

Mehr-Ziel-Optimierung eines Axialverdichters mit Hilfe eines gekoppelten Strömungslösers

K. Becker, Fachgebiet Strömungsmaschinen, Universität Kassel, Deutschland

C. Voß, Institut für Antriebstechnik, DLR, Deutschland

Mit der heutigen Rechenleistung können mehrstufige Axialverdichter in einem industriellen Auslegungsprozess zeitnah nicht vollständig dreidimensional optimiert werden. In der Regel ist man gezwungen, sich auf einzelne Gitter oder eine Stufe zu beschränken. Die Ein- und Austrittsbedingungen für die 3D-Rechnungen werden dabei den Daten des Ausgangsentwurfs entnommen. Es stellt sich daher die Fragen, wie die Optimierung einzelner Schaufelreihen das Verhalten des Gesamtverdichters beeinflusst und inwieweit sich die Randbedingungen der 3D-Rechnung verändern. Zur Beantwortung dieser Frage wird in dieser Arbeit ein gekoppelter Strömungslöser vorgestellt, der sich aus einem 3DNavier-Stokes-Strömungslöser und einer Throughflow-Rechnung zusammensetzt.

Durch die Kopplung der beiden Strömungsrechnungen eröffnen sich weitere Optionen zum Aufbau der Zielfunktionen. Neben den Strömungsgrößen der optimierten Gitter können nun auch die das Gesamtverhalten beschreibenden Kenngrößen wie z. B. der Gesamtwirkungsgrad verwendet werden, um die einzelnen Entwürfe zu bewerten. Als Optimierungsschale wird hier ein asynchroner, evolutionärer Algorithmus verwendet, der für den Einsatz bei Mehr-Ziel-Optimierung gedacht ist. Der Einsatz verschiedener Ersatzmodelle beschleunigt das Verfahren zusätzlich. Aus den Modellen abgeleitete Entwürfe werden anschließend mit dem gekoppelten Löser nur dann analysiert, wenn sie vielversprechend sind.

1. EINLEITUNG

In der Auslegung von Verdichtern nimmt die Bedeutung von CFD-Anwendungen in Kombination mit Optimierungsstrategien stetig zu. In diesem Zusammenhang werden sehr oft genetische oder evolutionäre Algorithmen eingesetzt. Die Vorteile dieser Strategien liegen in der Robustheit bezüglich verrauschter Daten, dem Erfassen zulässiger Bereiche und der guten Parallelisierbarkeit¹. Die stochastischen Eigenschaften dieser Optimierungsalgorithmen erfordern allerdings viele CFD-Rechnungen auf der Suche nach dem Optimum. Daher werden verschiedene Beschleunigungstechniken wie Neuronale Netze^{2,3} und Kriging-Modelle⁴ eingesetzt, um die Zahl der notwendigen Auswertungen zu reduzieren.

Derzeitige Rechenleistungen und 3D-Strömungslöser erlauben es im Auslegungsprozess mehrstufiger Axialverdichter nicht, die dreidimensionale Optimierung auf den gesamten Verdichter anzuwenden. Zurzeit können nur einzelne Schaufeln bzw. Stufen dreidimensional verbessert werden. Um die Auswirkungen der 3D-Optimierung auf den Gesamtverdichter jedoch berücksichtigen zu können, wird hier ein gekoppelter Strömungslöser eingeführt, der die 3D-Rechnung mit einem Meridianströmungsverfahren verbindet. Durch die Throughflow-Rechnung können zum einen die Randbedingungen der 3D-Rechnung für die einzelnen Schaufelgeometrien angepasst werden und zum an-

deren die Einflüsse auf den Gesamtverdichter dargestellt werden. So wird die Verlässlichkeit des Optimierungsprozesses erhöht.

Die Arbeit ist in vier Abschnitte eingeteilt. Zunächst wird das Prinzip des gekoppelten Strömungslösers im Detail beschrieben. Danach wird der Optimierungscod *AutoOpti* vorgestellt, der in den letzten Jahren am DLR in Köln⁵ entwickelt wurde. Der Fokus liegt dabei auf der notwendigen Prozesskette für den gekoppelten Strömungslöser. Anschließend wird der Löser am Beispiel des 3-stufigen Axialverdichters der RWTH Aachen angewendet. Im betrachteten Beispiel ist nur der dritte Rotor für die Optimierung freigegeben, und es wird nur der Auslegungspunkt als Betriebspunkt benutzt. Die Optimierungsziele sind so gewählt, dass sowohl das Strömungsfeld der dreidimensional optimierten Schaufeln als auch die Leistung des Gesamtverdichters verbessert werden. Schließlich werden die Auswirkungen auf die Kopplung erläutert, wenn die Meridianrechnung mit aufgelösten Seitenwandgrenzschichten durchgeführt wird.

2. NOMENKLATUR

Symbole

DF	Diffusionszahl
$\dot{m}$	Massenstrom

Ma	Machzahl
r	Radius
s	Entropie
α	Strömungswinkel (in Umfangsrichtung)
β	Strömungswinkel (in radialer Richtung)
η	Wirkungsgrad
Π	Druckverhältnis
θ	Temperaturverhältnis
ω	Totaldruckverlustbeiwert

Abkürzungen

CDA	Controlled Diffusion Airfoil
RANS	Reynolds-gemittelt Navier-Stokes
Ref	Referenz
Rot3	dritter Rotor
Sta2	zweiter Stator
Sta3	dritter Stator
OptiN	optimale Verdichterkonfigurationen

Indizes

0	Eintritt
1	Vorderkante
2	Hinterkante
3	Austritt
avg	gemittelt
is	isentrop
m	meridional
max	maximal
pol	polytrop
r	radial
rel	relativ
stat	statisch
t	total
u	tangential

3. AERODYNAMISCHES MODELL

Der hier beschriebene gekoppelte Strömungslöser kombiniert die 3D-Simulation mit einem Throughflow-Verfahren.

3.1. Strömungslöser

Als Meridianströmungslöser wird der fachgebietseigene Programmcode *MAGELAN* verwendet. Der numerische Algorithmus orientiert sich an den Arbeiten von Moore⁶ und Rhie⁷. Die allgemeine Vorgehensweise bei dem hier eingesetzten Verfahren besteht aus der Vorgabe einer Startverteilung des Druckfeldes, der Vorgabe der Randbedingungen am Eintritt sowie des Massenstroms, dem Bestimmen der stromabliegende Strömungsgrößen durch vorwärtsschreitende Integration der Bewegungsgleichungen und der Energiegleichung sowie der Korrektur des Druckfeldes zum Gewährleisten der Kontinuität. Verluste und Umlenkungen der einzelnen Schaufelreihen werden

