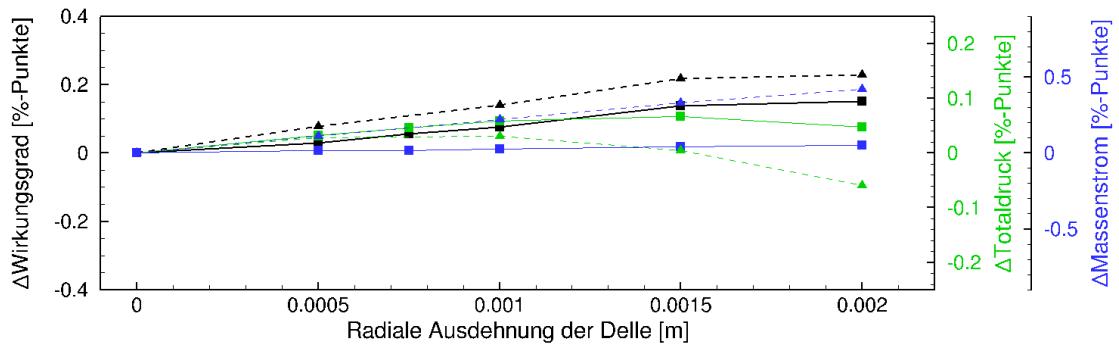


Abbildung 5.22: Vierte Parameterstudie – Performancedaten. Test 1: Durchgehende Linien. Test 2: Gestrichelte Linien.

Mit einer letzten Parametervariation wurde der Einfluss der Amplitude der Delle getestet. Hierfür wurden zwei unterschiedlich breite Dellen, variiert, wie in Abbildung 5.21 dargestellt.

Es zeigt sich, dass mit einer schmaleren Delle mit zunehmender Tiefe der Wirkungsgrad gesteigert werden kann, ohne den Massenstrom zu beeinflussen. Eine breitere Delle zeigt eine höhere Wirkungsgradsteigerung, bei gleichzeitig ansteigendem Massenstrom. Zudem ist ein Abfallen des Totaldrucks im angedrosselten Betriebspunkt unter den Wert der Referenz, ab einer gewissen Tiefe zu beobachten.

Zusammenfassend kann aus dieser Parameterstudie die Schlussfolgerung getroffen werden, dass auch mit wenig komplexen Gestaltungen der Seitenwandprofilierung, zumindest im untersuchten Bereich des Rotorpalts und damit vermutlich auch im Bereich des Statorpalts, eine, im Vergleich zur Optimierung mit deutlich höherer Parameterzahl, immer noch signifikante Beeinflussung des Wirkungsgrads erzielt werden kann. Auch Massenstrom und Totaldruck im Angedrosselten Punkt lassen sich beeinflussen.

Eine Optimierung mit wenigen Parametern, die eine Delle nahe der Vorderkante im Bereich der Spaltwirbelentstehung zuließe, würde daher in Bezug auf die mögliche Wirkungsgradsteigerung ähnliche Ergebnisse erzielen.

Gleichzeitig könnten so einfacher starke Gradienten in der Profilierung vermieden werden, die sich als besonders kritisch für die praktische Einsetzbarkeit der einer Profilierung erweisen haben.

5.2.7 Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse

Abbildung 5.23 zeigt die Paretofronten der verschiedenen Optimierungen und die Member mit einem Paretorang < 4. Der Übersichtlichkeit halber wurden Member mit schlechterem Paretorang ausgeblendet.

Von Interesse ist insbesondere die Wirkungsgradsteigerung im BP1, die im Vergleich zur Referenz möglich ist, ohne die Stabilität bzw. näherungsweise das Totaldruckverhältnis im BP2 zu vermindern.

Die höchste Wirkungsgradsteigerung lässt sich durch Freigabe von Beschaufelung und Seitenwandprofilierung in allen Bereichen (Rotor+Stator, Nabe+Gehäuse) erzielen und beträgt für die betrachtete Stufenkonfiguration ca. 1,05%-Punkte.

Eine Optimierung ohne Freigabe der Seitenwandprofilierung erreicht 0,85%-Punkte Wirkungsgradsteigerung.

Optimierungen der Seitenwandprofilierungen alleine zeigen für die Bereiche mit Spalt jeweils Werte zwischen 0,20 und 0,25%-Punkten. Eine Kombinationsstudie hat gezeigt, dass sich diese Zugewinne nahezu additiv verhalten (St13_G_RgSn in Abbildung 5.23).

Seitenwandprofilierungen auf den eingespannten Seiten der Beschaufelung können hingegen keine Wirkungsgradzunahme bewirken (lediglich für die Rotornabe untersucht: St13_S_Rn).

Der Zugewinn bei einer gleichzeitigen Optimierung von Beschaufelung und Seitenwandprofilierung ist geringer als die Summe der Einzeloptimierungen.

Vergleichen zu einer Optimierung der Seitenwandprofilierung wurde mit einer Schaufeloptimierung in etwa der doppelte Wirkungsgradgewinn erzielt, wie aus der Gegenüberstellung von St13_BS_Rg mit St13_S_Rg und St13_B_RngSng mit St13_S_RgSn zu erkennen ist.

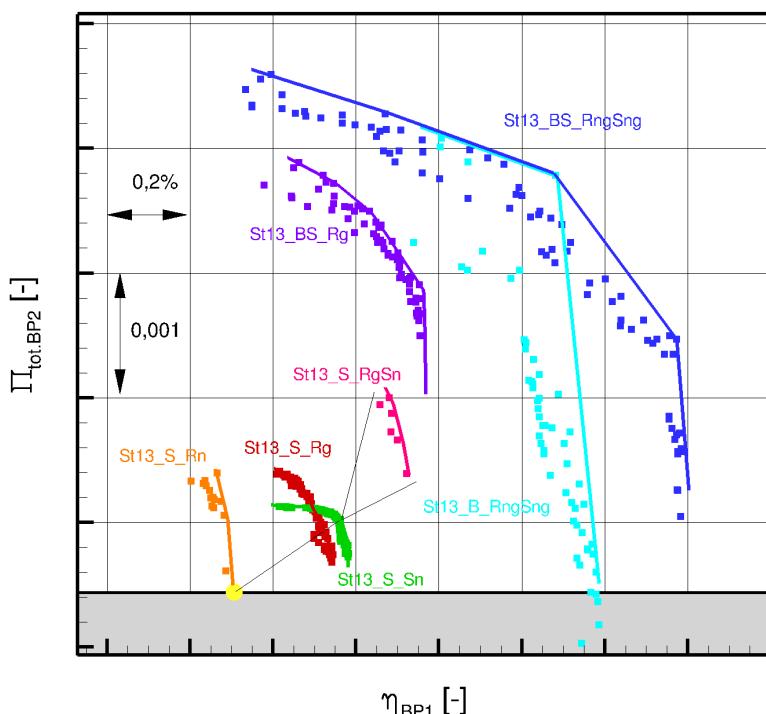


Abbildung 5.23: Paretofronten der Optimierungen von Stufe 13

Diese Gegenüberstellung vermittelt einen Eindruck der Wirksamkeit der Optimierung der verschiedenen Geometriebereiche hinsichtlich einer Wirkungsgradsteigerung. Die Aussagen stimmen dabei qualitativ mit den im Projektteil c erarbeiteten Schlussfolgerungen überein.

Es kann noch angemerkt werden, dass die erzielbaren Wirkungsgradsteigerungen immer von der Wahl der Parameter, deren Freigaben sowie der geforderten Nebenbedingungen abhängen. Die Ergebnisse sind daher als grobe Potentialabschätzung zu deuten.

Bezeichnung	Geometriemodifikation		Bereich				Wirkungsgradgewinn absolut	
	Beschau-felung	Seitenwandprofilierung	Rotor		Stator			
			Gehäuse	Nabe	Gehäuse	Nabe		
St13_BS_RngSng	x	x	x	x	x	x	1,05%	
St13_B_RngSng	x		x	x	x	x	0,85%	
St13_BS_Rg	x	x	x				0,43%	
St13_S_RgSn		x	x			x	0,41%	
St13_S_Rg		x	x				0,20%	
St13_S_Sn		x				x	0,25%	
St13_S_Rn		x		x			0,00%	

Tabelle 5.3: Übersicht der Stufenoptimierungen

5.2.8 Schlussfolgerungen

Die gleichzeitige Optimierung von Schaufelprofilen und Seitenwänden zeigt ein deutlich kleineres Potential als die Summe der Einzeloptimierungen erhoffen lässt. Der größte Teil des Wirkungsgradgewinnes wird durch die Optimierung der Beschaufelung erzielt. Daher sollte bei den Vielstufenoptimierungen auch hierauf der Fokus liegen. Bei der Profilkonturierung kommt erschwerend hinzu, dass bei großen Gradienten der Seitenwand in axialer Richtung der Spalt vergrößert werden müsste, wie detaillierte Untersuchungen im Teilprojekt 1.2.4c ergaben [1].

Da sich insgesamt jedoch größere Wirkungsgradgewinne erzielen lassen, wenn die Profilierung freigegeben wird, soll diese weiterhin berücksichtigt werden. Hierfür können jedoch weniger Parameter herangezogen und einfachere Profilierungen angestrebt werden, sofern diese die wichtigen geometrischen Details, insbesondere die markante Delle nahe der Vorderkante beschreiben können, wie die Ergebnisse der Parameterstudie zur Profilierung unterstreichen.

An den Einsparungen hat die Konturierung keine großen Effekte gezeigt. Es soll daher im Folgenden darauf verzichtet werden und lediglich die Beschaufelung optimiert werden.

Die Optimierung der Beschaufelung zeigte vor allem eine gezielte Entlastung der Rotorspitzenschnitte und Statornabenschnitte. Dies ebenso wie die Profilierung kann deutliche Auswirkungen auf die Spaltströmung nach sich ziehen und damit die Sekundärströmung effektiv beeinflussen.

Da eine Verlustreduktion in einer Schaufelreihe auch Auswirkungen auf die umliegenden Reihen zeigt, müssen alleine aus diesem Grund die Beschaufelungen an den Einsparungen mit optimiert werden. Andernfalls können erzielte Verlustreduktionen durch steigende Verluste in den umliegenden Schaufelreihen kompensiert werden.

Mit Hilfe der Einstufenoptimierungen konnten wichtige Erkenntnisse gesammelt werden, um Mehrstufenoptimierungen zur Reduktion der Randzonenverluste zielgerichtet durchführen zu können. Diese betreffen insbesondere die Wahl der Parameter und der freigegebenen Bereiche.

5.3 Mehrstufenoptimierungen

5.3.1 Aufbau

Für die Vielstufenoptimierungen wurden die letzten 8 Stufen von K1 herangezogen. Es wurden mehrere Optimierungen durchgeführt, wobei Erkenntnisse aus einer Optimierung direkt in die folgende Optimierung einflossen und zu Anpassungen geführt haben.

