

# PROBABILISTISCHE HCF-UNTERSUCHUNG VON VERDICHTERSCHAUFELN

## Kay Heinze

Technische Universität Dresden  
Institut für Strömungsmechanik  
D-01062 Dresden, Deutschland  
Email: kay.heinze@tu-dresden.de

## Winfried-Hagen Friedl

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG  
Engineering for Services  
D-15827 Dahlewitz/Berlin, Deutschland

## Konrad Vogeler

Technische Universität Dresden  
Institut für Strömungsmechanik  
D-01062 Dresden, Deutschland

## Matthias Voigt

Technische Universität Dresden  
Institut für Strömungsmechanik  
D-01062 Dresden, Deutschland

## 1 Abstract

Im Auslegungsprozess von Verdichterschaufeln werden für HCF-Untersuchungen überwiegend deterministische Modelle genutzt. Streuungen der HCF-Belastung, die z.B. durch Verschleiß und Abnutzung an den Schmiedegesenken oder durch Inhomogenitäten des Materials entstehen, werden mit Hilfe von Sicherheitsfaktoren und konservativen Ansätzen berücksichtigt. Ein wirklichkeitsnäherer Ansatz um diese Unsicherheiten zu berücksichtigen, ist der Einsatz von probabilistischen Methoden. Dadurch können während der Entwicklungsphase Informationen hinsichtlich HCF-Belastungs- und Eigenfrequenzstreuungen der real gefertigten Schaufeln einbezogen werden. Ausgehend von einer Messkampagne, in der 400 zufällig ausgewählte Schaufeln aus einem Hochdruckverdichter eines Rolls-Royce Deutschland Triebwerks mittels optischen Streifenprojektionsverfahren in einem vollautomatischen Prozess gescannt wurden, konnten Verteilungen und Verteilungsparameter von geometrischen Parametern des Schaufelblatts auf unterschiedlichen über dem Schaufelblatt verteilten spannweiten konstanten Profilschnitten ermittelt werden. Anschließend wurden die Verteilungen und Verteilungsparameter der geometrischen Parameter zum inversen Profilaufbau verwendet. Mit dem quasi 3D-Profil wurde ein bereits existierendes 3D-FE-Schalenmodell an die reale Schaufelgeometrie durch morphen mit dem Freehandmorphingtool von Altair Hyperworks angepaßt. Mit der hier vorgestellten Prozesskette wurden insgesamt 200 Realisierungen aufgebaut mit denen anschließend eine probabilistische HCF-Untersuchung durchgeführt wurde. Zum Aufsetzen, Durchführen und Auswerten der Monte-Carlo-Simulation wurde das an der TU Dresden entwickelte probabilistische Simulationstool ProSi verwendet. Aus der Monte-Carlo-Simulation konnten schließlich die HCF-Belastungs- und Eigenfrequenzstreuungen der Schaufeln ermittelt werden und in einer Sensitivitätsanalyse konnten Rückschlüsse von den einflussreichsten Parametern auf die Ergebnisgrößen gezogen werden. In Zusammenarbeit

mit der BTU Cottbus wurden die Eigenfrequenzen von zehn Schaufeln gemessen. Die Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Eigenfrequenzen beträgt für die beiden gemessenen Modes maximal 4,34% und zeigt, dass die geometrischen Abweichungen gut abgebildet wurden.

## 2 Einleitung

Durch den Einsatz von probabilistischen Methoden im Auslegungsprozess von Verdichterschaufeln können schon während der Entwicklung u.a. Streuungen der geometrischen Parameter berücksichtigt werden. Die gewonnenen Informationen aus der probabilistischen Simulation können so zu einer robusten Auslegung gegenüber Produktionsstreuungen an der Schaufelgeometrie verwendet werden. Die in diesem Paper vorgestellte Prozesskette ermöglicht innerhalb des HCF-Auslegungsprozesses geometrische Abweichungen der Schaufelgeometrie zu berücksichtigen. Ausgehend von einer Messkampagne in der 400 Rotorschaukeln aus einem Hochdruckverdichters (HDV) von Rolls-Royce Deutschland (RRD) mit unterschiedlichen Produktionshintergrund vermessen wurden [3], konnten aus den Messdatensätzen die geometrischen Parameter des Schaufelblatts mit dem in [5] vorgestellten Algorithmus bestimmt und statistisch ausgewertet werden. Die erfassten Parameter wurden anschließend genutzt, um die Flotte in einer Monte-Carlo-Simulation (MCS) abzubilden. Der Aufbau der Realisierungen erfolgte zunächst in zweidimensionalen Profilschnitten über der Schaufelblatthöhe. Mit Hypermesh konnten die Profilschnitte zu einer dreidimensionalen Fläche zusammengefasst werden. Auf diese Fläche wurde ein vorhandenes dreidimensionalen FE-Schalenetz gemorphet und anschließend mit Tetraederelementen zu einem Volumenkörper aufgefüllt. Die Auswertung der probabilistischen Simulation ergab, dass die Linien für die einzelnen Modes in Streubänder übergehen und das sich die Schwingformen in einzelnen Modes in

Abhängigkeit von der Schaufelgeometrie ändern. In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Strukturtechnik und Fahrzeugschwingungen der BTU Cottbus wurden die Eigenfrequenzen von zehn Schaufeln gemessen. Ein Vergleich der Eigenfrequenzen mit den Ergebnissen aus der FE-Simulation zeigt Abweichungen von maximal 4,34%. Durch die Bestätigung der Eigenfrequenzmessung kann davon ausgegangen werden, dass die geometrischen Abweichungen gut abgebildet wurden.

