

Numerische Simulation formvariabler Strukturkonzepte axialer Eintrittsleiträder von Turboverdichtern

Autoren:

Tobias Müller, Martin Lawerenz

Universität Kassel

Institut für Thermische Energietechnik, Fachgebiet Strömungsmaschinen

Email: tmueller@ite.maschinenbau.uni-kassel.de, lawerenz@uni-kassel.de

Kurt Wolters Straße 3, 34109 Kassel, GE

Abstract:

The presented work is concerned with the application of LS-DYNA to the mechanical analysis of shape adaptive airfoils in turbomachines. Adjustable Inlet Guide Vanes (IGV) in modern turbo compressors found a broad application and thus extend the operating range significantly. They are working as a regulating valve by adjusting the stagger angle of each airfoil. This can cause separations in the IGV which reduce the desired flow deflection and produces additional losses. A new approach is to actively adjust the airfoil geometry of the IGV to achieve the desired flow conditions. The boundary layers of a specifically contoured surface can be better controlled compared to the strong acceleration and deceleration of the flow in the leading edge area of restaggered guide vanes. This paper focuses on a concept which is based on a kinematic chain mechanism with a trailing edge adaption up to 50° . After a short overview of the design procedure of the concept, a structural simulation under static aerodynamic forces is discussed. Finally the design and computation of deformable surface layers, which define the contour of the airfoil, are presented.

Keywords:

Formvariable Turbomaschinenschaufel, Adaption, Kontaktmodellierung, Implizite Methode, shape adaption, implicit, contact, turbomachinery

1 Nomenklatur und Indizes

a	Schallgeschwindigkeit	$[m/s]$	\dot{m}	Massenstrom	$[kg/s]$
α_2	Abströmwinkel	$[^\circ]$	Ma_1	Zuströmmachzahl	$[-]$
d	Dicke	$[m]$	n	Anzahl	$[-]$
E	Elastizitätsmodul	$[N/m^2]$	p	Druck	$[N/m^2]$
ϵ	Dehnung	$[-]$	q	Streckenlast	$[N/m]$
F	Kraft	$[N]$	σ	Spannung	$[N/m^2]$
G	Lagerkraft	$[N]$	t	Teilung	$[m]$
h	Schaufelhöhe	$[m]$	u, v, w	Verschiebung	$[m]$
l	Länge	$[m]$	x, y, z	Koordinaten	$[m]$

ae	Ende formvariabler Bereich	HK	Hinterkante
$aero$	aerodynamische Last	k	Konturpunkt
as	Start formvariabler Bereich	KK	Kinematische Kette
l	Drehlager	s	Skelettlinie
dsl	Dreh Schublager	sg	Segment
DS	Druckseite	SS	Saugseite
h	Haut	t	Torsion

2 Einleitung

Die heute eingesetzte Verstellung der Leiträder zur Regelung von Turboverdichtern besteht aus einer Drehung der starren Schaufeln um eine senkrecht zur Strömung orientierte Achse. Im Fall der Eintrittsleiträder von Verdichtern wird auf diese Weise die Zuströmung zum folgenden Rotor positiv beeinflusst. Auf der anderen Seite verändert sich die Stellung der Schaufelvorderkante relativ zur Anströmung. Bei unveränderter Zuströmrichtung wächst die Fehlanströmung und das Druckfeld zeigt insbesondere im Bereich der Vorderkante große örtliche Schwankungen, die mit einer deutlichen Zunahme der Verluste verbunden sind. Bei entsprechend großen Fehlanströmungen entstehen Grenzschichtablösungen, die ein weiteres Ansteigen der Verluste zur Folge haben und die Strömungsumlenkung beeinträchtigen. Dabei entwickeln sich auch in der Abströmung in Umfangsrichtung große Gradienten der Strömungsgrößen, die ihrerseits zur Schwingungsanregung der nachfolgenden Laufradschaufeln führen können.

Die beschriebenen Nachteile starrer Schaufeln lassen sich durch die Integration von adaptiven Strukturkonzepten reduzieren. Untersuchungen in [1] zeigen, dass es möglich ist, durch eine Klappe den Bereich niedriger Verluste zu erweitern. Gegenüber einem Profil, das gezielt für diese hohe Umlenkung ausgelegt wurde, bleiben jedoch deutliche Defizite [2]. Adaptiv verformbare Profile stellen eine attraktive Möglichkeit dar, die Strömungsumlenkung eines Vorleitrades im Bereich geringer Verluste erheblich zu erweitern. Dabei bleibt die Vorderkante des Profils optimal zur Strömung ausgerichtet und die Geometrie des hinteren Profilabschnittes wird kontinuierlich an den jeweiligen Betriebszustand angepasst. Die technische Umsetzung einer formvariablen Schaufel benötigt ein Strukturkonzept, das eine ausreichend große Kraft zur Formveränderung bereitstellt und diese Kraft in die Struktur einleitet und verteilt. Darüber hinaus müssen Oberflächenwelligkeiten vermieden und Knicke durch eine störungsarme Oberfläche kompensiert werden (vgl. Bild 1). Dies erfordert eine geeignete Anbindung und Haftung an der inneren Struktur.

