

Abschlussbericht
Forschungsvorhaben 03ET7040L

COOREFLEX-Turbo

Vorhaben-Nr. 1.3.1b

„Robustes Aero Design“



Florian Danner, Sebastian Mann

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

MTU Aero Engines AG
Dachauer Straße 665
80995 München

04.09.2018

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
	A. Projektstrukturplan	5
	B. Balken/Meilensteinplan	6
	C. Erreichte Ergebnisse	7
	1.1.1 AP1 Optimierungsprozess	7
	1.1.2 AP2 Iteratoren	7
	1.1.3 AP3 Unterstützung der Validierung	7
2	Technische Darstellung der Arbeitspakete	8
	D. AP1 Optimierungsprozess	8
	2.1.1 AP1.1 Toolentwicklung	8
	2.1.2 AP1.2 Sensitivitätsbestimmung & Schrittweitendefinition	12
	2.1.3 AP1.3 Ziele- und Nebenbedingungen	17
	2.1.4 AP1.4 Erweiterung auf verschiedene Profiltypen	19
	E. AP2 Iteratoren	22
	3.1.5 AP2.1 Nutzbarmachen von Optimierungsmethoden	22
	3.1.6 AP2.2 Auswahl und Umsetzung	24
	F. AP3 Unterstützung der Validierung	28
3	Literaturverzeichnis	31

1 Einleitung

In den nächsten Jahrzehnten wird weiterhin in grösserem Umfang der Bedarfs an elektrischer Energie durch fossile Brennstoffe gedeckt werden. Deshalb kommt der Wirkungsgradverbesserung der hierfür eingesetzten Maschinen eine hohe Bedeutung zu.

Die Gasturbine stellt für das Erreichen dieser Ziele einen der Schlüsselfaktoren dar. Einerseits weisen Kombikraftwerke aus Gas- und Dampfturbinen (GuD) unter den fossil befeuerten Kraftwerken die höchsten Wirkungsgrade und damit die niedrigsten CO₂-Emissionen auf. Hierbei wird ca. 2/3 der im GuD-Prozess erzeugten elektrischen Energie durch die Gasturbine bereitgestellt. Andererseits ist der Bedarf an Regelleistung im Stromnetz durch die zunehmende Einspeisung von Strom aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen mittlerweile stark gestiegen. Dieser Bedarf wird sich im Zuge der angestrebten Energiewende in Zukunft weiter erhöhen. Aufgrund ihrer kurzen Startzeiten ist die Gasturbine ein adäquates Instrument diese Regelleistung bereitzustellen.

Hiermit ergibt sich für die Gasturbine neben der Forderung nach einem hohen Wirkungsgrad auch die Forderung nach einer hohen Betriebsflexibilität. Diese wird insbesondere beim Teillastverhalten benötigt, um die Leistungsschwankungen der erneuerbaren Energien ausgleichen zu können. Weiterhin muss die Gasturbine über eine hohe Betriebssicherheit und einen geringen Schadstoffausstoß verfügen.

Damit zukünftige Gasturbinen diesen Anforderungen gerecht werden können, ist es notwendig, alle Komponenten der Gasturbine hinsichtlich der o.g. Ziele zu optimieren. Dem Gasturbinenverdichter kommt hierbei eine zentrale Rolle zu. Neben dem hohen Einfluss des Verdichterwirkungsgrades auf den Gesamtwirkungsgrad ist insbesondere die Betriebsflexibilität der Gasturbine stark durch den Verdichter bestimmt, da die aerodynamische Stabilitätsgrenze des Verdichters die Limitierung des Arbeitsbereichs der Maschine darstellt. Da der Anteil der Teillaststunden im Gasturbinenbetrieb aufgrund der zuvor erwähnten Leistungsschwankungen der erneuerbaren Energien gegenüber den Volllaststunden zunehmen wird, stellt sich für die Auslegung des Verdichters neben einem möglichst hohen Wirkungsgrad im Auslegungspunkt bei Volllast die Aufgabe, einen niedrigen Teillastbetrieb zu ermöglichen, bei dem der Wirkungsgrad ebenfalls auf einem hohen Ni-

veau liegt. Dies erfordert einen vergrößerten stabilen Regelbereich des Verdichters bei verringerten Strömungsverlusten im gesamten Arbeitsbereich.

Um dies zu erreichen, ist neben der grundlegenden Auslegung auf einen größeren Arbeitsbereich auch eine höhere Robustheit der Auslegung notwendig. Nur so können die aerodynamischen Anforderungen auch unter der realen Varianz der Geometrie in Betrieb und Fertigung sichergestellt werden.

Die Ergebnisse dieses Vorhabens sollen dazu beitragen, eine solche robuste Auslegung bzw. Optimierung zu erreichen. Somit können Stabilität und Wirkungsgrad zukünftiger Verdichter im Hinblick auf das erhöhte Anforderungsprofil der Gasturbine verbessert werden.

Zusammenfassung

A. Projektstrukturplan

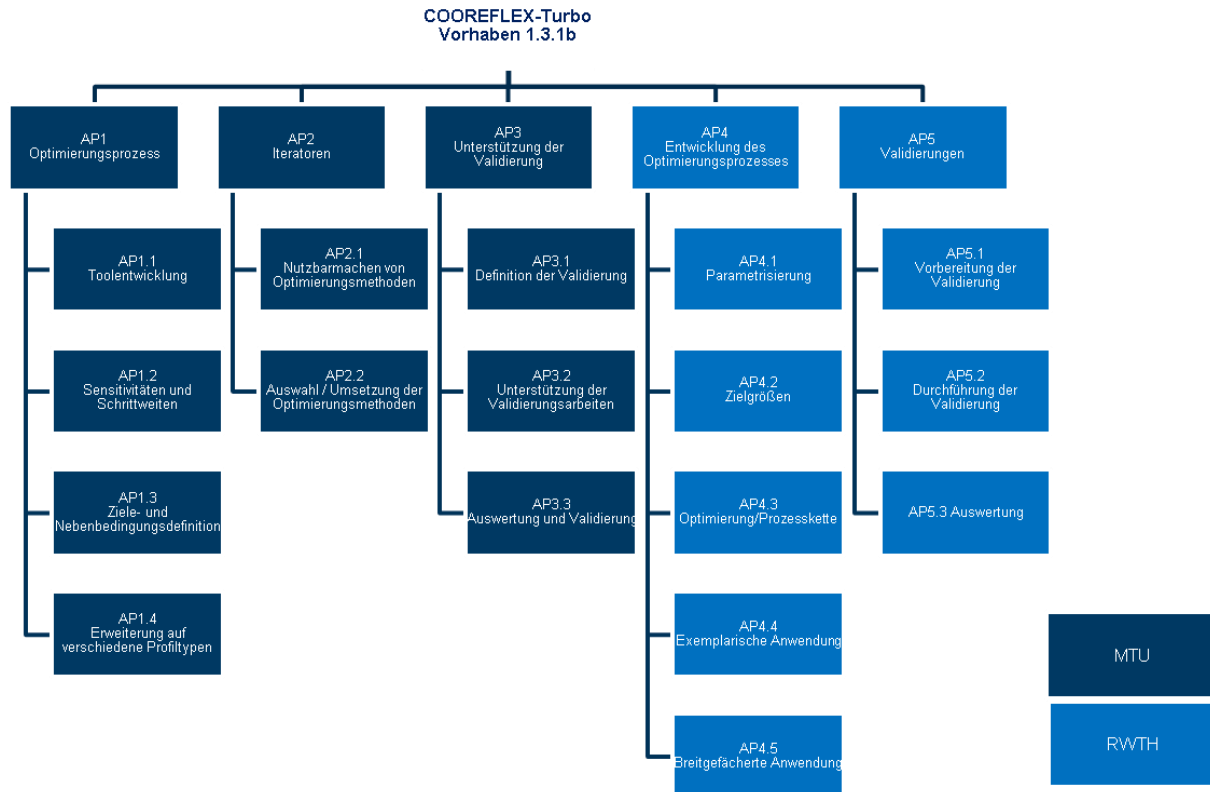


Abbildung 1: Projektstrukturplan

B. Balken/Meilensteinplan

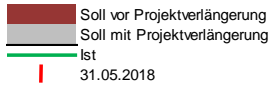
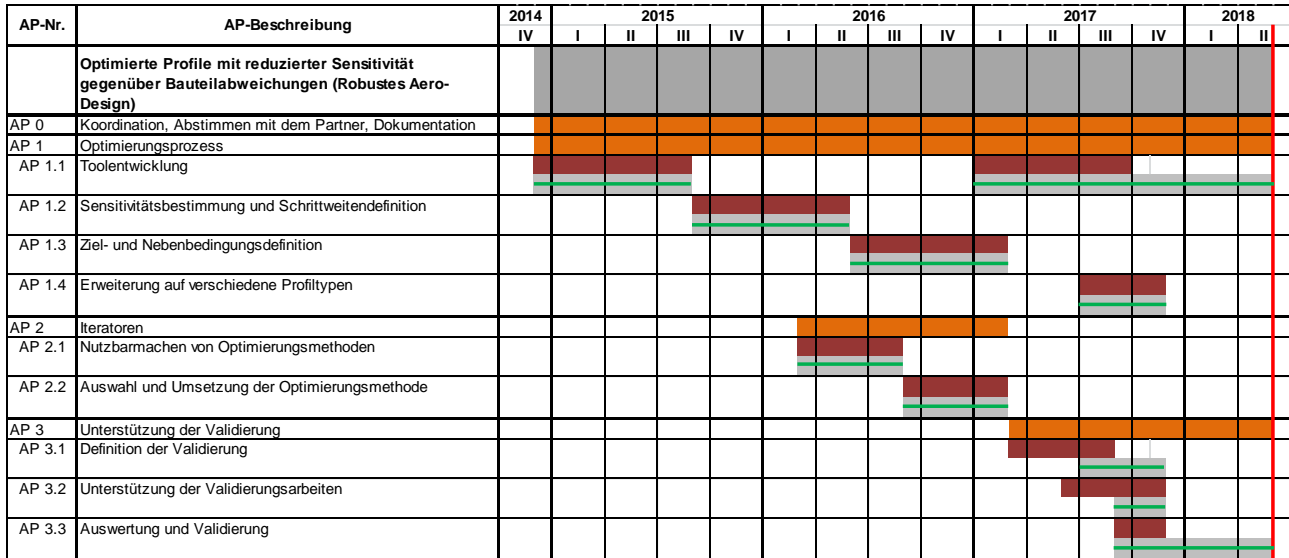


Abbildung 2: Balken-/Meilensteinplan

C. Erreichte Ergebnisse

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurden Methoden entwickelt, die als Grundlage für Robustheitsbewertungen von Turbomaschinenentwürfen hinsichtlich ihrer aerodynamischen Güte dienen. In Ergänzung zur punktuellen Maximierung eines Zielkriteriums tritt damit als zusätzliches Ziel oder Nebenbedingung eine Forderung nach Resistenz des Zielkriteriums auf schwankende Randbedingungen in Erscheinung.