### 3 Messkampagne

In der Messkampagne wurden 400 Schaufeln aus einem HDV von RRD vermessen, wobei der Fokus der Messkampagne auf dem Schaufelblatt lag. Zum Einsatz kam das Scansystem Kolibri Flex 100 der Firma IVB, das laut Hersteller eine Messgenauigkeit von  $5\mu\text{m}$  an großen Flächen aufweisen kann und vollautomatisch arbeitet [4]. Das Scansystem verwendet das optische



Abbildung 1. Triangulierte Messdaten

Streifenprojektionsverfahren mit dem eine berührungslose Messung der Schaufeloberfläche möglich ist. Die Schaufeln wurden für die Messungen am Fuss eingespannt und aus je acht verschiedenen Ansichten von Saugseite und Druckseite gescannt. Mit dem Einsatz von virtuellen Passmarken, wie ihn IVB verwendet, konnten die Einzelsichten pro Seite zusammengesetzt werden. Die beiden Halbschalen sind anschließend mit einem Best-Fit zueinander registriert worden. Danach erfolgte eine Ausrichtung der Messdaten an der CAD-Geometrie des Schaufelblatts. Abbildung 1 zeigt die triangulierten Messdaten eines Scans. Um den Umfang von 400 Schaufelscans zu bewältigen, wurde ein vollautomatischer Prozess entwickelt, der das Scannen und Registrieren der Schaufel sowie die Qualitätskontrolle beinhaltet [3].

### 4 Aufbereitung der Messdaten

Die Messdatensätze aus der Messkampagne enthalten pro Schaufel über 2 Millionen Messpunkte, die die Schaufeloberfläche beschreiben. Die Messdaten des Schaufelblatts

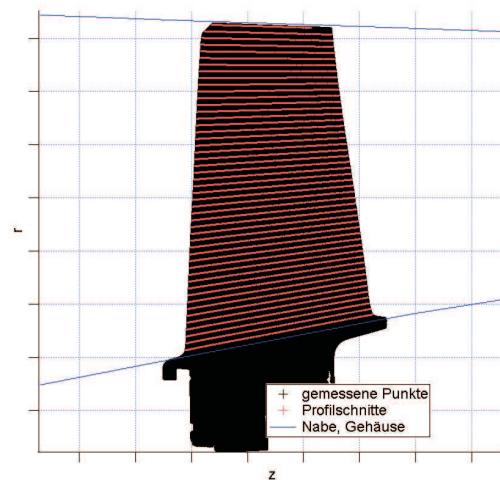


Abbildung 2. Unterteilung des Schaufelblattes in Profilschnitte

tes wurden zur weiteren Bearbeitung in spannenweitenkonstante Profilschnitte zwischen Gehäuse und Nabe unterteilt. Diese Profilschnitte können beliebig über dem Schaufelblatt verteilt sein. An jedem Profilschnitt wurden Staffelungswinkel, Sehnenlänge, maximale Wölbung, Wölbungsrücklage, maximale Dicke, Dickenrücklage, Vorderkantendicke, Vorderkantendickenrücklage, Hinterkantendicke und Hinterkantendickenrücklage bestimmt. Für den Rotor aus dem HDV wurden die Parameter in 49 Profilschnitten über dem Schaufelblatt verteilt bestimmt. Beginnend bei 2% Schaufelblatthöhe bis hin zu 98% Schaufelblatthöhe in Abständen von 2%. Dadurch konnte eine gute Auflösung der Parameter über die Schaufelblatthöhe erreicht werden. Weiterhin wurde der Fillet am Übergang Schaufelblatt zu Plattform durch eine Ellipse parametrisiert. Die beiden Parameter Fillethöhe und Filletdicke stellen die Halbachsen der Ellipse dar.

### 5 Auswertung der Messdaten

Die Messdaten werden nach der Bestimmung der Profilschnittparameter in Bereiche zusammengefasst. Bei der Zusammenfassung der Profilschnitte muss auf den Unterschied zwischen dem Verlauf der gemessenen Schaufelparameter zum Verlauf der Sollgeometrie über der Schaufelblatthöhe geachtet werden. Wie in Abbildung 3 erkennbar, ist der Verlauf von zwei Schaufeln des Parameters maximale Dicke, oberhalb des Fillet, nahezu parallel zum Parameterverlauf der Sollgeometrie (schwarze Linie). Das bedeutet, dass die Änderungen im Vergleich zur Sollgeometrie über die Schaufelblatthöhe fast konstant sind. Die Änderung kann also in einem Bereich bzw. mit einem Wert zusammengefasst werden [5]. Abbildung 4