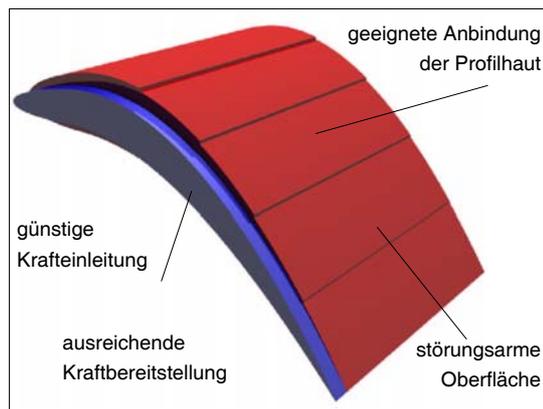


Bild 1: Formvariabilität

3 Kinematische Kette

Am Fachgebiet Strömungsmaschinen der Universität Kassel wurden unterschiedliche Strukturkonzepte [2] zur Krafteinleitung und Kraftbereitstellung für eine Formadaption erarbeitet. Dabei liefern geeignete Mechanismen bzw. der Einsatz intelligenter Materialien die Kräfte zur Formadaption. Aus einer Bewertung unterschiedlicher Strukturkonzepte resultiert das Konzept einer kinematischen Kette als formvariable Turbomaschinenschaufel. Bei einer kinematischen Kette werden einzelne starre Glieder derart miteinander verbunden, dass sich der gesamte Mechanismus bei der Anlenkung des ersten Kettengliedes durch die Kinematik wie ein Finger verstellt. Die zentrale Einleitung eines Torsionsmomentes durch einen extern angeordneten Aktuator liefert die Kräfte zur Verstellung der Glieder über Drehschub- und Drehgelenke. Ein erster Entwurf des Konzeptes mit $n_{sg} = 4$ beweglichen Segmenten und $n_{KK} = 2$ kinematischen Ketten in der Schaufel ist in Bild 2 für einen Hinterkantenwinkel von $\alpha_2 = 50^\circ$ dargestellt.

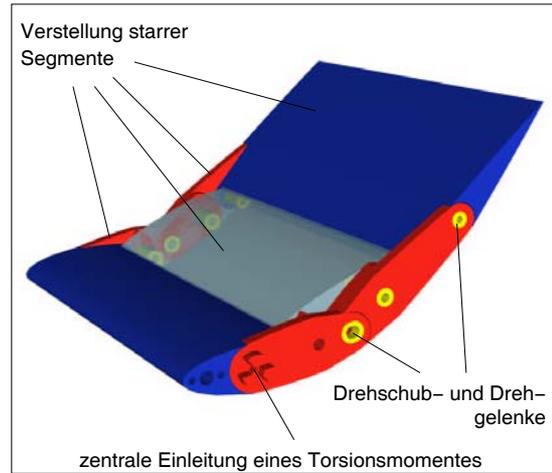


Bild 2: Formvariables Schaufelprofil

3.1 Auslegung und Funktion der kinematischen Kette

Die Profilgeometrie der formvariablen Turbomaschinenschaufel wird durch die Dickenverteilung einer vierziffrigen NACA-Profilsystematik (NACA 0012) beschrieben, die einer Skelettlinie überlagert wird. Die Skelettlinie setzt sich aus einem starren Abschnitt, der parallel zur Zuströmung ausgerichtet ist, und einem formvariablen Teil zusammen. Der formvariable Abschnitt der Skelettlinie wird durch ein Polynom dritten Grades beschrieben. Bild 3 zeigt eine Profilgeometrie mit einer bezogenen Hinterkantenauslenkung von $u_{HK}/l_s = 0.45$, einer bezogene Länge des formvariablen Profilabschnitts $l_a/l_s = 0.85$ und einem Skelettlinienwinkel von $\alpha_2 = 50^\circ$.

