

DLRK2008-081222

VALIDIERUNG OPTIMISierter VERDICHTERSCHAUFELN MIT HILFE DER 3D-CFD

A. K. Dutta, P. M. Flassig, D. Bestle

Lehrstuhl Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Deutschland
E-Mail: Amit.Dutta@tu-cottbus.de

A. Keskin, M. Swoboda

Compressor Aerodynamics
Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG
Deutschland
E-Mail: Akin.Keskin@Rolls-Royce.com

1 KURZFASSUNG

Der aerodynamische Schaufelentwurf, eine Teildisziplin der Verdichterauslegung von Triebwerken, ist ein äußerst zeitaufwändiger und damit kostenintensiver Prozess. Die Entwurfsphase, klassischerweise unterteilt in einen zweidimensionalen Schaufelprofilentwurf und ein radiales Auffädeln der entworfenen Profile zu einer dreidimensionalen Schaufel, ist durch einen hohen Detaillierungsgrad gekennzeichnet, welcher auf einer akkuraten Beschreibung der Schaufelgeometrie beruht. Dazu wird einerseits eine Parametrisierung mit hinreichender Gestaltungsfreiheit der Schaufelgeometrie gesucht, andererseits sollte diese mit möglichst wenigen Parametern eine effiziente Auslegung garantieren.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt in der Beschreibung einer aerodynamischen quasi-dreidimensionalen Schaufeloptimierung eines hochbelasteten Stators mittels geschickter Geometrieparametrisierung, um den industriellen Schaufelentwurfsprozess zu unterstützen. Hierbei wird eine dreidimensionale Schaufelgeometrieparametrisierung mit einer quasi-dreidimensionalen Auslegungsrechnung verknüpft, um die Rechenzeit für eine einzelne Analyse deutlich zu senken. Die Schaufelbeschreibung erfolgt durch Superposition einer gegebenen Dickenverteilung mit einer radial parametrisierten Skelettlinienwinkelverteilungsfläche, um die Zahl der Entwurfsvariablen zu reduzieren und stets eine glatte Schaufeloberfläche zu garantieren. Die Berechnung der Verluste im Auslegungspunkt sowie im Teil- und Überlastbereich als wesentliche Entwurfsziele einer Optimierung erfolgt durch zweidimensionale CFD-Rechnungen auf verschiedenen Schaufelschnitten und eine anschließende Mitteilung über den Radius. Das Ergebnis dieses Mehrkriterien-Optimierungsproblems sind optimale Kompromisslösungen auf der sogenannten Pareto-Front.

Da bei diesem Ansatz dreidimensionale Strömungseffekte vor allem an den Rändern vernachlässigt werden, soll im Rahmen des vorliegenden Beitrags untersucht werden, inwie-

weit die Ergebnisse des quasi-dreidimensionalen Prozesses auch das dreidimensionale Problem widerspiegeln, um die erreichten Ergebnisse zu validieren. Dazu werden die Untersuchungen in [1] fortgeführt und ausgewählte Ergebnisse mit Hilfe von 3D-CFD-Rechnungen im Stufenverband nachgerechnet. Die Ergebnisse der 3D-Strömungsanalyse werden mit einer Hochdruckverdichterstatorschaufel eines existierenden, industriellen Forschungsverdichters und mit alternativen Schaufelparametrisierungsansätzen aus [2] und [3] verglichen.

2 NOMENKLATUR

ACARE	<u>A</u> dvisory <u>C</u> ouncil for <u>A</u> eronautics <u>R</u> esearch in <u>E</u> urope
AMD	<u>A</u> dvanced <u>M</u> icro <u>D</u> evelopments
CDA	<u>C</u> ontrol <u>D</u> iffusion <u>A</u> irfoil
DP, CH, ST	Auslegungspunkt, Teil- und Überlastbereich
I, E	Ein-, Austritt (Inlet, Exit)
IGG	<u>I</u> nteractive <u>G</u> rid <u>G</u> enerator
IGV, R, S	Vorleitrad (Inlet <u>G</u> uide <u>V</u> ane), Rotor, Stator
isen, poly	isentrop, polytrop
LE, TE	Vorder-, Hinterkante (<u>L</u> eading <u>E</u> dge, <u>T</u> railing <u>E</u> dge)
MDCT	<u>M</u> atlab <u>D</u> istributed <u>C</u> omputing <u>T</u> oolbox
PS, SS	Druck-, Saugseite (<u>P</u> ressure <u>S</u> ide, <u>S</u> uction <u>S</u> ide)
red	reduziert
SL	Pumgrenze (<u>S</u> urge <u>L</u> ine)
SM	Pumgrenzabstand (<u>S</u> urge <u>M</u> argin)
S1, S2	Meridian-, Schaufelkanalstromfläche
c, c _m	Sehnenlänge, meridiane Sehnenlänge
c	Bézier-Kurve
f	Zielfunktion
h ₁ , h ₂ , h	skalare, vektorielle Ungleichheitsnebenbedingungen
i, j	Zählindex, Schaufelsektionsindex

$\mathbf{k}, \mathbf{K}$	Kontrollpunkte, Kontrollpunktmatrix der Bézier-Fläche
$\dot{m}$	Massenstrom
$p, p_0, \bar{p}$	statischer, Total-, und gemittelter statischer Druck am Austritt
$p, \mathbf{p}$	Entwurfsparameter und -vektor
r	Kreisradius, radiale Schaufelhöhe
$\tilde{r}$	relative radiale Schaufelhöhe
$\tilde{s}$	normierte Bogenlänge
t, u	Kurvenparameter
$\mathbf{s}$	Bézier-Fläche
$\tilde{x}$	normierte Sehnenkoordinate
$B_{i,j}$	Bernstein-Polynom
$\bar{H}$	kompressibler Grenzschichtformfaktor
M	Machzahl
T	Profildicke
$\mathcal{H}$	Referenzentwurf
$\mathcal{K}$	Entwurf des 2D-Ansatzes aus [2]
$\mathcal{P}, \mathcal{Q}$	ausgewählte nicht-dominierte Kompromisslösungen
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$\alpha, \Delta\alpha$	Strömungswinkel, Strömungsumlenkung
β	Metall- bzw. Skelettlinienwinkel
$\tilde{\beta}$	dimensionsloser Skelettlinienwinkel
γ	maximaler, gemittelter Verlust für den Teil- und Überlastbereich, Isentropenexponent
$\hat{\epsilon}$	Toleranz in der Strömungsumlenkung
η	Wirkungsgrad
μ	Keilwinkel
Π	Druckverhältnis
ξ	Staffelungswinkel
$\omega, \bar{\omega}$	diskreter, gemittelter Druckverlustbeiwert

3 EINLEITUNG

Der immer intensiver werdende Wettbewerb in der Triebwerksindustrie zwingt die Hersteller zu einem Umdenken in der Konzeptionierung und Entwicklung von Triebwerken. Neben leistungstechnischen und ökonomischen Gesichtspunkten von Seiten der Triebwerkshersteller werden verstärkt ökologische Aspekte miteinbezogen, wie sie in den Zielen [4] der ACARE (*Advisory Council for Aeronautics Research in Europe*) formuliert sind. Um insgesamt den steigenden Anforderungen nach effizienterem, lärm- und schadstoffreduzierterem, zuverlässigerem sowie sicherem Luftverkehr und somit auch den vorschuberzeugenden Triebwerken nachkommen zu können, müssen für zukünftige Entwicklungen bewährte Methoden und Praktiken bereits im Entwurfsprozess überdacht und durch neue, innovativere Konzepte erweitert, möglicherweise ersetzt werden. Dabei werden anerkannte und zuverlässige Entwurfsprogramme und -verfahren automatisiert und einer numerischen Mehrkriterien-Optimierungsstrategie in einer flexiblen Entwurfsumgebung zugänglich gemacht, um schneller auf verbesserte, für industrielle Zwecke akzeptable Lösungen zu kommen.

Der Verdichter als eine der wichtigsten Komponenten eines Triebwerks was Gewicht, Baulänge und Entwicklungs-

kosten angeht, spielt eine entscheidende Rolle in der Auslegung eines Triebwerks [5]. Das gegenwärtige Konzept in der aerodynamischen Verdichterauslegung ist ein schrittweise komplexer werdender Prozess, bei dem die Anzahl der Entwurfsparameter stetig ansteigt. Startpunkt ist klassischerweise die eindimensionale Mittelschnittsrechnung, bei der die Ringraumgeometrie, grundlegende thermo- und aerodynamische Stufenein- und -austrittsgrößen sowie Leistungsdaten wie Verdichtergesamtdruckverhältnis, Wirkungsgrad und Pumpgrenze festgelegt werden. Ist ein Parametersatz gefunden, werden mit Hilfe des zweidimensionalen Stromlinienkrümmungsverfahrens radiale Verteilungen aerodynamischer und thermodynamischer Parameter an spezifischen axialen Positionen des Ringraums in der sogenannten S2-Strömungsebene nach Wu [6] von der Nabe bis zum Gehäuse definiert. Hierbei steigt der Detaillierungsgrad insbesondere der Ringraumgeometrie stark an. Auf Grundlage des resultierenden zweidimensionalen Strömungsfeldes mit sämtlichen aerodynamischen Parametern werden zunächst zweidimensionale Schaufelprofile individuell generiert, die durch radiales Auffädeln und Anwendung moderner Gestaltungsprinzipien zur Beeinflussung der Sekundärströmungen eine dreidimensionale Schaufel ergeben.