Größte Herausforderung bei den durchgeführten Vielstufenoptimierungen ist es, diese mit einem vertretbaren Aufwand durchführen zu können. Wie in Kapitel 2.2 erörtert, führen die großen Rechendomänen und die mögliche hohe Anzahl an freien Geometrieparametern schnell zu Optimierungen, die in nicht mehr in einer vertretbaren Zeit und mit vertretbaren Rechenressourcen durchgeführt werden können.

Daher kommen hier zum einen von Seiten des Optimierers Beschleunigungstechniken in Form von Ersatzmodellen und Multi-Fidelity-Strategien zum Einsatz. Zum anderen werden Möglichkeiten der Parameterreduktion eingesetzt, um die Zahl der Parameter zu reduzieren.

5.3.1.1 Betriebspunkte

Wie auch bei den Einzelstufenoptimierungen wurde der Auslegungspunkt zur Bestimmung des Wirkungsgrads berechnet sowie eine angedrosselter massenstromgeregelter Betriebspunkt, um den Totaldruck nahe der Stabilitätsgrenze als Maß für den Arbeitsbereich bei Nominaldrehzahl zu ermitteln.

Dabei hat sich gezeigt, dass die so optimierten hinteren Stufen bei einem Betrieb mit den unveränderten vorderen Stufen dazu führen können, dass bei Heißtagbedingungen (geringerer reduzierter Drehzahl) der Arbeitsbereich gegebenenfalls nicht mehr eingehalten wird und die vorderen Stufen zu hoch belastet werden.

Daher wurde ein dritter angedrosselter Betriebspunkt eingeführt, der bei reduzierter Drehzahl entsprechend einer Umgebungstemperatur von 50°C sicherstellt, dass der Verdichter auch bei geringerer reduzierter Drehzahl einen ausreichenden Arbeitsbereich aufweist.

Für den zusätzlichen Betriebspunkt, der per Druckrandbedingung eingestellt wird, wird gefordert, dass ein Totaldruck aufgebaut wird, der mindestens dem der Referenz entspricht und zudem der Massenstrom nur minimal (-0,5kg/s) geringer ausfallen darf. So werden die vorderen Stufen durch die optimierten Geometrien stets in ähnlicher Weise belastet und laufen in einem vergleichbaren Punkt auf ihrer Charakteristik. Dies stellt sicher, dass der nötige Arbeitsbereich eingehalten wird und kein Wirkungsgradabfall auftritt, auch wenn die vorderen Stufen während der Optimierung nicht mitsimuliert werden.

5.3.1.2 Multi-Fidelity-Prozesskette

Für die Optimierungen wurden zwei Prozessketten erstellt, die eine unterschiedliche Modellgüte aufweisen, indem zwei unterschiedliche Netzauflösungen für die Simulationen verwendet werden (Abbildung 5.24).

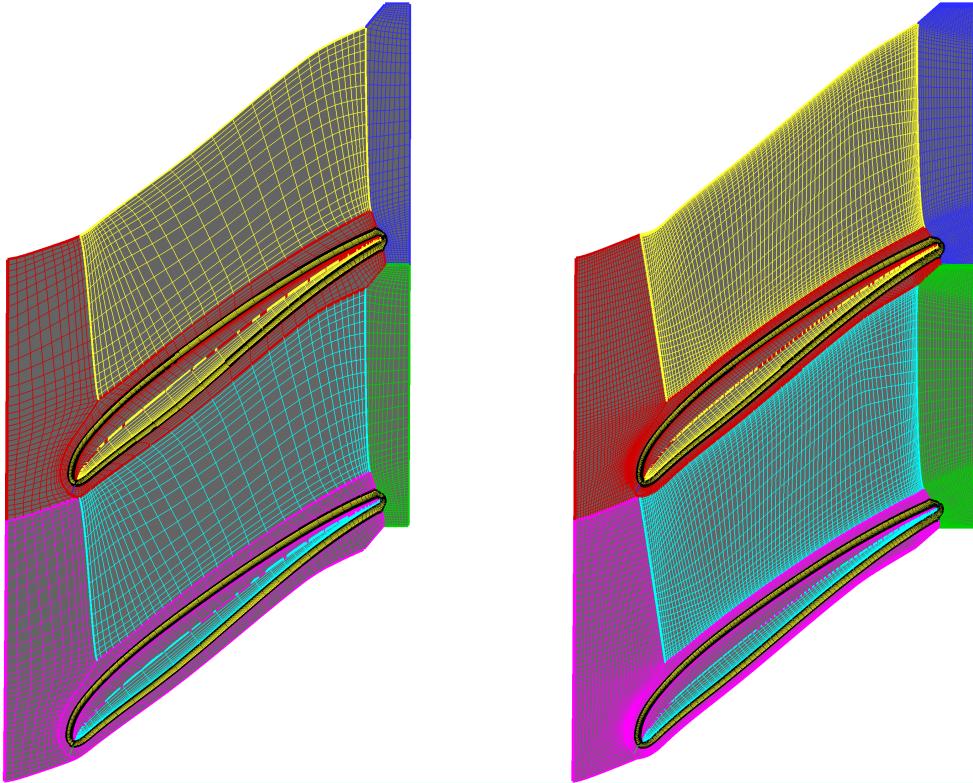


Abbildung 5.24: Netzauflösung Low-Fi (links) und Hi-Fi (rechts) am Beispiel einer Stator-Nabe.

Die geringere Netzauflösung von weniger als 1/8 bei der Low-Fi-Prozesskette im Vergleich zur Hi-Fi-Prozesskette hat signifikante Auswirkungen auf die Simulationsgeschwindigkeit einer neuen Geometrie der Optimierung. Die Beschleunigung liegt deutlich über einer Größenordnung.

So können, zwar mit geringerer Güte, aber dennoch mit für die Optimierung nutzbarer Aussagekraft, deutlich größere Bereiche im Parameterraum mit den gleichen Rechenressourcen überprüft werden. Dies kann insbesondere zu Beginn einer komplexen Optimierung mit großer Parameterzahl zu einem deutlich schnelleren Fortschritt führen.

5.3.1.3 Freie Parameter

Die hohen Anforderungen an die Rechenressourcen bei Vielstufenoptimierungen führen zu dem Bestreben die Parameterzahl möglichst gering zu halten. Ein Ziel der Optimierungen war es daher zu untersuchen, wie die Parameterzahl möglichst gering gehalten werden kann. Es wurden daher mehrfach Anpassungen bei der Parametrisierung vorgenommen.

Zunächst wurde eine Optimierung unter Freigabe der Beschaufelung und Seitenwandprofilierung durchgeführt. Für die Seitenwandprofilierung wurde dabei auf

besonders komplexe Formen verzichtet und stattdessen eine Parametrisierung gewählt, die eine einzelne Welle zulässt. Die Parameterstudien an Stufe 13 haben gezeigt, dass sich hierdurch annähernd gleiche Wirkungsgradgewinne erzielen lassen (vgl. Kap. 5.2.6). Diese wurde per Master-Slave-Ansatz auf alle Stufen angewandt. Dabei wurde jedoch Position und Tiefe der Welle für jede Stufe separat freigegeben, so dass sich die Welle an die jeweiligen Gegebenheiten der Spaltströmung anpassen kann.

Für die Schaufelparametrisierung wurden zunächst die gleichen Parameter, wie bei den Stufenoptimierungen verwendet und diese mittels Bernsteinpolynomen gekoppelt. Insgesamt wurden so ca. 200 freie Parameter verwendet, was zunächst als oberste Grenze angenommen wurde.

Diese Optimierung hat jedoch gezeigt, dass sich durch den Multi-Fidelity-Ansatz sehr schnell Fortschritte erzielen lassen. Und dass wesentliche Verbesserungen auch mit einem Low-Fi-Modell gefunden werden können.

Für die Folgende zweite Vielstufenoptimierung wurde daher eine unabhängige Parametrisierung der Beschaufelung gewählt. Die Gehäuseprofilierung wurde in dieser Optimierung nicht geändert. Das Verhältnis von erwartetem Wirkungsgradgewinn zu notwendigem Aufwand bei einer Gehäuseprofilierung wurde zu diesem Zeitpunkt bereits als deutlich geringer erachtet als zu Beginn des Projektes, so dass der Fokus auf einem Retrofit der Beschaufelung lag.

Zudem führt eine unabhängige Freigabe der Schaufelparameter bereits zu einem drastischen Anstieg der Parameter. Freigegeben wurden neben den Metallwinkeln, ein Saugseitenparameter und Parameter zur Statorfädelung.

Die Auswahl der Parameter basiert zum einen auf einer Analyse des Parametereinflusses auf die Zielfunktionswerte der ersten Optimierung und zum anderen auf Überlegungen zur Festigkeit. Durch die Beschränkung auf die erwähnten Parameter wird eine signifikante Verschlechterung der strukturmechanischen Eigenschaften der Rotoren erheblich unwahrscheinlicher, als wenn auch Parameter wie Sehnenlänge und Rotorfädelung freigegeben wären.

Insgesamt belaufen sich die Parameter bei dieser Parametrisierung auf ca. 350. Aufgrund der vorherigen positiven Erfahrungen kommt erneut ein Multi-Fidelity-Verfahren zum Einsatz. Hierbei wird jedoch zunächst ausschließlich mit dem Low-Fidelity-Modell optimiert und Pareto-Optimale Geometrien lediglich mit der Hi-Fi-Prozesskette nachgerechnet.

Abschließend wird der Frage nachgegangen, welches Potential durch eine Kopplung der Parameter über Bernsteinpolynome verloren geht und das gleiche Setup noch einmal mit durch Bernsteinpolynome gekoppelte Parameter optimiert.

5.3.2 Optimierung von Beschaufelung und Konturierung mit Parameterkopplung

Die erste Vielstufenoptimierung wurde unter Freigabe der Beschaufelung und Seitenwandprofilierung mit 200 freien Parametern, wie in Abschnitt 5.3.1.3 Freie Parameter geschildert, durchgeführt.