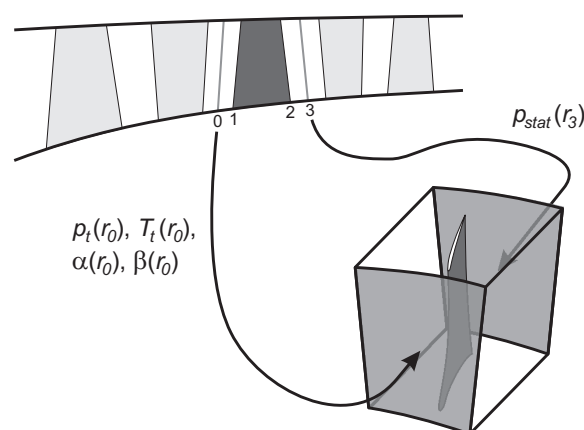


BILD 1: Austausch der Strömungsdaten zwischen der 2D- und 3D-Strömungsrechnung

durch Korrelationen modelliert. Es kann sowohl reibungsfrei bzw. reibungsbehaftet gerechnet werden. Der Algorithmus enthält daher Modelle für Sekundärströmungen und radiale Mischung,⁸ die nur im reibungsbehafteten Fall verwendet werden. Im Folgenden wird zunächst nur der reibungsfreie Fall für die Kopplung betrachtet.

Die notwendigen Korrelationen für die Totaldruckverluste und die Vorhersage der Minderumlenkung sind aus den Arbeiten von Çetin et al.⁹ und Lieblein¹⁰ abgeleitet. Die Verluste werden in Abhängigkeit von der Schaufelgeometrie und den Strömungsdaten über den Totaldruckverlustbeiwert beschrieben. Der Gesamtverlust setzt sich aus Profil- und Inzidenzverlusten sowie Stoß-, Spalt-, Sekundär- und im reibungsfreien Fall auch Seitenwandverlusten zusammen. Die Verlustbeiwerte werden abschließend noch aufgrund von Reynoldszahleffekten korrigiert. Die Ergebnisse der Korrelationen werden in eine äquivalente, der Strömung entgegengerichtete Schaufelkraft umgewandelt.

Zur Simulation der dreidimensionalen, turbulenten Strömung wird das Programm *TRACE* des DLR eingesetzt. Es handelt sich dabei um einen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Löser, der auf einem zellenzentriertem Finite-Volumen-Verfahren basiert und ein $k-\omega$ -Modell zur Bestimmung der turbulenten Viskosität nutzt. Nähere Angaben zum Verfahren finden sich z. B. in Kügeler et al.¹¹ und Nürnberger¹².

3.2. Kopplung der Strömungslöser

Besonders wichtig in der Kopplung ist der Austausch von Informationen zwischen den beiden Strömungslösern. In Bild 1 und Bild 2 ist der Datenfluss schematisch dargestellt. Aus der Throughflow-Rechnung werden die 3D-Randbedingungen an Eintritt und Austritt ermittelt. Dazu sind am Eintritt die radialen Verteilungen des Totaldrucks $p_t(r_0)$, der Totaltemperatur $T_t(r_0)$ und der beiden Strömungswinkel $\alpha(r_0)$ und $\beta(r_0)$ erforderlich. Am Austritt muss die radiale Verteilung des statischen Drucks $p(r_3)$

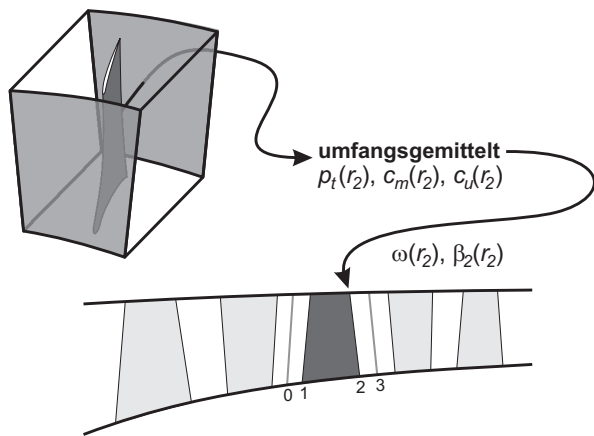


BILD 2: Austausch der Strömungsdaten zwischen der 3D- und 2D-Strömungsrechnung

vorgegeben werden. Im Gegenzug liefert die 3D-Rechnung Informationen über die Strömung innerhalb der dreidimensional berechneten Gitter, durch die dann die Korrelationen in der Throughflow-Rechnung ersetzt werden können. Dazu werden aus den Strömungsinformationen durch eine Umfangsmittelung die radialen Verteilungen der Gitterverluste $\omega(r_2)$ und Abströmwinkel $\beta(r_2)$ bestimmt. Die Indizes 1 und 2 repräsentieren hier Vorder- und Hinterkante der Schaufeln. Die Indizes 0 und 3 beziehen sich hier auf Ein- und Austrittsebene des 3D-Netzes.

Der gekoppelte Strömungslöser startet mit einer Throughflow-Rechnung für den Gesamtverdichter, in der für alle Strömungsgitter die beschriebenen Korrelationen benutzt werden. Da im Vergleich zu 3D-Rechnungen diese sehr schnell ablaufen, lässt man die Throughflow Rechnungen auskonvergieren. Falls diese Anfangsrechnung erfolgreich ist, werden die 3D-Randbedingungen, in Bild 1 dargestellt, extrahiert und an die 3D-Rechnung übergeben. Mit diesen Randbedingungen wird die 3D-Rechnung gestartet. Nach einer festgelegten Iterationszahl wird die Rechnung angehalten und aus den Daten werden durch Umfangsmittelung die Informationen über Verluste und Abströmwinkel berechnet, wie es in Bild 2 gezeigt ist. Es schließt sich nun eine weitere Throughflow-Rechnung an. Anstelle der Korrelationen werden jetzt für das zu optimierende Gitter die Daten aus der 3D-Rechnung verwendet. Für die restlichen, nicht dreidimensional berechneten Gitter werden weiterhin die Korrelationen benutzt. Ist der Durchlauf erfolgreich, werden die Randbedingungen der 3D-Rechnung wieder aktualisiert und das dreidimensionale Navier-Stokes Verfahren fortgesetzt. Dieser Zyklus wiederholt sich so lange, bis sowohl die 3D-Rechnung konvergiert ist und die 3D-Randbedingungen sich nicht mehr verändern. In diesem Fall ist der gekoppelte Löser konvergiert. Falls jedoch ein Schritt in diesem iterativen Prozess fehlschlägt, gilt die gekoppelte Rechnung als nicht konvergiert.