Der Schaufelentwurf als finaler, äußerst zeitaufwändiger und sehr komplexer Teilprozess der aerodynamischen Verdichterauslegung mit einer Vielzahl an Entwurfsparametern ist in den letzten Jahren genauer untersucht und durch Automatisierung des Entwurfsprozesses sowie durch Anwendung der Mehrkriterien-Optimierung mit Hilfe geschickter Problemformulierungen beschleunigt und verbessert worden, z.B. in [2]. In dieser Arbeit wird gezeigt, wie 2D-Schaufelprofile entkoppelt, also sektionsweise und unabhängig voneinander, generiert und für den Auslegungspunkt sowie Teil- und Überlastbereich mit Hilfe eines genetischen Algorithmusses optimiert werden können. Das Problem bei der Zusammensetzung der 3D-Schaukel aus den einzeln optimierten Sektionen ist jedoch, dass eine Geometrieglattheit der resultierenden Schaufel nicht garantiert werden kann. Ein nachträgliches radiales Glätten der sektionsweise optimierten Schaufel würde nicht das volle Leistungspotenzial ausschöpfen und lediglich eine suboptimale Lösung darstellen.

Büche et al. [7] zeigen, wie eine Schaufel über eine radiale Parametrisierung geometrischer Größen wie z.B. dem Verhältnis der Dicke zur Sehne des Profils mit Hilfe von B-Spline-Kurven beschrieben werden kann. Mittels gewichteter Summen und Anwendung von Evolutionsstrategien sind optimierte Entwürfe gefunden worden.

Besonderes Augenmerk der vorliegenden Arbeit liegt in der Validierung der automatisierten quasi-3D Verdichterschaukeloptimierung, die in [1] vorgestellt wurde und hier fortgeführt werden soll. Durch den neuartigen Ansatz einer 3D-Schaukelparametrisierung wird die gesamte Schaufel durch wenige Parameter aufgebaut, wobei a priori radiale Glattheit der resultierenden dreidimensionalen Schaufel gewährleistet wird. Der Profilaufbau, angelehnt an die Vorgehensweise von Abott and Doenhoff aus dem Jahr 1949 [8], erfolgt über die Superposition der dimensionslosen Skelettl-

nienwinkelverteilung $\tilde{\beta}$ und der dimensionslosen Profildicke $\tilde{T}$. Der Vorteil einer dimensionslosen Darstellung liegt in der adäquaten Basis für die Parametrisierung innerhalb einer Optimierung. Da die Skelettlinie zum größten Teil die Umlenkung des Profils $\Delta\alpha = \alpha_I - \alpha_E$ quantifiziert, wobei α_I und α_E die Zu- und Abströmwinkel der Strömung darstellen, ist sie ein unmittelbarer Indikator für die Belastung des Profils [9]. Als Erweiterung des geschilderten Ansatzes wird die dimensionslose Skelettlinienwinkelverteilung einer Sektion $\tilde{\beta}$ radial über alle Sektionen betrachtet und als Bézier-Fläche parametrisiert. Überlagert mit einer gegebenen Dickenverteilung $\tilde{T}$ der Sektionen ergibt sich daraus eine komplette Schaufel [10]. Zusätzlich werden die Metallwinkel am Ein- und Austritt der Schaufel radial über die gesamte Schaufelhöhe jeweils als Bézier-Kurve parametrisiert, um durch Erhöhung des Freiheitsgrades eine flexiblere Geometriebeschreibung zu ermöglichen [1]. Damit eine zeitnahe Antwort innerhalb der Optimierung bzgl. der aerodynamischen Effizienz der Schaufel bzgl. des Verlustes im Auslegungspunkt sowie im Teil- und Überlastbereich erfolgen kann, werden auf definierten radialen Schaufelhöhen 2D-Strömungsanalysen in der S1-Ebene durchgeführt. Randbedingungen dieser Analyse werden der im Schaufelentwurfsprozess vorangehenden S2-Rechnung entnommen und versucht einzuhalten, damit der Einsatz im Stufenverband gewährleistet bleibt. Die aerodynamische Leistungsoptimierung der entworfenen 3D-Schaukel wird mittels einer repräsentativen Mittelung der zu optimierenden Zielwerte aus der 2D-Rechnung durchgeführt.

Durch Anwendung des beschriebenen Entwurfskonzeptes profitiert der Entwurfsingenieur von einem niederdimensionalen Parameterraum aufgrund des kompakten Parametrisierungsansatzes der Skelettlinien- und Metallwinkelverteilung über die Bézier-Fläche bzw. -Kurven, welche eine mathematisch einfacher formulierte Sonderform von B-Spline-Flächen bzw. -Kurven darstellen. Zudem hat diese Art der Geometriebeschreibung einen positiven Effekt auf den Findungsprozess eines optimalen Schaufelentwurfs des Mehrkriterien-Optimierungsproblems. Diese Beschreibungsart soll als Demonstration der generellen Parametrisierungsmöglichkeit dienen und kann bei anspruchsvolleren bzw. komplizierteren Geometrien angepasst und gegebenenfalls durch flexiblere B-Spline-Formulierungen ersetzt werden.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt insbesondere in der Validierung der so gewonnenen quasi-3D optimierten Schaufel, indem untersucht wird, wie sich diese Schaufel verhält, wenn sie innerhalb einer Schaufelreihe im Verdichter eingesetzt werden würde. Dafür werden zwei optimale Entwürfe aus der Front der nicht-dominierenden Lösungen des quasi-3D Mehrkriterien-Problems entnommen und volle 3D-CFD-Rechnungen im Stufenverband inklusive Turbulenzmodellierung durchgeführt.

4 SCHAUFELPARAMETRISIERUNGSKONZEPT

Bei der Parametrisierung für numerische Optimierungen ist es wichtig, einen geeigneten Kompromiss zwischen Entwurfsflexibilität und Entwurfszeit zu finden, wel-

che gegensätzliche Kriterien darstellen, [11]. Die Schwierigkeit besteht darin, den Entwurfsraum nicht zu sehr einzuschränken und genügend Freiheitsgrade zuzulassen, um das volle Optimierungspotenzial auszuschöpfen. Mit Hilfe von modernen Spline-Ansätzen [12] ist es möglich, Schaufelgeometrien direkt über die Außenkontur bzw. indirekt über Skelettlinienwinkel- und Dickenverteilung β , T zu beschreiben und Änderungen an der Geometrie einfach vorzunehmen. Letztere Beschreibungsart, insbesondere in ihrer dimensionslosen Form $\tilde{\beta}$ und $\tilde{T}$, wird nach [9] für fortschrittliche, hochbelastete CDA-Profil favorisiert, da die Anzahl der Parameter gering bleibt und gleichzeitig eine hohe Sensibilität der Entwurfsparameter auf Geometrieänderungen sichergestellt wird.

Die vorliegende Arbeit basiert auf einer Untersuchung von Dutta et al. [1] und bedient sich einer, aus einem Referenzentwurf entnommenen, dimensionslosen Dickenverteilung $\tilde{T}$, welche einer radial parametrisierten, dimensionslosen Skelettlinienwinkelverteilung $\tilde{\beta}$ überlagert wird. Dies stellt eine Erweiterung des reinen 2D-Parametrisierungsansatzes nach [9] in Richtung der relativen Schaufelhöhe $\tilde{r}$ dar. Hierdurch wird a priori eine glatte, dreidimensionale Schaufel erzeugt ohne den klassischen Weg des Auffädels von einzelnen Sektionen.