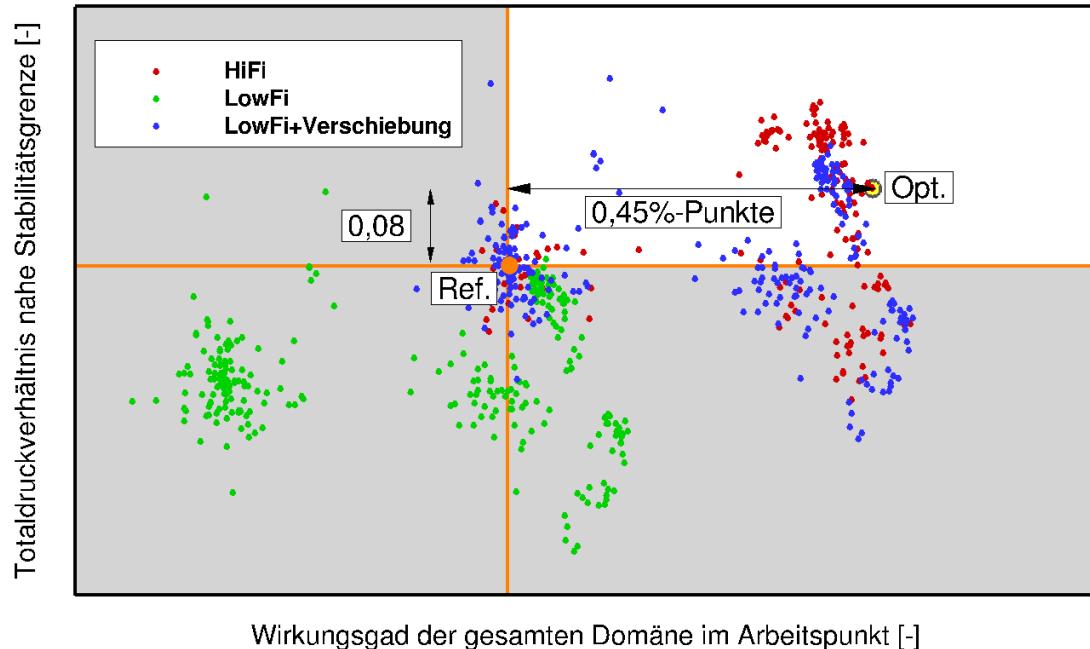


Abbildung 5.25: Darstellbarer Teil der Datenbasis der ersten Vielstufenoptimierung

Abbildung 5.25 zeigt einen Teil der berechneten Datenbasis. Es handelt sich um alle Member der Datenbasis für die Informationen über den Wirkungsgrad im Arbeitspunkt als auch das Totaldruckverhältnis im angedrosselten Betriebspunkt vorliegen.

Zur Beschleunigung des Optimierungsvorganges können Prozessketten vorzeitig abgebrochen werden, wenn bereits klar wird, dass die berechnete Geometrie keinen guten Paretorang erzielen wird. Ist der Wirkungsgrad im Auslegungspunkt beispielsweise schlecht gegenüber den bisherigen Paretooptimalen Geometrien, so wurde die Prozesskette nach der ersten CFD-Simulation abgebrochen. Diese Vorgehensweise ist sinnvoll, wenn wie im vorliegenden Fall die Nebenbedingungen keine allzu große Hürde für die Optimierung darstellen. So wurde die Simulation etlicher Betriebspunkte eingespart, was zum schnelleren Vorankommen der Optimierung beigetragen hat. Die bis zum Abbruch der Prozesskette gewonnenen Informationen über eine Geometrie, beispielsweise der Wirkungsgrad im Auslegungspunkt, werden wie die Daten aller Geometrien, die die Prozesskette komplett durchlaufen haben, ebenfalls zum Training der Ersatzmodelle herangezogen und verbessern diese sukzessive. Lediglich der Datenbasis-Plot (Abbildung 5.25) erscheint etwas ausgedünnt.

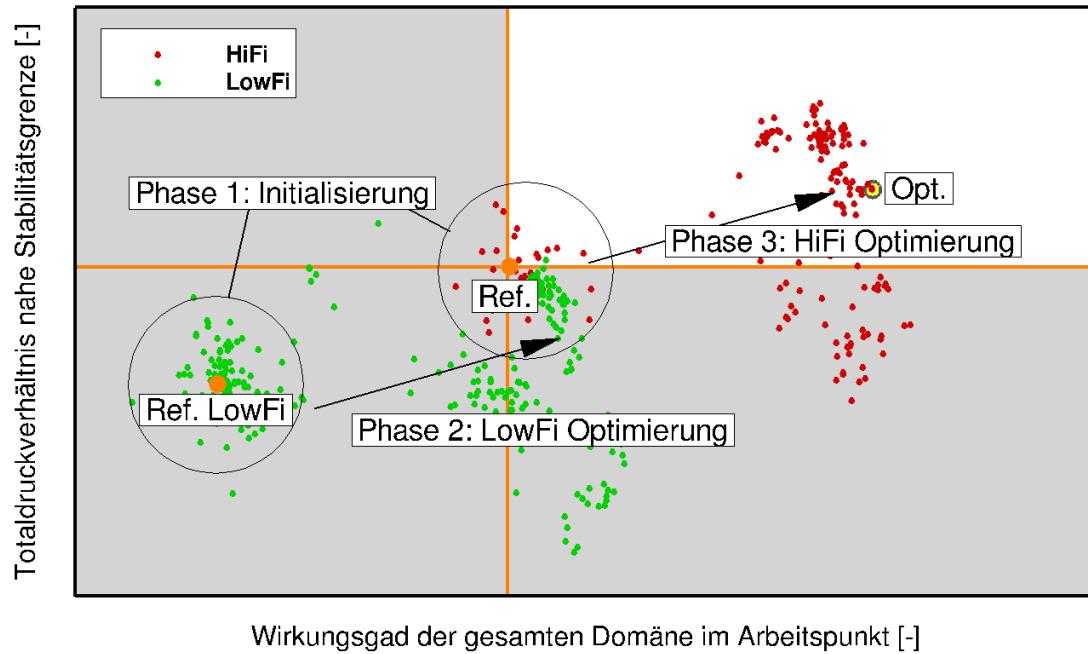


Abbildung 5.26: Phasen der Optimierung

Die Optimierung kann in drei Phasen beschrieben werden (Abbildung 5.26). Die erste Phase besteht in der Initialisierung. Hierbei werden zufällig aus der Referenzgeometrie erzeugte Geometrien berechnet und bilden die Anfangsbasis für die Ersatzmodelle. In der zweiten Phase wurde hauptsächlich die Low-Fidelity-Datenbasis aufgefüllt mit signifikanten Fortschritten im Wirkungsgrad. In der dritten Phase wurden zunehmend Hi-Fidelity-Simulationen durchgeführt, da eine höhere Genauigkeit zum Voranbringen der Optimierung notwendig wurde. Aus den Hi-Fi-Ergebnissen wurde eine Geometrie ausgewählt, die einen möglichst hohen Wirkungsgradgewinn aufweist und gleichzeitig eine ausreichende Stabilität im angedrosselten Betriebspunkt.

Diese Optimierung und der beobachtete Fortschritt während der Optimierung lassen einen deutlichen Vorteil des Multi-Fidelity-Ansatzes gegenüber einer Optimierung ohne mehrere Modellgüten vermuten. Insbesondere das zügige Vorankommen der Optimierung durch Low-Fidelity-Simulationen in der zweiten Phase hat die Entscheidung zum Aufbau der folgenden Optimierung stark beeinflusst.

Die optimierten Rotoren sind alle an der Rotor spitze aufgedreht. Die Statorgehäuseschnitte variieren kontinuierlich über die Stufen von ebenfalls leicht aufgedreht bis leicht zugeschrägt. Die Rotornabenschritte sind alle leicht zugeschrägt und die Statornabenschritte der hinteren Stufen leicht aufgedreht. Weiterhin kann eine Reduktion der Profilkrümmung an den Spalten und ein etwas stärkerer Bow der Statoren auf Spaltseite ausgemacht werden. Abbildung 5.27 zeigt beispielhaft einen vorderen Rotor und Stator der Konfiguration im Vergleich zur Referenz.



Abbildung 5.27: Optimierter Rotor und Stator einer vorderen Stufe der Konfiguration im Vergleich zur Referenz

In Abbildung 5.28 und Abbildung 5.29 sind beispielhaft die Konturierungen derselben Stufe dargestellt. Beide zeigen die typische Delle im Bereich der Vorderkante. Dieses Bild zeigt sich bei allen Stufen der optimierten Konfigurationen.

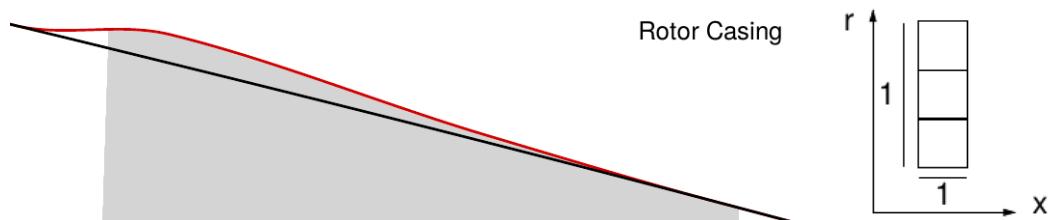


Abbildung 5.28: Optimierte Rotorgehäuseprofilierung

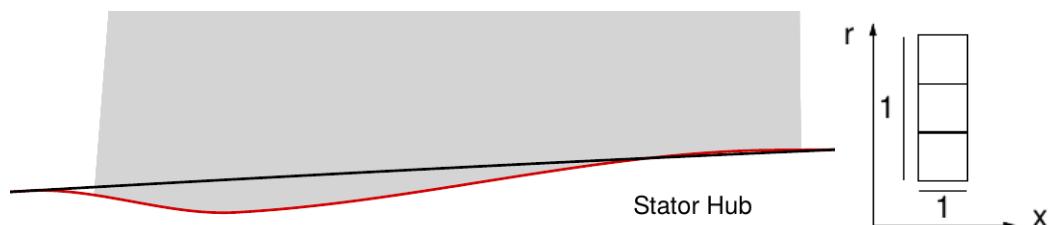


Abbildung 5.29: Optimierte Statornabenprofilierung

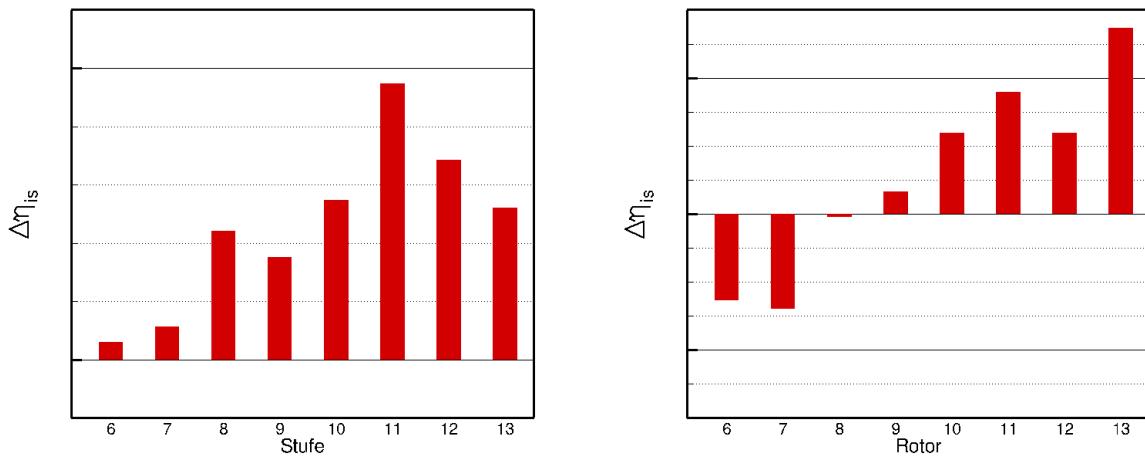


Abbildung 5.30: Änderung des Wirkungsgrads der Stufen (links) und der Rotoren (rechts) der optimierten Konfiguration im Vergleich zur Referenz.