1.1.1 AP1 Optimierungsprozess

Einer der zentralen Bausteine zur Robustheitsbewertung von Entwürfen ist eine Prozesskette, welche die Berücksichtigung von unsicheren Informationen zulässt. Dazu wurde die existierende, für Optimierungsaufgaben entwickelte Prozesslandschaft OPUS sowohl um probabilistische Methoden als auch um zusätzliche Parallelisierungsoptionen erweitert. Insbesondere wurde ein Prozess zur parametrischen Analyse und Synthese von Schaufelgeometrien etabliert, der den Anforderungen einer probabilistischen Betrachtungsweise gerecht wird.

1.1.2 AP2 Iteratoren

Als Grundlage für eine industrielle Anwendung der entwickelten Methoden wurden verschiedenartige Maße zur Quantifizierung der Robustheit untersucht sowie die Eignung von gradientenbasierten Optimierungsverfahren im Vergleich zu genetischen Algorithmen im Hinblick auf eine robuste Optimierung geprüft. Insbesondere bei Mehrzieloptimierungen ist das globale Suchverhalten genetischer Algorithmen hinsichtlich der numerischen Effizienz sowie der Bewertung der Robustheit eines Entwurfes vorteilhaft.

1.1.3 AP3 Unterstützung der Validierung

Aus einer realitätsnahen Anwendung der entwickelten Prozesse konnten grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden, die eine Stoßrichtung für einflussreiche Entwurfsparameter zur robusten Auslegung vorgeben. Die Ergebnisse trugen ferner zur Plausibilisierung des Gesamtprozesses und im Speziellen zur gewählten Vorgehensweise bei der Robustheitsbewertung bei.

2 Technische Darstellung der Arbeitspakete

D. AP1 Optimierungsprozess

2.1.1 AP1.1 Toolentwicklung

Optimierungsframework OPUS

Um den Anforderungen von aerodynamischen Geometrieoptimierungen unter Berücksichtigung von Robustheitsaspekten gerecht zu werden, waren im Bereich der Toolentwicklung neben der Entwicklung von neuen Prozesskettenbausteinen (siehe Airfoil-Modifier) auch Erweiterungen des Optimierungsframeworks OPUS notwendig. Mithilfe von OPUS werden – aufbauend auf verschiedenen Tools und Bausteinen – Prozessketten definiert, welche automatisiert abgearbeitet werden. Da in Hinblick auf Robustheitsbetrachtungen mehrere Betriebspunkte bewertet werden müssen, stellt das auch neue Anforderungen an die Zusammenstellung der Prozesskette.

Im einfachsten, jedoch auch ressourcen-intensivsten, Fall könnte je Betriebspunkt eine komplette Prozesskette (Grobbausteine: Geometriegenerierung, Vernetzung, Berechnung, Auswertung) parallel durchgeführt werden. Um jedoch unnötig Prozesskettenschritte, insbesondere im Hinblick auf die Optimierung unter Berücksichtigung vieler Betriebspunkte, zu vermeiden, wurden sogenannte konfigurierbare Gateways in die aerodynamische Standardprozesskette implementiert. Diese Gateways ermöglichen eine Verzweigung innerhalb einer Prozesskette und somit eine Aufteilung der Prozesskette in einen gemeinsamen und einen zu parallelisierenden Anteil. Es wurden drei konfigurierbare Gateways neu implementiert, um in einer Optimierung folgende Szenarien abbilden zu können:

1. *Aero3D_MultiLoadCases_SingleMesh*: Die verschiedenen Betriebspunkte unterscheiden sich ausschließlich durch andere aerodynamische Randbedingungen. Geometriegenerierung und Vernetzung kann für alle Betriebspunkte gemeinsam stattfinden. Die Berechnung wird für jeden Betriebspunkt parallelisiert durchgeführt.
2. *Aero3D_MultiLoadCases*: Die Betriebspunkte bedingen eine Anpassung des Netzes (z.B. verringerte Drehzahl → veränderte erste Wandabstände im Netz sind anzupassen). Die Geometriegenerierung kann gemeinsam genutzt werden. Vernetzung und Berechnung werden parallelisiert durchgeführt.

3. *Aero3D_MultiConfigurations*: Die Betriebspunkte bedingen eine Anpassung der Geometrie (z.B. Verstell-Leitgitter im Verdichter). Die Schritte Ringraum- und Profilerstellung können gemeinsam genutzt werden. Anpassung der Geometrie (z.B. Leitgitter rotieren), Vernetzung und Berechnung werden parallelisiert durchgeführt.

Alle drei Szenarien sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt und in OPUS anwählbar.

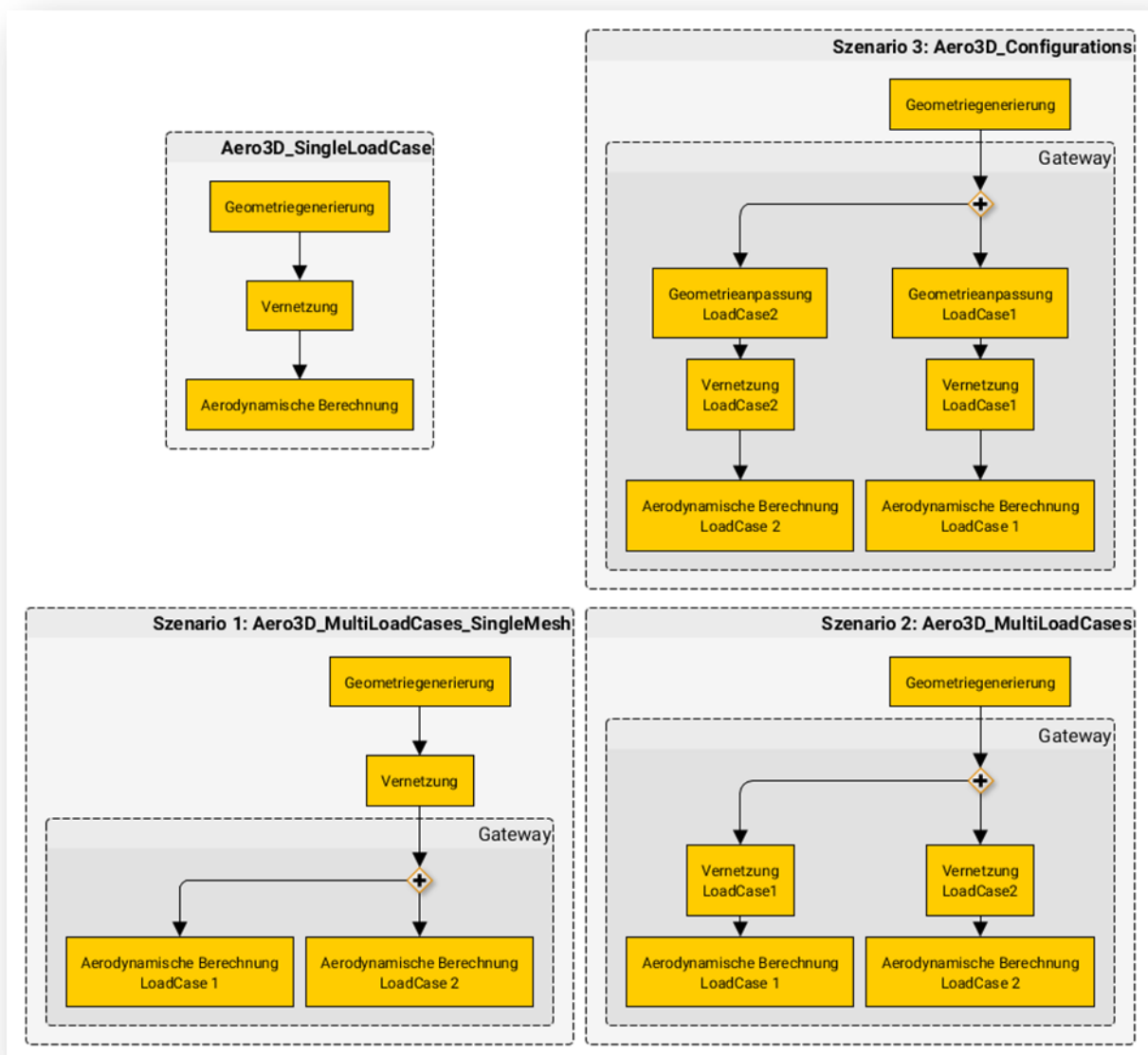


Abbildung 3: Schematische Darstellung der verschiedenen Workflows mit den implementierten Gateways

Robuste Parametrisierung

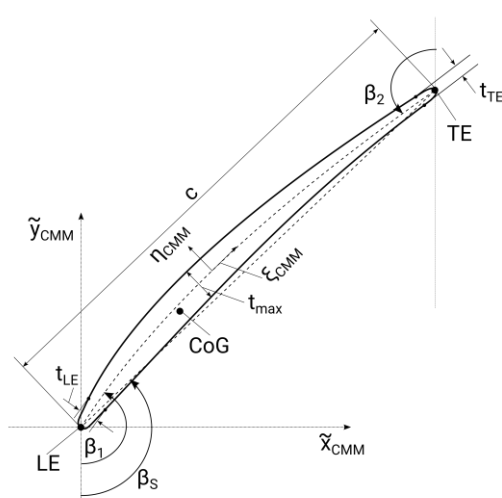
Grundlage für Robustheitsbetrachtungen von Turbomaschinen-Entwürfen ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten. Aus aerodynamischer Sicht sind dies maßgeblich geometrische Abweichungen der Beschaukelung von ihrem Nominalzustand sowie streuende Betriebsbedingungen. An die Stelle eines deterministischen Berechnungsmodelles mit nominalen Zuständen hinsichtlich Geometrie und thermodynamischen Randbedingungen rückt somit ein probabilistisches Modell. Das probabilistische Modell wiederum basiert auf einer definierten Anzahl von (für sich deterministischen) Einzelrechnungen, die innerhalb des Wahrscheinlichkeitsraumes zufällig realisiert werden. Die Gesamtheit aller Realisierungen ist damit Ausgangspunkt für statistische Auswertungen, der zugehörige Gesamtprozess Grundlage für die im Rahmen des Projektes beschlossene Weganpassung.