Um die Skelettlinienwinkelverteilung $\tilde{\beta}$ mit wenigen Parametern beschreiben zu können, wird eine bi-quadratische Bézier-Fläche [13] mit einem bi-direktionalen Netz von 3×3 Kontrollpunkten verwendet, welche von der relativen Sehnenlänge $\tilde{x}$ und der relativen Schaufelhöhe $\tilde{r}$ abhängt, Abb. 1. Für die Bézier-Fläche sieht diese wie folgt aus:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(t, u) &:= \left[\tilde{x}(t, u), \tilde{r}(t, u), \tilde{\beta}(t, u) \right]^T \\ (1) \quad &= \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 B_{i,2}(t) B_{j,2}(u) \mathbf{k}^{(ij)}, \end{aligned}$$

wobei

$$(2) \quad B_{i,2}(t) = \binom{2}{i} t^i (1-t)^{2-i}, \quad t \in [0, 1],$$

$$(3) \quad B_{j,2}(u) = \binom{2}{j} u^j (1-u)^{2-j}, \quad u \in [0, 1],$$

$$(4) \quad \mathbf{k}^{(ij)} = \left[\tilde{x}^{(ij)}, \tilde{r}^{(ij)}, \tilde{\beta}^{(ij)} \right]^T, \quad i, j \in [0, 1, 2].$$

Die Transformation von β , r und x in dimensionslose Größen lautet mit den Größen aus Abb. 2:

$$(5) \quad \tilde{\beta} := \frac{\beta_I - \beta(x)}{\beta_I - \beta_E} \in [0, 1],$$

$$(6) \quad \tilde{r} := \frac{r - r_{hub}}{r_{tip} - r_{hub}} \in [0, 1],$$

$$(7) \quad \tilde{x} := \frac{x}{c} \in [0, 1].$$

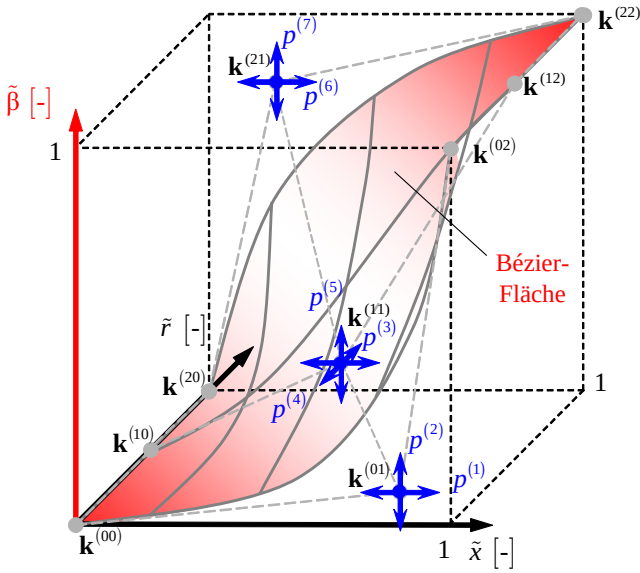


Abb. 1. Dimensionslose Skelettlinienwinkelverteilung parametrisiert mit einer Neun-Punkt-Bézier-Fläche

Die Kontrollpunktkoordinaten der Bézier-Fläche können in der Matrix $\mathbf{K}$ zusammengefasst werden. Um Randbedingungen zu genügen, müssen einige Kontrollpunkte in ihrer Bewegung fixiert werden, andere dagegen ergeben sich aus Entwurfsparametern $p^{(i)}$, $i = 1(1)7$, die willkürlich innerhalb festgelegter Grenzen gewählt werden können:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}^{(00)} & \mathbf{k}^{(01)} & \mathbf{k}^{(02)} & \mathbf{k}^{(10)} & \mathbf{k}^{(11)} & \mathbf{k}^{(12)} & \mathbf{k}^{(20)} & \mathbf{k}^{(21)} & \mathbf{k}^{(22)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & p^{(1)} & 1 & 0 & p^{(3)} & 1 & 0 & p^{(6)} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & p^{(4)} & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & p^{(2)} & 1 & 0 & p^{(5)} & 1 & 0 & p^{(7)} & 1 \end{bmatrix}.$$

Die korrespondierenden Skelettlinienwinkelverteilungen für spezifische Schaufelsektionen entlang der Stromfläche werden aus der Fläche in Abb. 1 an den entsprechenden radialen Schaufelhöhen $\tilde{r}$ bestimmt.

Zusätzlich zu der Parametrisierung der dimensionslosen Skelettlinienwinkelverteilung $\tilde{\beta}$ mittels der beschriebenen Bézier-Fläche werden die Metallwinkel $\beta_I(r)$, $\beta_E(r)$ am Ein- und Austritt der Schaufel in ihrer dimensionslosen Form

$$\tilde{\beta}_I := \frac{\beta_I^{min} - \beta_I}{\beta_I^{min} - \beta_I^{max}} \in [0, 1], \quad (9)$$

$$\tilde{\beta}_E := \frac{\beta_E^{min} - \beta_E}{\beta_E^{min} - \beta_E^{max}} \in [0, 1] \quad (10)$$

als weitere Parameter berücksichtigt. Um die Anzahl der Parameter gering zu halten, wird jeweils eine Bézier-Kurve mit nur drei Kontrollpunkten für die dimensionslosen Metallwinkel verwendet, Abb. 2. Es gilt jeweils:

$$\mathbf{c}_{I,E}(t) = \left[\tilde{r}(t), \tilde{\beta}_{I,E}(t) \right]^T = \sum_{i=0}^2 B_{i,2}(t) \mathbf{k}_{I,E}^{(i)}, \quad (11)$$

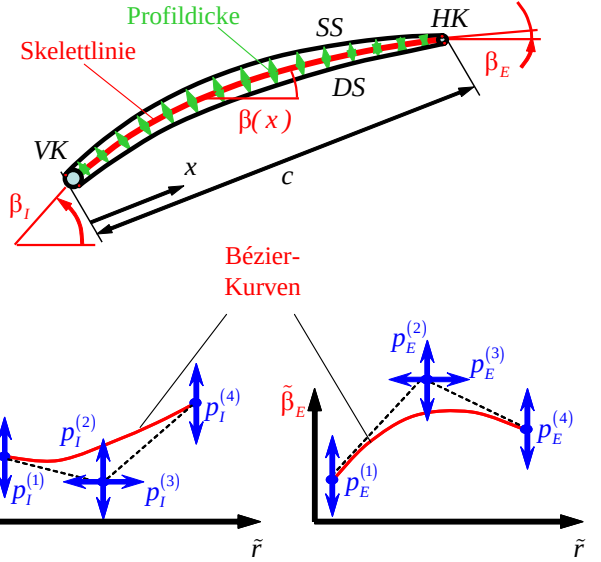


Abb. 2. Dimensionslose Metallwinkelverteilung am Schaufelein- und -austritt parametrisiert mittels Drei-Punkt-Bézier-Kurven

wobei

$$B_{i,2}(t) = \binom{2}{i} t^i (1-t)^{2-i}, \quad t \in [0, 1], \quad (12)$$

$$\mathbf{k}_{I,E}^{(i)} = \left[\tilde{r}^{(i)}, \tilde{\beta}_{I,E}^{(i)} \right]^T, \quad i \in [0, 1, 2]. \quad (13)$$

Der für die Optimierung resultierende Entwurfsvektor $\mathbf{p}$, der sich aus den zu variierenden Parametern der Bézier-Fläche und -Kurven zusammensetzt, ist gegeben durch

$$\mathbf{p} = \left[p^{(1)} \dots p^{(7)} \quad p_I^{(1)} \dots p_I^{(4)} \quad p_E^{(1)} \dots p_E^{(4)} \right]^T \in \mathbf{P}, \quad (14)$$

$$\mathbf{P} := \left\{ \mathbf{p} \in \mathbb{R}^{15} \mid \mathbf{0} \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{1} \right\}.$$

Die Parameter $p^{(1)}$ bis $p^{(7)}$ bezeichnen Kontrollpunktkoordinaten der Bézier-Fläche für die dimensionslose Skelettlinienwinkelverteilung, wohingegen die Parameter $p_I^{(1)}$ bis $p_I^{(4)}$ die Kontrollpunktvariationen der radialen Metallwinkelverteilung am Eintritt und $p_E^{(1)}$ bis $p_E^{(4)}$ die am Austritt beschreiben.

Der Einfachheit halber werden die Radien der Schaufelvorder- und -hinterkante r_{LE} , r_{TE} auf die Grenzen ihrer Herstellbarkeit gesetzt. Alle weiteren Parameter, wie der Staffelungswinkel ξ und Keilwinkel μ ergeben sich aus der gewählten Parametrisierung und globalen geometrischen Forderungen [9].

5 FORMULIERUNG DES MEHRKRITERIEN-OPTIMIERUNGSPROBLEMS

Die Auslegung einer Schaufel im Entwurfspunkt sowie für den Teil- und Überlastbereich ist von we-

sentlicher Bedeutung, um einen großen und stabilen Arbeitsbereich zu gewährleisten. Daher werden sich die Ziele der Mehrkriterien-Optimierung, wie in [1] detailliert beschrieben, auf die Minimierung des Druckverlustbeiwertes

$$(15) \quad \omega = \frac{p_{0,E}^{isen} - \bar{p}_{0,E}}{p_{0,I} - p_I}$$

beschränken, wobei $p_{0,E}^{isen}$ den Gesamtdruck am Austritt beim isentropen Aufstau, $\bar{p}_{0,E}$ den gemittelten Gesamtdruck am Austritt und $p_{0,I}$, p_I den Gesamt- bzw. statischen Druck am Eintritt kennzeichnet.