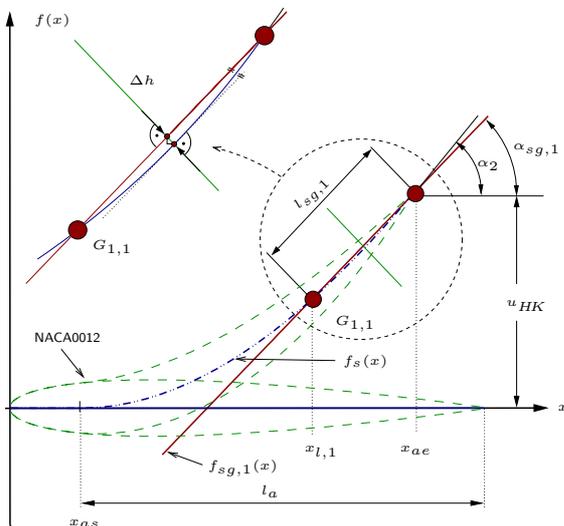


Bild 3: Profilgeometrie

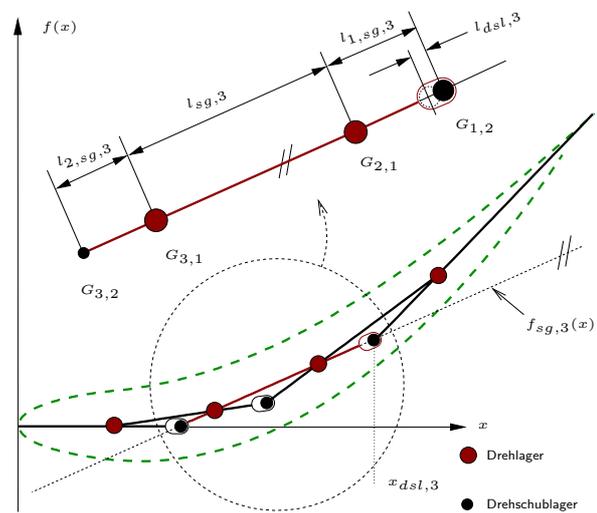


Bild 4: Nachbildung der Skelettlinie

Ausgangspunkt zur Auslegung der einzelnen Segmentsehnen ist die Profilhinterkante, durch die die Sehne des ersten Segmentes gelegt wird. Zur Definition der Anzahl beweglicher Segmente und zur Ermittlung der Lagerpositionen wird ein Parameter Δh verwendet, der den maximalen senkrechten Abstand zwischen einer Segmentgeraden und der Skelettlinienfunktion beschreibt. Somit repräsentiert Δh die Güte der sequentiellen Nachbildung der Skelettlinie durch Geradenstücke. Durch die erste Lagerposition wird eine weitere Sehne gelegt

und die nächste Lagerkoordinate $x_{l,2}$ im ausgelenkten Zustand berechnet. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die Lagerkoordinate $x_{l,i}$ kleiner ist als die Startkoordinate des formvariablen Bereiches $x_{l,i} < x_{as}$. Damit liegt die Segmentanzahl n_{sg} fest. Anschließend wird in weiteren Iterationszyklen der Abstand Δh verringert, bis die Bedingung $|x_{l,i} - x_{as}| < \epsilon$ erfüllt ist.

Bild 4 zeigt das Ergebnis der Sehnenberechnung in der ausgelenkten Konfiguration für alle Segmente bei einer Anzahl von $n_{sg} = 4$ beweglichen Segmenten.

Zur Funktionsweise der Kinematik sind die Drehschubgelenke erforderlich, da sich zwischen den gekoppelten Segmenten eine Relativverschiebung einstellt. Die Lage $x_{dsl,3}$ des Drehschubgelenkes $G_{1,2}$ wird nach Bild 4 aus dem Schnittpunkt der Geradengleichungen $f_{sg,1}$ und $f_{sg,3}$, bzw. der Gleichungen $f_{sg,i}$ und $f_{sg,i+2}$ berechnet, wobei $1 \leq i \leq (n_{sg} - 1)$. Nach der Berechnung aller geometrischen Größen zur Beschreibung der Kinematik können im Anschluss beliebige Zwischenpositionen bis zur Endlage $\alpha_{sg,1} = 0^\circ$ durch Starrkörperrotationen und -translationen berechnet werden. Eine detaillierte Beschreibung der Auslegungsmethodik wird in [3] vorgestellt.

4 Finite Elemente Berechnung

Die weitere Auslegung im Hinblick auf einen Prototypen erfolgt für eine Anzahl kinematischer Ketten von $n_{KK} = 2$ und einer Zuströmmachzahl von $Ma_1 = 0.2$. Das Programm LS-DYNA 970 [4] wird zur Simulation des Strukturverhaltens [5] unter dem Einfluss einer äußeren Belastung verwendet.

4.1 FE-Modell

Für die dynamische, implizite Berechnungsmethode werden 49552 Knoten mit jeweils 3 Verschiebungsfreiheitsgraden und 40994 Hexaeder-Elementen (ELFORM=2) verwendet. Die Strukturdiskretisierung erfolgt unter Berücksichtigung der Symmetrieeigenschaft mit dem Netzgenerator TrueGrid®[6]. Bild 5 zeigt das FE-Modell mit der Lagerindizierung, den Kraft- und Verschiebungsrandbedingungen.