Voraussetzung für die Bedienung eines probabilistischen Modelles stellt eine vollständige Parametrisierung der als unsicher und damit als parametrisch veränderlich zu betrachtenden Größen sowie die Kenntnis der assoziierten statistischen Verteilungen und Korrelationen dar. Zur Berücksichtigung von geometrischen Bauabweichungen muss konsequenterweise eine Parametrisierung des Schaufelblattes existieren, die einerseits statistisch robust, d.h. eindeutig, ist und zum anderen Schaufelsynthesen hoher Güte ermöglicht. Im Detail muss die Parametrisierung folgenden Anforderungen gerecht werden:

- *statistische Robustheit:* Die Parameteranalyse einer spezifischen geometrischen Realisation muss auf eine eindeutige Kombination von Parametern führen (Eindeutigkeit der Analyse), und eine spezifische Parameterkombination muss auf ein eindeutiges geometrisches Ergebnis führen (Eindeutigkeit der Synthese).
- *statistische Belastbarkeit:* Die Datengrundlage, welche zur Bildung der Parameterstatistiken verwendet wird, muss ausreichend umfangreich sein. Der tatsächliche Umfang ist abhängig von der statistischen Verteilung der Parameter und somit der Parametrik selbst. Implizit bedingt dies reproduzierbare Methoden für Schaufelvermessung und Analyseverfahren.
- *Güte der Synthese:* Eine notwendige Voraussetzung zur Verwendung der Parametrik im Rahmen probabilistischer Bewertungen ist die Fähigkeit, digitale Abbilder realer Schaufeln mit hoher Güte zu synthetisieren. Die Synthese muss sowohl geometrisch als auch aerodynamisch äquivalent zum realen Ebenbild sein.

- *Abbildbarkeit des Wahrscheinlichkeitsraumes:* Die geometrischen Realisierungen müssen mit der gewählten Parametrik ohne Einschränkung approximierbar sein.
- *Sampling-Eignung:* Die Parametrisierung muss für verschiedene Profiltypen und Baumuster anwendbar und die zugehörigen statistischen Eingangsdaten müssen übertragbar sein. Zur Begrenzung des numerischen Aufwandes bei einer probabilistischen Bewertung sollte der Umfang des Parametersatzes klein sein.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde eine schnittbasierte Parametrik verwendet. Die Schaufelgeometrie wird dabei durch radiale Profile definiert, die mittels einer Parametrik entsprechend Abbildung 4 modifiziert werden. Die gezeigte Parametrik wurde ausgehend von einem umfangreichen Satz an Spline-basierten Parametern, der die Forderung nach statistischer Robustheit nicht erfüllte, durch gezielte Parameterreduktion entwickelt. Die für die Robustheitsbetrachtung entwickelte Parametrik erfüllt dabei die oben gelisteten Kriterien vollständig und weist trotz der Reduzierung des Parameterumfangs einen für den Gesamtprozess verträglichen Verlust an Genauigkeit gegenüber dem vollen Satz an Spline-basierten Parametern auf. Die hohe Genauigkeit des reduzierten Parametersatzes wird maßgeblich durch ein Aufprägen von Bauabweichungen in Form von relativen Differenzen zum Nominalzustand der Profile erzielt.



Variable	Bezeichnung
x_{ref}	axiale Ausrichtung
y_{ref}	azimutale Ausrichtung
β_s	Staffelungswinkel
β_1	Vorderkantenwinkel
β_2	Hinterkantenwinkel
t_{max}	Profildicke
t_{LE}	Vorderkantendicke
t_{TE}	Hinterkantendicke
c	Sehnenlänge

Abbildung 4 Parametersatz für Robustheitsbetrachtungen (in Anlehnung an [Mag_2018])

2.1.2 AP1.2 Sensitivitätsbestimmung & Schrittweitendefinition

Sensitivität des numerischen Gradienten

Numerische Berechnungsprozessketten unterliegen, hervorgerufen durch die begrenzte Rechengenauigkeit bzw. (was deutlich schwerer wiegt) Abbruch-Konvergenzkriterien des Strömungslösers, gewissen Ungenauigkeiten. Realitätsnahe stationäre CFD-Rechnungen konvergieren nicht vollständig aus, sondern müssen mithilfe eines mehr oder weniger strengen Konvergenzkriteriums beendet werden. Die resultierenden Ergebnisse sorgen für ein „Rauschen der Zielgröße“, welche bei kleinen Parameteränderungen (und erneuter Auswertung) zu Tage treten und ggf. Sensitivitäten verfälschen, welche durch finite Differenzen erzeugt wurden. Das Rauschen begrenzt die Möglichkeiten der Optimierung zum Einen in Bezug auf die Genauigkeit des gefundenen Minimums als auch in Bezug auf die Geschwindigkeit des Optimierungsprozesses. Sollte das Rauschen zu stark ausfallen, ist eine Optimierung ggf. überhaupt nicht möglich.

Der Erfolg z.B. eines Gradientenverfahrens zur numerischen Optimierung ist entscheidend von der Güte der Gradienten abhängig. Diese Gradienteninformation ist ebenfalls von dem zuvor beschriebenen Rauschen betroffen. Werden die Gradienten mithilfe finiter Differenzen (hier z.B. Vorwärtsgradient) ermittelt, kann das Rauschen umgangen werden, indem ausreichend große Schrittweiten für die finite Differenz verwendet werden. Wird der Schritt jedoch zu groß gewählt, bildet die finite Differenz ggf. nicht mehr den Gradienten an der zu betrachtenden Stelle ab, sondern ist durch die Nichtlinearität des zugrundeliegenden aerodynamischen Problems verfälscht. Es muss demnach ein geeignetes Maß (so klein wie möglich, so groß wie nötig) für die Schrittweite gefunden werden.

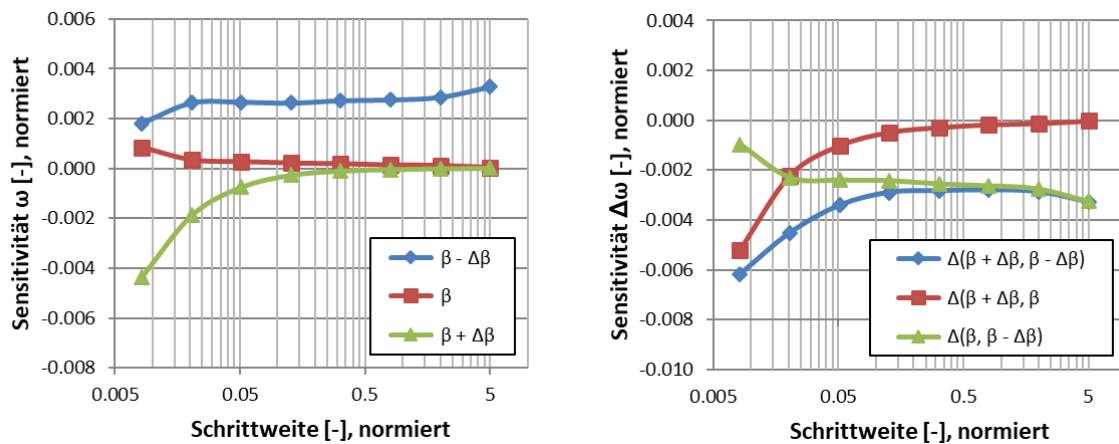


Abbildung 5: Darstellung der Sensitivitäten erster (links) und zweiter Art (rechts) für den Verlustbeiwert ω bzw. $\Delta\omega$ über der Schrittweite. Die Sensitivität für ω wird dabei für drei verschiedene Anströmwinkel dargestellt. Für die Sensitivitäten zweiter Art wird das Delta zwischen den verschiedenen Anströmwinkeln gebildet.

Soll unter dem Einfluss von Bauteilabweichungen mit dem Ziel Robustheit gegenüber diesen Bauteilabweichungen optimiert werden, verschärft sich die Problematik weiter. Es gilt nicht nur zu bestimmen, wie sich eine aerodynamische Größe unter Einfluss von Auslegungsvariablen ändert, sondern auch, wie sich der Unterschied zwischen einer aerodynamischen Größe zweier Konfigurationen (mit und ohne Bauteilabweichung) unter dem Einfluss von Auslegungsvariablen ändert. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Strahltriebwerke und Turbomaschinen der RWTH Aachen (Eigenantrag COOREFLEX 1.3.1A) konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, mit der vorliegenden aerodynamischen Prozesskette sowohl Sensitivitäten erster Art, als auch die für die Robustheit nötigen Sensitivitäten zweiter Art (Sensitivität eines Deltas) zu bestimmen. Ferner wurden hierfür auch geeignete Schrittweiten für eine Gradientenbestimmung (erster und zweiter Art) ermittelt. Abbildung 5 zeigt exemplarisch an einer Zielgröße und einem Auslegungsparameter, dass es für beide Arten der Sensitivitäten einen Schrittweitenbereich gibt, der sowohl frei von Rauschen als auch frei von nichtlinearen Effekten (annähernd konstant) ist. Verständlicherweise ist dieser Bereich für die Sensitivitäten zweiter Art kleiner. Zudem wurde am Beispiel einer weiteren Konfiguration mit realistischer Bauteilabweichung gezeigt, dass die Sensitivitäten zweiter Art weitestgehend schrittweitenstabil bestimmt werden konnten -- sowohl mit einem adjungierten als auch konventionellen (mit finiten Differenzen betriebenen) Strömungslöser (vgl. Abbildung 6).

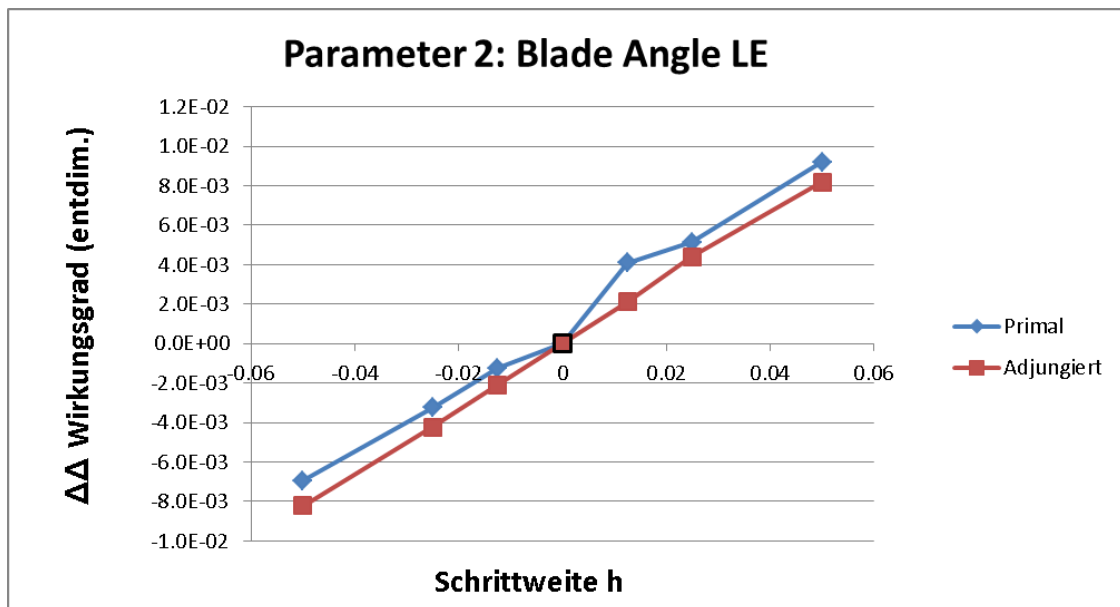


Abbildung 6: Darstellung konventioneller (primaler) und adjungierter Sensitivitäten zweiter Art. Lesart: Wie ändert sich das Zielgrößen-Delta mit und ohne Bauteilabweichung, wenn Parameter 2 um die Schrittweite h ausgelenkt wird.