Die Betonung der vorliegenden Arbeit liegt in der quasi-3D Evaluation der Schaufelgüte mit Hilfe der 2D-Strömungsanalyse einer 3D parametrisierten Schaufelgeometrie. Die 2D-CFD beruht auf einer sektionsweisen Analyse der Strömung, wobei durch Analyse verschiedener Sektionen auf verschiedenen radialen Schaufelhöhen und darauf folgende Mittelung der resultierenden Verlustbeiwerte eine Aussage über die Güte der gesamten Schaufel gemacht werden kann. Es werden drei Schaufelhöhen betrachtet, um die erzeugten Verlustwerte zu bestimmen. Eine Linienmittelung

$$(16) \quad \bar{\omega}^{(*)} = \frac{1}{2(\tilde{r}_3 - \tilde{r}_1)} \sum_{i=1}^2 (\tilde{r}_{i+1} - \tilde{r}_i) (\omega_{i+1}^{(*)} + \omega_i^{(*)}),$$

im Gegensatz zur arithmetischen Mittelung berücksichtigt unterschiedliche Intervalle der radialen Höhe $\tilde{r}$, wobei auf $\tilde{r} = 0$ und $\tilde{r} = 1$ nicht extrapoliert wird, da 3D-Grenzschichteffekte Einfluss auf die Randzonen haben können. Der obere Index (*) steht hierbei für den Auslegungspunkt (DP) bzw. für einen Punkt Richtung Pumpen (CH) oder Sperren (ST). Letztere ergeben sich aus einer konstanten Variation des Zuströmwinkels ausgehend vom Auslegungspunkt, in Richtung Pump- und Sperrgrenze. Diese beiden Punkte dienen für die Charakterisierung des Teil- und Überlastbereiches und werden im zweiten Kriterium des Mehrkriterien-Problems durch

$$(17) \quad \gamma = \max \{ \bar{\omega}^{CH}, \bar{\omega}^{ST} \}$$

berücksichtigt. Damit sich die erzeugten Schaufelprofile in geeigneten geometrischen und aerodynamischen Grenzen bewegen, werden Nebenbedingungen formuliert. Auf der einen Seite wird ein Maximalwert $\hat{H}_E$ für den kompressiblen Grenzschichtformfaktor $\bar{H}_E^{SS}$ an der Profilhinterkante der Saugseite definiert, um eine Strömungsablösung im Bereich der Profilhinterkante zu verhindern. Andererseits wird die geforderte Strömungsumlenkung durch $\Delta\alpha_E(\tilde{r}_i) = \alpha_E^{S2}(\tilde{r}_i) - \alpha_E^{S1}(\tilde{r}_i)$ innerhalb einer gewissen Toleranz $\hat{\epsilon}$ restringiert, um den Druckaufbau der Folgestufe zu sichern. Dabei kennzeichnet α_E^{S2} den geforderten Abströmwinkel aus dem Stromlinienkrümmungsverfahren, dem vorangegangenen Schritt im Schaufelentwurfsprozess und α_E^{S1} den Abströmwinkel der 2D-CFD-Rechnung. Die strukturelle Integrität der Schaufel wird durch implizite Einstellungen wie

der aus dem Referenzentwurf entnommenen Dickenverteilung T sowie dem Verhältnis der maximalen Dicke zur Sehnenlänge T/c sichergestellt, was in etwa zur gleichen strukturellen Güte führt.

Zusammenfassend kann das komplette vektorielle Optimierungsproblem wie folgt mathematisch formuliert werden:

$$(18) \quad \min_{\mathbf{p} \in \mathbf{P}} \begin{bmatrix} \bar{\omega}^{DP} \\ \gamma \end{bmatrix}$$

mit den aerodynamischen Nebenbedingungen

$$(19) \quad h_1 = \max_i \bar{H}_E^{SS}(\tilde{r}_k) - \hat{H}_E \leq 0,$$

$$(20) \quad h_2 = \max_i |\Delta\alpha_E(\tilde{r}_k)| - \hat{\epsilon} \leq 0,$$

wobei $\mathbf{p}$ den Entwurfsvektor (14) repräsentiert. Das Ergebnis einer solchen konfliktären Mehrkriterien-Optimierung sind, sogenannte Pareto-optimale Lösungen, welche untereinander nicht vergleichbar sind. Keine der Zielgrößen kann ohne Verschlechterung des anderen Zielwertes verbessert werden, wie in [11] beschrieben.

6 NUMERISCHE STRÖMUNGSSIMULATION

In diesem Abschnitt werden einige Angaben zu Einstellungen der numerischen Strömungssimulation gemacht. Einerseits wird die 2D-Strömungsanalyse erläutert, die an den gewählten drei Schaufelsektionen durchgeführt wird, um daraus gemittelte Verluste für den Auslegungspunkt sowie für den Teil- und Überlastbereich zu ermitteln, andererseits wird die 3D-CFD-Rechnung für die Validierung von zwei ausgewählten quasi-3D optimierten Schaufelentwürfen vorgestellt.

6.1 2D-Strömungsanalyse

Das für die 2D-Strömungsanalyse verwendete Programm *Mises* [14] besteht aus dem Netzgenerator *Iset*, dem Strömungslöser *Ixes* und dem Auswertemodul *Iplot*. Mit Hilfe von *Mises* ist es möglich, reibungslose Strömungen mittels stationärer Euler-Gleichungen zu beschreiben. Wandnahe viskose Grenzschichteffekte werden durch ein System gekoppelter, nicht-linearer, integraler Grenzschichtgleichungen, die mit dem Newton-Raphson-Verfahren gelöst werden, berücksichtigt. Dies erlaubt die Berechnung von starken viskos/nicht-viskosen Interaktionen, wie z.B. stoßinduzierte Ablösungen oder transitionsbehaftete Ablöseblasen. Ganz nach dem Motto, so wenig Gitterpunkte wie möglich, aber so viele wie nötig, um Netzunabhängigkeit der resultierenden Lösung sicherzustellen, wird das Berechnungsgitter aufgebaut. Dabei wird ein I-Gitter mit 60 Gitterpunkten in der Eintrittsebene verwendet, 70 auf der Schaufelprofiloberfläche, 45 im Austrittsbereich und 16 in der S2-Ebene von Schaufel zu Schaufel, Abb. 3. In Bereichen mit zu erwartenden höheren Strömungsgradienten wie in der Grenzschicht und an der Vorderkante aufgrund hoher Geometriekrümmung werden Verfeinerungen des Gitters entlang und orthogonal zu den

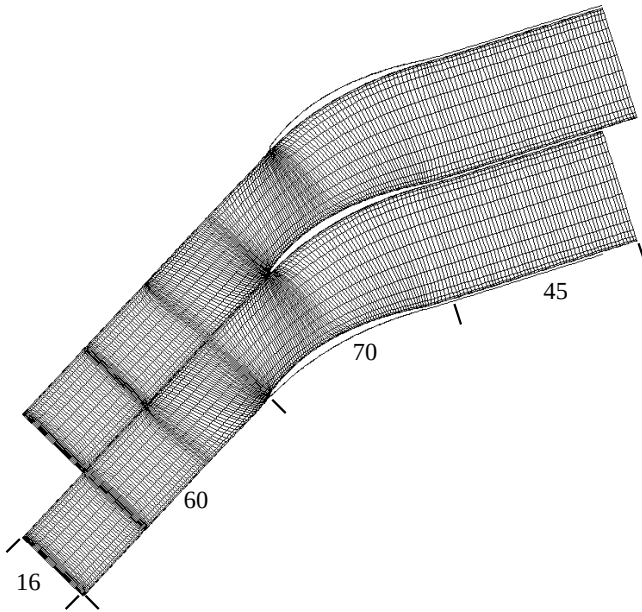


Abb. 3. Berechnungsgitter für die 2D-Strömungsanalyse

Stromlinien vorgenommen. Wichtige aerodynamische Randbedingungen der analysierten hochbelasteten CDA-Profil sind in Tabelle 1 zusammengefasst, insbesondere die Bereiche für die Eintrittsmachzahl M_I , für den Zuströmwinkel α_I und die Umlenkung $\Delta\alpha$, welche aus dem Stromlinienkrümmungsverfahren stammt und über die Schaufelhöhe variiert. Die Durchführung einer *Mises*-Rechnung dauert etwa fünf bis zehn Sekunden.

Tabelle 1. Aerodynamische Randbedingungen

Parameter	Wert	Einheit
M_I	0.75 ... 0.82	[-]
α_I	47.1 ... 48.9	[°]
$\Delta\alpha$	29.7 ... 19.6	[°]

6.2 3D-CFD-Validierungsrechnung

Nach Beendigung der quasi-3D-Optimierung werden Pareto-optimale Entwürfe selektiert und volle 3D-CFD-Rechnungen im Mehrstufenverband eines industriellen Forschungsverdichters mit variablen Strömungsbedingungen durchgeführt. Die gesamte Berechnungsdomäne beinhaltet acht Schaufelreihen angefangen beim Eintritt des Vorleitrades (IGV) über dreieinhalb Stufen bis zum Austritt der Rotorreihe 4 (R1 – R4), wobei der optimierte Stator in der dritten Stufe (S3) zu finden ist, Abb. 4. Durch Betrachtung der Schaufelreihen vor der optimierten Statorschaufel (IGV – R3) kann der Einfluss der optimierten Statorreihe

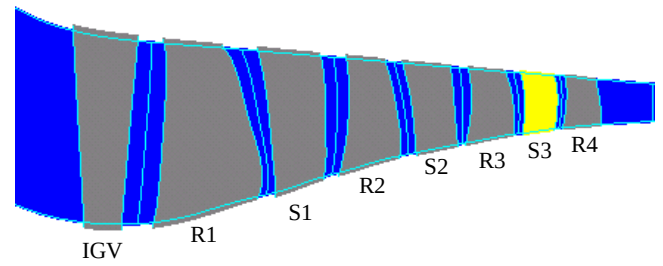


Abb. 4. Berechnungsdomäne für die 3D-CFD-Analyse

stromauf erfasst werden, ebenso wie die Stromabwirkung auf die nachfolgende Rotorreihe (R4).