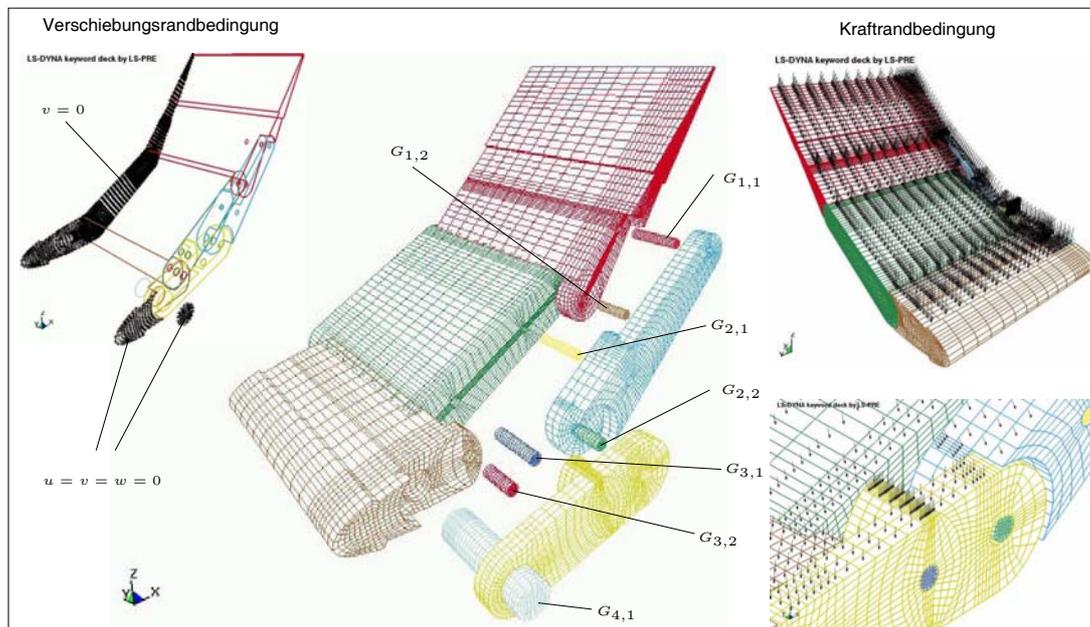


Bild 5: FE-Modell

Die Verschiebungsfreiheitsgrade u, v, w an der seitlichen Begrenzung der Profilvorderkante und an der Stirnfläche des Anlenkhebels werden als Einspannrandbedingung behandelt. Weiterhin wird die Verschiebungsrandbedingung $v = 0$ in Spannweitenrichtung in der Symmetrieebene definiert. Die Definition der

Kraftrandbedingung wird durch die Vorgabe einer dreiecksförmigen [2] Druckverteilung auf den Segmentflächen der Profilsaug- und Profildruckseite im ausgelenkten Zustand realisiert (vgl. Bild 7). Die resultierende aerodynamische Last wird aus dem Impulssatz bei drallfreier Zuströmung durch die Vorgabe von α_2 , \dot{m} und Ma_1 berechnet

$$F_z(\alpha_2) = Ma_1 a \dot{m} \tan(\alpha_2) \quad (1)$$

und anschließend entsprechend auf die Segmentflächen verteilt.

$$p_{aero}(x) = \frac{p_{aero,0}(\alpha_2)}{2(x_{as} - l_s)h} (x - l_s) \quad \text{wobei} \quad p_{aero,0}(\alpha_2) = \frac{2F_z(\alpha_2)}{l n_{KK}} \quad (2)$$

Die zeitliche Entwicklung des Lastanstieges wird durch eine lineare Funktion vorgegeben. Durch die Verwendung von SURFACE_TO_SURFACE und TIED_SURFACE_TO_SURFACE Kontaktmodellen zwischen den Lagersitzen und den Lagerbolzen werden die einzelnen Kettensegmente miteinander verkettet (Bolzenkontakt). Zusätzlich wird der Kontakt zwischen den Segmentflächen berücksichtigt (Segmentkontakt).

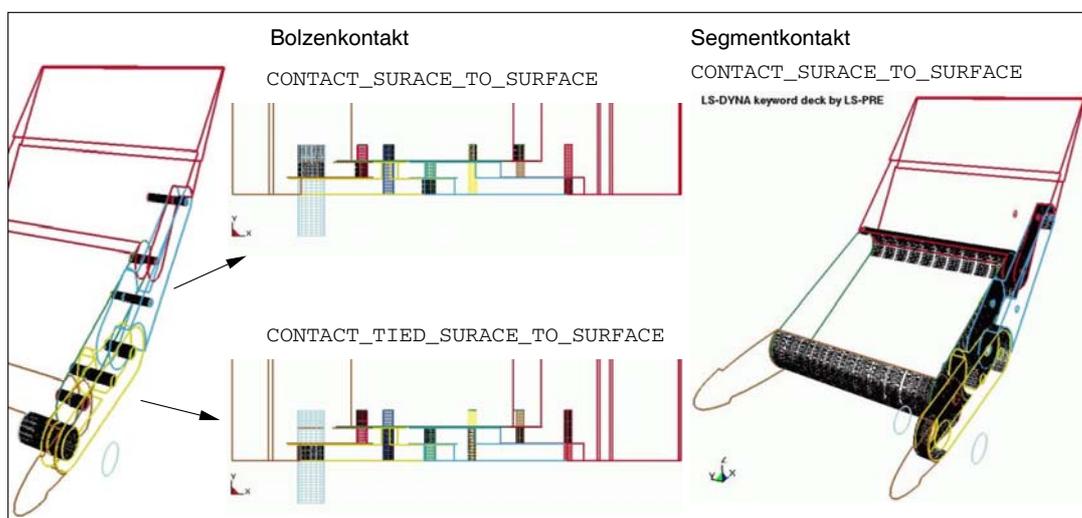


Bild 6: Kontaktdefinition (IGAP=2 , SOFT=0 FS=FD=0.1)

4.2 Ergebnisse

Für die implizite Berechnung (IMASS = 1) auf einem Pentium 4 (1.7 GHz, 1024 RAM) unter SUSE Linux 7.2 wurden 6 Stunden und 26 Minuten (CPU-Zeit) benötigt. Als Berechnungszeit wurden ENDTIM = 15000 ms vorgegeben, die mit den Einstellungen IAUTO = 1 , DTMIN = 50.0 ms, DTMAX = 500.0 ms und DT0 = 100.0 ms zu 33 Berechnungsschritten führten.