Anhand der durchgeführten Studien konnten die Nutzbarkeit der Prozesskette in Bezug auf Gradienteninformation sichergestellt sowie auch Richtwerte für zu verwendende Gradientenschrittweiten abgeleitet werden.

Sensitivität hinsichtlich der Aufbereitung von Eingangsdaten

Der Bestimmung von Sensitivitäten und Korrelationen aus den Ergebnissen probabilistischer Betrachtungen gingen im vorliegenden Projekt Monte-Carlo-Simulation voraus. Als Eingangsgrößen dienten den Simulationen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen für jeden der unsicheren Parameter sowie eine zugehörige Korrelationsmatrix, um das kombinierte Auftreten einzelner Merkmalsausprägungen zu quantifizieren. Sowohl die Dichteverteilungen als auch die Korrelationen basieren auf Messprotokollen von Daten der taktilen Qualitätssicherung seriengefertigter Schaufeln. Zur Aufbereitung der taktilen Messdaten wurde ein Prozess entwickelt, welcher die profildefinierenden Parameter auf den Konstruktionsebenen der Schaufel ausgehend von den Rohdaten der Prüfschnitte bestimmt. Der Prozess beinhaltet Korrekturen für das zugrundeliegende Messwerkzeug sowie diverse Koordinatentransformationen, Drehungen, Abwicklungsvorschriften und Interpolationsroutinen.

Die Routine zur Aufbereitung der Daten wurde in enger Zusammenarbeit mit dem hochschulseitigen Projektpartner, dem Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen der RWTH Aachen, entwickelt und implementiert. Eine ausführliche Darstellung der Umrechnungsroutine kann dem Abschlussbericht des Hochschulpartners sowie [Mag_2018] entnommen werden. Zweierlei Ursachen für epistemische Unsicherheiten, die im Rahmen der Datenaufbereitung existieren, wurden identifiziert und deren Wirkung im Sinne von Sensitivitätsstudien untersucht:

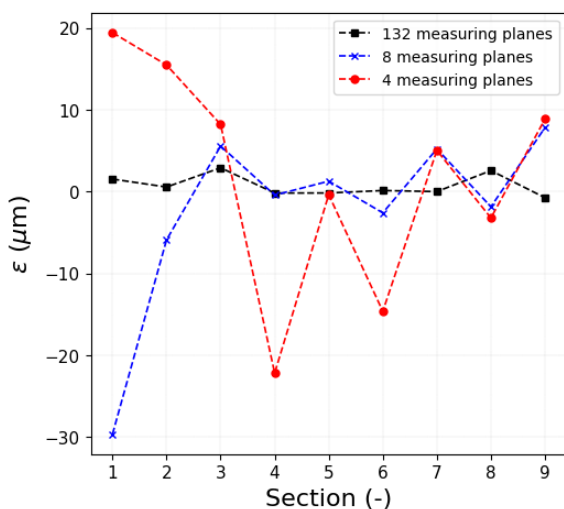
- (i) die Unsicherheit hinsichtlich der Geometrie im Bereich zwischen benachbarten Prüfschnitten und somit die Sensitivität auf eine begrenzte räumliche Auflösung der Messdaten sowie
- (ii) die Unsicherheit infolge eines endlichen Stichprobenumfangs und der damit verbundenen Sensitivität auf die Wahl der Fitting Kurve für die Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Während für firmeninterne Anwendungen reale Daten aus der Qualitätssicherung von Serienbauteilen hinterlegt werden, sind die im nachfolgenden gezeigten Abbildungen und Ergebnisse schematisch zu verstehen. Sie spiegeln weder quantitativ noch qualitativ tatsächlich auftretende Bauabweichungen wider. Die im Bericht gezeigten Ergebnisse basieren entsprechend auf hypothetischen Daten.

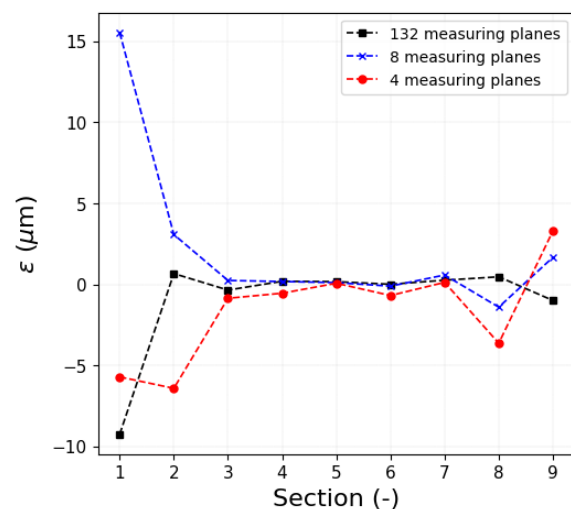
zu (i): Sensitivität auf räumliche Auflösung der Messdaten

Die fehlende Kenntnis der geometrischen Ausprägung einer Schaufel im Bereich zwischen benachbarten Prüfschnitten ist mit einer Unsicherheit der statistischen Daten verbunden, die einer probabilistischen Bewertung hinterlegt sind. Insbesondere die Notwendigkeit zur Inter- und Extrapolation auf die Konstruktionsebenen der Schaufel ist mit einem Verlust an Genauigkeit und somit unweigerlich auch mit einer Verstärkung des Effektes der Unsicherheit verbunden. Zur Quantifizierung dieses Effektes wurde die Sensitivität eines Parameters auf die Anzahl der Prüfschnitte und somit die Dichte der räumlichen Auflösung evaluiert. Abbildung 7 zeigt exemplarisch den Einfluss auf die Vorderkantendicke. Die Darstellung basiert auf virtuellen Prüfprotokollen, die aus Schaufelgeometrien mit künstlich erzeugten Bauabweichungen extrahiert wurden. Im Rahmen der gezeigten Betrachtung

unterliegt ferner die Annahme, es handle sich um $n=4,8$ oder 132 über die Schaufelhöhe äquidistant verteilte, ebene Prüfschnitte, auf welchen Messdaten existieren. Die Anzahl und Lage der in Realität verwendeten Prüfschnitte hängt von der Schaufelhöhe sowie der Art der verwendeten 3D-Gestaltungsmaßnahmen ab. Sie liegt typischerweise zwischen 4 und 8.



a) Fehler im Median



b) Fehler bei der Standardabweichung

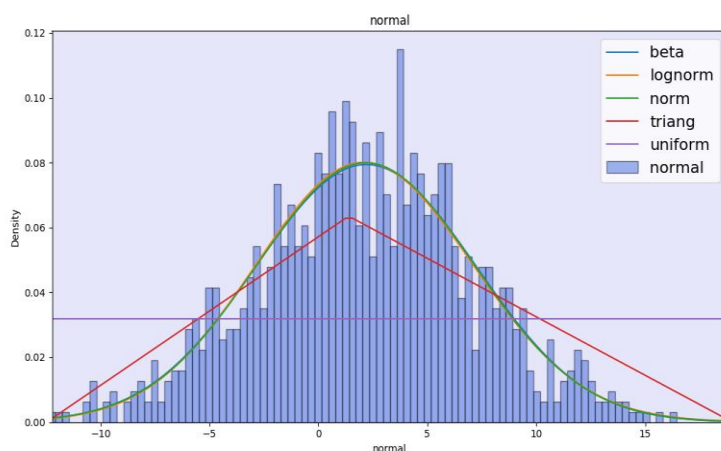
Abbildung 7 Sensitivität der Eingangsparameter auf räumliche Auflösung der taktilen Daten ausgedrückt als Fehler gegenüber theoretischen Referenzdaten (hier: Vorderkantendicke)

Neben den Sensitivitäten des Medians (Abbildung 7a) und der Standardabweichung (Abbildung 7b) auf die Anzahl und Lage der Prüfschnitte wird gezeigt, dass der mit der Aufbereitung verbundene Fehler sowie der assoziierte Verstärkungseffekt der Unsicherheit mit zunehmender Anzahl von Prüfschnitten gegen Null konvergiert.

zu (ii): Sensitivität auf Wahl der Fitting-Kurve

Sobald Geometriedaten einer Stichprobe mit ausreichend großem Umfang erhoben und aufbereitet sind, muss die in Form von diskreten Realisationen vorliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung durch eine kontinuierliche, analytische Funktion approximiert werden (vgl. Abbildung 8). Die analytischen Funktionen der jeweiligen Parameter dienen dann als Eingangsverteilungen für die den Robustheitsbetrachtungen zugrundeliegenden Monte-Carlo-Simulationen. Die richtige Wahl der approximierenden Fitting-Kurve ist typischer-

weise auch bei großem Stichprobenumfang (hier 1000 Realisationen) nicht eindeutig. Zur Beurteilung der Güte einer Approximation kann ein Test nach Kolmogorov-Smirnov dienen. Als Maßzahlen werden unter anderem die maximale Differenz der kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen zwischen dem empirischen Datensatz und der Fitting-Kurve sowie die Wahrscheinlichkeit für die richtige Wahl bei der Art der Verteilung herangezogen.



beta	
max. Diff.	0.0166
p-Value	0.9446
lognorm	
max. Diff.	0.0188
p-Value	0.8696
norm	
max. Diff.	0.0168
p-Value	0.9381

Abbildung 8 Sensitivität der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung auf Art der Approximation (Eingangsdaten: generische, normalverteilte Zufallszahlen $N(\mu=2, \sigma=5)$)

Im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation hängt die Wahl des realisierten Wertes eines zufällig streuenden Parameters unmittelbar von der gefitteten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ab. Jede Robustheitsbewertung unterliegt folglich einer gewissen Unschärfe, die der Prozessanwender durch die Wahl und Güte der Fitting-Kurve determiniert und im weitesten Sinne von der zugrundeliegenden Datenbasis abhängt. Ein quantitatives Maß für die Unschärfe kann dementsprechend nicht pauschal bestimmt werden.

2.1.3 AP1.3 Ziele- und Nebenbedingungen

Deterministisches Robustheitsmaß Polarenbreite

Im Rahmen des Projektes wurde auf verschiedene Robustheitsmaße zurückgegriffen. Um die in Kapitel E beschriebenen Optimierungsstudien durchführen zu können und zum Vergleich zum probabilistischen Robustheitsmaß, wurde hier auf ein sogenanntes deterministisches Maß zurückgegriffen.