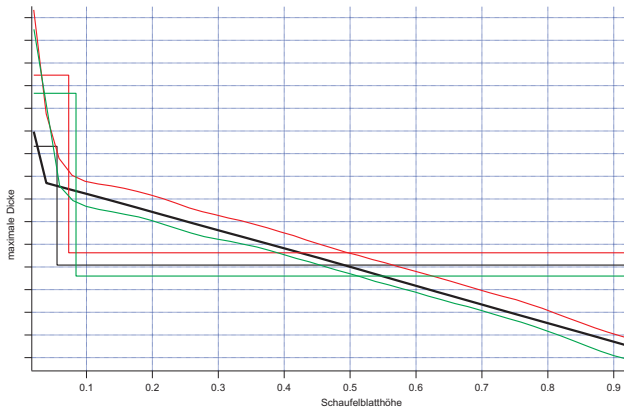


Abbildung 3. Verlauf der maximalen Dicke über dem Schaufelblatt

zeigt die maximalen Dicken aller gemessenen Schaufeln sowie deren Mittelung für den Bereich zwischen Fillet und Schaufelspitze. Mit den zusammengefassten Parametern

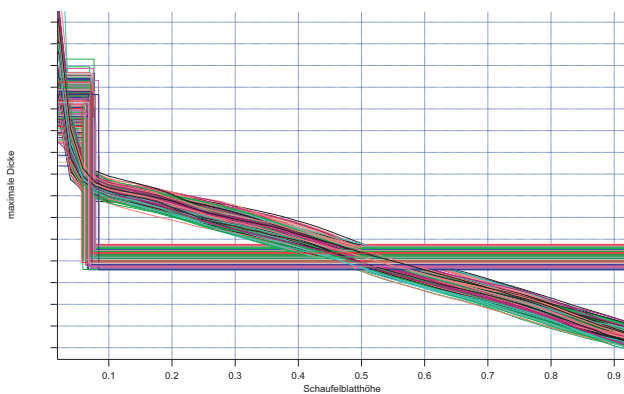


Abbildung 4. Mittelung ein Bereich maximale Dicke

konnten die Verteilungen sowie die Verteilungsparameter bestimmt werden. Die Verteilungen wurden mit Hilfe des

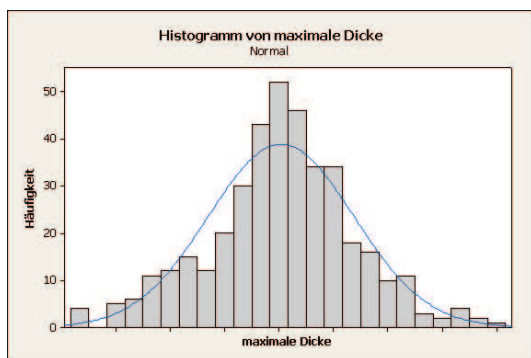


Abbildung 5. Histogramm maximale Dicke

Anderson-Darling (AD) Wert bestimmt, der den Abstand einer vorgegebenen Verteilung zu der diskreten Verteilung

der Messdaten ermittelt. Für die Verteilungsbestimmung standen 10 verschiedene Verteilungarten zur Auswahl. Es wurde die Verteilung ausgewählt, die laut AD-Wert am besten an die Messdaten angepasst ist. In Abbildung 5 ist das Histogramm für die maximale Dicke in dem Bereich Fillet bis Schaufelspitze mit der am besten angepassten Verteilung zu sehen. Die Verteilung entspricht der Normalverteilung.

## 6 Bestimmung der Korrelationen

Zur Auswertung der Korrelationen zwischen den geometrischen Parametern wurde der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient genutzt. Abbildung 6 zeigt die Korrelationsmatrix aller Parameter des Schaufelblattes für einen Bereich sowie die beiden Filletparameter Filletdicke und Fillethöhe. Die Parameter sind jeweils symmetrisch