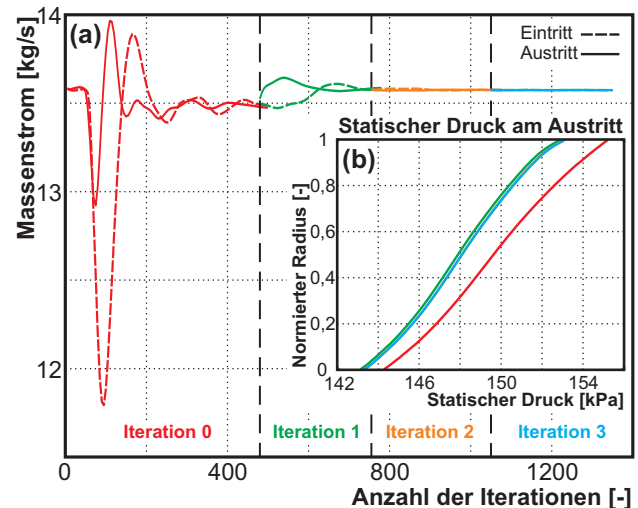


BILD 3: Konvergenzverhalten des gekoppelten Strömungslösers: (a) Massenstromverlauf in Ein- und Austrittsebene der 3D-Simulation; (b) radiale Verteilung des statischen Austrittsdrucks in der 3D-Rechnung

3.3. Konvergenzverhalten des gekoppelten Systems

Für die Bewertung des Konvergenzverhaltens müssen drei Aspekte betrachtet werden, die Konvergenzverläufe des 3D-Strömungslösers und des Meridianströmungslösers sowie die wechselseitige Beeinflussung beider Strömungslöser. In den durchgeführten Untersuchungen wurde der 3D-RANS-Strömungslöser *TRACE* mit dem Meridianströmungslöser *MAGELAN* verknüpft. Die im Folgenden beschriebenen Konvergenzkriterien und Einschränkungen beziehen sich daher auf die Kopplung dieser beiden Strömungslöser.

Im dreidimensionalen Verfahren werden das mittlere Residuum, der isentrope Wirkungsgrad und die Massendruckdifferenz zwischen der Ein- und Austrittsebene als Konvergenzkriterien verwendet. Beim Meridianströmungslöser wird üblicherweise der Betrag der Druckkorrektur als Konvergenzindikator genutzt. In Voruntersuchungen zeigte sich jedoch, dass dieses Kriterium im gekoppelten Löser zu eng gefasst ist. Kleine Änderungen der Geometrie und die Übergabe der Strömungsinformationen aus der 3D-Rechnung haben bewirkt, dass viele Designvariationen als divergent gewertet wurden. Daher werden hier die Änderungen des Druckverhältnisses und des polytropen Wirkungsgrads in den letzten Iterationen als Kriterium verwendet. Wenn beide Größen innerhalb einer vorgegebenen Toleranz liegen, gilt die Rechnung als konvergiert.

Das Konvergenzverhalten des gekoppelten Lösers ist in Bild 3 erläutert. Als Verdichter wurde hier der 3-stufige Axialverdichter der RWTH Aachen verwendet, und das Laufrad der 3. Stufe wurde mit dem 3D Navier-Stokes Verfahren berechnet. Dargestellt ist in Bild 3a die Entwicklung des Massenstroms am Ein- und Austritt des dritten Rotors. Wie bereits erwähnt, startet der gekoppelte Löser

mit einer Meridianströmungsrechnung, die auch die 3D-Randbedingungen liefert. Die Entwicklung des Eintrittsmassenstroms gestaltet sich sehr glatt und wird nicht durch geänderte Randbedingungen gestört. Beim Austrittsmassenstrom zeigen sich hingegen Sprünge im Verlauf, deren Ursache in der Aktualisierung der Randbedingungen liegt. Im kleineren Fenster (Bild 3b) ist für jede Iteration der radiale Verlauf des statischen Drucks am Austritt aufgetragen. Der große Spalt zwischen dem Ausgangsdaten und der ersten Aktualisierung resultiert aus dem Einsatz der 2D-Korrelationen in der anfänglichen Meridianströmungsrechnung. Die Differenz zwischen der 2. und 3. Aktualisierung ist schon so gering, dass die beiden Linien sehr nah beieinander liegen. Nach knapp 1300 Iterationen konvergiert auch die 3D-Rechnung. Der Konvergenzverlauf ist folglich nicht langsamer als bei einzelnen 3D-Rechnungen ohne Kopplung. Damit die Kopplung auch als erfolgreich gilt, dürfen die Massenströme nicht mehr als 1% voneinander abweichen.

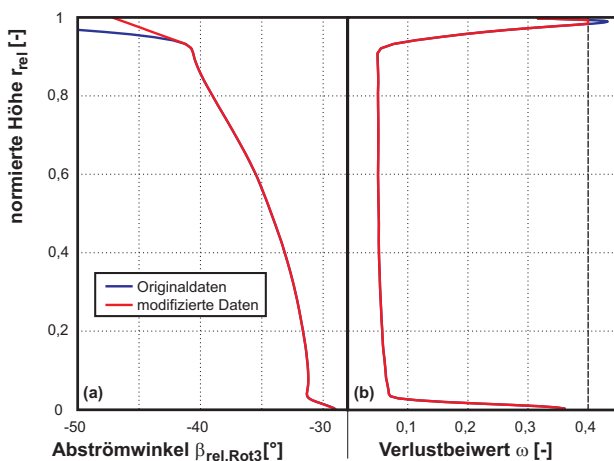


BILD 4: Restriktionen für den Abströmwinkel (a) und die Verluste (b) innerhalb der Throughflow Rechnung

3.4. Restriktionen für den Abströmwinkel und die Verluste innerhalb der Throughflow Rechnung

Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Basis der beiden hier verwendeten CFD Strömungslöser können die umfangsgemittelten radialen Verteilungen für Abströmwinkel und Verluste nicht direkt in der Meridianrechnung verwendet werden. In der 3D Navier-Stokes Rechnung führen die Grenzschichten an Nabe und Gehäuse in Verbindung mit dem Druckgradienten in Umfangsrichtung zu ausgeprägten Sekundärströmungen, die im Gehäusebereich noch durch die Spaltströmung beeinflusst wird. Diese Vorgänge haben starke Gradienten in den Strömungsgrößen zur Folge, die in dem Throughflow-Modell nur begrenzt berücksichtigt werden können, da in diesem Verfahren Schubspannungen in den Impulsgleichungen nicht enthalten sind. Um Probleme mit extremen Änderungen des Abströmwinkels in den Randschichten zu vermeiden, wird bei der Übergabe der umfangsgemittelten Ergebnisse aus der

3D-Rechnung der Gradient des Abströmwinkels begrenzt. In Bild 4a ist die Änderung des Abströmwinkels im Vergleich zu den Daten der ursprünglichen Verteilung dargestellt. Die Verläufe unterscheiden sich nur im Blattspitzenbereich.

Eine ähnliche Situation ergibt sich auch hinsichtlich des Totaldruckverlustbeiwertes, der im seitenwandnahen Bereich sehr groß wird. Beim direkten Übertragen dieser Werte in eine äquivalente Widerstandskraft in der Throughflow-Rechnung führt dies unter Umständen zu Ablöseerscheinungen, die einen Abbruch der Rechnung zur Folge haben. Aufgrund der fehlenden Schubspannungen im Meridianströmungsmodell müssen daher die Totaldruckverluste ebenfalls limitiert werden. In den durchgeführten Untersuchungen wurde ein Maximalwert von $\omega_{pt} = 0,40$ benutzt. In Bild 4b ist exemplarisch die radiale Verteilung des umfangsgemittelten Totaldruckverlustes als Ergebnis der 3D-Rechnung zusammen mit dem Grenzwert dargestellt.