Abbildung 5.30 zeigt, wie sich die Wirkungsgradgewinne auf die Stufen aufteilen und wie sich die Wirkungsgrade der Rotoren ändern. Während die Verluste aller Statoren reduziert werden konnten, verlieren die ersten beiden Rotoren der Konfiguration an Wirkungsgrad. Gleichzeitig lässt sich eine Lastumverteilung zwischen den Stufen beobachten. Die vorderen Stufen der Konfiguration laufen bei einem höheren Totaldruckverhältnis, die hinteren bei einem geringeren (Abbildung 5.31). Das bereits im Verhältnis geringere Totaldruckverhältnis der hinteren Stufen wird demnach tendenziell weiter reduziert (Abbildung 5.32).

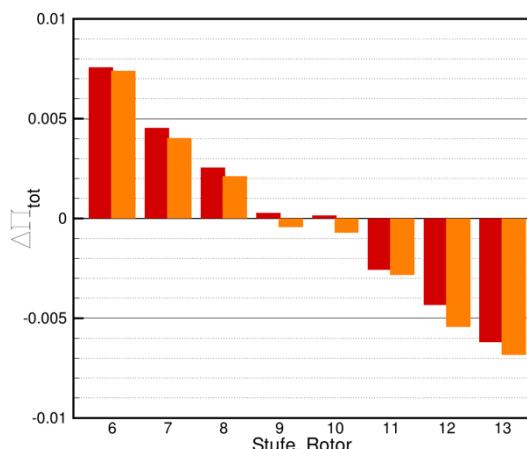


Abbildung 5.31: Änderung des Totaldruckverhältnisses der Stufen (rot) und der Rotoren (orange) der optimierten Konfiguration im Vergleich zur Referenz.

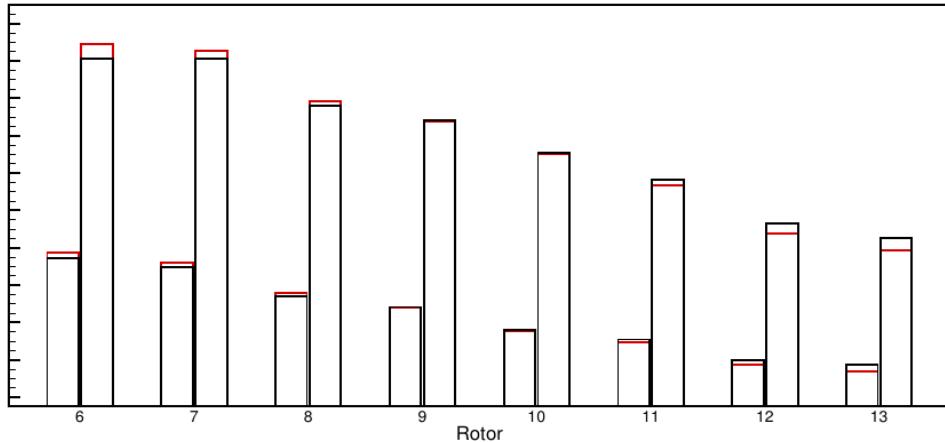


Abbildung 5.32: Statischer Druck (linker Balken) und Totaldruck (rechter Balken) der Referenz (schwarz) und der optimierten Geometrie (rot)

Um zu überprüfen, inwiefern dieses Verhalten überhaupt von den Geometrien der vorderen Stufen der Konfiguration beeinflusst wird, wurde die optimierte Geometrie erneut gerechnet, jedoch mit Stufe 6 aus der Referenzkonfiguration. Hierbei hat sich gezeigt, dass auch so eine Einbuße beim Wirkungsgrad des Rotors 6 zu verzeichnen ist.

Auf Basis der Optimierungsergebnisse wurden verschiedene Korrelationsanalysen der Geometrieparameter mit den Zielfunktionen durchgeführt, um zu analysieren, welche Parameter besonders wichtig sind und welche Parameter keinen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis zeigen und bei einer nötigen Reduktion der Parameterzahl als erste weggelassen werden sollten. Dabei konnten keine Parameter als eindeutig unwichtig ermittelt werden. Es zeigte sich jedoch, dass insbesondere Staffelungswinkel, Vorder- und Hinterkantenwinkel, sowie ein Saugseitensplineparameter eine höhere Korrelation zeigen.

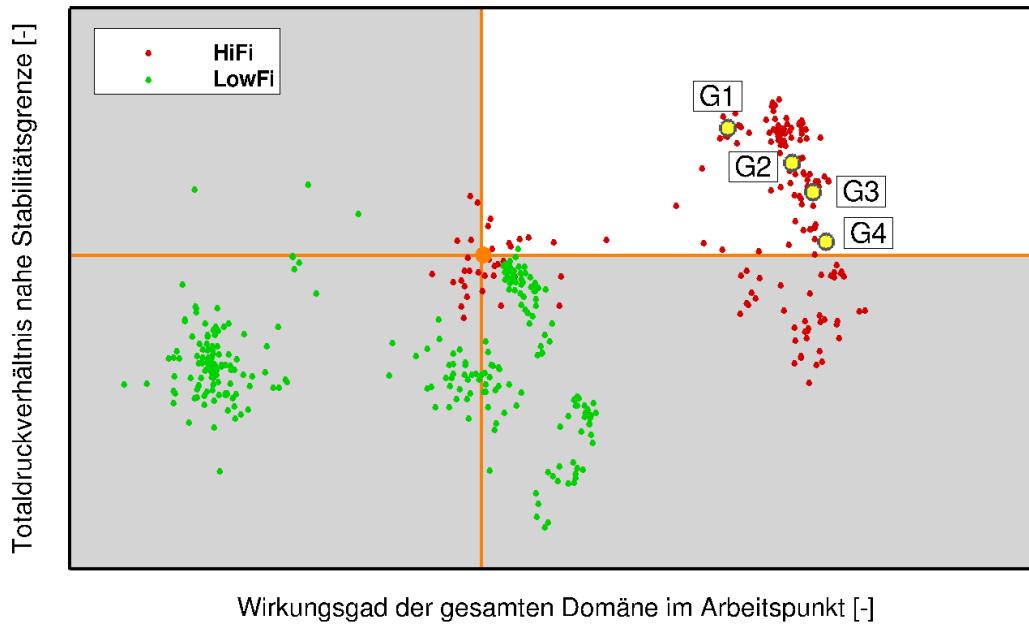


Abbildung 5.33: Ausgewählte Member für die Auswertung

Weiterhin wurde untersucht welche Auswirkungen ein zurücksetzen verschiedener Profilparameter auf die Referenzwerte verursacht. Dazu wurden die optimierten Konfigurationen G1-G4 ausgewählt (Abbildung 5.33) und Vorder- sowie Hinterkantenwinkel, als auch Druck- und Saugseintenparameter nacheinander auf die Referenzwerte gesetzt. Dabei haben sich keine signifikanten Änderungen des Wirkungsgrads gezeigt, jedoch eine Abnahme im Totaldruckverhältnis im BP2, so dass G4 unter den Wert der Referenz abfällt.

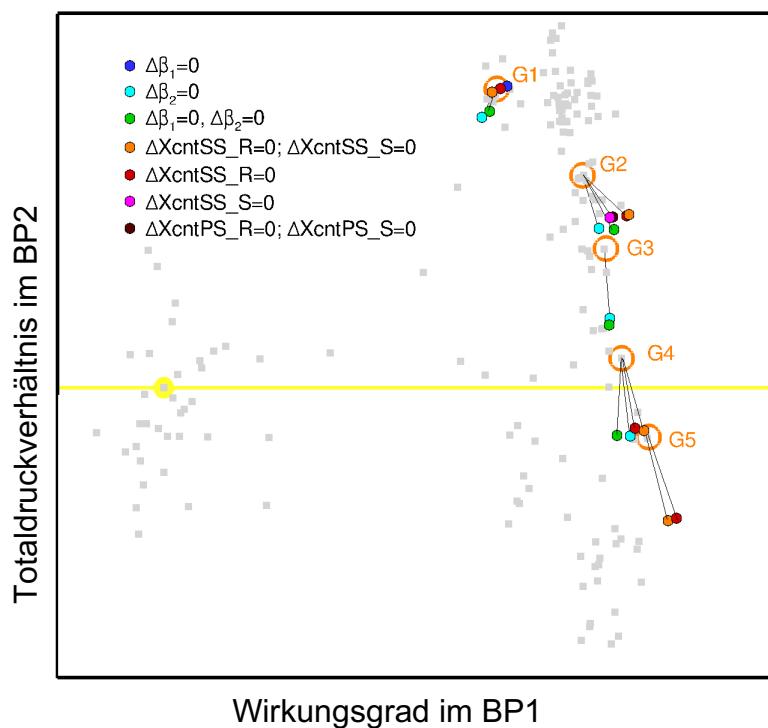


Abbildung 5.34: Parameterstudie: Einzelne Parameter auf Referenzwerte zurücksetzen

5.3.2.1 Gesamtverdichterrechnungen

Um sicherzustellen, dass die optimierten hinteren Stufen zu den vorderen Stufen des Verdichters passen, wurden Kennlinien der Optimierten Geometrien G1-G4 bei ISO-Bedingungen (Abbildung 5.35), sowie bei Heißtagbedingungen (Abbildung 5.36) berechnet.

Die Wirkungsgradsteigerungen werden hierdurch bestätigt. Für die Gesamtkonfiguration beträgt die Wirkungsgradsteigerung im Auslegungspunkt (ca.) durch G1: 0,15%-Punkte, G2: 0,22%-Punkte, G3: 0,23%-Punkte und G4: 0,24%-Punkte.

Die Stabilitätsbereiche werden ebenfalls erfüllt, der Totaldruckaufbau von G4 liegt allerdings insbesondere bei Heißtagbedingungen etwas unter der Referenz.

Auch wenn diese Ergebnisse im Hinblick auf eine Belastung der vorderen Stufen bei Heißtagbedingungen nicht als kritisch zu werten sind, wurde für die folgenden Optimierungen unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Teilvorhaben 1.2.4.c dennoch ein dritter Betriebspunkt zur Sicherstellung des Betriebsbereichs bei Heißtagbedingungen aufgenommen.