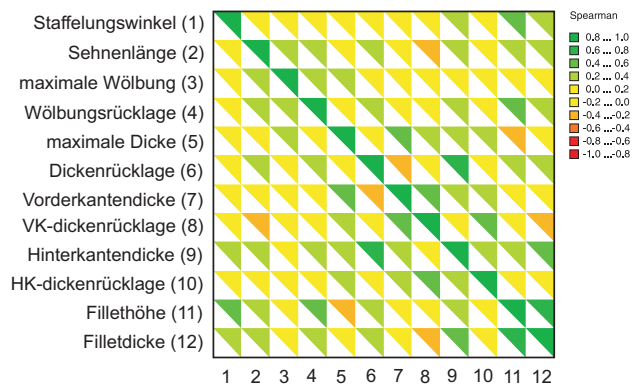


Abbildung 6. Korrelationsmatrix der Schaufelparameter

auf beiden Achsen angeordnet. Auf der Diagonalen in der Mitte schneiden sich die Parameter, was zu einem Korrelationskoeffizienten von  $r = 1$  führt. Durch die Symmetrie der Korrelationsmatrix um die Diagonale, genügt es die Korrelationskoeffizienten oberhalb bzw. unterhalb der Diagonalen zu berücksichtigen. Um verdeckten Korrelationen vorzubeugen, wurde zu jedem Feld der Ant-Hill-Plot untersucht [1]. In Abbildung 7 beträgt der Korrelationskoeffizient bei Berücksichtigung der gesamten Wolke  $r = 0,6$ . Werden die einzelnen Schaufeln näher untersucht und auf Zugehörigkeit geprüft, so stellt sich heraus, dass es zwei Gruppen von Schaufeln gibt, die unterschiedliche Produktionsmerkmale aufweisen. Einige Chargen bilden zusammen die blaue Wolke, die restlichen Chargen bilden die schwarze Wolke. Beide Wolken liegen parallel nebeneinander und verwischen somit die Korrelation. Bei getrennter Berechnung des Korrelationskoeffizienten ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,8$  für beide Wolken. Nach Auswertung aller Korrelationen hat sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der maximalen Dicke, Vorderkantendicke und Hinterkantendicke sowie zwischen Fillethöhe und Filletdicke herausgestellt.

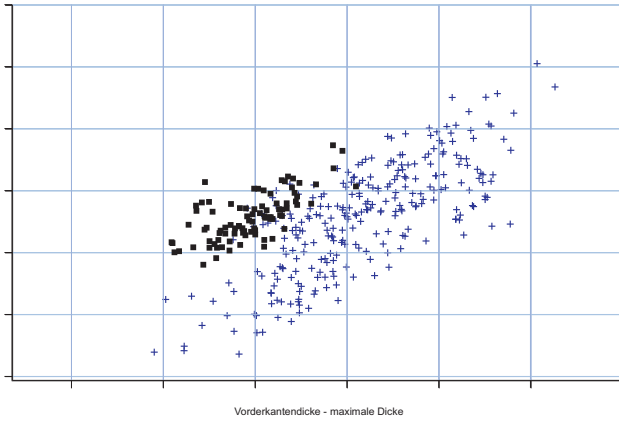


Abbildung 7. verdeckte Korrelation



Abbildung 9. Morphoberfläche mit FE-Netz

## 7 Profilvariation

Für die Profilvariation ist eine charakteristische Beschreibung der Schaufel in Profilschnitten erforderlich. Dazu wurden diskret Punkte auf den Profilschnitten der CAD-Geometrie verteilt. Alle Punkte zusammen beschreiben das Ausgangsnetz, dass auf jede beliebige



Abbildung 8. quasi-3D Modell der Schaufel

Schaufelrealisierung gezogen werden kann (Abbildung 8). Für den Morphvorgang des dreidimensionalen FE-Schalennetzes wurden die oben erläuterten Profilschnitte verwendet, um eine geometrische Fläche in Hypermesh aufzubauen. Diese Fläche muss nicht zwingend aus den zweidimensionalen Profilschnitten aufgebaut werden, sondern kann auch aus CAD-Flächen, 2D- oder 3D-Splines bestehen. Um das FE-Schalennetz zu morphen, ist eine dreidimensionale Fläche des neuen Profils notwendig. In Abbildung 9 ist die Fläche (grau) mit dem FE-Netz (grün) zu sehen.

## 8 Morphing

Durch das Morphen des FE-Schalennetzes konnten die Gaslasten an Druck- und Saugseite für die FE-Simulation erhalten werden. Zum Morphen wurde das Tool Hypermorph von Altair Hyperworks verwendet. Aufgrund der komplexen Geometrie hat sich das freehand-Morphing als zuverlässigste Morphingvariante herauskristallisiert. Durch den Einsatz der dreidimensionalen Fläche kann jeder Knoten des FE-Schalennetzes auf die Fläche gemorphet werden und es entsteht eine exakte Abbildung des FE-Schalennetzes auf das vorher variierte Profil. Das FE-Schalennetz wurde vor dem Morphen auf ein Profil mit kurzer Sehnenlänge und kleiner Dicke gemorphet. Während des Morphings hat sich gezeigt,

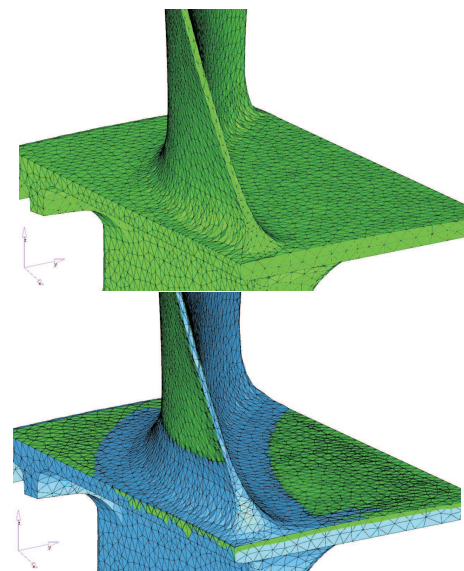


Abbildung 10. Morphingresultate

dass eine Erweiterung der Sehnenlänge und der Dicke mit dem FE-Schalennetz zuverlässiger funktioniert als umgekehrt. Der Morphingvorgang unterteilt sich in mehrere Arbeitsschritte. Zunächst wurden die Übergänge