4. MEHR-ZIEL OPTIMIERUNG

Als Mehr-Ziel-Optimierungsstrategie wird ein asynchroner evolutionärer Algorithmus eingesetzt, zu dessen Beschleunigung verschiedene Antwortflächen eingesetzt werden. Der Optimierungscode ist mit *MPI* parallelisiert und besteht aus einem Hauptprozess und mehreren Unterprozessen. Im Hauptprozess werden alle berechneten Datensätze in einer Datenbank, entsprechend ihrem Paretorang¹³, verwaltet. Zusätzlich werden hier neue Member für die Optimierung aus Mutation, Crossover und Differential Evolution sowie den Antwortflächen abgeleitet.

Die Antwortflächen werden separat von der Optimierung trainiert. Im Verlaufe der Optimierung wird das Training öfters wiederholt, basierend auf dem augenblicklichen Stand der Datenbank. Die neuen vielversprechenden Kandidaten werden an die Optimierung verschickt und anschließend durch den gekoppelten Strömungslöser berechnet. Zur Auswahl stehen Neuronale Netze, Kriging-Modelle und polynomiale Antwortflächen.

Die Member werden in den Unterprozessen anhand einer Prozesskette ausgewertet. Nähere Einzelheiten bezüglich des Optimierungsalgorithmus finden sich in Voß et al.⁵ und Dorfner et al.¹⁴. Daher werden im Folgenden nur die Änderungen aufgrund des gekoppelten Strömungslösers beschrieben.

In Bild 5 ist die Prozesskette des gekoppelten Strömungslösers schematisch dargestellt. Sie lässt sich in vier Abschnitte einteilen, die Erzeugung der Verdichtergeometrie, da, die Strömungssimulation und das Postprocessing.

Änderungen in der Geometrie

Vom Hauptprozess erhält der Slave einen Datensatz in normierter Form. Für das Programm zur Erzeugung der Be-

schaufelungsoberfläche müssen die Werte zunächst in reale Geometriedaten umgewandelt werden. Der Schaufelgenerator ist als CAD-Werkzeug am Institut für Antriebstechnik des DLR entwickelt worden und basiert auf B-Spline Kurven und B-Spline Tensorprodukten¹⁵. Durch die große Vielfalt möglicher Geometrien kann es schnell zu nicht zulässigen Entwürfen kommen, da sie den mechanischen und strukturellen Anforderungen nicht gewachsen sind.

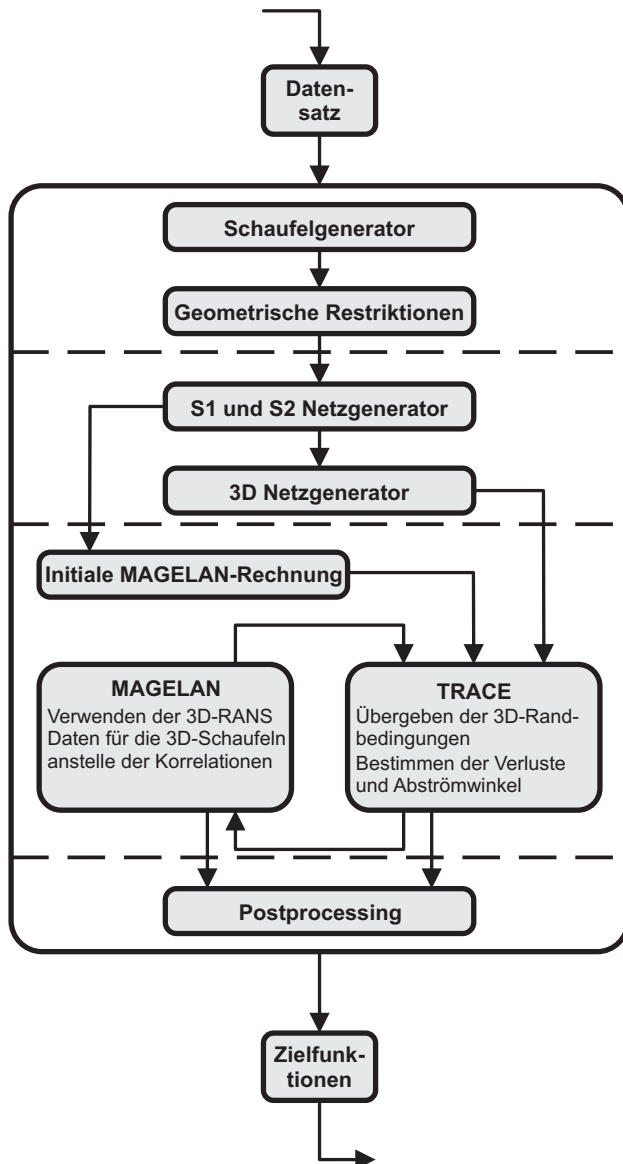


BILD 5: Schematische Darstellung der Prozesskette für den gekoppelten Strömungslöser

Aus diesem Grund ist dem Schaufelgenerator ein Modul nachgeschaltet, in dem die Entwürfe auf geometrische Restriktionen überprüft werden. Dadurch wird verhindert, dass ungeeignete Geometrien unnötigerweise an die Netzgenerierung weitergegeben werden. Die angewendeten geometrischen Restriktionen basieren auf einer Fortentwicklung der in Voß et al.⁵ beschriebenen Vorgehens-

weise. Zunächst werden die einzelnen Profile zweidimensional auf Restriktionen überprüft. Danach wird die gesamte Schaufel untersucht. Überprüft werden dabei der Staffellungswinkel, die Metallwinkel an Ein- und Austritt, der Radius und die Dicke auf Extrema und Monotonie. Die Prozesskette wird abgebrochen, sollten die geometrischen Restriktionen in irgendeinem Punkt verletzt werden. In diesen Fällen erhält der Datensatz eine künstlich schlechte Bewertung, die an den Hauptprozess zurückgesendet wird.

Netzerzeugung

Das Generieren der Netze wird in zwei Schritten durchgeführt. Die S1- und S2-Netze werden durch eine Erweiterung des Programms *G3DMESH* der Firma CFD Norway erzeugt, beschrieben bei Weber¹⁶. Aus den Informationen über die Geometrie wird zudem das Rechnetz für das Throughflow-Verfahren aufgebaut. Dabei sind zum einen Vorder- und Hinterkanten Netzlinien des S2m-Netzes der 3D-Netzgenerierung und zum anderen die Ein- und Austrittsebene der 3D-Rechengebiete Netzlinien des Meridianströmungsnetzes. Der Austausch der Strömungsinformationen, wie er im vorherigen Abschnitt beschrieben ist, wird so vereinfacht. Wenn das Erstellen der zweidimensionalen Rechnetze erfolgreich war, wird ausgehend von den S1- und S2-Netzen das 3D-Rechnetz unter Verwendung von *G3DMESH* erzeugt. Die existierenden S1-Rechnetze für den Naben- und Gehäuseverlauf sowie das vorhandene S2-Netz werden dabei automatisch zum vollständigen 3D-Netz verbunden.