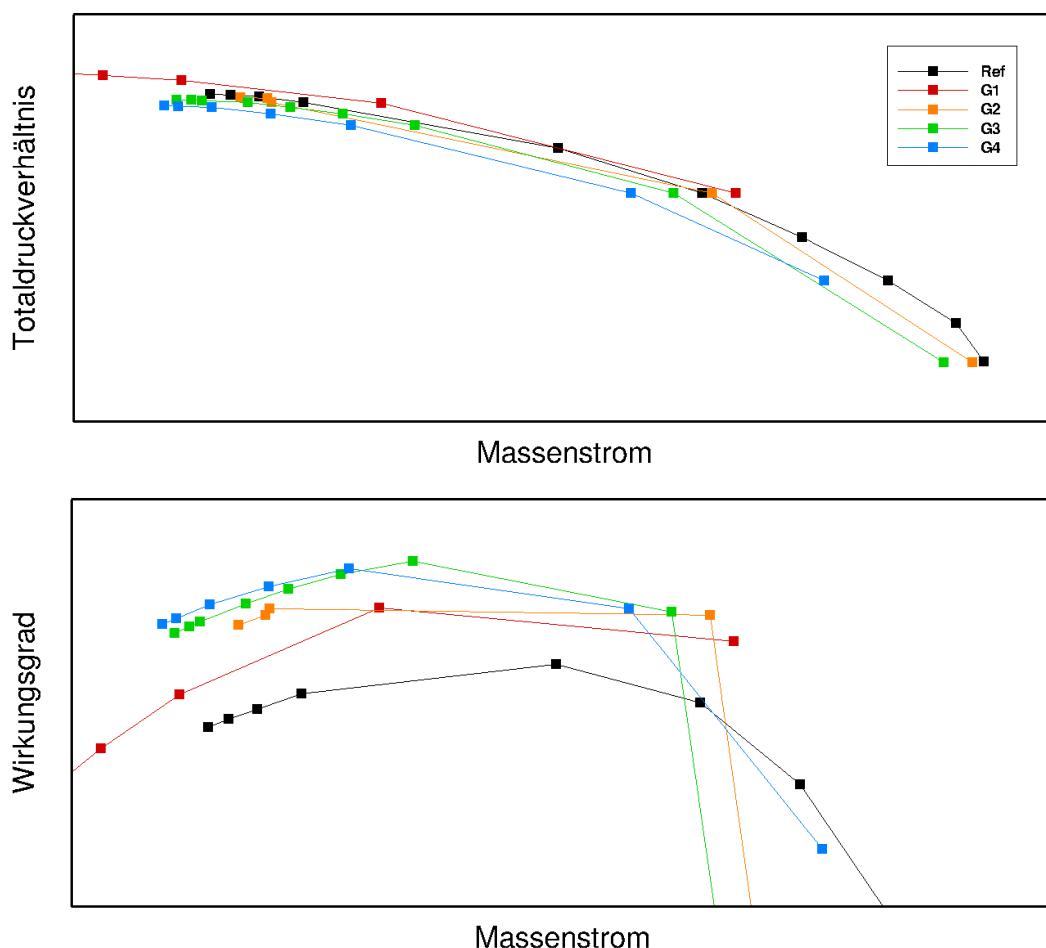


Abbildung 5.35: Kennlinien optimierter Geometrien und der Referenz bei ISO-Bedingungen

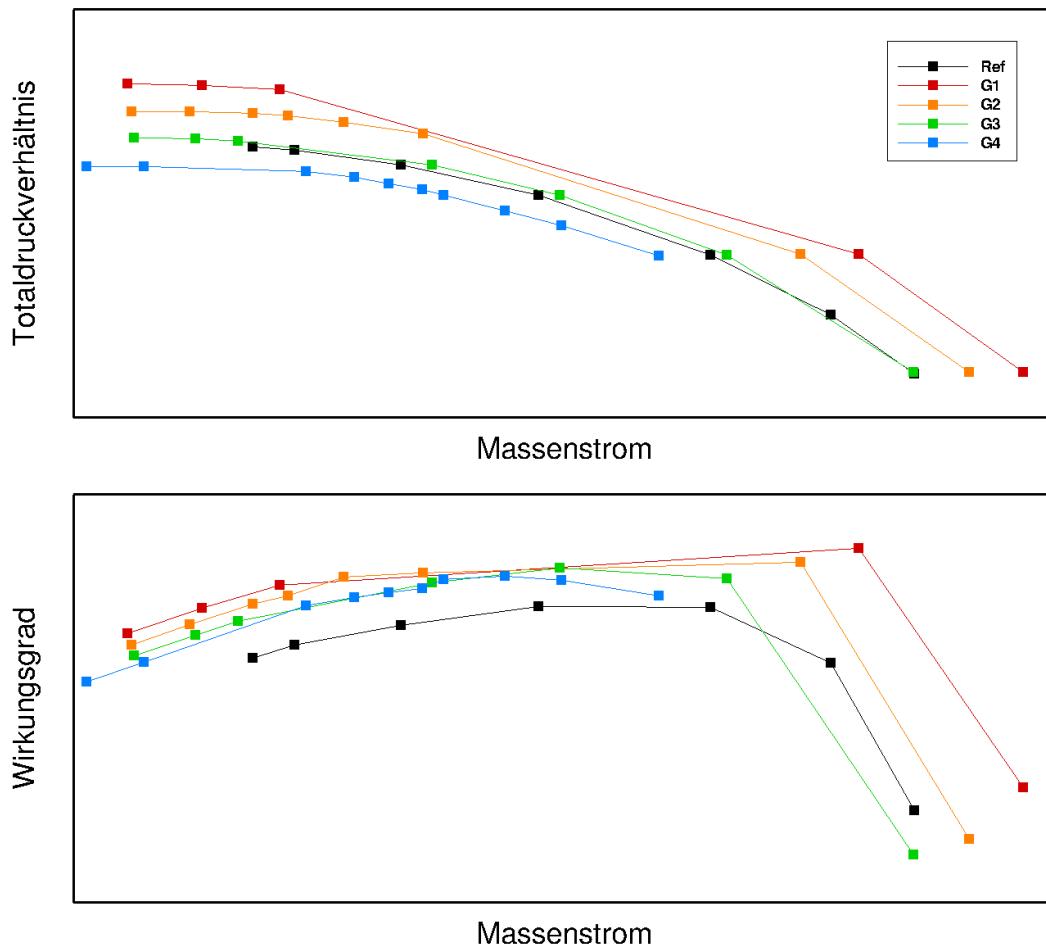


Abbildung 5.36: Kennlinien optimierter Geometrien und der Referenz bei Heißtag-Bedingungen (ISO+35°)

5.3.3 Optimierung der Beschaufelung ohne Parameterkoppelung

Aufgrund der positiven Erfahrungen mit dem Multi-Fidelity-Ansatz bei der Vielstufenoptimierung, wurde eine weitere Optimierung aufgesetzt mit nochmals deutlich erhöhter Parameterzahl. Die Beobachtung des Optimierungsablaufs der vorhergehenden Optimierung, insbesondere das deutliche vorankommen der Optimierung in Phase 2 fast ausschließlich basierend auf Low-Fidelity-Simulationen, wurde hier genutzt, indem zunächst ausschließlich auf Basis der Low-Fidelity-Prozesskette optimiert wurde.

Für diese Optimierung wurde keine Parameterkopplung verwendet und die komplette Beschaufelung in den Randzonen unabhängig voneinander optimiert. Die Zahl der Parameter belief sich auf 350. Die radiale Ausdehnung der Randzonenbereiche wurde variabel gelassen im Gegensatz zur konstanten Ausdehnung von 30% relativer Kanalhöhe bei den vorherigen Optimierungen.

Die Schaufelparameter wurden im Vergleich zur vorherigen Optimierung auf die wichtigsten Parameter reduziert. Dazu zählen Vorder- und Hinterkantenwinkel, Staffelungswinkel, Saugseitensplineparameter und Parameter zur Statorfädelung. Dies geschah auch vor dem Hintergrund, etwaige strukturmechanische Fragestellungen, die sich durch die Schaufelmodifikation ergeben in Grenzen zu halten.

Die Seitenwände wurden in dieser Optimierung nicht modifiziert. Einerseits, da die Zahl der Parameter bereits durch die Freigabe der kompletten Beschaufelung bereits überaus hoch ist. Andererseits, da es sich bei dem Verdichter K1 um einen bereits bestehenden Verdichter handelt, für den Retrofitmaßnahmen möglich sein sollen. Da die Seitenwandprofilierung ein geringeres Potential zur Wirkungsgradsteigerung gezeigt hat und zudem deutlich umfangreichere Umbauten an der Maschine erfordern würde als ein auswechseln der Beschaufelung, wird mit Hinblick auf einen Retrofit auf eine Gehäuseprofilierung verzichtet.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass während der Projektbearbeitung festgestellt wurde, dass die Maschine bis hierhin mit einer älteren Version der Strakgeometrie gerechnet wurde. Dies wurde an dieser Stelle behoben und die folgenden Optimierungen mit der aktuellen Version der Strakgeometrie berechnet. Die Unterschiede sind marginal, bewirken jedoch einen gewissen Offset der Ergebnisse. Da für die hier durchgeföhrten Betrachtungen vor allem das Delta im Wirkungsgrad von Belang ist, kann von einem vernachlässigbaren Einfluss auf die erlangten Ergebnisse ausgegangen werden.

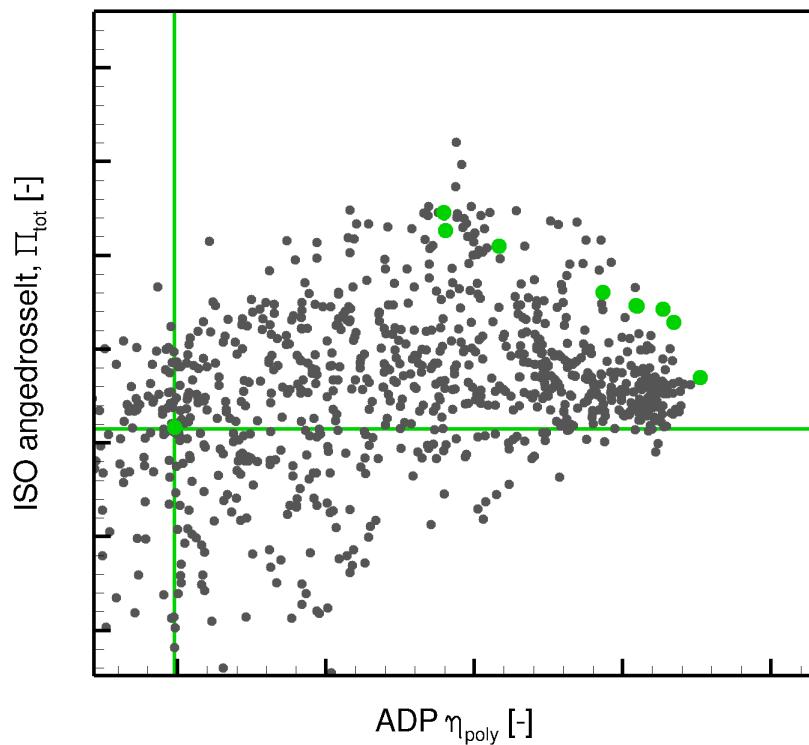


Abbildung 5.37: Optimierungsdatenbasis der zweiten Vielstufenoptimierung mit unabhängiger freigabe aller Schaufelreihen.