zwischen Saugseite und Vorderkante bzw. Hinterkante sowie analog auf der Druckseite auf die 3D-Fläche gezogen. Anschließend konnten Vorderkante, Hinterkante, Saugseite und Druckseite auf die 3D-Fläche gemorpt werden. Zum Schluss erfolgt die Verschiebung der Knoten im Filletbereich. In Abbildung 10 sind zwei gemorphte Schaufeln zu sehen. Am Fillet zwischen Hinterkante und Plattform lassen sich diese beiden FE-Netze am besten vergleichen. Die obere Schaufel hat einen kleinen Fillet, während die untere Schaufel einen großen Fillet aufweist. Am Ende des Morphvorgangs wurde das dreidimensionale Schalennetz mit Tetraeder-Elementen ausgefüllt.

## 9 Prozesskette

Abbildung 11 zeigt den Prozessablauf der probabilistischen Untersuchung. Die aus der statistischen Auswertung erhaltenen Verteilungen und Verteilungsparameter der geometrischen Parameter sowie die aus der Korrelationsmatrix gewonnenen Zusammenhänge der geometrischen Parameter dienen als Eingangsparameter für die Monte-Carlo-Simulation (MCS).

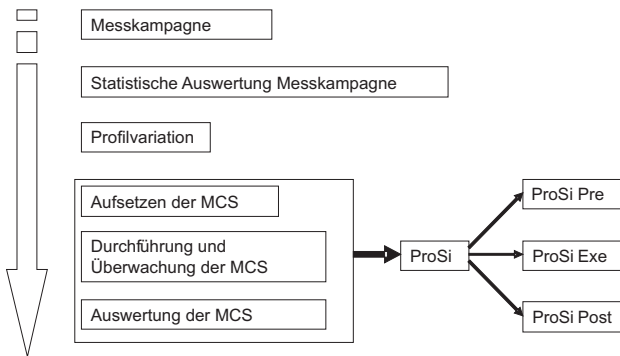


Abbildung 11. Prozessablauf der probabilistische Untersuchung

Die geometrischen Parameter werden in ProSi Pre als probabilistische Variablen definiert. Weiterhin können die Korrelationen in einer Korrelationsmatrix eingetragen werden, die bei der Zufallszahlengenerierung berücksichtigt wird. In ProSi Exe werden nach der Erzeugung der Zufallszahlen die einzelnen Rechnungen auf vorher definierte Knoten des Linuxclusters geschoben und ein bereitgestelltes Script arbeitet die einzelnen Schritte innerhalb der MCS ab. Nach dem Morphen und Vernetzen des FE-Schalennetzes mit Volumenelementen werden die neu erzeugten Knoten und Elemente für die Abaqusrechnung bereitgestellt. Anschließend filtert ein C-Programm die interessanten Ergebnisgrößen aus der Abaqus Ergebnisdatei. Die Ergebnisgrößen können nach der MCS mit ProSi Post für die statistische Auswertung herangezogen werden. In ProSi Post (Abbildung 12) können neben den allgemeinen statistischen Aussagen zu den Verteilungsparametern der Ergebnisgrößen u.a. auch PieCharts und Korrelationsmatrizen, sowie Histogramme erstellt werden.

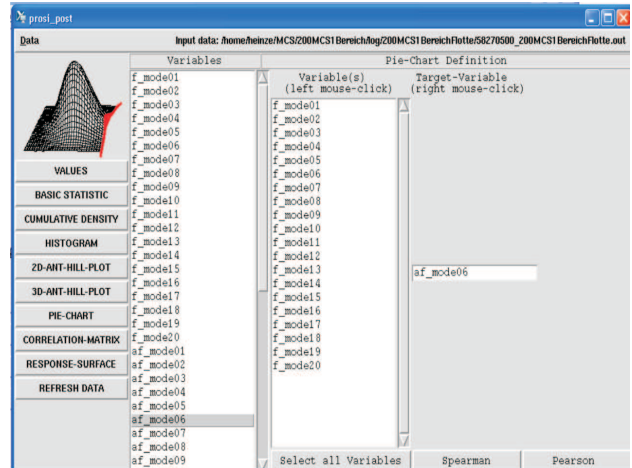


Abbildung 12. ProSi Post

## 10 Monte-Carlo-Simulation

Die MCS, welche schematisch in Abbildung 13 dargestellt ist, setzt sich aus drei Arbeitsschritten zusammen. Im ersten Schritt wurden die Realisierungen der stochastischen Variablen  $x$  generiert, welche den in der Messkampagne ermittelten Verteilungsfunktionen der geometrischen Parametern entsprechen. Anschließend wurden die  $n_{sim} = 200$  deterministischen ABAQUS-Rechnungen mit Hilfe von ProSi Exe durchgeführt. Im letzten Schritt wurden die deterministischen Datensätze statistisch ausgewertet [6].