Die 3D-Rechnung wird mit Hilfe des kommerziellen Software-Paketes *FineTM/Turbo* der Firma *NUMECA* [15] durchgeführt. Der Netzgenerator *IGG* wird verwendet, um ein strukturiertes, lösungsunabhängiges Gitter mit ca. 5 Mio. Gitterpunkten zu erzeugen, Abb. 5. Bei Vorgabe von Totaltemperatur, Totaldruck und der Strömungswinkel am Eintritt werden verschiedene Gegendrucke am Austritt für die Berechnung herangezogen, um eine komplette Drehzahlcharakteristik für die stationäre, voll-turbulente Strömung mit Hilfe des Spalart-Allamaras Turbulenzmodells [16] sowie dem radialen Gleichgewicht rechnen zu können. Die Rechenzeit für jeden einzelnen Gegendruck beläuft sich bei einem Hochleistungscluster mit vier zusätzlichen Knoten à zwei *AMD Opteron* 2,8 GHz Prozessoren auf etwa fünf Stunden, so dass eine volle Charakteristik mit acht bis neun Punkten nahezu zwei Tage in Anspruch nimmt.

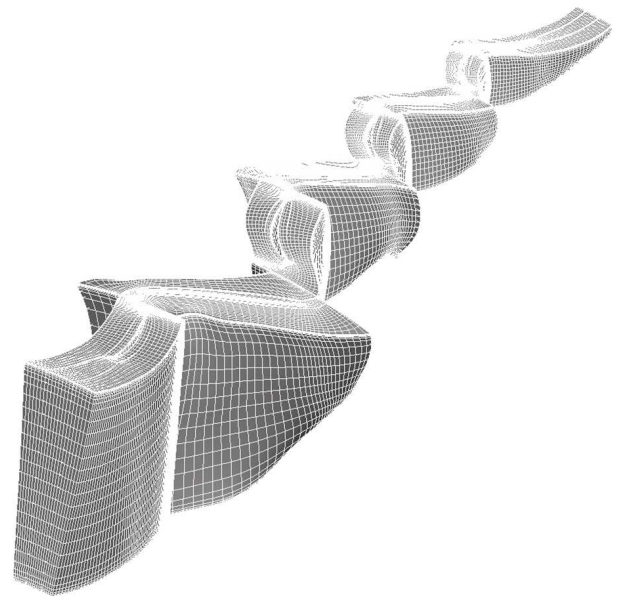


Abb. 5. Berechnungsgitter für die 3D-CFD-Analyse

7 PROZESSINTEGRATION UND AUTOMATISIERUNG

Neben der Integration und Automatisierung des gesamten Prozesses der Q3D-Schaufelgenerierung, als Grundlage für eine Optimierung, bildet die Parallelisierung von Teilschritten zur drastischen Reduzierung der Analysezeit einen weiteren Schwerpunkt der Untersuchung. Zur Integration von *Matlab* [17] und für die Optimierung dient *iSIGHT-FD* [18]. Das Programm *Matlab* fungiert hierbei gleichzeitig als Profilgenerator, Prozessintegrator und Parallelisierer. Abb. 6 zeigt den in die *iSIGHT-FD*- und *Matlab*-Umgebung eingebetteten Prozess der Q3D-Schaufelanalyse. Nach durchgeführter Initialisierung erfolgt die Entwurfsevaluation für einen durch den Optimierer vorgegebenen Parametervektor $\mathbf{p}$, der an *Matlab* übergeben wird. In *Matlab* werden dann zunächst die dimensionslose Skelettlinienwinkelfläche und die radialen Verläufe der Metallwinkel am Ein- und Austritt berechnet. Aus der resultierenden Bézier-Fläche der Skelettlinienwinkel und den Bézier-Kurven der Metallwinkel werden für drei definierte relative Schaufelhöhen $\tilde{r}$ die Verteilungen der Skelettlinienwinkel bzw. die Metallwinkel extrahiert. Es folgt die Profilgenerierung entsprechend [19] und das Schreiben erforderlicher Eingangsdateien für die numerische Strömungsfeldanalyse in *Mises*. Dabei werden für die Schaufelsektionen auf den gewählten radialen Schaufelhöhen jeweils drei Analysen für den Auslegungspunkt (*DP*), für den Teillast (*CH*) und Überlastbereich (*ST*) durchgeführt. Diese werden unter Anwendung der *Matlab Distributed Computing Toolbox (MDCT)* auf einem Hochleistungscluster verteilt durchgeführt und ermöglichen im Vergleich zu einer sequentiellen Analyse eine Rechenzeitersparnis um ca. den Faktor 3. Nach erfolgter Analyse des Strömungsfeldes werden alle benötigten Größen zur Berechnung der Kriterien und aller Nebenbedingungen für die Optimierung aus den *Mises* Ergebnisd Dateien über *Matlab* extrahiert. Am Anfang der globalen Analyse erfolgt zunächst die Abfrage der CFD-Konvergenz. Entsprechend einer benutzerdefinierten Straftermmethodik werden dann abhängig von der Zahl nicht konvergierter Lösungen einer globalen Iteration allen relevanten Optimierungsgrößen Strafterme aufgeprägt. Dies setzt einen robusten Optimierungsalgorithmus voraus und ist deshalb für deterministische Verfahren ungeeignet, da hier die Gradientenbestimmung verfälscht werden würde. Weiterhin ist darauf zu achten, dass der Optimierer selbst ebenfalls Strafterme unzulässigen Lösungen hinzufügt und wenn möglich bei benutzerdefinierten Straftermen Tendenzen der Verletzungen erkennbar sind. Sind alle numerischen Strömungsfeldanalysen konvergiert, werden die Kriterien $\mathbf{f}$ und Nebenbedingungen $\mathbf{h}$ entsprechend den Gleichungen (18) bis (20) berechnet und an *iSIGHT-FD* zurückgegeben. Die Optimierung wird solange fortgesetzt, bis die Gesamtanzahl der vordefinierten Iterationen erreicht ist. Das Ergebnis ist eine Fülle von Lösungen mit einer Front nicht-dominierter Lösungen, die im Sinne der Mehrkriterien-Optimierung alle optimale Kompromisse darstellen.

Eine berechtigte Frage, die sich im Anschluss an diese Optimierung stellt, ist, ob die 2D-optimierten 3D-Schaukeln

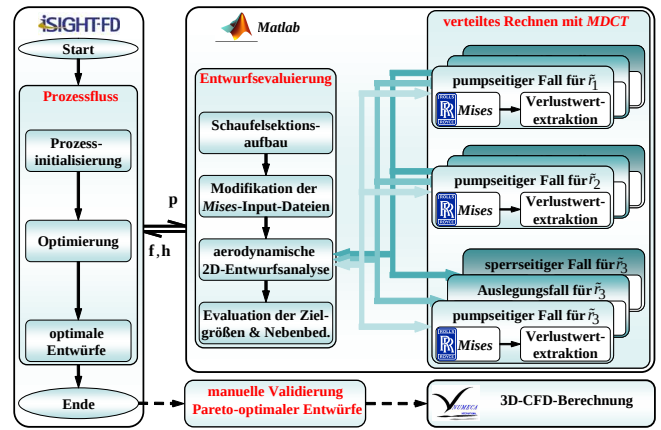


Abb. 6. Prozessschabild

sich im 3D-Strömungsfeld und im Stufenverband ebenfalls als vorteilhaft erweisen. Im Anschluss an die Q3D-Optimierung werden deshalb zwei ausgewählte Schaufelgeometrien aus der Pareto-Front selektiert und mit Hilfe des kommerziellen CFD-Programmpaketes von *Numeca* für bestimmte Betriebszustände im Mehrstufenverband strömungstechnisch untersucht.