Abbildung 5.37 zeigt die Optimierungsdatenbasis. Es wurde eine Wirkungsgradsteigerung von 0,35%-Punkten auf Basis der Low-Fidelity-Rechnungen erzielt. High-Fidelity-Nachrechnung der grün markierten Punkte der Datenbasis ergeben einen identischen Wirkungsgradgewinn.

5.3.4 Optimierung der Beschaufelung mit Parameterkoppelung

In einer weiteren Optimierung wurde untersucht, welchen Einfluss eine Parameterkopplung in Form von Bernsteinpolynomen auf das Ergebnis aufweist. Hierfür wurde wiederum die Beschaufelung optimiert, jedoch eine Kopplung der Parameter über Bernsteinpolynome 2. Ordnung in axialer Richtung vorgenommen. Die Parameter entsprechen denen der vorherigen Vielstufenoptimierung. Durch die Parameterkopplung kann eine Reduktion der freien Parameter auf eine Anzahl von 74 bewirkt werden.

Das Optimierungsergebnis zeigt einen maximalen Wirkungsgradzugewinn von 0,35%-Punkten und damit etwas weniger, als bei der ungekoppelten Optimierung.

In Abbildung 5.38 ist die Änderung der Rotorstaffelungswinkel von Referenz zu optimierter Geometrie der beiden Vielstufenoptimierungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit der gekoppelten Parametrisierung ähnliche Werte für die vorderen und hinteren Rotoren der Konfiguration eingestellt werden, der mittlere Bereich aufgrund der Parameterkopplung von nur 2. Ordnung abweicht.

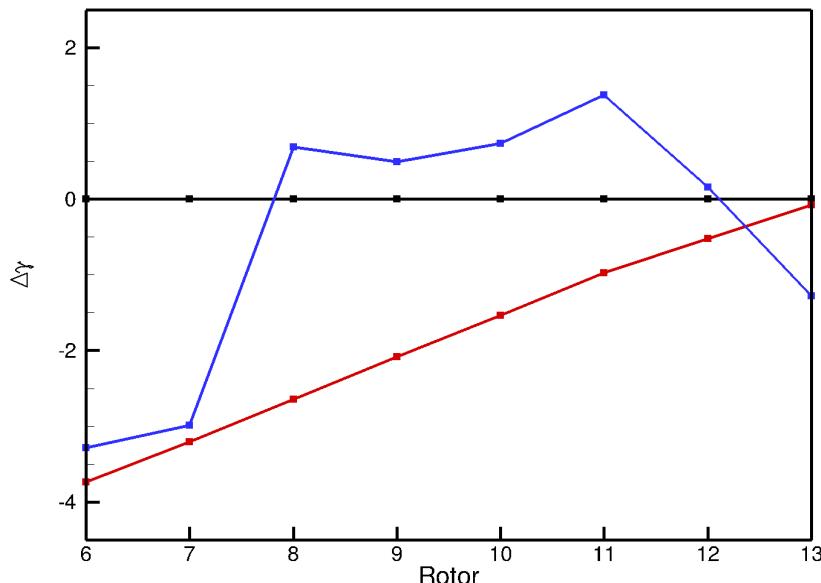


Abbildung 5.38: Änderung des Staffelungswinkels der Rotoren. Schwarz: Referenz, blau: Optimierung 1, rot: Optimierung 2 mit Parameterkopplung über Bernsteinpolynome 2. Ordnung.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung weiterer Parameter. Um den Wirkungsgradgewinn in die Nähe des Wertes ohne Parameterkopplung zu bringen sollte daher der Splinegrad erhöht werden.

5.3.5 Gegenüberstellung der Vielstufenoptimierungen

	Optimie- rungs- domäne	Parameter- koppelung	Freie Para- meter	Modellgüte & Verfahren	Betriebs- punkte	Wirkungsgrad- steigerung (HiFi)
1	Randzonen Schaufeln + Gehäuse- kontur	Bernstein- Polynome + Master- Slave- Ansatz	>200	Multi-Fidelity	2	0,45%-Punkte
2	Randzonen Schaufeln	-	350	Low-Fidelity, High-Fidelity Nachrechnun- gen	3	0,35%-Punkte
3	Randzonen Schaufeln	Bernstein- Polynome	74	Low-Fidelity, High-Fidelity Nachrechnun- gen	3	0,22%-Punkte

Tabelle 5.4: Übersicht der Vielstufenoptimierungen

Tabelle 5.4 zeigt die durchgeführten Vielstufenoptimierungen. Eine Optimierung unter Freigabe der Beschaufelung als auch der Gehäuseprofilierung konnte das beste Ergebnis erzielen, trotz eingesetzter Parameterkopplung. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse möglicherweise außerhalb des technisch machbaren liegen. Dies liegt zum einen an der eingesetzten Profilierung, die gegebenenfalls eine Spaltvergrößerung erfordert, was mit Wirkungsgradeinbußen einhergeht und zum anderen für die Rotorgeometrien, deren Strukturmechanische Eigenschaften nur mit einem einfachen Tool während der Optimierung überprüft wurden. Auch hier wäre gegebenenfalls mit Rückschritten zu rechnen.

Die zweite Optimierung 0,35%-Punkte Wirkungsgradgewinn durch Anpassung der Beschaufelung mit weniger Profilparametern als in der ersten Optimierung, jedoch keiner Koppelung. Durch die Beschränkung der Profilparameter auf Winkel und einen Saugseitenparameter ist nicht mit Rückschritten bei einer ausgiebigen Strukturmechanischen Bewertung zu rechnen.

Eine identische Optimierung mit Koppelung der Profilparameter über Bernsteinpolynome bewirkt einen deutlich geringeren Wirkungsgradgewinn. Ein sinnvoller Kompromiss könnte in der Verwendung eines höheren Splinegrads liegen.

6 Realgasrechnung

Da die Entwicklungen aus den Teilprojekten 1.2.4.a+b erst zum Ende der Projektlaufzeit zur Verfügung standen kamen die Realgasmodelle nicht bei den Optimierungsstudien zum Einsatz. Stattdessen wurde im Nachhinein abgeschätzt, welchen Einfluss die Modelle auf das Ergebnis der Optimierung haben könnten.

Hierfür wurden Gesamtverdichterrechnungen von Referenz und optimierter Geometrie mit den Idealgasmodellen und Realgasmodellen durchgeführt.

Unter Idealgas wird hierbei ein kalorisch perfektes Gas (konstante Wärmekapazität) und Realgas ein thermisch perfektes Gas (Wärmekapazität, innere Energie und Enthalpie sind alleine von der Temperatur abhängig) verstanden.

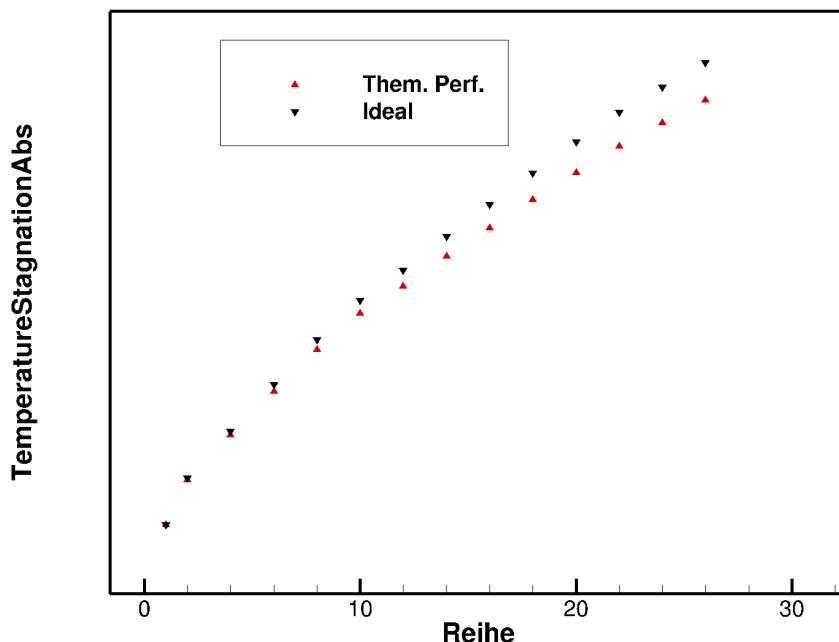


Abbildung 6.1: Verlauf der Totaltemperatur durch die Maschine

Abbildung 6.1 zeigt den Verlauf der Totaltemperatur durch den Verdichter für den Auslegungspunkt berechnet mit Idealgas- und Realgasmodell. Das Delta am Austritt beträgt ca. 35K. Dieser Unterschied nicht vernachlässigbar. Für eine möglichst genaue Bestimmung der Performancegrößen sollte daher das Realgasmodell herangezogen werden.

Bei einer Optimierung kommt es jedoch darauf an, ob das Optimierungsergebnis ein anderes wäre, wenn ein anderes Gasmodell verwendet würde. Hierfür ist es wichtig abzuschätzen, welchen Einfluss eine Geometrieveränderung auf die Temperatursteigerung aufweist.

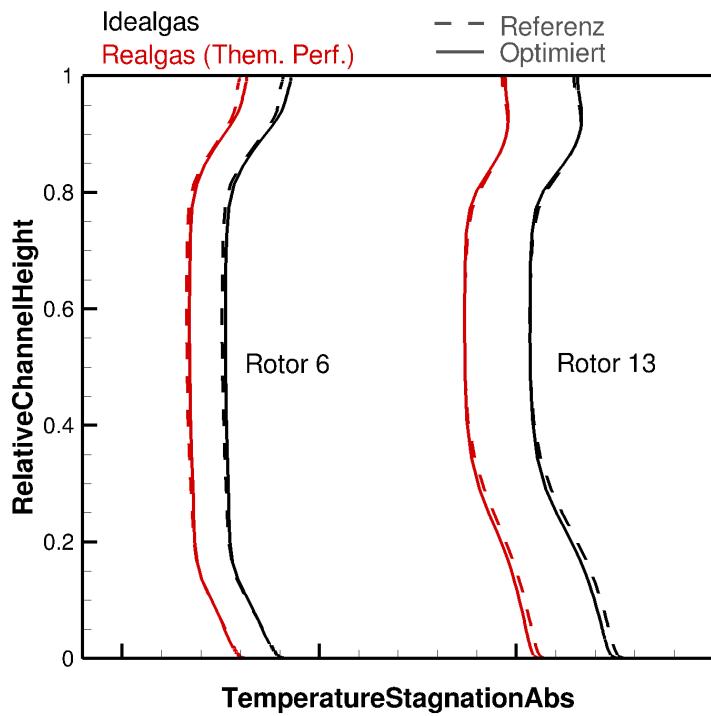


Abbildung 6.2: Totaltemperaturverteilungen von optimierter Geometrie G4 und Referenz unter Verwendung des Idealgas- und Realgasmodells.