Gekoppelter Strömungslöser

Die einzelnen Aufgaben des gekoppelten Strömungslösers sind bereits in Kap. 3.2 ausführlich behandelt worden. Aufgrund der Struktur der Datenbasis innerhalb der Optimierung müssen alle Member bewertet werden, auch wenn die zugehörige Verdichterkonfiguration zu keinen realistischen Ergebnissen führt. Analog zur fehlgeschlagenen Überprüfung der Geometrie wird der Datensatz künstlich schlecht bewertet.

Postprocessing

Unter der Annahme einer konvergierten Strömungsrechnung werden in beiden CFD-Werkzeugen die Daten nachbearbeitet und die relevanten Strömungsgrößen bestimmt, so dass die Zielfunktionen berechnet und an den Hauptprozess zurückgesendet werden können. Auf diese Weise erhält jeder Member eine eigene qualitative Bewertung. Alle Member werden gesammelt und in der globalen Datenbank abgelegt.

5. OPTIMIERUNGSBEISPIEL

Das Potential dieses Entwurfssystems wird im Folgenden anhand des dreistufigen Axialverdichters mit Vorleitrad der

RWTH Aachen gezeigt. Der Verdichter ist detailliert vermessen worden und bietet daher eine gute Grundlage, um die Ergebnisse des gekoppelten Strömungslösers mit den Messergebnissen^{17,18} zu vergleichen und so die Resultate der Optimierung besser einschätzen zu können. Charakteristische Merkmale sind der konstant bleibende Außenradius und die *Controlled Diffusion Airfoils* (CDA). Der Verdichter ist für ein Totaldruckverhältnis von $\Pi_t = 2,03$ bei einem Massenstrom von $\dot{m} = 13,4 \text{ kg/s}$ und einer Auslegungsdrehzahl von $n = 17.000 \text{ 1/min}$ ausgelegt worden. Vergleiche mit den Messergebnissen¹⁹ zeigen, dass die Strömung mit den eingesetzten Korrelationen zufriedenstellend wiedergegeben wird, obwohl die Verlust- und Minderumlenkungsmodelle nicht speziell für CDA definiert sind.

Für die Optimierung wurde hier der dritte Rotor ausgewählt und auch nur der Auslegungspunkt als Betriebspunkt betrachtet. Es sei aber an dieser Stelle erwähnt, dass innerhalb des gekoppelten Strömungslösers auch mehrere Gitter dreidimensional gerechnet werden können, und zusätzlich mehrere Betriebspunkte berücksichtigt werden können. In diesem Optimierungsbeispiel ist darauf allerdings verzichtet worden. Der Schwerpunkt lag hier in der Prüfung und Validierung des gekoppelten Strömungslösers in einer Mehr-Ziel Optimierungsschale.

TAB 1: Designparameter der Optimierung

Konstruktionsprofile für Rotor 3	Freiheitsgrade
s-Shift des Profils (außer Nabe)	4
Änderung des Staffelungswinkels	5
Kontrollpunkt auf der Saugseite (x,y)	10
Ringraum im Bereich des Rotors 3	
Punkte auf der Nabekontur (radial)	2
Punkte auf der Gehäusekontur (radial)	2
Gesamtzahl der Designparameter	23

Die dreidimensionale Schaufelgeometrie des Rotors 3 basiert auf fünf Konstruktionsprofilen, die sich an der Nabe, in der Kanalmitte und am Gehäuse sowie bei 20% und 80% relativer Kanalhöhe befinden. Die Konstruktionsprofile werden durch B-Splinekurven und ihre Kontrollpunkte beschrieben. Das am Institut für Antriebstechnik des DLR entwickelte Oberflächenmodell basiert zunächst auf einer Generierung zweidimensionaler Profile, die dann in den 3D-Raum transformiert werden. Mittels einer *Surface Skinning* Methode wird die B-Spline-Tensorproduktoberfläche berechnet, die die Konstruktionsprofile enthält. In Tab. 1 sind alle 23 Designparameter der Optimierung aufgeführt. Das Profil an der Nabe ist fixiert, während die anderen 4 Profile jeweils in Richtung der Sehne verschoben werden können. Zusätzlich ist bei allen fünf Profilen der Staffelungswinkel freigegeben, und ein B-Splinekontrollpunkt auf der Saugseite kann in axialer und radialer Richtung variiert werden. Darüber hinaus kann die

Form des Ringraums durch die radiale Verschiebung zweier Punkte jeweils auf der Nabekontur und Gehäusekontur verändert werden. Die Variationsbreite der Designvariablen ist klein gehalten, um unzulässige Regionen im Designparameterraum zu vermeiden und den Optimierungsprozess zu beschleunigen.

Zwei Zielfunktionen definieren die Optimierung. Um den Wirkungsgrad zu verbessern, wird die erste Zielfunktion durch die Summe aus dem Wirkungsgrad des dritten Rotors und dem des Gesamtverdichters gebildet. Der Wirkungsgrad von Rotor 3 wird dabei der 3D-Strömungssimulation von *TRACE* entnommen und der Gesamtwirkungsgrad den Strömungsdaten von *MAGELAN*. Zweitens soll die aerodynamische Belastung des Verdichters im dritten Stator reduziert werden, der im Auslegungspunkt sehr hoch belastet ist. Daher werden die maximale und mittlere Diffusionszahl des letzten Stators summiert. Als zusätzliche Restriktion wird verlangt, dass das Totaldruckverhältnis des Verdichters bei fester Drehzahl und vorgegebenem Massenstrom nicht unter $\Pi_t = 2$ fallen darf, damit der Betriebspunkt erhalten bleibt.