8 ERGEBNISSE

Zunächst wird die quasi-3D-Schaufeloptimierung ausgewertet. Da das vektorielle Optimierungsproblem (18) bis (20) prädestiniert ist für die Verwendung eines stochastischen Optimierungsalgorithmus, wird der Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm NSGA-II [20] zur Lösung des Entwurfsproblems eingesetzt, der in *iSIGHT-FD* 3.0 gegenüber der in [1] benutzten Version deutlich verbessert wurde. Die Mehrkriterien-Optimierung wird mit einer zufällig generierten Startpopulation von 150 Individuen gestartet und läuft über 150 Generationen, was auf 22650 Entwurfsevaluationen führt. Etwa 48,5% zulässige Entwürfe werden gefunden, welche die Optimierungsformulierung mit allen Nebenbedingungen erfüllen. Eine Optimierung inklusive Schaufelprofilgenerierung, neun zweidimensionalen Strömungsanalysen sowie der Evaluierung der Zielgrößen und Nebenbedingungen dauert bei verteilter Rechnung ca. 25 Sekunden, was zu einer Gesamtoptimierungsdauer der 22650 Entwürfe von ca. 6,5 Tagen führt.

Abb. 7 zeigt den Kriterienraum mit allen zulässigen Lösungen in grün sowie die Front der nicht-dominierten Lösungen in rot im linken unteren Bereich des Diagramms der zu minimierenden Kriterien. Zum Vergleich ist der Punkt des durch menschliche Suche gefundenen Referenzentwurfs $\mathcal{H}$ in blau sowie der Entwurf $\mathcal{K}$ des 2D-Ansatzes [2] in orange dargestellt. Beide Zielgrößen (18) können signifikant verbessert werden im Vergleich zu den anderen Entwürfen, wobei die erhaltene Front wegen des verbesserten genetischen Algorithmus auch die Ergebnisse in [1] deutlich dominiert. Der Verlust im Auslegungspunkt des Entwurfs $\mathcal{P}$ ist um ca. 0,23 Prozentpunkte und der Verlust im Teil- und Über-

lastbereich des Entwurfs Q um etwa 1,39 Prozentpunkte gegenüber dem Referenzentwurf $\mathcal{H}$ reduziert. Die Punkte $\mathcal{P}$ und Q stellen die Eckpunkte der Front der nicht-dominierten Lösungen dar, aus dem der Entwurfsingenieur verschiedene Entwürfe diskutieren kann. Im Vergleich zur Einkriterien-Optimierung kann hierbei eine Auswahl zwischen verschiedenen miteinander nicht vergleichbaren Kompromisslösungen getroffen werden. Aus der Darstellung der zugehörigen Schaufeln ist zu erkennen, dass der Q3D-Optimierungsansatz radial glatte Schaufelgeometrien erzeugt im Gegensatz zur welligen Schaufel aus dem Ansatz in [2], was beim 3D-Ansatz erst gar nicht möglich wäre. Außerdem sind weitere radiale Geometrieparameter wie die Keilwinkel an der Vorder- und Hinterkante μ_{LE} , μ_{TE} glatt in ihren Verteilungen, was selbst bei der von außen glatten Referenzschaufel nicht der Fall ist. Dies resultiert aus der manuellen Anpassung der Geometrieparameter des Referenzentwurfs entlang der Schaufelhöhe.

Abb. 8 zeigt radiale Verteilungen des Verlustes im Auslegungspunkt. Dabei werden 2D-Strömungsanalysen der Entwürfe $\mathcal{P}$ und Q auf den betrachteten radialen Höhen, die den Sektionen 5, 11 und 17 entsprechen, mit den Ergebnissen des Referenzentwurfs $\mathcal{H}$ und des Entwurfs $\mathcal{K}$ verglichen. Es ist zu erkennen, dass mit den Entwürfen $\mathcal{P}$ und Q auf den Sektionen 5 und 11 deutlich kleinere Verlustwerte erzielt werden, wohingegen auf Sektion 17 der Verlust für Entwurf Q am größten und für Entwurf $\mathcal{P}$ dagegen kleiner ist als die Verluste der anderen Entwürfe.

Für die dreidimensionale aerodynamische Validierung werden die Schaufeln $\mathcal{P}$ und Q ausgewählt und einer 3D-CFD-Rechnung im Mehrstufenverband unterzogen. Dabei wird der statische Gegendruck p_E bei konstanten Eintrittsbedingungen und konstanter Drehzahl variiert, um eine komplette Charakteristik zu erhalten. Abb. 9 zeigt den polytropen Wirkungsgrad η_{poly} (a) und das Druckverhältnis Π (b) über

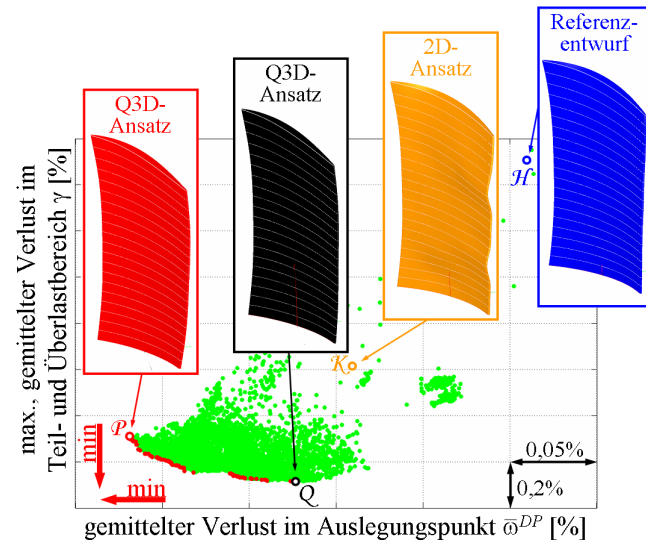


Abb. 7. Vergleich der nicht-dominierten Lösungen $\mathcal{P}$ und Q mit der Lösung $\mathcal{K}$ aus [2] und dem Referenzentwurf $\mathcal{H}$ im Kriterienraum

dem reduzierten Eintrittsmassenstrom $\dot{m}_{I,red}$ aufgetragen. Es ist erkennbar, dass die Kurvenanfänge in beiden Diagrammen der Abb. 9 (jeweils unten rechts) bei kleinerem Gegendruck p_E zwar fast deckungsgleich sind, jedoch die Wirkungsgrade der optimierten Entwürfe für die einzelnen Gegendrucke in Abb. 9a etwas größer sind als die des Referenzentwurfs $\mathcal{H}$. Dies bestätigt die Ergebnisse in Abb. 7, d.h. dass die Entwürfe $\mathcal{P}$ und Q tatsächlich geringere Verluste haben als der Referenzentwurf $\mathcal{H}$.

Am linken oberen Ende der Kurven in Abb. 9 bei großem Gegendruck sind jeweils die polytropen Wirkungsgrade bzw. die Druckverhältnisse der unterschiedlichen Entwürfe ebenfalls nahezu gleich, außer bei Entwurf Q . Dieser Entwurf zeigt einen Wirkungsgradabfall beim höchsten Gegendruck im Überlastbereich, Abb. 9a, wobei der Druckaufbau entsprechend Abb. 9b jedoch weiterhin gewährleistet wird. Insgesamt wird deutlich, dass bei allen optimierten Entwürfen, speziell für den Entwurf Q der Abstand zur Pumpgrenze SM größer wird, d.h. dass auch bei kleineren reduzierten Massenströmen $\dot{m}_{I,red}$ ein Druckaufbau stattfindet. Der Pumpgrenzabstand lässt sich nach [21] durch

$$(21) \quad SM = \frac{\frac{\Pi^{SL}}{\dot{m}_{I,red}^{SL}} - \frac{\Pi^{DP}}{\dot{m}_{I,red}^{DP}}}{\frac{\Pi^{DP}}{\dot{m}_{I,red}^{DP}}}$$

berechnen, wobei Π^{SL} und $\dot{m}_{I,red}^{SL}$ bzw. Π^{DP} und $\dot{m}_{I,red}^{DP}$ die Totaldruckverhältnisse und reduzierten Eintrittsmassenströme