Abbildung 6.2 zeigt beispielhaft radiale Verteilungen von zwei Rotoren der Referenzgeometrie und optimierten Geometrie G4. Beide Geometrien wurden jeweils mit Ideal- und Realgasmodell berechnet. Hierbei zeigt sich, dass die Unterschiede durch das Modell zwar deutlich zu sehen sind, die Unterschiede zwischen den Geometrien im Vergleich jedoch sehr gering sind.

Die Wirkungsgraddifferenz zwischen optimierter Geometrie und Referenz ist daher auch für beide Gasmodelle identisch, auch wenn es einen Offset bei den Wirkungsgraden für unterschiedliche Gasmodelle gibt.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Einfluss des Gasmodells auf das Optimierungsergebnis gering ist und keine abweichenden Optimierungsergebnisse bei Einsatz eines Idealgasmodells zu erwarten sind. Für die abschließende Performancebewertung sollte jedoch stets das höherwertigere Modell herangezogen werden.

7 Schlussfolgerungen und Designregeln

Während des Projektes wurden wichtige Erkenntnisse bei diversen Optimierungen der Randzonenbereiche von Einzel- und Vielstufenkonfigurationen und im Austausch mit Teilprojekt 1.2.4.c gesammelt, die gut zu bisherigen Ergebnissen passen. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich hierbei grundsätzliche unterteilen in:

1. Erkenntnisse zur geometrischen Gestaltung der Randzonenbereiche
2. Erkenntnisse zur Optimierung vielstufiger Verdichterkonfigurationen

In dem hier vorliegenden Projekt wurde Verdichter K1 untersucht, im Teilprojekt 1.2.4c zudem Verdichter K2 und K3. Aus diesen Untersuchungen können charakteristische Geometriemodifikationen abgeleitet werden, die für die „konventionellen Designs“ K1, K2, K3 zu Verbesserungen des Wirkungsgrads geführt haben. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch andere konventionelle 2D-Auslegungen auf Basis einer HPA-Beschaukelung durch derartige Modifikationen im Wirkungsgrad gesteigert werden können, ohne an Stabilität einzubüßen.

Die Schaufelmodifikationen können zusammenfasst als ein Aufdrehen der Beschaukelung im Bereich der Spalte (Rotor und Stator) und ein zudrehen im Bereich der Einspannung beschrieben werden. Die Konturierung zeigt als wesentliches Merkmal eine Kanalaufweitung („Delle“) nahe der Schaufelvorderkante auf Spaltseite im Bereich der Spaltwirbelentstehung.

Neben diesen Geometriemodifikationen wird als wichtiges Ergebnis dieses Projektes die Erarbeitung und Beschreibung eines effizienten, robusten Optimierungsprozesses zur Optimierung von Vielstufenkonfigurationen erachtet. Hierbei haben sich folgende Punkte als wichtig herausgestellt:

- Optimierungsdomäne: Schaufelrandzonen (Gehäusekontur nur bedingt)
- Parameterkoppelung für die Optimierung der Beschaukelung mittels Polynomen. Ordnung axial: 3. oder größer.
- Multi-Fidelity-Ansatz mit entsprechenden Ersatzmodellen zur Optimierungsbeschleunigung
- Wahl von geeigneten Betriebspunkten zur Sicherstellung des Arbeitsbereichs im Verbund mit den Frontstufen (ISO / Hot Day /Cold Day)

Bezüglich des Optimierungsprozesses soll an dieser Stelle noch einmal der Erfolg des Multi-Fidelity-Ansatzes hervorgehoben werden, durch den eine deutliche Beschleunigung der Optimierungszeiten erzielt wurde, was wesentlich für die Optimierung mit einer hohen Anzahl an Parametern und großen Simulationsdomänen ist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Projektes war es den Wirkungsgrad eines Verdichters durch die Optimierung der Randzonen der hinteren 8 Stufen zu steigern ohne den Arbeitsbereich zu reduzieren. Hierfür wurde die Beschaufelung als auch die Seitenwandkontur optimiert.

Da Optimierungen einzelner Stufen immer auch die Strömung der benachbarten Stufen beeinflussen und sich auch die optimierte Stufe erst im Verbund korrekt bewerten lässt ist es für ein solches Vorhaben notwendig alle betrachteten Stufen im Verbund zu optimieren.

Dies wirkt sich in zweierlei Hinsicht auf den Rechenaufwand der Optimierungen aus. Zum einen sind die Rechendomänen groß, was einen hohen Simulationsaufwand pro Betriebspunkt erfordert. Zum anderen kann die Anzahl freier Parameter schnell etliche hundert betragen.

Eine besondere Herausforderung war es daher in diesem Projekt die Optimierungen so zu gestalten, dass sie vom Rechenaufwand noch innerhalb eines realisierbaren Rahmes lagen.

Dazu wurden Techniken zur Parameterreduktion erprobt, indem Parameterkopplungen über die Stufen hinweg durch Bernstein-Polynome bzw. einen „Master-Slave-Ansatz“ eingesetzt wurden.

Darüber hinaus wurde eine Multi-Fidelity-Strategie eingesetzt, um optimiererseitig eine Beschleunigung der Optimierung zu erzielen.

Die Optimierungen haben ein deutliches Potential für die Wirkungsgradsteigerung durch Modifikation der Schaufelgeometrien in den Randzonen aufgezeigt. Auch die Seitenwandprofilierung zeigt ein Potential, bei dem es jedoch aufgrund anderer Aspekte, wie Fertigung und Kosten, fraglich erscheint, ob dieses komplett realisiert werden kann.

Die am Verdichter K1 gefundenen Geometriemodifikationen stimmen tendenziell mit denen im Projektteil 1.2.4c am Verdichter K2 gefundenen und am Verdichter K3 überprüften überein, so dass diese in Form von Designrichtlinien für klassisch ausgelegte Verdichter mit HPA Beschaufelung eine gewisse Allgemeingültigkeit bewiesen haben.

Zusammenfassend wurden deutliche Fortschritte bei der Optimierungsstrategie für vielstufige Verdichterkonfigurationen, als auch in Form von Designerkenntnissen erzielt. In Zukunft kann ein konventionell ausgelegter Verdichter auf Basis der Designerkenntnisse modifiziert und unter Anwendung der entwickelten Optimierungsstrategie auf effiziente und robuste Weise bezüglich des Wirkungsgrads optimiert werden.

Aufgrund der guten Ergebnisse beim Einsatz der Multi-Fidelity-Strategie sollte bei der Weiterentwicklung der Optimierungsstrategie verstärkt Nutzen von schnellen Modellen gemacht werden. So könnten zusätzlich Through-Flow verfahren eingebunden werden oder bereits trainierte „Tiefe Neuronale Netze“ helfen Optimierungstendenzen schnell zu erkennen und die Optimierungen so zu beschleunigen, indem beispielsweise Vorhersagen der gesamten Verdichterströmung durch ein mit Hilfe von Deep-Learning-Verfahren trainiertes Tiefes Neuronales Netz getroffen werden (Abbildung 8.1).

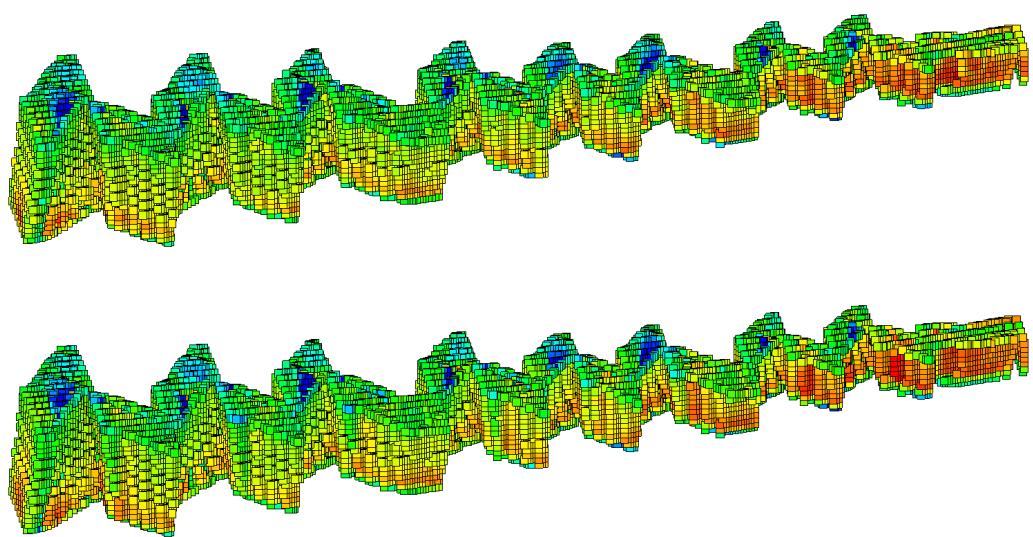


Abbildung 8.1: Vergleich der Axialgeschwindigkeit. Vorhersage durch Tiefes Neuronales Netz (oben), Simulation (unten).

9 Literaturverzeichnis

- [1] S. Klumpp, „Schlussbericht AG Turbo Cooreflex Vorhaben 1.2.4c - Optimierung der hinteren Stufen eines Gasturbinenverdichters bei weiterer Erhöhung der Freiheitsgrade unter Berücksichtigung von Realgaseffekten,“ 2018.
- [2] U. Köller, R. Mönig, B. Küsters und H. A. Schreiber, „Development of Advanced Compressor Airfoils for Heavy-Duty Gas Turbines - Part I: Design and Optimization,“ *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 397-405, 2000.
- [3] B. Küsters, H. A. Schreiber, U. Köller und R. Mönig, „Development of advanced compressor airfoils for heavy-duty gas turbines – Part II: Experimental and theoretical analysis,“ *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 406-414, 2000.
- [4] U. Köller, „Entwicklung einer fortschrittlichen Profilsystematik für stationäre Gasturbinenverdichter,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Forschungsbericht 1999- 20, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 1999.
- [5] E. Kügeler, K. Fakhari und R. Mönig, „Influence of Real Gas Phenomena in a Multistage Gas Turbine Compressor,“ in *ISROMAC12-2008-20029*, 2008.
- [6] G. Kröger, „Beeinflussung von Rotorspaltströmungen durch rotationssymmetrische Gehäusekonturen. Dissertation. DLR-Forschungsbericht. DLR-FB-2010-33,“ 2010.
- [7] G. Kröger, E. Nicke und C. Cornelius, „Beeinflussung der Spaltströmung durch Optimierung der Geometrie im Schaufelspitzenbereich, Abschlussbericht COORETEC- Turbo 1.2.1,“ 2009.
- [8] G. Kröger, C. Voß, E. Nicke und C. Cornelius, „Theory and Application of axisymmetric endwall contouring for compressors,“ in *ASME 11-GT-45624*, 2011.
- [9] G. Kröger, C. Cornelius und E. Nicke, „Rotor Casing Contouring in High Pressure Stages of Heavy Duty Gas Turbine Compressors with Large Tip Clearance Heights,“ in *ASME 09- GT-59626*, 2009.