Dazu wurde das Zielfunktional, bzgl. dessen die Robustheit bewertet werden sollte, nur für diskret gleich gestreute (gestreut in Bezug auf eine Störung, z.B. Bauabweichung oder Anströmwinkel) Realisierungen bestimmt. Die Zielfunktionale Z_i der n gestreuten Realisierungen wurden mit dem Zielfunktional des Nominalmembers $Z_{nominal}$ verglichen und in Analogie zur Bestimmung kleinster Fehlerquadrate berechnet.

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{nominal})^2}$$

Dieses allgemein dargestellte, einfache Robustheitsmaß R wurde im frühen Stadium des Projektes verwendet, um Profilloptimierungen mit dem Ziel einer möglichst breiten Verlustpolare durchzuführen (siehe Kapitel E). Ein Profil sollte möglichst robust gegen Anströmwinkeländerungen gemacht werden. Dazu wurden gemäß diesem Robustheitsmaß drei verschiedene Anströmwinkel gewählt (ein Nominalwinkel und zwei „deterministisch gestreute“ Winkel, $\pm 0,5^\circ$) und für diese Anströmwinkel der Verlustbeiwert ω bestimmt. Als Robustheitswert ergibt sich nun:

$$R = \sqrt{(\omega_{i=-0.5} - \omega_{ADP})^2 + (\omega_{i=0.5} - \omega_{ADP})^2}$$

Anhand dieser einfachen Definition werden die Vor- und Nachteile dieses Maßes deutlich. Von Vorteil ist die einfache Implementierung und Bewertbarkeit. Da ein Member immer an allen gestreuten Realisierungen ausgewertet wird, ist die Robustheitsaussage für dieses Member (eine ausreichende Anzahl von Realisierungen n vorausgesetzt) belastbar. Sind viele Arten von Abweichungen (m) mit je n Realisierungen notwendig, wird der Aufwand zur Bestimmung der Robustheit sehr groß. Zudem setzt die diskrete und gleichbleibende Streuung der Realisierungen einen Kenntnisstand der auftretenden Streuungen voraus und die Robustheitinformation ist auf diese beschränkt.

Probabilistisches Robustheitsmaß

Das oben gezeigte Maß zur Robustheitsbewertung basierte auf einer Evaluation der schaufelcharakteristischen Polarenbreite unter Berücksichtigung deterministisch vorgegebener Betriebspunkte. Im Gegensatz dazu wurde ein weiteres Konzept untersucht, das unter Vorgabe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen statistische Schwankungen im Betriebspunkt und der Geometrie berücksichtigt. Das Konzept wurde im Unterauftrag am

DLR Köln entwickelt. Es baut auf der Verwendung von Metamodellen und der zufälligen Belegung von Variablen, die unter Robustheitsgesichtspunkten ausgewertet und gleichermaßen als Design-Variablen einer Optimierung interpretiert werden. In der vorliegenden Implementierung wurde die Streuung der unsicheren Variablen als unabhängig betrachtet.

Als Robustheitsmaß dient entweder der Zielwert einer Basisrealisierung, ein Mittelwert aller zufällig erzeugten Realisierungen oder ein α -Quantil. Das Robustheitsmaß wird innerhalb des Metamodells nach einer definierten Anzahl von Realisierungen aktualisiert und analysiert. Die Bewertung erfolgt mittels eines internen Rankings. Das eigentliche Ranking der Entwürfe im Rahmen der Optimierungsrechnung bleibt davon unbeeinträchtigt. Derart kann das Robustheitsmaß entweder zur Definition von Restriktionen Verwendung finden oder in die Definition einer Zielgröße eingehen. Insbesondere wenn die Zufallsvariablen einen starken Einfluss auf die Zielgröße aufweisen, kann es sinnvoll sein, die Validität des Metamodells sicher zu stellen, indem dessen Datenbasis durch zusätzliche exakte Lösungen ergänzt wird. Der implementierte Prozess stellt entsprechende Optionen zur Verfügung. Ergebnisse einer konkreten Anwendung des Verfahrens in Kombination mit genetischen Algorithmen der Optimierungsumgebung AutoOpti sowie ein Vergleich mit dem in OPUS verfügbaren gradientenbasierten Optimierer werden in Abschnitt E diskutiert.

2.1.4 AP1.4 Erweiterung auf verschiedene Profiltypen

Airfoil-Modifier-Grundlagen

Mit der weiter oben gezeigten Parametrik können verschiedenste Profilformen charakterisiert werden. Unterschiede in den Profilformen und der Größe der Ergebnisse sind vorwiegend auf unterschiedliche Fertigungsarten zurückzuführen. So zeigen geschmiedete oder gegossene Leitschaufeln in der Regel deutlich andere Fertigungsabweichungen als gefräste Blisken.

Der Prozessablauf zur Synthese einer Realschaufel wird nachfolgend beschrieben. In der Design-Phase einer Schaufel wird eine „heiße“ Nominalgeometrie erzeugt, aus welcher ein CAD-Model abgeleitet wird. Unter Berücksichtigung von Gaslasten und Fliehkräften wird eine Transformationsliste errechnet, mit deren Hilfe die „kalte“, d.h. zu fertigende Nominalgeometrie, erzeugt werden kann. Durch die Analyse der Profilschnitte von Real- und

Nominalschaufel im kalten Zustand sowie deren Rückführung auf eine Dicken- und Wölbungsbasierte Beschreibung können Deltas zwischen Nominal- und Realgeometrie für typische Parameter berechnet werden. Unter der in der Fachliteratur gängigen Annahme, dass besagte geometrische Deltas im Betrieb erhalten bleiben, wird ausgehend von der „heißen“ Nominalschaufel eine „heiße“ Schaufel mit Bauabweichungen erzeugt. Dazu werden die „kalten“ Deltas auf die „heiße“ Nominalgeometrie aufgeprägt. Das dafür benutzte Tool trägt den Namen Airfoil-Modifier.

Ein Ablaufschema der Synthese von Nominaldesign zu heißer Schaufel mit Bauabweichung ist Abbildung 9 zu entnehmen.

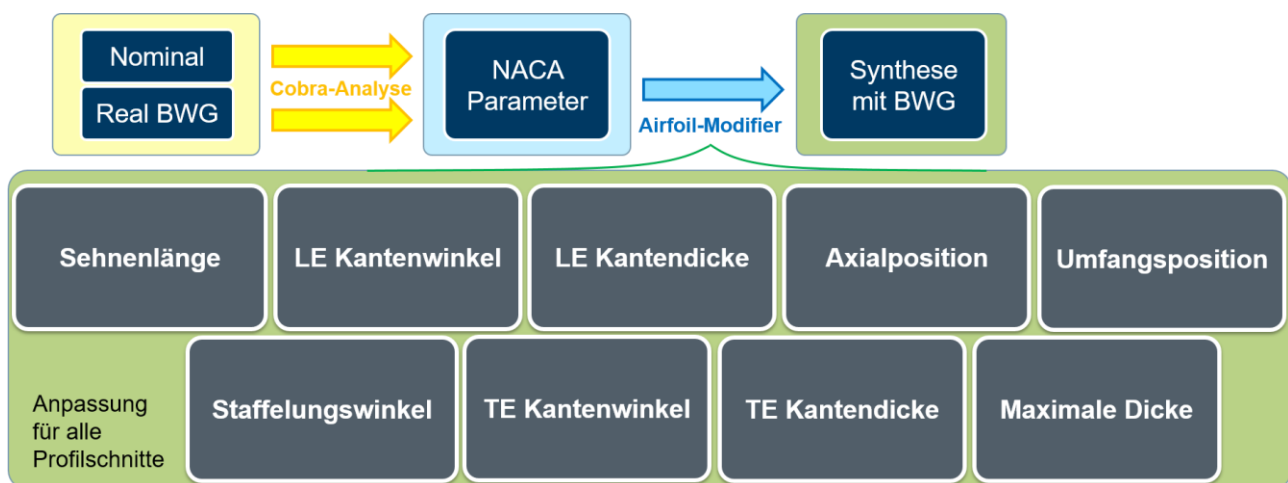


Abbildung 9: Prozess-Schema mit detailliertem Ablauf des Airfoil-Modifiers

Die Vorgabe der Deltas kann für jedes Konstruktionsprofil separat erfolgen. Dies hat allerdings eine für probabilistische Zwecke ungünstig große Anzahl an Parametern zur Folge, da pro Profil neun Parameter variiert werden, was bei einem mehrstufigen Modell schnell zu einer hohen Gesamtanzahl an Variablen und dementsprechend zu einer hohen Anzahl an zu simulierenden Realisationen führt. Um diesem Problem entgegenzuwirken, ist eine Vorgabe der Deltas in Polynomform vorgesehen worden. Je nach Anzahl der vorgegebenen Stützpunkte wird der radiale Verlauf der Deltas über die Kanalhöhe durch eine Konstante, ein quadratisches oder ein kubisches Polynom approximiert. Auf diese Weise kann die Anzahl an benötigten Freiheitsgraden zur vollständigen Beschreibung einer Schaufel drastisch gesenkt werden, was sich positiv auf die benötigten Ressourcen auswirkt. Die

derartig entstandenen Geometrien inklusive Bauabweichung werden im nächsten Prozessschritt vernetzt, anschließend simuliert und postprozessiert.

Airfoil-Modifier in OPUS

Um Bauabweichungen oder übliche Verschleißerscheinungen der Schaufelgeometrie in einer Prozesskette berücksichtigen zu können ist es notwendig, die per Auslegungsparametrik definierte Schaufelgeometrie nachträglich modifizieren zu können.

Dabei ist es entscheidend, dass die so zusätzlich ergänzte Modifikation auf analoge Weise und unabhängig von der Schaufelgeometrie der Auslegungsparametrik aufgebracht wird, um die Anwendbarkeit auf verschiedenste Profiltypen sicher zu stellen. Dies ist durch die Verwendung des oben beschriebenen Airfoil-Modifiers gegeben. Wie bereits weiter oben in Bezug auf Gateways erwähnt, ist es für eine effiziente Optimierung essentiell, unnötige Prozesskettenanteile zu vermeiden. So werden beispielsweise innerhalb einer Gradientenbestimmung sehr viele neue Geometrien erzeugt, welche sich jedoch nur durch einen Parameter (finite Differenzen bei Sensitivitätsbestimmung) unterscheiden. Beispielsweise ist davon nur eine Schaufelreihe in einer Maschine betroffen. Es wäre ineffizient für alle Schaufelreihen eine neue Geometrie zu erzeugen, deshalb wird in OPUS in diesem Fall die Basisgeometrie übernommen und nur die Schaufel mit geändertem Parameter neu generiert. Einmal erzeugte Geometrien werden im aktuellen Member somit sowohl genutzt, um ein Netz zu generieren als auch um als Basis für weitere Member zur Verfügung zu stehen. Für beide Zwecke steht ein und dieselbe Datei zur Verfügung.