Die globale Strukturantwort unter Verwendung von linear elastischem Materialverhalten (MAT_ELASTIC) wird in Bild 7 anhand der Hinterkantenverschiebung gezeigt. Die Verschiebung steigt linear bis auf einen Maximalwert von $w_h = 4.84\text{mm}$ an und bleibt danach konstant. Dabei werden Relativverschiebungen der Bolzen in allen Drehschublagern berechnet. Beispielsweise beträgt die Verschiebung für den Lagerbolzen $G_{2,2}$: $w_{dst} = 0.128\text{mm}$.

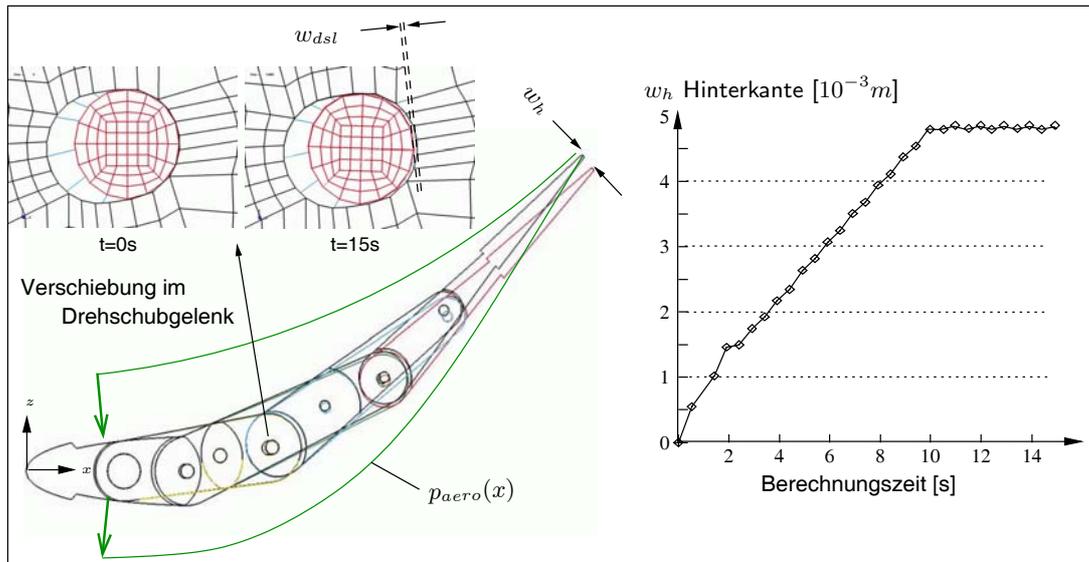


Bild 7: Hinterkantenverschiebung

Die Darstellung der Verschiebung in y -Richtung (Bild 8) zeigt eine Torsionsbelastung der Kettensegmente 2 und 4. Zwischen den Segmenten wurde dabei ein Spalt von $0.25mm$ modelliert.

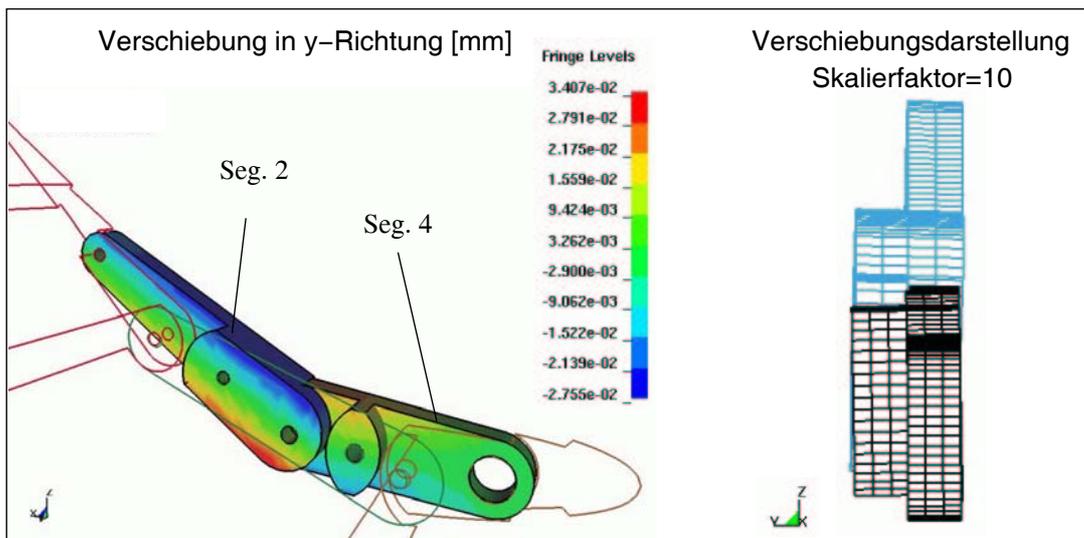


Bild 8: Torsionsbelastung

Die maximalen resultierenden Kontaktkräfte treten in den vorderen Lagern auf. Bild 9 liefert die Vergleichsspannungen in den Lagerbolzen des Segmentes vier und zeigt den Verlauf der entsprechenden Kontaktkräfte. Die maximale Vergleichsspannung $\sigma_{vm,max} = 0.213GPa$ wird im Lager $G_{3,1}$ berechnet, liegt aber noch unterhalb der maximal zulässigen Spannung von $\sigma_{max} = 0.300GPa$.