10 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER VORGEHENSWEISE BEI DER VERDICHTERAUSLEGUNG.....	9
ABBILDUNG 2.2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER RANDZONEVERLUSTE IN EINER VIELSTUFENKONFIGURATION	10
ABBILDUNG 2.3: ENTWICKLUNG DER ENTROPIE AN DEN STUFEAUSTRITTEN ALS MAß FÜR DIE VERLUSTE (LINKS). BEISPIEL EINER MASSENSTROMVERTEILUNG ENTLANG DER KANALHÖHE IN EINER HINTEREN STUFE (RECHTS).....	11
ABBILDUNG 3.1: FLUSSDIAGRAMM VON AUTOOPTI	13
ABBILDUNG 3.2: ERLÄUTERUNG DES EVG.....	14
ABBILDUNG 3.3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES MASTER-SLAVE-ANSATZES ZUR PARAMETERKOPPELUNG	16
ABBILDUNG 3.4: VERSCHIEBUNG DER KONTUR AM RADIALSPALT VON ROTOR (OBEN) UND STATOR (UNten) IN AXIALER RICHTUNG BIS ZUM KONTAKT MIT DER PROFILIERTEN SEITENWAND ZUR ERMITTlung DER MAXIMALEN AXIALEN VERSCHIEBbarkeit.....	17
ABBILDUNG 3.5: MINIMALER ABSTAND IM RADIALSPALT ZWISCHEN BESCHAUFElung UND SEITENWAND BEI EINER AXIALEN VERSCHIEBUNG VON BESCHAUFElung UND SEITENWAND RELATIV ZUEINANDER.	17
ABBILDUNG 4.1: DIMENSIONSLOSER WANDABSTAND Y+	18
ABBILDUNG 4.2: NUMERISCHER SETUP MIT MISCHUNGSEBENEN UND ZAPFLUFTENTNAHMESTELLEN	19
ABBILDUNG 4.3: KONSTRUKTION EINER FILLET-KONTUR ABBILDUNG 4.4: BEISPIEL EINES FILLETS AM STATOR	19
ABBILDUNG 5.1: HAUPTSCHRITTE DER OPTIMIERUNGSPROZESSKETTE	22
ABBILDUNG 5.2: VERGLEICH ZWEIER MÖGLICHER ROTORGEOMETRIEN DURCH DIE EINGESETZE PARAMETRISIERUNG.....	23
ABBILDUNG 5.3: CHARAKTERISTIKEN DER VIELSTUFENKONFIGURATION (STUFE 6-13) UND VON STUFE 13 MIT UNTERSCHIEDLICHEN EINTRITSRANDBEDINGUNGEN.	25
ABBILDUNG 5.4: OPTIMIERUNGSDATENBASIS DER OPTIMIERUNG 1: SEITENWANDPROFILIERUNG MIT DLR TOOLS	25
ABBILDUNG 5.5: PARETO-OPTIMALE GEOMETRIEN OHNE (LINKS) UND MIT (RECHTS) MASSENSTROMRESTRIKTION.	26
ABBILDUNG 5.6: VERLUSTKOEFFIZIENTEN VON ROTOR UND STATOR UND WIRKUNGSGRAD DER STUFE FÜR REFERENZ UND DREI AUSGEWÄHLTE GEOMETRIEN ENTLANG DER PARETOFRONT OHNE MASSENSTROMRESTRIKTION.	27
ABBILDUNG 5.7: PARETOFRONTEN DER GEHÄUSEKONTUROPTIMIERUNGEN SOWIE ERGEBNISSE EINER KOMBINATIONSSTUDIE (St13_S_RGSN).....	28
ABBILDUNG 5.8: STREICHLINIEN UND WANDSCHUBSPANNUNG AUF DER SAUGSEITE DES REFERENZROTORS (LINKS) UND EINES ROTORS MIT NABENPROFILIERUNG (RECHTS).....	29
ABBILDUNG 5.9: ÄNDERUNG DER VERLUSTE UND DES STUFENWIRKUNGSGRADS DURCH EINE NABEN- UND GEHÄUSEPROFILIERUNG AM ROTOR.	29
ABBILDUNG 5.10: ÄNDERUNG DER VERLUSTE UND DES STUFENWIRKUNGSGRADS DURCH GEHÄUSEPROFILIERUNGEN AM ROTOR....	30
ABBILDUNG 5.11: OPTIMIERTE GEOMETRIEN IM VERGLEICH ZUR REFERENZ. GRAU: REFERENZ, ROT: OPTIMIERT.	31
ABBILDUNG 5.12: OPTIMIERTE GEOMETRIEN IM VERGLEICH ZUR REFERENZ. GRAU: REFERENZ, ROT: OPTIMIERT.	32
ABBILDUNG 5.13: ÄNDERUNG DER VERLUSTE UND DES STUFENWIRKUNGSGRADS DURCH SCHAFELOPTIMIERUNG UND KOMBINIerte SCHAUFEL+SEITENWANDPROFIL-OPTIMIERUNG (KOMBI).....	32
ABBILDUNG 5.14: ERSTE PARAMETERSTUDIE - GEOMETRIEN	33
ABBILDUNG 5.15: ERSTE PARAMETERSTUDIE - PERFORMANCEDATEN	33
ABBILDUNG 5.16: ERSTE PARAMETERSTUDIE – RADIAL VERTEILUNGEN.....	34
ABBILDUNG 5.17: ZWEITE PARAMETERSTUDIE - GEOMETRIEN	34
ABBILDUNG 5.18: ZWEITE PARAMETERSTUDIE - PERFORMANCE DATEN	34
ABBILDUNG 5.19: DRITTE PARAMETERSTUDIE - GEOMETRIEN.....	35
ABBILDUNG 5.20: DRITTE PARAMETERSTUDIE - PERFORMANCE DATEN.....	35
ABBILDUNG 5.21: VIERTE PARAMETERSTUDIE - GEOMETRIEN.....	35
ABBILDUNG 5.22: VIERTE PARAMETERSTUDIE – PERFORMANCE DATEN. TEST 1: DURCHGEHENDE LINIEN. TEST 2: GESTRICHELTE LINIEN.....	36
ABBILDUNG 5.23: PARETOFRONTEN DER OPTIMIERUNGEN VON STUFE 13.....	37
ABBILDUNG 5.24: NETZAUFLÖSUNG LOW-Fi (LINKS) UND Hi-Fi (RECHTS) AM BEISPIEL EINER STATOR-NABE.....	40
ABBILDUNG 5.25: DARSTELLBARER TEIL DER DATENBASIS DER ERSTEN VIELSTUFOPTIMIERUNG	42
ABBILDUNG 5.26: PHASEN DER OPTIMIERUNG.....	43
ABBILDUNG 5.27: OPTIMIERTER ROTOR UND STATOR EINER VORDEREN STUFE DER KONFIGURATION IM VERGLEICH ZUR REFERENZ .44	
ABBILDUNG 5.28: OPTIMIERTE ROTORGEHÄUSEPROFILIERUNG	44
ABBILDUNG 5.29: OPTIMIERTE STATORNABENPROFILIERUNG	44
ABBILDUNG 5.30: ÄNDERUNG DES WIRKUNGSGRADS DER STUFEN (LINKS) UND DER ROTOREN (RECHTS) DER OPTIMIERten KONFIGURATION IM VERGLEICH ZUR REFERENZ.	45
ABBILDUNG 5.31: ÄNDERUNG DES TOTALDRUCKVERHÄLTNISSES DER STUFEN (ROT) UND DER ROTOREN (ORANGE) DER OPTIMIERten KONFIGURATION IM VERGLEICH ZUR REFERENZ.	45

ABBILDUNG 5.32: STATISCHER DRUCK (LINKER BALKEN) UND TOTALDRUCK (RECHTER BALKEN) DER REFERENZ (SCHWARZ) UND DER OPTIMIERTEN GEOMETRIE (ROT)	46
ABBILDUNG 5.33: AUSGEWÄHLTE MEMBER FÜR DIE AUSWERTUNG	47
ABBILDUNG 5.34: PARAMETERSTUDIE: EINZELNE PARAMETER AUF REFERENZWERTE ZURÜCKSETZEN	47
ABBILDUNG 5.35: KENNLINIEN OPTIMIERTER GEOMETRIEN UND DER REFERENZ BEI ISO-BEDINGUNGEN	48
ABBILDUNG 5.36: KENNLINIEN OPTIMIERTER GEOMETRIEN UND DER REFERENZ BEI HEIßTAG-BEDINGUNGEN (ISO+35°)	49
ABBILDUNG 5.37: OPTIMIERUNGSDATENBASIS DER ZWEITEN VIELSTUFENOPTIMIERUNG MIT UNABHÄNGIGER FREIGABE ALLER SCHAUFELREIHEN	50
ABBILDUNG 5.38: ÄNDERUNG DES STAFFELUNGSWINKELS DER ROTOREN. SCHWARZ: REFERENZ, BLAU: OPTIMIERUNG 1, ROT: OPTIMIERUNG 2 MIT PARAMETERKOPPLUNG ÜBER BERNSTEINPOLYNOME 2. ORDNUNG.....	51
ABBILDUNG 6.1: VERLAUF DER TOTALTEMPERATUR DURCH DIE MASCHINE	53
ABBILDUNG 6.2: TOTALTEMPERATURVERTEILUNGEN VON OPTIMIERTER GEOMETRIE G4 UND REFERENZ UNTER VERWENDUNG DES IDEALGAS- UND REALGASMODELLS.	54
ABBILDUNG 8.1: VERGLEICH DER AXIALGESCHWINDIGKEIT. VORHERSAGE DURCH TEIFES NEURONALES NETZ (OBEN), SIMULATION (UNTEN).	57

11 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1.1: ÜBERSICHT DER ARBEITSPAKETE.....	6
TABELLE 4.1: RECHENNETZTOPOLOGIEN	18
TABELLE 5.1: ÜBERSICHT DER OPTIMIERUNGEN VON STUFE 13 UND DER VERWENDETEN FREIGABEN	24
TABELLE 5.2: PROFILPARAMETERFREIGABEN	31
TABELLE 5.3: ÜBERSICHT DER STUFENOPTIMIERUNGEN	38
TABELLE 5.4: ÜBERSICHT DER VIELSTUFENOPTIMIERUNGEN	52