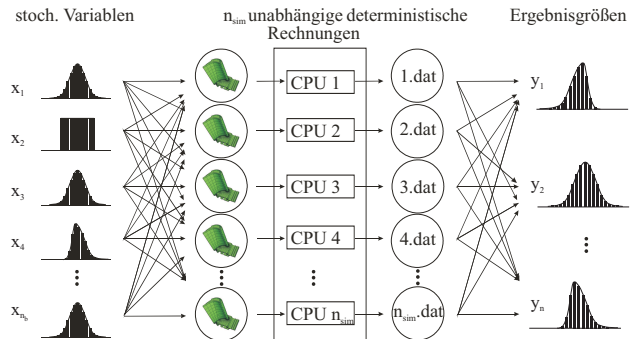


Abbildung 13. Darstellung der Monte-Carlo-Simulation

## 11 Auswertung Monte-Carlo-Simulation

Als Ergebnisgrößen der MCS wurden sowohl die Eigenfrequenzen der 20 Modes als auch die Knoten mit der größten HCF-Belastung pro Mode untersucht. Durch die Streuungen der Eingangsparameter und den dadurch entstanden verschiedenen Realisierungen streuen natürlich auch die Eigenfrequenzen. Abbildung 14 zeigt das Campbell-Diagramm mit dem die Lage der Eigenfrequenzen zu den Erregerfrequenzen im gesamten Betriebsdrehzahlbereich beurteilt werden kann. Es werden die Frequenzen über der Drehzahl

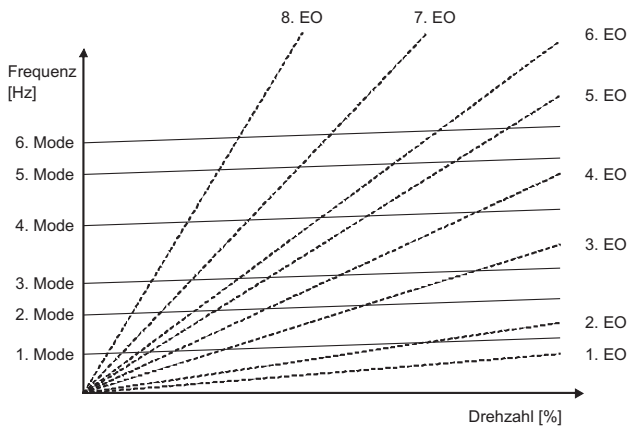


Abbildung 14. Campbell-Diagramm

als Abszisse aufgetragen. Zum einen können die Eigenfrequenzen (schwarze durchgezogene Linien) über der Drehzahl aufgetragen werden. Weiterhin werden die drehzahlabhängigen Erregerfrequenzen (schwarz gepunktete Linien) als Strahlen durch den Ursprung aufgetragen. An den Schnittpunkten zwischen

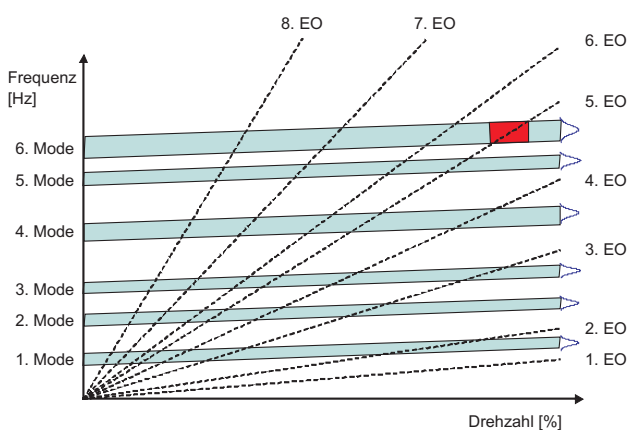


Abbildung 15. Campbell-Diagramm II

Erregerfrequenz und Eigenfrequenz wird die Schaufel mit derselben Frequenz angeregt, die ihrer Eigenfrequenz entspricht. Dadurch kommt es in diesem Punkt zu Resonanzschwingungen, die zum Versagen der Schaufel führen können. Durch die Streuungen der Eigenfrequenzen gehen die Linien nun in Streubänder über (Abbildung 15). Das Streuband schneidet die Erregerfrequenzen nicht mehr nur in einem Punkt, sondern in einem Bereich (rot markiert). Folglich kann es nicht mehr nur bei einer Drehzahl, sondern in einem Drehzahlbereich zu Resonanzschwingungen der Schaufeln kommen. Ein weiteres Ergebnis der MCS ist die Sensitivitätsanalyse. Durch sie ist es möglich die Eingangsgrößen mit dem größten Einfluss auf die Ergebnisgröße herauszufinden. In Abbildung 16 ist dieses Ergebnis in Form eines PieCharts für den ersten Mode dargestellt. Dieser Mode entspricht der 1. Biegung. Es ist zu erkennen, dass Fillethöhe