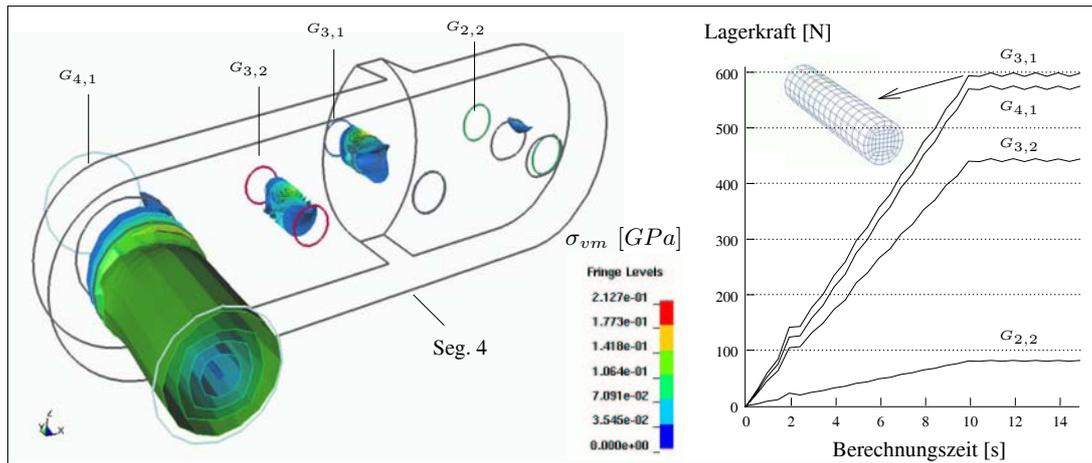


Bild 9: Lagerbelastungen für das Segment 4

5 Auslegung der Profilhaut

Die Auslegung eines Oberflächenkonzeptes [7] erfolgt nach dem Vorbild einer Schuppenhaut. Die Haftung der Haut an die innere Profilstruktur wird durch flexible Hautabschnitte realisiert, wobei zusätzliche Kräfte zur Deformation der Hautabschnitte und zur Überwindung der Reibung aufgebracht werden müssen.

Zur Überdeckung der gesamten Profilkontur werden jeweils 3 Hautabschnitte an den Segmenten der Profilsaug- und Druckseite angebracht. Ein Kreisbogen wird zur geometrischen Beschreibung eines Hautabschnittes (vgl. Bild 10) verwendet. Die Länge l_h eines Hautabschnittes wird dabei unter Berücksichtigung der zu überdeckenden Konturlänge und der Relativverschiebung des Befestigungspunktes x_k festgelegt.

$$F(x) = \frac{Eh \left(\frac{d_2 - d_1}{l_h} x + d_1 \right)^3}{12 (l_h - x)} w(x)'' \quad (3)$$

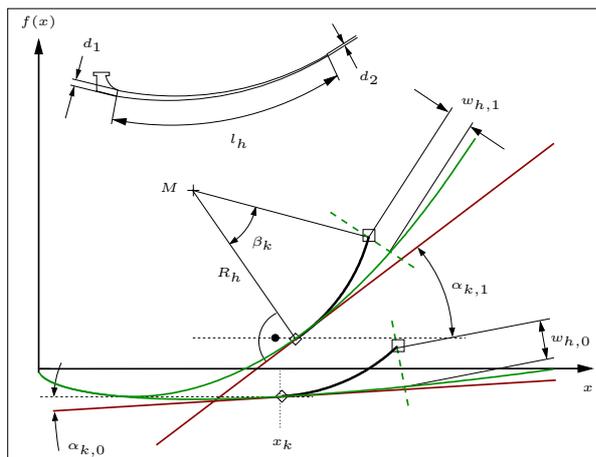


Bild 10: Geometrische Beschreibung der Haut

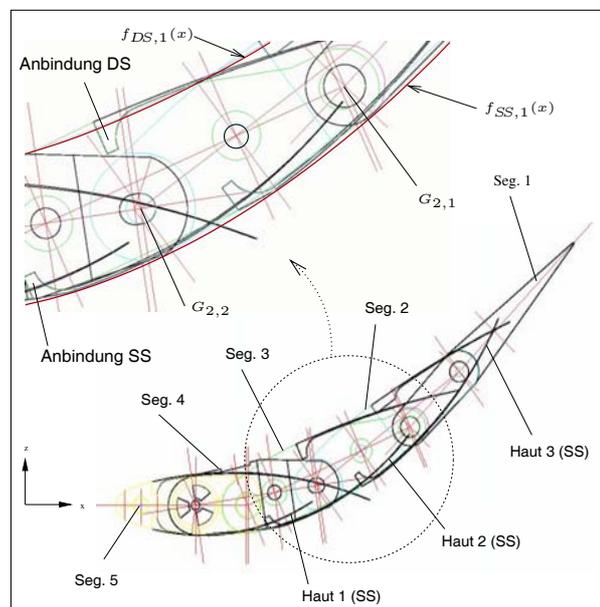


Bild 11: Asymmetrische Anbindung der Haut

Die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Steifigkeitsabnahme als Funktion der Hautlänge eines Hautabschnittes geht aus der Forderung nach einem gleichmäßigen Anliegen an die innere Struktur hervor. Die abnehmende Steifigkeit wird durch eine linear abnehmende Dicke des Hautabschnittes bei konstanten