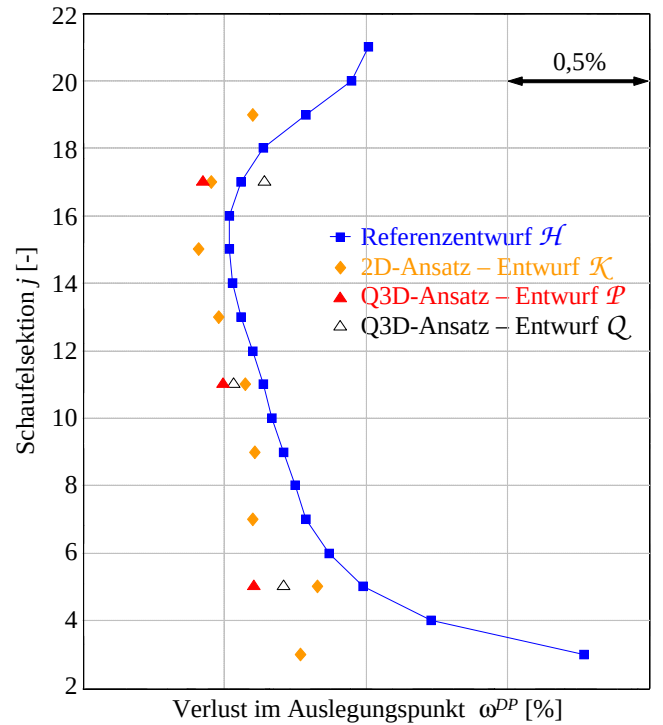


Abb. 8. Radiale Verteilung des Verlustes am Auslegungspunkt im Vergleich

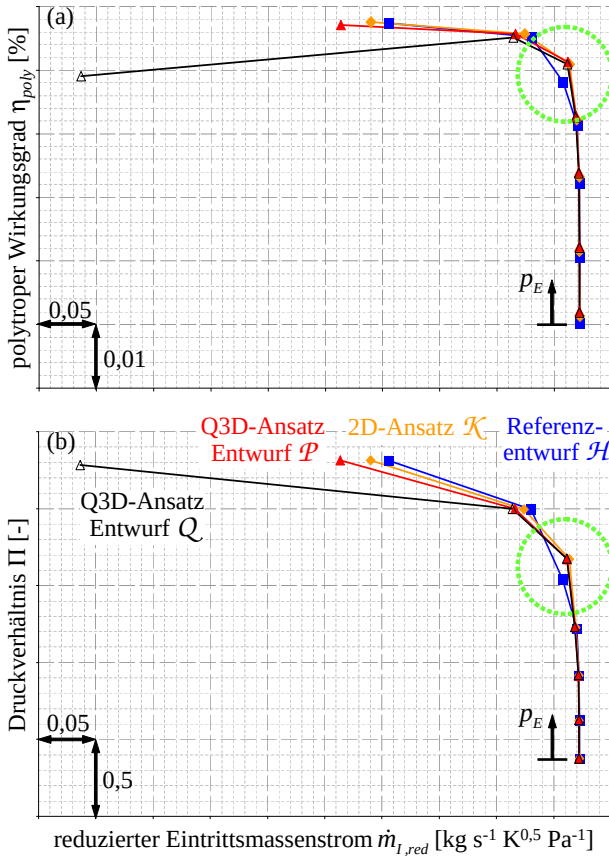


Abb. 9. Polytroper Wirkungsgrad (a) und Druckverhältnis (b) der gesamten Berechnungsdomäne in Abhängigkeit des Eintrittsmassenstroms

an der Pumpgrenze bzw. am Auslegungspunkt darstellen. Bezogen auf den vorgegeben Auslegungspunkt ergeben sich relative Verbesserungen der Pumpgrenzabstände SM um 8,98% bzw. 1,95% für die Entwürfe Q bzw. $\mathcal{P}$ im Vergleich zum Referenzentwurf $\mathcal{H}$.

Im mittleren Bereich der Kurven, um den Auslegungspunkt herum, der mit einem grün gestrichelten Kreis gekennzeichnet ist, gibt es deutlichere Unterschiede in den Kurvenverläufen. Die quasi-3D optimierten Schaufeln $\mathcal{P}$ und Q sind in diesem Bereich dem Referenzentwurf $\mathcal{H}$ überlegen, da bei gleichem Gegendruck p_E größere polytrope Wirkungsgrade bzw. größere Druckverhältnisse erreicht werden, genauso wie beim Entwurf $\mathcal{K}$ aus dem 2D-Ansatz. Dies bestätigt das Ergebnis in Abb. 7, dass Entwürfe $\mathcal{P}$, Q und $\mathcal{K}$ unter anderem geringe Verluste am Auslegungspunkt haben als der Referenzentwurf. Die Verbesserung in diesem Bereich ist auch in Abb. 10 zu erkennen, die den polytropen Wirkungsgrad η_{poly} (a) und das Druckverhältnis Π (b) in Abhängigkeit des variierten Gegendrucks p_E dargestellt und mit Abb. 9 korrespondiert. Die Wirkungsgradkurven der Q3D-optimierten Entwürfe $\mathcal{P}$ und Q sowie der des 2D-Ansatzes verlaufen grundsätzlich oberhalb des Referenzentwurfes. Damit erreichen die Entwürfe $\mathcal{P}$, Q und $\mathcal{K}$ nicht nur am Auslegungspunkt (grün gestrichelt), sondern über den gesamten Bereich

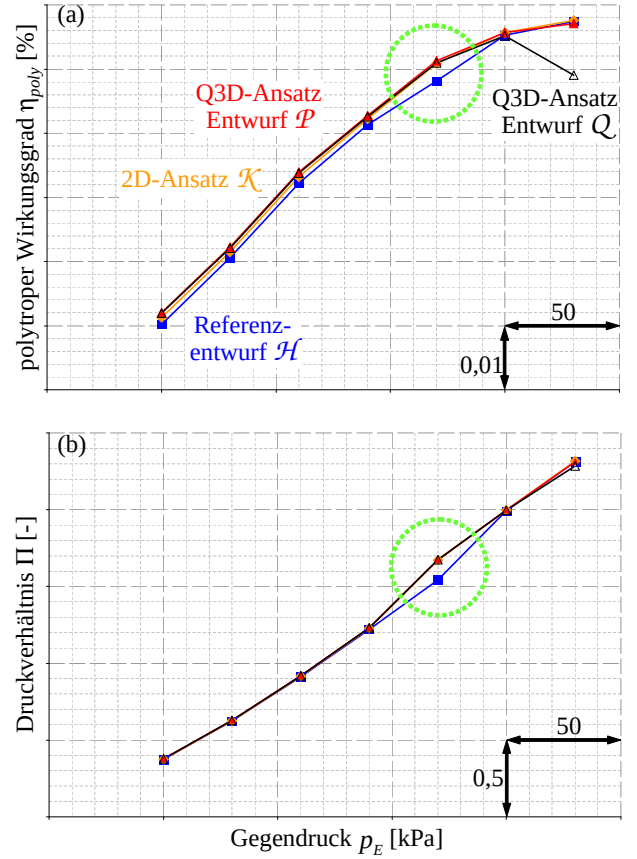


Abb. 10. Polytroper Wirkungsgrad (a) und Druckverhältnis (b) der gesamten Berechnungsdomäne in Abhängigkeit des Gegendrucks

einen höheren Wirkungsgrad bei jeweils gleichem Gegendruck, was bei der Q3D-Optimierung (18) durch das zweite Kriterium erreicht wird. Lediglich am äußersten Ende der Kurve bricht der Wirkungsgrad des Entwurfs Q etwas ein, da diese extremen Verhältnisse bei der Q3D-Optimierung unberücksichtigt bleiben. Das Druckverhältnis Π jedoch steigt in diesem Bereich immer noch an, Abb. 10b. Insgesamt ist der Kurvenverlauf des Druckverhältnisses Π aller Entwürfe über den gesamten Gegendruckbereich nahezu gleich, ausgenommen der Bereich um den Auslegungspunkt. Dort bauen die Q3D-optimierten Entwürfe $\mathcal{P}$ und Q sowie der Entwurf $\mathcal{K}$ des 2D-Ansatzes einen höheren Druck bei gleichem Gegendruck auf, was wiederum auf die Verlustminimierung zurückzuführen ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei einem Vergleich der Entwürfe $\mathcal{P}$ und Q Entwurf $\mathcal{P}$ einen kleineren Verlust im Auslegungspunkt und minder gute Qualität im Teil- und Überlastbereich im Vergleich zum Entwurf Q besitzt, Abb. 7. Dabei wird diese auf 2D-CFD-Rechnungen basierende Unterscheidung auch in den Ergebnissen der 3D-CFD-Rechnungen deutlich erkennbar, da Q einen größeren Pumpgrenzabstand aufweist im Vergleich zu $\mathcal{P}$, und $\mathcal{P}$ wiederum durch einen geringfügig höheren Wirkungsgrad im Auslegungspunkt im Vergleich zu Q charakterisiert ist, Abb. 9a,b.