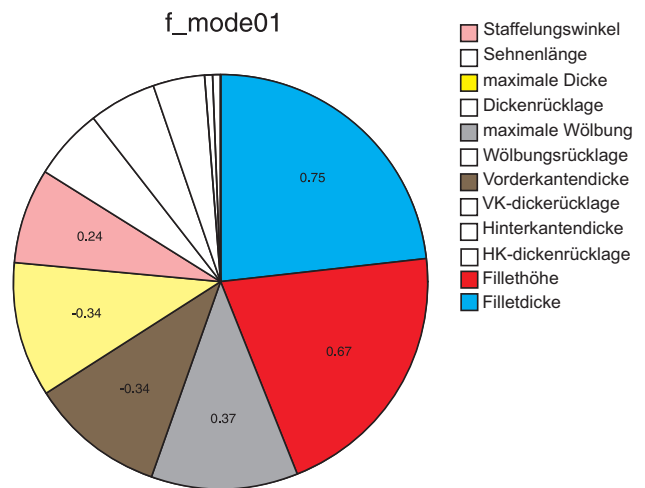


Abbildung 16. PieChart Mode1

und Filletdicke den größten Einfluss auf die Eigenfrequenz haben. Ein Blick auf die Korrelationsmatrix (Abbildung 17) für die ersten 6 Modes zeigt, dass besonders für die höheren

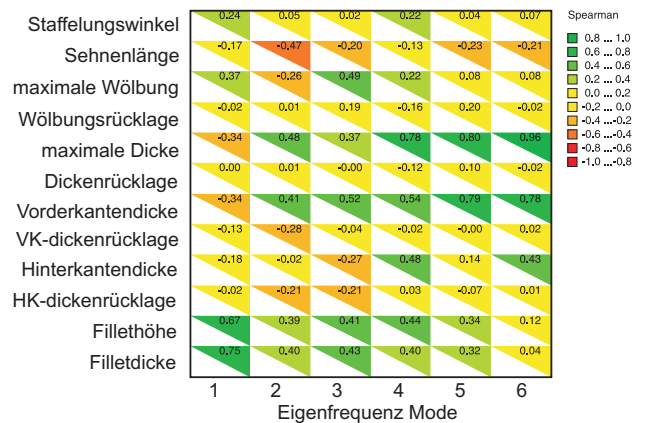


Abbildung 17. Korrelationsmatrix Eingangsparameter-Modes

Modes die Dicke der Schaufel an Einfluss gewinnt. Für den zweiten Mode, welcher der ersten Torsion entspricht, ist neben der Dicke der Schaufel auch die Sehnenlänge entscheidend. Hier liegt eine negative Korrelation vor, die aussagt, dass mit steigender Sehnenlänge die Eigenfrequenz abnimmt. Die Änderung der Massenverteilung führt in diesem Fall zu einer Erhöhung des Trägheitsmoments [2]. Weiterhin können aus der MCS Aussagen zur HCF-Belastung getroffen werden. Als Kriterium für die hochzyklische Belastung (HCF-Belastung) wird der af-Wert definiert. Er wird an jedem Knoten berechnet und setzt sich aus folgenden Termen zusammen (Gleichung (1)).

$$af = f(FS_{Bend}, UTS, \sigma_{steady.FEM}, \sigma_{alt.FEM}) \quad (1)$$

Wobei  $FS_{Bend}$  der Biegewechselfestigkeit und  $UTS$  der

Mindestzugfestigkeit bei Betriebstemperatur entspricht.  $\sigma_{steady.FEM}$  steht für die statische Mittelspannung und

Korrelation zwischen der maximalen Dicke und dem af-Wert. Ab dieser Grenze besteht ein linearer Zusammenhang

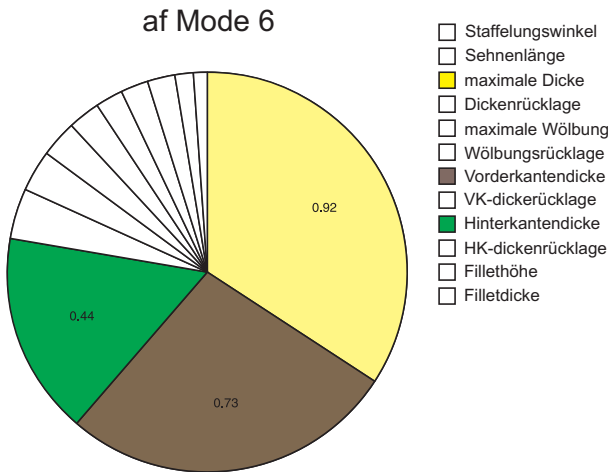


Abbildung 18. PieChart af mode6

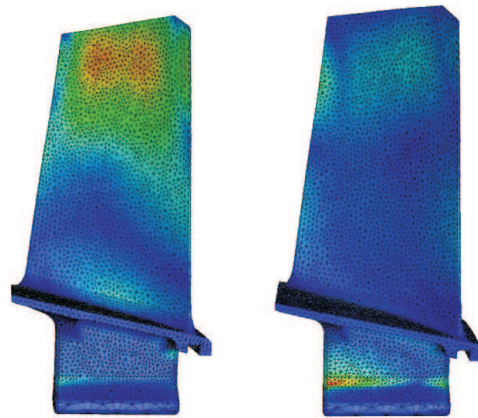


Abbildung 20. maximale af-Knoten am Mode 6

$\sigma_{alt.FEM}$  entspricht der normierten Ausschlagspannung. Je größer der af-Wert ist, desto höher ist die Belastung der Schaufel. Am Beispiel des Mode 6 soll der af-

zwischen den beiden Größen. Der Ant-Hill-Plot zeigt demnach zwei verschiedene Systemcharakteristiken. Ein Blick auf die af-Plots verdeutlicht das Problem (Abbildung 20). Während im linken Bild der kritische Bereich (roter Bereich) nahe der Schaufelspitze (Bereich 6.1) liegt, hat sich der kritische Bereich im rechten Bild in den Schaufelfuß (Bereich 6.2) verlagert. Die zwei verschiedenen Charakteristiken resultieren also aus der Definition des af-Wertes. Dieser ist abhängig