Materialeigenschaften erreicht. Dazu werden die Abschnittsdicke d_1 an der Einspannung im Segment und die Abschnittsdicke d_2 am Ende des Hautabschnittes festgelegt. Die Dimensionierung des Radius R_h eines Hautabschnittes erfolgt durch die Auswertung der Kontaktkraft unter Berücksichtigung der Spannungs- und Dehnungsrandbedingungen. Die entscheidende Größe, die sich aus der Vorgabe von R_h unter Berücksichtigung der aktuellen Konturkrümmung ermitteln lässt, ist die Verschiebung $w_h = w_h(R_h, l_h)$ am Balkenende. Die Verschiebung wird aus dem Abstand zwischen dem Hautelementende und der Profilkontur für die unausgelenkte und ausgelenkte Schaufelstellung berechnet. Das Modell eines geraden einseitig eingespannten Balkens mit linear abnehmendem Dickenverlauf wird zur Vorabschätzung der integralen Kontaktkraft F (Gl. 3) verwendet. Die Befestigung der Hautabschnitte ist in Bild 11 zu erkennen, wobei die Hautabschnitte im nicht anliegenden Zustand dargestellt sind. Dabei überdecken die Hautabschnitte 2 und 3 der Profilsaugete die Segmentkonturen der Lager $G_{2,2}$ und $G_{2,1}$.

5.1 FE-Simulation

Die Berechnung des Anlegevorganges der Haut erfolgt in 1 Min. und 56 Sec. (CPU) mit einem statischen (IMASS = 0), impliziten Lösungsverfahren [8] in 20 Berechnungsschritten. Es werden Schalenelemente (ELFORM = 10) verwendet, die den Dickenverlauf des Hautabschnittes exakt wiedergeben. Durch die Vorgabe einer Verschiebung w wird der Hautabschnitt auf eine ideale Profilkontur $f_{SS}(x)$ gezwungen, die als Starrkörper (MAT_RIGID) modelliert wird (vgl. Bild 12). Eine SURFACE_TO_SURFACE Kontaktmodellierung (THKOPT = 1, SHLTHK = 1, SOFT=0, SLSFAC=0.00001) wird zur Simulation des Anlegevorganges eines Hautabschnittes verwendet. Dabei wird jeweils die unausgelenkte (0) und ausgelenkte (1) Konfiguration betrachtet.

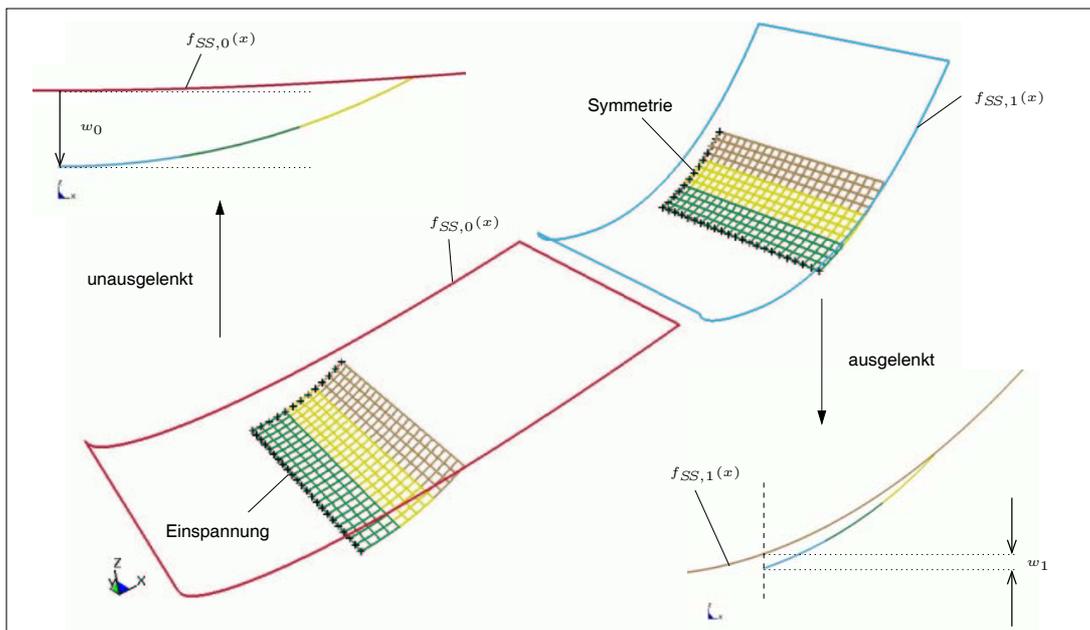


Bild 12: FE-Modell

Bild 13 zeigt exemplarisch die berechnete Strukturantwort für den Hautabschnitt 2 auf der Saugseite, der am Segment 3 befestigt wird. Die integrale Kontaktkraft für die ausgelenkte Konfiguration stimmt sehr gut mit dem analytische Balkenmodell (Glg. 3) überein. Demgegenüber steht eine große Abweichung für die unausgelenkte Konfiguration ($0.8 \leq w_0/w_{0,max} \leq 1.0$), die sich mit der kontinuierlichen Veränderung des Hebelarmes der integralen Kontaktkraft gegenüber der Einspannung während des Anlegevorgangs erklären lässt. Dies wird anhand einer Momentankonfiguration bei $w_0/w_{0,max} = 0.85$ deutlich. Aus den Kontaktkraftverläufen im unausgelenkten und ausgelenkten Fall kann ein Intervall $[F_0, F_1]$ abgelesen werden, in dem sich eine entsprechende Kontaktkraft F während der Geometrieänderung einstellt.