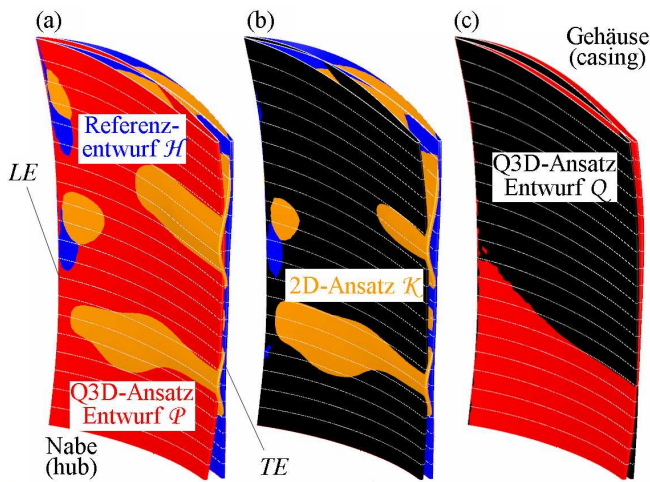


Abb. 11. Vergleich der 3D-Schaufelgeometrien: (a) Q3D-optimierter Entwurf $\mathcal{P}$ in rot, Referenzentwurf $\mathcal{H}$ in blau, 2D-optimierter Entwurf $\mathcal{K}$ in orange, (b) Q3D-optimierter Entwurf $\mathcal{Q}$ in schwarz, Referenzentwurf $\mathcal{H}$ in blau, 2D-optimierter Entwurf $\mathcal{K}$ in orange, (c) Q3D-optimierte Entwürfe $\mathcal{P}$ in rot und $\mathcal{Q}$ in schwarz

Um sich ein Bild über die dreidimensionalen Schaufelgeometrien der unterschiedlichen Entwürfe machen zu können, ist in Abb. 11 ein Vergleich der Schaufeln dargestellt. In Abb. 11a wird die Referenzschaufel $\mathcal{H}$ und die Schaufel $\mathcal{K}$ aus dem 2D-Ansatz mit der Q3D-optimierten Schaufel $\mathcal{P}$, welche sich durch den geringsten gemittelten Verlust im Auslegungspunkt auszeichnet, verglichen, wohingegen Abb. 11b den Vergleich mit der Q3D-optimierten Schaufel $\mathcal{Q}$ zeigt, die den geringsten gemittelten Verlust im Teil- und Überlastbereich aufweist. Es ist deutlich zu erkennen, dass die optimierten Entwürfe $\mathcal{P}$ und $\mathcal{Q}$ in den Randbereichen zur Nabe und zum Gehäuse hin größere Metallwinkel am Austritt aufweisen als die Referenzschaufel $\mathcal{H}$. Dabei ist der Metallwinkel am Austritt des Entwurfs $\mathcal{P}$ größer im Nabenbereich sowie kleiner am Gehäuse und umgekehrt für den Entwurf $\mathcal{Q}$.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der Betonung auf einen automatisierten quasi-3D-Schaufelentwurfsprozess für Axialverdichter ist die Schaufelgenerierung, die 2D-Strömungsanalyse auf selektierten radialen Schaufelhöhen und die Extraktion der benötigten Daten für die Mehrkriterien-Optimierung in die *iSIGHT-FD*-Plattform integriert worden. Dabei ist ein voll dreidimensionaler Ansatz für die Schaufelparametrisierung gewählt worden, indem die Skelettlinienwinkelverteilung mittels einer Bézier-Fläche und die Metallwinkel am Ein- und Austritt mittels Bézier-Kurven radial über die Schaufelhöhe parametrisiert wurden, um mit möglichst wenigen Parametern eine ausreichend hohe Entwurfsflexibilität sowie radiale Geometrieglattheit zu garantieren. Durch Superposition mit einer gegebenen Dickenverteilung werden die zweidimensionalen Sektionen erzeugt, auf denen mit Hilfe des Strömungslösers

Mises die aerodynamische Güte, d.h. die Verluste im Auslegungspunkt und im Teil- und Überlastbereich berechnet wird. Die Minimierung des gemittelten Verlustes einerseits im Auslegungspunkt und andererseits im Teil- und Überlastbereich repräsentieren die Zielgrößen des Mehrkriterien-Optimierungsproblems, welches mit einem verbesserten genetischen Algorithmus NSGA-II gelöst wird. Das Ergebnis dieser automatisierten und verteilt rechnenden Optimierung zeigt eine Vielzahl von Kompromisslösungen, welche bessere Entwürfe darstellen als die Referenzschaufel $\mathcal{H}$ sowie die Schaufel $\mathcal{K}$ aus [2], wobei letztere zum Teil ein anderes Optimierungsziel verfolgt hat. Der größte Vorteil der Q3D-Schaufeloptimierung liegt in der Tatsache, dass sie ohne jegliche Kenntnis von Entwürfen von Grund auf stattfindet und radial glatte Schaufeln produziert.

Anschließend werden zwei ausgewählte, nicht-dominierte Entwürfe der Q3D-Mehrkriterien-Optimierung für die Validierung im Mehrstufenverband per 3D-CFD mittels des Programms *FineTM/Turbo* der Firma NUMECA für verschiedene Gegendrucke bei konstanten Eintrittsbedingungen und konstanter Drehzahl nachgerechnet. Es zeigt sich, dass diese Entwürfe im Auslegungspunkt im Vergleich zum Referenzentwurf tatsächlich eine höhere aerodynamische Güte aufweisen, was durch einen besseren polytropen Wirkungsgrad sowie höherem Druckverhältnis gekennzeichnet ist. Auch im Teil- und Überlastbereich sind im Allgemeinen Wirkungsgradverbesserungen sowie Vergrößerungen des Pumpgrenzabstandes zu erkennen.

Die Ergebnisse der 3D-CFD-Rechnungen rechtfertigen damit nachträglich, die aerodynamische Entwurfsevaluation über zeitsparende zweidimensionale Strömungsfeldberechnungen vorzunehmen, anstatt zeitintensive 3D-CFD-Rechnungen in den Optimierungsprozess zu integrieren. Zum Einen dominieren die exemplarisch gewählten Kompromisslösungen den Referenzentwurf nicht nur im Kriterienraum der Mehrkriterien-Optimierung, sondern auch in den 3D-CFD-basierten Resultaten. Zum Anderen ist die Widersprüchlichkeit der 2D-Kriterien valide, da diese auch durch die 3D-CFD-Rechnungen bestätigt wird.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des VIT 2 Projektes (Virtuelles Triebwerk) in Zusammenarbeit mit Rolls-Royce Deutschland und ist zum Teil vom Land Brandenburg finanziert worden.

Literatur

- [1] A. K. Dutta, P. M. Flassig, and D. Bestle. A Non-Dimensional Quasi-3D Blade Design Approach with Respect to Aerodynamic Criteria. *Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2008-50687*, 2008.
- [2] A. Keskin. *Process Integration and Automated Multi-Objective Optimization Supporting Aerodynamic Compressor Design*. Ph.D. thesis, Shaker, Aachen, 2007.
- [3] A. Keskin, M. Swoboda, J. Palluch, and C. Abt. Comparison of Different Parameterization And Optimization Approaches in the Field of Aerodynamic Compressor Design. *Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2008-50687*, 2008.

- sor Blade Design. *Proceedings of CEAS European Air and Space Conference, CEAS-2007-222*, Berlin, 2007.
- [4] ACARE: Advisory Council For Aeronautics Research in Europe. *Strategic Research Agenda, Executive Summary*. URL: <http://www.acare4europe.org>, 2002.
- [5] K. Steffens and A. Schäffler. Triebwerksverdichter – Schlüsseltechnologie für den Erfolg bei Luftfahrtantrieben. *Proceedings of DGLR Jahrestagung, DGLR-JT2000-101*, 2000.
- [6] C.-H. Wu. A General Theory of Three-Dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachines of Axial-, Radial-, and Mixed-Flow Types. NACA TN 2604, Lewis Flight Propulsion Laboratory, Washington, 1952.
- [7] D. Büche, G. Guidati, and P. Stoll. Automated Design Optimization of Compressor Blades for Stationary, Large-Scale Turbomachinery. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, GT2003-38421*, 2003.
- [8] I. H. Abbott and A. E. Doenhoff. *Theory of Airfoil Sections*. Dover, New York, 1949.
- [9] P. M. Flassig. Knowledge Based Blade Generation with the Objective of an Automatic Aerodynamic Compressor-Design. *Proceedings of ICAS Student Contribution*, Hamburg, 2006.
- [10] A. K. Dutta, P. M. Flassig, and D. Bestle. Multi-Objective Blade Design Using a Quasi-3D Non-Dimensional Parameterization Approach. *Proceedings of CEAS European Air and Space Conference, CEAS-2007-219*, Berlin, 2007.
- [11] D. Bestle. *Analyse und Optimierung von Mehrkörpersystemen*. Springer, Berlin, 1994.
- [12] J. Gräsel, A. Keskin, M. Swoboda, H. Przewozny, and A. Saxer. A Full Parametric Model for Turbomachinery Blade Design and Optimisation. *Proceedings of ASME DETC, DETC2004-57467*, 2004.
- [13] L. Piegl and W. Tiller. *The NURBS Book*. Springer, Berlin, 2nd edition, 1997.
- [14] M. Drela and H. Youngren. *A User's Guide to MISES 2.53*. Cambridge: MIT Computational Aerospace Sciences Laboratory, 1998.
- [15] NUMECA. *NUMECA FineTM Turbo User Guide 7.4*. Numeca Int. S.A., 2006, URL: <http://www.numeca.com>.
- [16] J. D. Anderson. *Computational Fluid Dynamics*. Mechanical Engineering Series. McGraw-Hill International Editions, 1995.
- [17] E. B. Magrab, S. Azarm, B. Balachandran, J. Duncan, K. Herold, and G. Walsh. *An Engineer's Guide to MATLAB*. Prentice Hall, 2nd edition, 2004.
- [18] Engenious Software Inc. *iSIGHT-FD Version 3.0 User's Guide*, 2007.
- [19] Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG. *JA81 How-To Manual*. 2007.
- [20] K. Deb. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2001.
- [21] N. Cumpsty. *Compressor Aerodynamics*. Krieger Publishing Company, Malabar, 2004.