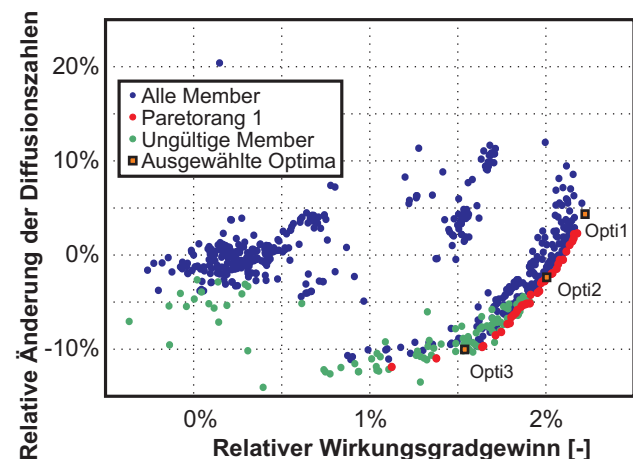


BILD 6: Darstellung der Zielfunktionswerte relativ zur Ausgangskonfiguration

In Bild 6 ist die Entwicklung der Paretofront dargestellt. Aufgetragen ist hier die prozentuale Änderung der Diffusionszahlen über dem relativen Wirkungsgradgewinn. Als Bezug ist die Ausgangskonfiguration gewählt. Die Optimierung strebt daher nach rechts unten hin zu kleineren Diffusionszahlen und einem höheren Wirkungsgrad. Die größeren Sprünge in der Datenbasis werden durch den Einsatz des Kriging-Verfahrens erzielt. Die Verteilung der Member deutet auf eine ausgebildete Paretofront hin. Die grün markierten Datenpunkte stehen für konvergierte Member, die jedoch ein zu kleines Druckverhältnis aufweisen. Aus der Vielzahl an optimalen Verdichterkonfigurationen werden für eine nähere Betrachtung drei, durch Quadrate gekennzeichnete Member herausgegriffen und mit der Ausgangskonfiguration verglichen.

- *Opti1*: hoher Wirkungsgrad
- *Opti2*: Kompromisslösung zwischen beiden Zielen
- *Opti3*: starke aerodynamische Entlastung des dritten Stators

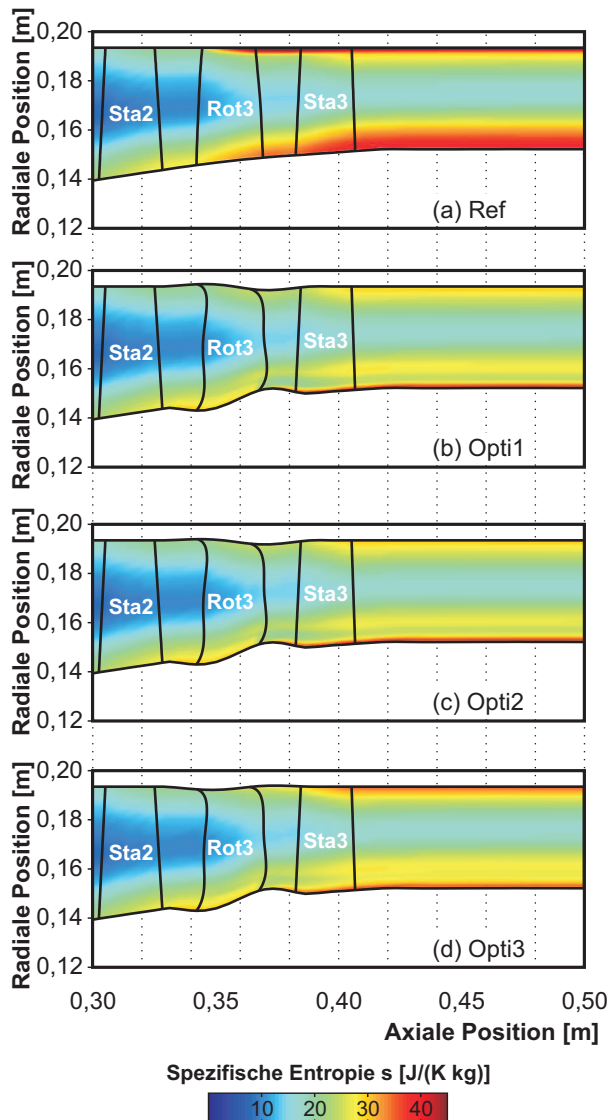


BILD 7: S2-Entropiediagramm der letzten Stufe für verschiedene Verdichterkonfigurationen

Alle drei optimierten Geometrien weisen ähnliche Ringraumkonturen auf. Bild 7 zeigt, dass die beiden variablen Punkte auf der Nabenkontur bis zum Grenzwert verschoben worden sind. Der vor dem Gitter liegende Punkt hat sich zur Maschinenachse bewegt, so dass sich der Eintrittsquerschnitt vergrößert. Der Punkt hinter der Schaufel ist dagegen ganz nach oben gewandert, wodurch sich der Strömungskanal dort verengt. Unterschiede zwischen den drei Lösungen sind dagegen in den Gehäusekonturen sichtbar. Während bei *Opti1* und *Opti2* der vordere Punkt nach oben und der hintere Punkt nach unten verschoben ist, verhält es sich bei *Opti3* entgegengesetzt. Auch

die dreidimensionalen Schaufelformen sind ähnlich, wie Bild 8 verdeutlicht. Die Schaufeln sind s-förmig geformt und im Vergleich zu Ausgangskonfiguration etwas stromauf verschoben. Die Vorderkanten sind in den Randbereichen stark stromauf gebogen. Zusätzlich sind die Schaufelspitzen in Richtung der Saugseite geneigt. Im Vergleich der optimierten Geometrien wird deutlich, dass mit steigendem Wirkungsgrad, der Spaltwirbel deutlich abnimmt.

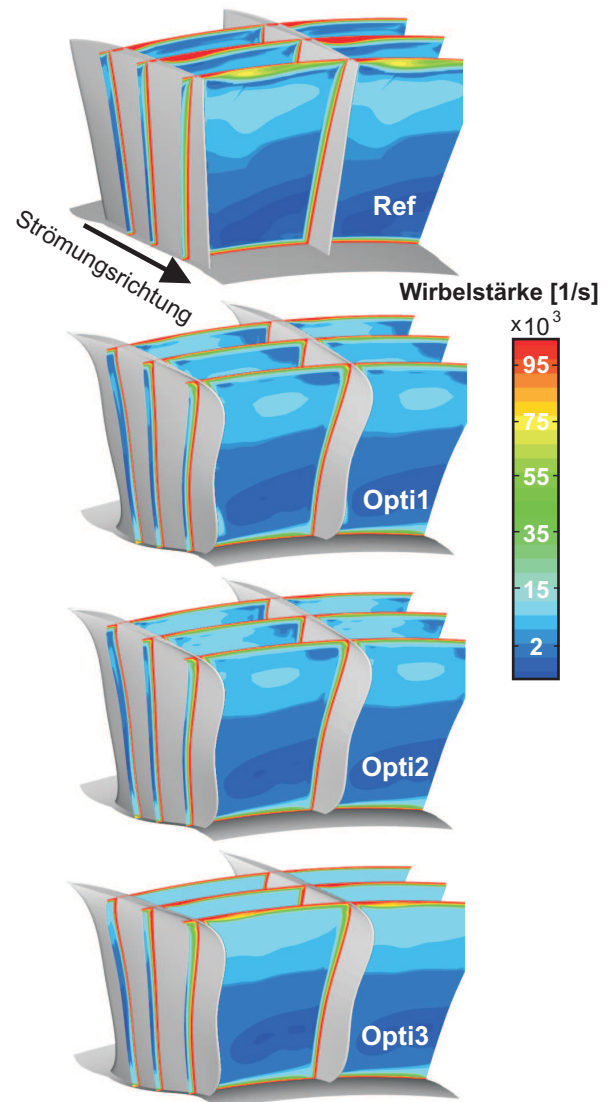


BILD 8: Spaltwirbel der optimierten Rotoren im Vergleich zur Ausgangskonfiguration

In Tab. 2 zeigen sich die Unterschiede der ausgewählten Optima. Bei *Opti1* steigen neben dem Totaldruckverhältnis $\Pi_{t_{Rot3},Opti1} = 2,05$ auch die Wirkungsgrade für den dritten Rotor $\eta_{is_{Rot3},Opti1} = 92,6\%$ und den gesamten Verdichter $\eta_{pol,Opti1} = 90,4\%$. Dieser Gewinn im Wirkungsgrad wird allerdings durch eine höhere Belastung des letzten Stators erkauft. Im Vergleich zur Ausgangskonfiguration ist die mittlere Diffusionszahl um 0,021 gestiegen.