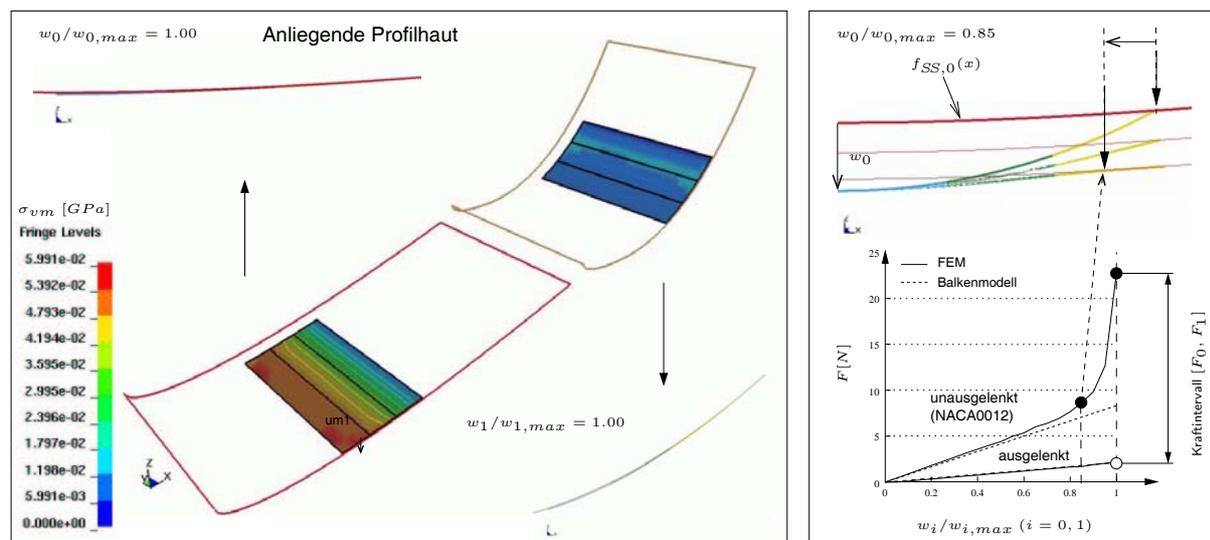


Bild 13: Simulation des Anlegevorganges

6 Zusammenfassung

Die Anwendung von LS-DYNA Simulationen im Entwicklungsprozess einer formvariablen Vorleitrad-schaufel für Turboverdichter ist Gegenstand dieser Arbeit. Die Simulationsrechnungen bestätigen die Bauteilsicherheit der Segmentlager und geben einen Einblick in das Strukturverhalten der gesamten kinematischen Kette unter einer angenommenen aerodynamischen Lastverteilung. Die Anbindung einer schuppenförmigen Profilhaut zur Realisierung großer Geometrieänderungen bildet einen weiteren Schwerpunkt der vorgestellten Untersuchungen. Dabei kann die analytische Vorauslegung der Profilhautabschnitte für die ausgeglichene Konfiguration durch FE-Berechnungen bestätigt werden. Größere Abweichungen treten jedoch bei den maximalen Kontaktkräften in der unausgelenkten Konfiguration auf.

Die Simulationen bilden die Basis für die folgenden experimentellen Untersuchungen der formvariablen Schaufel, die zusätzlich die Bestimmung der Strömungsverluste zum Inhalt haben.

Literatur

- [1] U. Stark and M. Böhle. Theoretische und experimentelle Untersuchungen an ungestaffelten Gittern aus Profilen mit mechanischen Klappen. *Forschung im Ingenieurwesen*, Bd. 56(6), 1990.
- [2] T. Müller and M. Lawerenz. Shape adaptive airfoils for turbomachinery applications undergoing large deformations. In *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, pages 1–10, Norfolk, VA, 7–10 April 2003.
- [3] T. Müller and M. Lawerenz. Mechanische Analyse formvariabler Eintrittsleiträder auf der Basis einer kinematischen Kette. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2004*, pages 1–10, Dresden, 20.–23. September 2004.
- [4] J. Hallquist. *LS-DYNA Theoretical Manual*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA, 1998.
- [5] T. Müller and M. Lawerenz. Shape adaptive airfoils for turbomachinery applications: Simulation and optimization. In *4th European LS-DYNA Conference*, pages 1–10, Ulm Germany, 22.–23. Mai 2003.
- [6] XYZ Scientific Applications. *TrueGrid® Manual - Version 2.1.0*. XYZ Scientific Applications, Inc., Livermore, CA, USA, 2001.

- [7] D.W. Bechert, M. Bruse, W. Hage, and R. Meyer. Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application. *Naturwissenschaften*, (87):157–71, April 2000. Department of Turbulence Research, German Aerospace Center, Berlin, Germany.
- [8] J. Hallquist. *LS-DYNA Keyword User's Manual - 970*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA, 2003.