Um dieses Prinzip auch unter Aufbringung von Bauabweichungen (beispielsweise einer spezifischen) und Nutzung des Airfoil-Modifiers weiterhin nutzen zu können, sind spezielle Vorkehrungen notwendig. Das Vorgehen ist in Abbildung 10 dargestellt. Es muss dabei zwischen einer zu sichernden Nominalgeometrie und einer geometriebildenden, zu bewertenden Geometrie mit Bauteilabweichungen unterschieden werden. Zunächst wird die Nominalgeometrie erstellt (diese ist von der Designparametrik erstellt worden). Nachfolgend wird diese Geometrie durch den Airfoil-Modifier verändert und ist somit nicht mehr für Folgemember verwendbar. Es entstehen somit zwei Geometrievarianten. Damit ist sicher-

gestellt, dass bestehende Nominalgeometrien weiterhin für Folgemember genutzt werden können.

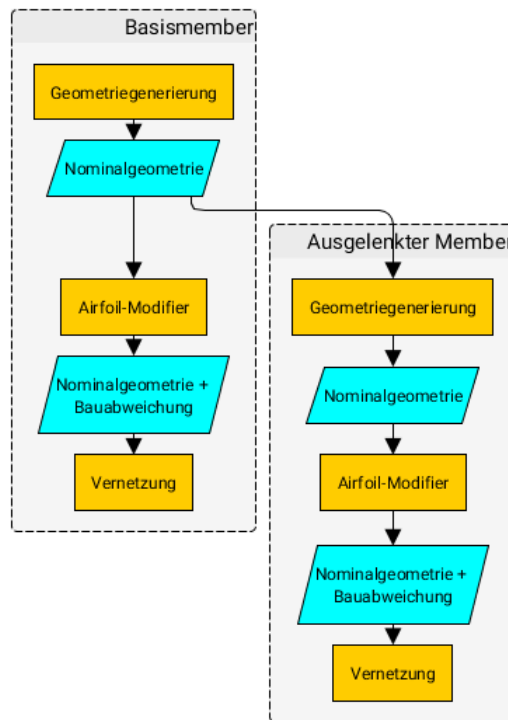


Abbildung 10: Darstellung des in OPUS implementierten Prinzips der Wiederverwendung bereits erzeugter Geometrie. Unter Nutzung des Airfoil-Modifiers muss hierbei in eine zu bewertende Nominalgeometrie mit Bauabweichungen und eine zu sichernde Nominalgeometrie unterschieden werden.

E. AP2 Iteratoren

3.1.5 AP2.1 Nutzbarmachen von Optimierungsmethoden

Im Rahmen des Projektes wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen der RWTH Aachen verschiedene Optimierungsverfahren (deterministisch vs. probabilistisch, lokal vs. global) zur Berücksichtigung von Robustheitsaspekten in Betracht gezogen. Anhand eines vereinfachten Q3D-Modells wurde ein Gradientenverfahren (lokalen Charakters) mit einem globalen Verfahren (AutoOpti), welches Antwortflächen nutzt, verglichen.

Das Q3D-Modell wurde aus einer 3D-Hochdruckverdichter-Kaskade abgeleitet, wobei mithilfe von Anpassungen des Ringraums vergleichbare Kontraktionsverhältnisse hergestellt wurden. Ziel der betrachteten Optimierungsaufgabe war es, ein verlustarmes Profil zu ge-

nerieren, welches möglichst insensitive auf Anströmwinkeländerungen reagiert, also eine breite Verlustpolare aufweist.

Das Optimierungsproblem wurde allgemein als Mehrzielproblem formuliert:

- Minimiere:
 - den Verlustbeiwert ω unter Nominalanströmbedingungen
 - den Robustheitsbeiwert R (welcher in Kapitel D) definiert wurde
- unter den Nebenbedingungen
 - Massenstrom (-0.5% ... +0.5%)
 - Abströmwinkel (-0.05° ... +0.05°)
- mithilfe der Profildesignvariablen.

Da mit rein lokalen Gradientenverfahren keine Mehrzieloptimierungen möglich sind, wurden die Ziele hierfür zueinander gewichtet. Ziel war es, die Paretofront an mehreren diskreten Stellen (jeweils eine Optimierung) anzufahren. Dazu wurden zunächst exemplarisch drei Gewichtungen gewählt:

- cfg1: Gewichtung_ ω = 100%, Gewichtung_ R = 0% (reine Verlustoptimierung)
- cfg2: Gewichtung_ ω = 0%, Gewichtung_ R = 100% (reine Robustheitsoptimierung)
- cfg3: Gewichtung_ ω = 50%, Gewichtung_ R = 50%

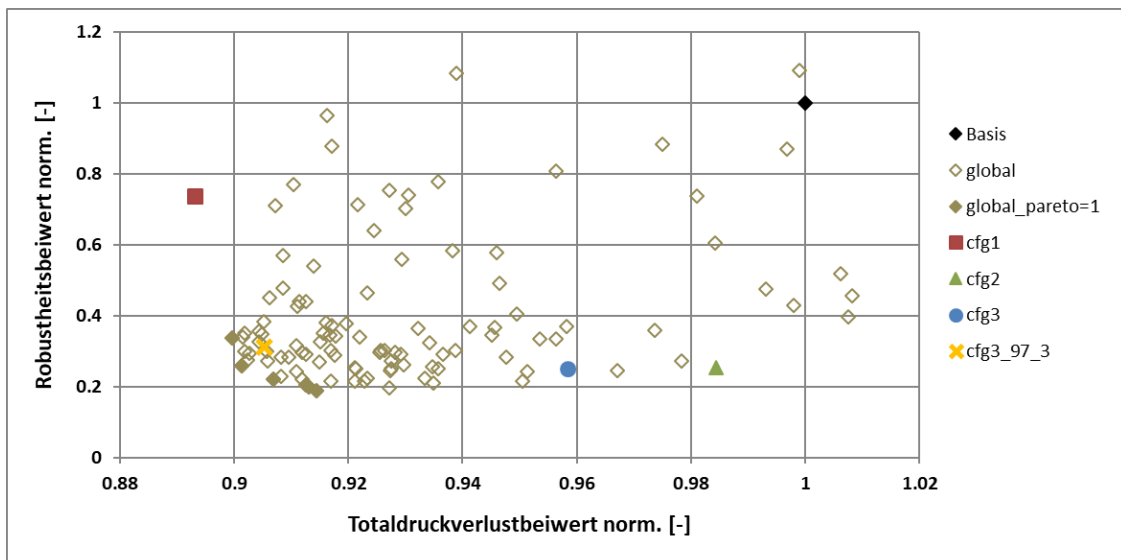


Abbildung 11: Darstellung der konkurrierenden Zielgrößen Totaldruckverlustbeiwert (ω_{adp}) und Robustheitsbeiwert R für die Ergebnisse aus vier lokalen Optimierungsläufen, der Ausgangsbasis sowie einer globalen, antwortflächenbasierten Optimierung mit Kennzeichnung von Pareto-optimalem Ergebnis

In Abbildung 11 wird ersichtlich, dass es dem Algorithmus deutlich leichter fiel, den Robustheitsbeiwert zu verringern. Die Gewichtung $cfg3$ hat bzgl. des Robustheitsbeiwerts zu einem gleichwertigen Ergebnis geführt wie $cfg2$, was zunächst nicht zu erwarten war. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurde eine Optimierung mit der Gewichtung

- $cfg3_97_3$: Gewichtung $\omega = 97\%$, Gewichtung $R = 3\%$

durchgeführt, um die Paretofront möglichst weit im niedrigen Verlustbereich abzustützen. Als Resultat erhält man mit relativ hohem Aufwand eine anhand von vier Stellen abgestützte Paretofront.

Das beschriebene Optimierungsproblem wurde zusätzlich mit AutoOpti und damit global gelöst. Hier zeigt sich deutlich, dass die Stützstellen aus den lokalen Optimierungen noch nicht vollständig pareto-optimal gefunden worden waren. Offensichtlich konnte das Gradientenverfahren nur jeweils lokale Optima finden. Das globale Verfahren konnte die Front in fast allen Bereichen weiter in Richtung Ursprung verlagern. Die derart bestimmte Front ist zudem deutlich kleiner als aus den lokalen Optimierungen vermutet. Lediglich für den Bereich geringer Verluste konnte das Gradientenverfahren die Paretofront abstützen und dies in einem Bereich, den das globale Verfahren nicht abdecken konnte.

Unter Aufwandsgesichtspunkten kann gesagt werden, dass das globale Antwortflächenverfahren mit 2700 getätigten Auswertungen die Optimierungsaufgabe deutlich effizienter gelöst hat als das Gradientenverfahren mit ca. 16000 Auswertungen für die vier gewichteten Optimierungen. Höchstens bei Ein-Ziel-Optimierungen bleibt die Gradienten-basierte Vorgehensweise konkurrenzfähig, da sie hier ggf. auch durch die Anwendung eines adjungierten Strömungslösers beschleunigt werden kann.

3.1.6 AP2.2 Auswahl und Umsetzung

Im vorliegenden Abschnitt werden Ergebnisse einer robusten Profilloptimierung diskutiert, die auf einem probabilistischen Robustheitsmaß (vgl. Kapitel 2.D) basieren. Die multidimensionale Optimierung verfolgt analog zur oben beschriebenen Anwendung des deterministischen Robustheitsmaßes unter Verwendung der Profilparameter als Designvariablen zwei konkrete Ziele:

- minimiere den Profilverlustbeiwert im Auslegungspunkt und
- maximiere die Robustheit des Profils im Bezug auf Störungen im Eintrittswinkel.

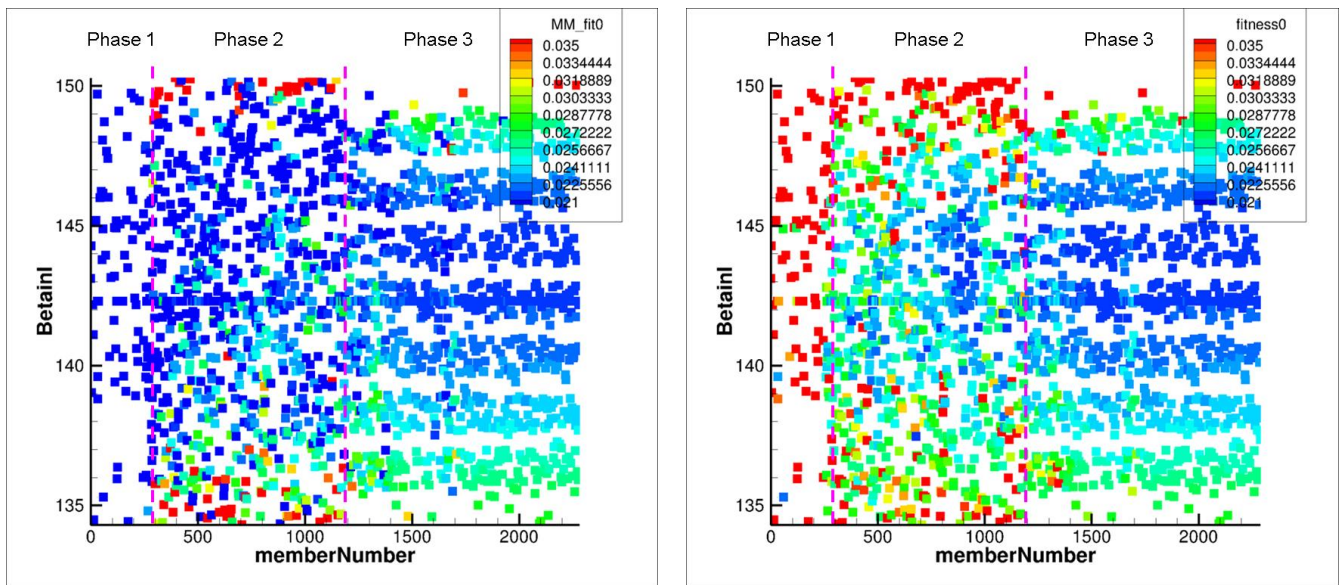
Als unsicher werden die Zuströmbedingungen betrachtet, indem zufällige gleichverteilte Inzidenzstörungen aufgeprägt werden. Als Restriktionen sind die Profillumlenkung sowie geometrische Ober- und Untergrenzen für entsprechende Parameter einzuhalten, um nicht-machbare Profilentwürfe a priori zu vermeiden.