TAB 2: Ergebnisse aus der Optimierung

	Opti1	Opti2	Opti3	Ref
Π_t	2.0522	2.0139	2.0014	2.0174
η_{pol}	0.9038	0.9020	0.8978	0.8911
$\eta_{is_{Rot3}}$	0.9258	0.9237	0.9196	0.8987
$DF_{max,Sta3}$	0.5773	0.5411	0.4859	0.5524
$\overline{DF}_{Sta3}$	0.5272	0.4923	0.4664	0.5061

Die Verdichterkonfiguration *Opti2* ist mitten aus der Paretofront entnommen und stellt einen Kompromiss zwischen Wirkungsgrad und Entlastung dar. Die starken Gewinnen in den Wirkungsgraden von *Opti1* werden hier mit $\eta_{is_{Rot3},Opti2} = 92,4\%$ und $\eta_{pol,Opti2} = 90,2\%$ nicht ganz erreicht. Allerdings bleiben die Belastungen des letzten Stators auf dem Niveau der Ausgangskonfiguration. Mit der Geometrie *Opti3* wird der letzte Stator stark entlastet. Die mittlere Diffusionszahl fällt auf $\overline{DF}_{Sta3,Opti3} = 0,466$. Das Totaldruckverhältnis liegt nur noch leicht über dem festgelegten Grenzwert. Die Wirkungsgrade liegen immer noch deutlich über den Werten der Ausgangskonfiguration.

Dieses Optimierungsbeispiel soll nur zeigen, dass durch den vorgestellten gekoppelten Strömungslöser die Anwendungsmöglichkeiten innerhalb einer Mehr-Ziel-Optimierung erweitert werden. Neben der Optimierung des dritten Rotors wird auch eine Verbesserung des Gesamtverdichterverhaltens erreicht. Denn die zugehörige Meridianströmungsrechnung erlaubt es, die Auswirkungen auf die benachbarten Schaufelreihen zu bewerten und in die Zielfunktionen einfließen zu lassen. In Becker et al.¹⁹ finden sich weitere Informationen bezüglich der drei optimierten Verdichterkonfigurationen dieses Optimierungsbeispiels.

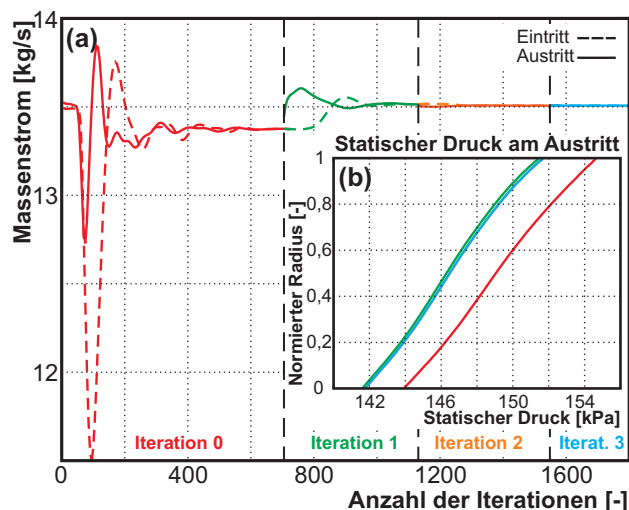


BILD 9: Konvergenzverhalten des gekoppelten Strömungslösers unter Berücksichtigung der viskosen Terme: (a) Massenstromverläufe der 3D-Simulation; (b) Statischer Austrittsdruck in der 3D-Rechnung

6. REIBUNGSBEHAFTETER ANSATZ

In den bisherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass das Prinzip des gekoppelten Strömungslösers im Rahmen einer Optimierung funktioniert. Die Untersuchungen¹⁹ belegen, dass die Kopplung stabil in der Prozesskette läuft. Um die in Kap. 3.4 festgelegten Restriktionen im Datenaustausch zu minimieren, werden nun in einem weiteren Schritt die Seitenwandgrenzschichten im Throughflow-Verfahren mit aufgelöst. Die Kopplung wird weiterhin iterativ durchgeführt.

In Bild 9 ist das Konvergenzverhalten gezeigt. Zwischen den ersten beiden Iterationen zeigt sich, genau wie in Kap. 3.3, eine deutliche Verschiebung der 3D-Randbedingung am Austritt hin zu kleineren Werten (siehe Bild 9). Die Intervalle, in denen die Randbedingungen aktualisiert werden, sind hier größer gewählt, so dass die 3D-Rechnungen vor dem nächsten Iterationsschritt schon eingeschwungen ist. Dadurch erhöht sich auch die Anzahl der Iterationen, bis das Gesamtsystem konvergiert ist.

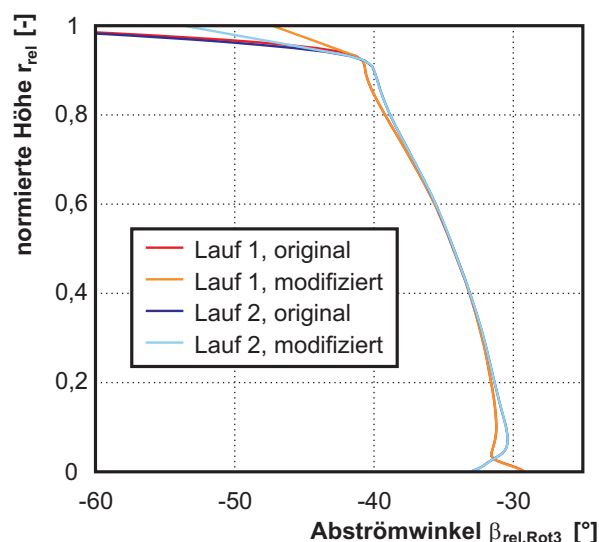


BILD 10: Restriktionen für Abströmwinkel für den reibungsfreien (Lauf 1) und den reibungsbehafteten (Lauf 2) Fall