Beim Ausgangsprofil handelt es sich um einen nabennahen Profilschnitt eines Verdichtersrotors. Die charakteristischen Betriebsbedingungen des Profilschnittes im Auslegungspunkt sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1 Betriebsbedingungen des Anwendungsfalls zur robusten Profilloptimierung

Eintrittsmachzahl [-]	0.67
Reynoldszahl Profil [-]	1.36e6
Anströmwinkel [°]	142.3
Kontraktionsverhältnis meridional [-]	1.07

Abbildung 12 zeigt die Entwicklung der Zielkriterien über dem zeitlichen Verlauf einer metamodelgestützten robusten Optimierung. Die Farbgebung der als Rechteck dargestellten Realisationen weist auf den Verlustbeiwert des jeweiligen Profils hin, der vom Zuströmwinkel abhängt. Dem linken Teilbild können die mittels Metamodell vorhergesagten Werte zum Zeitpunkt der Erzeugung einer Realisation entnommen werden. Im rechten Teilbild sind die entsprechenden Werte exakter Berechnungen aufgetragen.



a) meta-modellbasierter Verlustbeiwert

b) tatsächlich berechneter Verlustbeiwert

Abbildung 12: Verlauf einer robusten Optimierung am Beispiel einer Profilgeometrie und unter unsicherem Winkel der Zuströmung: Phase 1 (zufällige Initialisierung), Phase 2 (Optimierung mit jeweils einer Realisierung), Phase 3 (Optimierung mit jeweils 7 Realisierungen)

Die Optimierung ist in 3 Phasen gegliedert, die wie folgt charakterisiert sind:

- Phase 1: Realisationen werden zufällig erzeugt, um einen weiten Bereich des Designraums abzudecken. Insbesondere im Fall eines Ausgangsprofils mit moderaten Profileigenschaften kann dies zur Beschleunigung der Konvergenz führen.
- Phase 2: In der Startphase der Optimierung wird zunächst nur eine willkürliche Realisation je Betriebspunkt berechnet.
- Phase 3: Die Optimierung wird mit 7 Realisationen je Betriebspunkt bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums fortgesetzt.

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abbildung 13a in Form einer Paretofront hinsichtlich der zwei oben genannten Zielkriterien dargestellt. Die Farbkodierung der Realisationen zeigt die Dicke der Profilvorderkante. Entlang der Pareto Front ergibt sich erwartungsgemäß ein Verlauf hin zu dünneren Kanten mit abnehmender Fitness hinsichtlich ihrer Robustheit und zunehmender Fitness hinsichtlich der Minimalverluste im Auslegungspunkt. Die resultierenden Verlustpolaren sind in Abbildung 13b für das Ausgangsprofil sowie drei explizite Realisationen der Paretofront gezeigt. Der Abbildung kann entnommen

werden, dass mit der entwickelten Vorgehensweise gegenüber dem Ausgangsprofil (blau) der Verlust im Auslegungspunkt reduziert und die Robustheit auf Inzidenzstörungen erhöht werden konnte.

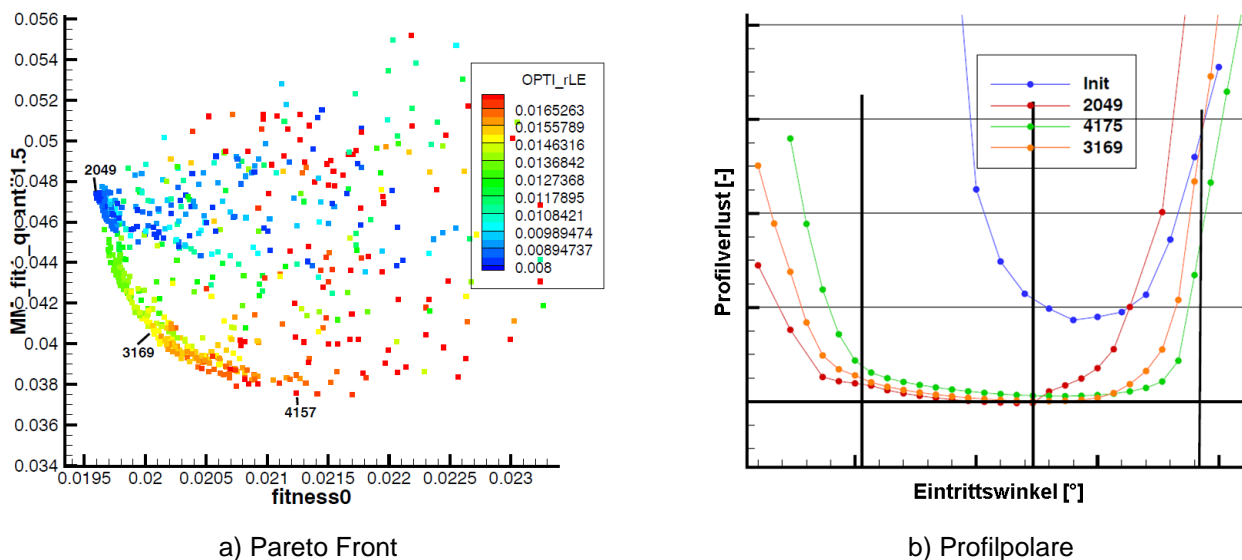


Abbildung 13 Ergebnis einer robusten Profilloptimierung unter Verwendung eines probabilistischen Robustheitsmaßes im Rahmen einer Metamodellbewertung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Metamodellbasierte Optimierung zu numerisch effizienten Lösungen führt, die neben dem Zielkriterium selbst auch dessen Robustheit berücksichtigen. Im vorliegenden Fall bezog sich die Robustheit ausschließlich auf unsichere Zuströmbedingungen. Unsicherheiten in der Profilform wurden dabei nicht berücksichtigt. Um ein derartiges Verfahren für den industriellen Einsatz nützen zu können, waren folgende Erweiterungen nötig, die im nachfolgenden Abschnitt adressiert werden:

- Berücksichtigung geometrischer Unsicherheit in der Profilform,
- Integration der tatsächlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen anstelle generischer Verteilungen,
- Berücksichtigung von Korrelationen zwischen den unsicheren Parametern anstelle der Unabhängigkeitsannahme,
- Anwendung auf einen 3-dimensionalen Fall (Schaufel anstelle Profilschnitt) sowie
- Integration von Streumaßen zur Robustheitsbewertung.

F. AP3 Unterstützung der Validierung

Testfall

Zur Validierung der Funktionsfähigkeit der beschriebenen Prozesse wird im Folgenden eine generische Anwendung diskutiert, welche die oben gelisteten Erweiterungen unter Zuhilfenahme der implementierten Prozessbausteine beinhaltet. Ziel des Anwendungsfalls war die Bewertung zweier Designvarianten eines dreidimensional gestalteten Rotors unter Robustheitsgesichtspunkten bei unsicherer Schaufelgeometrie und unter variierenden Betriebsbedingungen. Zur Reduzierung der benötigten Rechenressourcen wurde daher ein 3-Gitter-Modell aus dem Gesamtmodell eines Hochdruckverdichters extrahiert. Dieses Modell besteht neben dem Rotor selbst aus einer vorangestellten sowie einer stromab folgenden Statorreihe. Es wurde jeweils von umfangssymmetrischen Bauabweichungen ausgegangen, um mit periodischen Randbedingungen arbeiten zu können.

Parameterdefinition

Die Geometrien der Statoren vor bzw. nach dem Rotor wurden als deterministisch betrachtet. Um Variabilität im Betriebspunkt und somit Inzidenzstörungen am Rotor zu berücksichtigen wurde der Gegendruck des hinteren Stators innerhalb definierter Grenzen zufällig variiert. Im Rotor wurden Geometrieabweichungen eingebracht, die eine generische Produktionsstreuung beschreiben und deren Größenordnung deshalb am Toleranzband orientiert war. Es handelt sich um Bauabweichungen in Sehnenlänge und Vorderkantendicke. Beide Parameter folgten einer Gauss-Verteilung, bei der 3 Sigma ca. ein Viertel des Toleranzbandes abdecken. Die Bauabweichungen wurden in radialer Richtung vereinheitlicht, d.h. das gesamte Delta wurde über der Schaufelhöhe konstant aufgeprägt. Eine Kopplung der Parameter erfolgte mittels des Rang-Korrelationskoeffizienten von Spearman, der exemplarisch zu 0,8 festgesetzt wurde. Dieser stellte sicher, dass ein Rotor, dessen Vorderkante zu dick war, demnach auch am oberen Ende des Streubandes für die Sehnenlänge lag.

Methodik

Als Verfahren wurde ein Latin Hypercube Sampling (LHS) gewählt. Dieses entspricht einer Monte-Carlo-Simulation (MCS), wobei die Ziehung der Samples im Gegensatz zur MCS nicht rein zufällig durchgeführt wird, sondern einem Muster folgt. Dabei wird im ersten

Schritt der Wahrscheinlichkeitsraum in N Intervalle geteilt, die der Anzahl an geforderten Samples entsprechen. Jedes Intervall besitzt die gleiche Wahrscheinlichkeit. Sind etwa 10 Samples angefordert, so deckt jedes Intervall 10% des gesamten Streubandes ab. Anschließend werden die N Samples derart gezogen, dass pro Intervall ein Sample vorliegt und gleichzeitig die vorgegebene Korrelationsstruktur der Parameter untereinander eingehalten wird. Dadurch wird eine im Vergleich zur reinen MCS bessere Abdeckung des gesamten Wahrscheinlichkeitsraumes gewährleistet.