Durch die reibungsbehaftete Vorgehensweise können die Totaldruckverlustbeiwerte ohne Beschränkung an die 2D-Simulation zu übergeben. Dies gilt nicht für die Übergabe der Abströmwinkel. In Bild 10 sind die Abströmwinkel sowohl für die reibungsfreie, als Lauf 1 bezeichnete Rechnung als auch für die Rechnung mit Seitenwandgrenzschichtauflösung (Lauf 2). In beiden Fällen können die hohen Umlenkungen im Blattspitzenbereich nicht in der Throughflow-Rechnung verwendet werden. Die dort benutzten Verteilungen sind mit 'modifiziert' bezeichnet. Die Abweichungen in Lauf 2 sind allerdings kleiner. Auffällig sind zudem die unterschiedlichen Verläufe im Bereich des Schaufelfußes. Lauf 2 weist dort höhere Beträge

für den Abströmwinkel auf, so dass die Ergebnisse aus den Messungen¹⁸ besser wiedergegeben werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit ist ein gekoppelter Strömungslöser vorgestellt worden, der sich zunächst aus einem 3D-Navier-Stokes-Verfahren und einer reibungsfreien, aber verlustbehafteten Throughflow-Rechnung zusammensetzt. Für den komplexen Informationsaustausch mussten bestimmte Begrenzungen für die Throughflow-Rechnung eingefügt werden. Obwohl die Kopplung iterativ durchgeführt wird, konvergiert das gekoppelte System genauso schnell wie eine alleinige 3D-Simulation. Folglich bieten sich zum Aufbau der Zielfunktionen neue Optionen, ohne dass sich die Rechenzeit maßgeblich erhöht.

Das Potential des gekoppelten Löfers ist im Zusammenhang mit der Mehr-Ziel-Optimierung anhand einer Beispielrechnung exemplarisch gezeigt worden, wobei ein Gitter für die 3D-Optimierung freigegeben ist und ein Betriebspunkt berücksichtigt wird. Im Rahmen der Optimierung konnte eine deutliche Leistungssteigerung sowohl des Einzelgitters als auch des Gesamtverdichters bei gleichzeitiger Berücksichtigung der aerodynamischen Belastungen erreicht werden. Das vorgestellte Verfahren lässt sich leicht auf mehrere 3D-Gitter und weitere Betriebspunkte anwenden.

Um die Strömung besser wiederzugeben, sind dann die Seitenwandgrenzschichten innerhalb der Meridianrechnung zusätzlich aufgelöst worden. Dadurch konnten zum einen die Beschränkungen für den Datenaustausch teilweise aufgehoben werden. Die Abströmwinkel müssen allerdings immer noch nachbehandelt werden. Zum anderen werden die Strömungsverhältnisse auch besser wiedergegeben.

Mit diesem überarbeiteten gekoppelten Strömungslöser gilt es nun Optimierung durchzuführen. Dabei ist angedacht, mehr als einen Betriebspunkt zu rechnen und auch die Zahl der 3D-optimierten Schaufelreihen zu erhöhen.

Literatur

- [1] Ahmed, R., 2005. *Auslegung vielstufiger Axialverdichter mit parallelen Evolutionsstrategien und neuronalen Netzen*, Vol. Reihe 7, Nr. 469. VDI Verlag.
- [2] Rai, M. M., 2006. "Single- and Multiple-Objective Optimization with Differential Evolution and Neural Networks". *VKI Lecture Series 2006-03: Introduction to Optimization and Multidisciplinary Design*.
- [3] Giannakoglou, K. C. und Karakasis, M. K., 2006. "Hierarchical and Distributed Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithms". *VKI Lecture Series 2006-03: Introduction to Optimization and Multidisciplinary Design*.
- [4] Keskin, A., Swoboda, M., Dutta, A. K., Flassig, P. M. und Bestle, D., 2008. "Accelerated Industrial Blade Design Based On Multi-Objective Optimization Using Surrogate Model Methodology". *ASME Paper GT2008-50506*.
- [5] Voß, C., Aulich, M., Kaplan, B. und Nicke, E., 2006. "Automated Multiobjective Optimisation in Axial Compressor Blade Design". *ASME Paper GT2006-90420*.
- [6] Moore, J. G., 1985. "An elliptic procedure for 3d viscous flow". In *3D Computation Techniques Applied To Internal Flows In Propulsion Systems*, AGARD LS-140.
- [7] Rhie, C. M., 1986. *A Pressure Based Navier-Stokes Solver Using the Multigrid Method*.
- [8] Fay, G., 2002. "Zur Berechnung der Meridianströmung subsonischer Axialverdichter auf der Basis der umfangsgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen". *Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Universität Kassel*.
- [9] Çetin, M., Üçer, A. c., Hirsch, C. und Serovy, G. K., 1987. "Application of Modified Loss and Deviation Correlations to Transonic Axial Compressors". *AGARD-R745*.
- [10] Johnsen, I. A. und Bullock, R. O., 1965. "Aerodynamics Design of Axial-Flow Compressors". *NASA SP-36*.
- [11] Kügeler, E., Weber, A. und Lisiewicz, S., 2001. "Combination of a Transition Model with a Two-Equation Turbulence Model and Comparison with Experimental Results". *Proceedings of the 4th European Turbomachinery Conference, Florence, Italy, ATI-CST-076/01*.
- [12] Nürnberger, D., 2004. "Implizite Zeitintegration für die Simulation von Turbomaschinenströmungen". *Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum*.
- [13] Abbas, H. A., Sarker, R. und Newton, C., 2001. "PDE: A Pareto-Frontier Differential Evolution Approach for Multi-Objective Optimization Problems". *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, 2, May, pp. 971–978.
- [14] Dorfner, C., Nicke, E. und Voss, C., 2007. "Axis-Asymmetric Profiled Endwall Design Using Multi-objective Optimization Linked with 3D-RANS-Flow-Simulations". *ASME Paper GT2007-27268*.
- [15] Piegl, L. und Tiller, W., 1997. "The Nurbs Book, Monographs in Visual Communication". 2nd ed., ISBN 3-540-61545-8, Springer Verlag.

- [16] Weber, A., 2004. "3D Structured Grids for Multistage Turbomachinery Applications based on G3DMESH". *1st revision ed. Institute of Propulsion Technology, German Aerospace Centre, Cologne, February, DLR IB-325-05-04.*
- [17] Hoynacki, A., 1999. "Einfluss von instationärer Strömung und Turbulenz auf die Grenzschicht und auf die Druckverteilungen von Beschaukelungen moderner mehrstufiger Verdichter". *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., Frankfurt, Abschlussbericht Vorhaben Nr. 601.*
- [18] Bohne, A., 2002. "Einfluss von instationärer Strömung und Turbulenz auf die Profilmströmung und das Grenzschichtverhalten moderner Beschaukelungen mehrstufiger Axialverdichter im off-design-Bereich". *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., Frankfurt, Abschlussbericht Vorhaben 694.*
- [19] Becker, K., Lawerenz, M., Voß, C. und Mönig, R., 2008. "Multi-Objective Optimization In Axial Compressor Design Using A Linked CFD-Solver". *ASME Paper GT2008-51131.*