Erkenntnisse

Vor einer Interpretation der Ergebnisse ist sicher zu stellen, dass das Sampling die Statistik der Grundgesamtheit repräsentiert. Einerseits müssen die erzeugten Zufallszahlen den geforderten Verteilungen entsprechen, andererseits ist die Einhaltung der Korrelationen untereinander zu kontrollieren. In Abbildung 14 a) und b) sind die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Parameter „Kantendicke“ sowie „Sehnenlänge“ als Histogramm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Gauss-Verteilung im Rahmen der erreichbaren Genauigkeit erzeugt wurde, die Ziehung der Zufallszahlen also der Vorgabe entsprach. In Abbildung 14 c) ist die Korrelationsmatrix der Input-Parameter aufgezeichnet. Der Abbildung kann entnommen werden, dass die Anzahl der Stichproben ausreichend ist, um die vorgegebene Korrelation von 0,8 zwischen Vorderkantendicke und Sehnenlänge hinreichend genau zu approximieren.

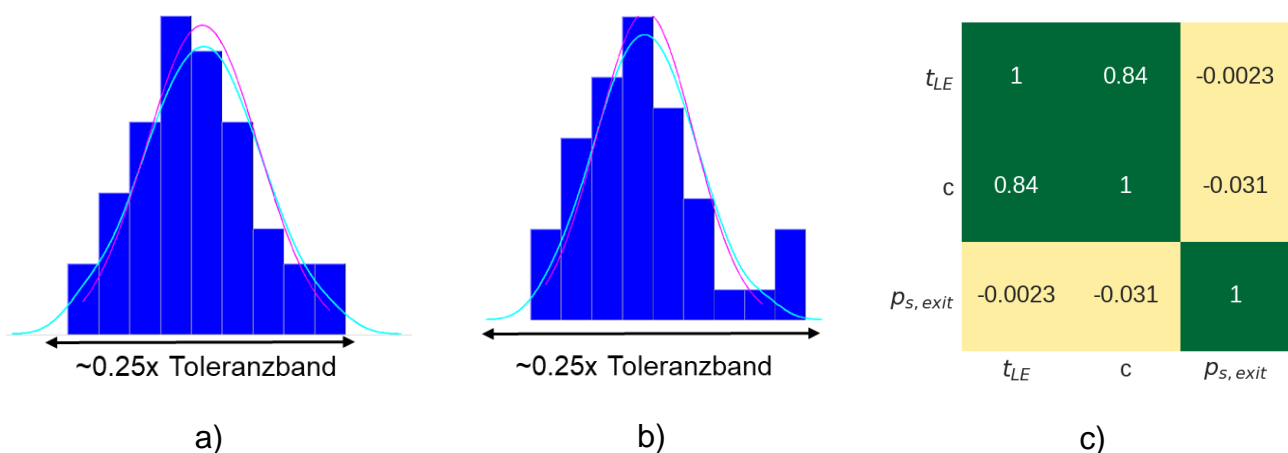


Abbildung 14: Inputparameter: a) Verteilung der Vorderkantendicke, b) Verteilung der Sehnenlänge, c) Korrelationsmatrix (Spearman's Korrelationskoeffizient)

Das zentrale Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation ist in Abbildung 15 analog zur vorangegangenen Profilloptimierung in Form von Schaufelpolaren dargestellt. Einerseits sind die deterministisch berechneten Polaren beider Designvarianten mit gefüllten Symbolen dargestellt. Andererseits sind die Ergebnisse der Zufallsziehungen als Punktwolken leerer Symbole dargestellt. Erwartungswert sowie 3-Sigma-Streuung sind als Fehlerbalken eingezeichnet.

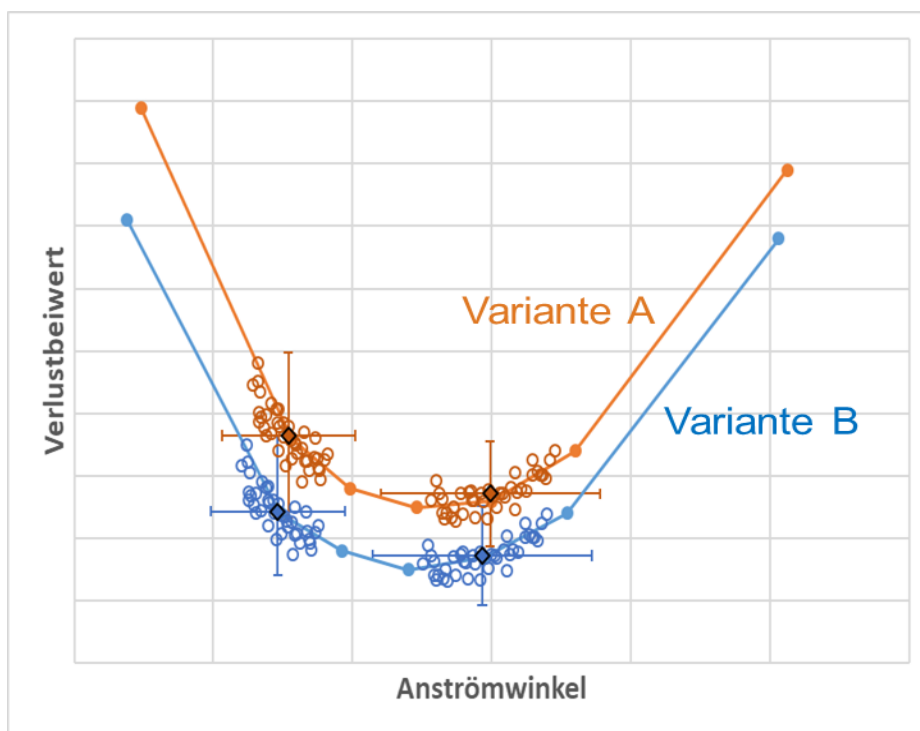


Abbildung 15: Robustheitsbewertung anhand von Verlustpolaren zweier Schaufelentwürfe bei generischer Produktionsstreuung und unter unsicheren Betriebsbedingungen: deterministische Bewertung (gefüllte Symbole) und probabilistische Bewertung (leere Symbole)

Folgendes kann Abbildung 15 entnommen werden:

- Die Punktwolken streuen um den deterministisch berechneten Verlauf der Polare. Dies wird durch die Kombination aus zufälliger Variation des Gegendruckes (und der assoziierten Inzidenzsituation am Rotoreintritt) sowie der geometrischen Streuung verursacht.
- Die Erwartungswerte der probabilistischen Betrachtungen werden (im vorliegenden Anwendungsfall) durch die deterministische Herangehensweise mit hoher Genauigkeit approximiert.

- Die Streuung in horizontaler Richtung (Anströmwinkel) ist bei dem Betriebspunkt mit höherem Anströmwinkel größer. Die Streuung in vertikaler Richtung (Rotor-Verlustbeiwert) ist im Betriebspunkt mit kleinerem Anströmwinkel größer. Beides ist eine Konsequenz der lokalen Steigung der Polare.
- Basierend auf der Betrachtung des 95%-Quantils der Streuung im Verlustbeiwert sind beide Designvarianten äquivalent im Bezug auf ihre Robustheit. Die Differenz beträgt 0,015%-Punkte. Variante B wäre im Rahmen eines Auslegungsprozesses einer Designvariante A vorzuziehen.

Der vorliegende Anwendungsfall zeigt, dass mit den entwickelten Methoden die technischen Grundlagen für eine probabilistisch fundierte Robustheitsbewertung sowie robuste Optimierungen geschaffen wurden. Anstelle von deterministischen Einzelrechnungen unter der Annahme von Sicherheit hinsichtlich Geometrie und Randbedingungen können somit Bewertungen unter Unsicherheit erfolgen, die aufgrund der modularen Strukturen in OPUS vom Anwender des Verfahrens flexibel an- und abgewählt werden können.

3 Literaturverzeichnis

[Mag_2018] Ph. Magin, F. Danner, M. Binz, Ch. Keller: Towards Robust Turbomachinery Design: Parametric Blade Synthesis Based on Quality Control Data; Proceedings of GPPS Forum 2018; GPPS-2018-0127

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht Forschungsvorhaben COOREFLEX-turbo Vorhaben-Nr. 1.3.1b „Robustes Aerodesign“	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Florian Danner, Sebastian Mann	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.05.2018
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MTU Aero Engines AG Dachauer Straße 665 80995 München	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03ET7040L
	11. Seitenzahl 31
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 1
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 15
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Rahmen des Vorhabens wurden Methoden entwickelt, die als Grundlage für Robustheitsbewertungen von Turbomaschinen-entwürfen hinsichtlich ihrer aerodynamischen Güte dienen. Als ein zentraler Bausteine zur Robustheitsbewertung wurde dazu eine Prozesskette entwickelt, welche die Berücksichtigung von unsicheren Informationen zulässt. Eine existierende, für Optimierungsaufgaben entwickelte Prozesslandschaft, wurde sowohl um probabilistische Methoden als auch um zusätzliche Parallelisierungsoptionen erweitert. Insbesondere wurde ein Prozess zur parametrischen Analyse und Synthese von Schaufel-geometrien etabliert, der den Anforderungen einer probabilistischen Betrachtungsweise gerecht wird. Als Grundlage für eine industrielle Anwendung der entwickelten Methoden wurden verschiedenartige Maße zur Quantifizierung der Robustheit untersucht sowie die Eignung von gradientenbasierten Optimierungsverfahren im Hinblick auf Robustheit geprüft. Aus einer realitätsnahen Anwendung der entwickelten Prozesse konnten grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden, die eine Indikation für einflussreiche Entwurfparameter zur robusten Auslegung vorgeben. Die Ergebnisse trugen ferner zur Plausibilisierung des Gesamtprozesses und im Speziellen zur gewählten Vorgehensweise bei der Robustheitsbewertung bei.	
19. Schlagwörter	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Final Report Research Program COOREFLEX-turbo, Project No. 1.3.1b "Robust Aero Design"	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Florian Danner, Sebastian Mann	5. end of project 05/31/2018
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) MTU Aero Engines AG Dachauer Straße 665 80995 München	9. originator's report no.
	10. reference no. 03ET7040L
	11. no. of pages 31
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 1
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 15
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Within the framework of this project methods were developed, which provide the basis for the assessment of robustness of turbomachine schemes concerning aerodynamic performance. As a central element of the assessment of robustness a process chain was established, which allows to consider uncertainties of information. An existing process landscape designed for optimisation tasks was extended with probabilistic methods and with further options for parallelisation. Especially a process was established for the parametric analysis and synthesis of blade geometries, which was fitted to the probabilistic approach. As a fundament for the industrial application of the developed method, several measures to quantify the robustness were investigated as well as the feasibility of gradient based methods to optimise robustness. By using the process for a realistic application, fundamental findings were detected, which give an indication for the most influencing parameters concerning robustness. The results gave a contribution to make the overall process plausible, especially for the chosen approach of the assessment of robustness.	
19. keywords	
20. publisher	21. price