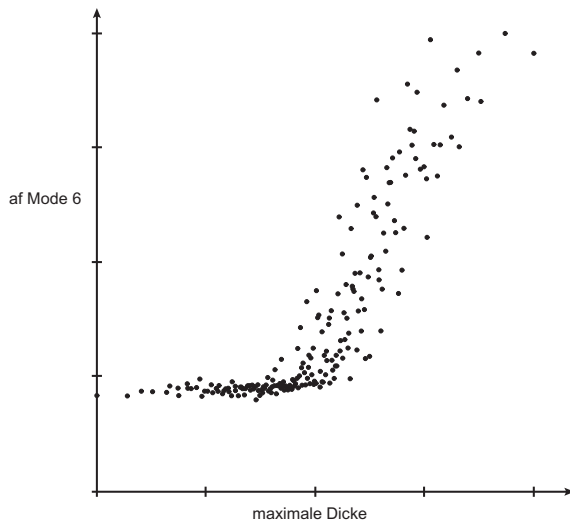


Abbildung 19. Ant-Hill-Plot maximale Dicke vs af-mode6

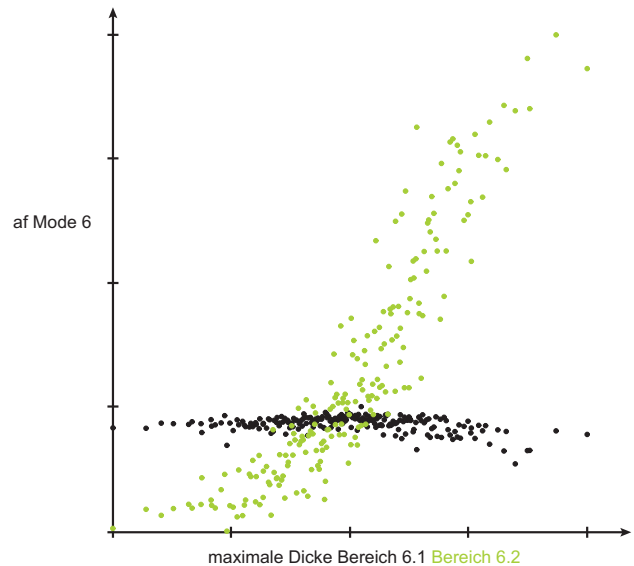


Abbildung 21. Ant-Hill-Plot maximale Dicke Bereich 6.1/6.2 vs af-mode6

Wert untersucht werden. Abbildung 18 zeigt dazu den PieChart. Demnach hat die Dicke (Maximale Dicke, Vorderkantendicke, Hinterkantendicke) der Schaufel den dominierenden Einfluss auf den af-Wert. Um eventuelle Unstimmigkeiten zu finden, muss wie bei der verdeckten Korrelation der Ant-Hill-Plot aller Eingangsgrößen zur Ergebnisgröße geprüft werden. Betrachtet man den af-Wert und die maximale Dicke im Mode 6, so tritt ein ungewöhnliches Systemverhalten auf (Abbildung 19). Bis zu einer bestimmten maximalen Dicke besteht keine

vom Knoten. Er ist nicht an einen Ort gebunden. Bei

getrennter Betrachtung des af-Wertes (Abbildung 21), zeigt sich nun deutlich, dass im Bereich 6.1 die maximale Dicke auf den af-Wert keinen Einfluss hat (schwarze Punktwolke). Das heißt, der af-Wert ist in diesem Bereich robust gegenüber Änderungen der maximalen Dicke. Im Gegensatz dazu besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der maximalen Dicke und dem af-Wert im Bereich 6.2 (grüne Punktwolke). Die Änderung der maximalen Dicke hat einen entscheidenden Einfluss auf den af-Wert im Bereich 6.2. In den beiden betrachteten Bereichen haben somit unterschiedliche Eingangsgrößen Einfluss auf den af-Wert. Diese Annahme bestätigt auch ein Blick auf den PieChart für die af-Werte der beiden Bereiche. Für den Bereich 6.1 (Abbildung 22) hat neben der Dickenrücklage auch der Fillet einen großen Einfluss auf den af-Wert. Im Bereich 6.2 (Abbildung 23) hat die Dicke der Schaufel (bestehend aus maximaler Dicke, Vorderkantendicke und Hinterkantendicke) den größten Einfluss auf den af-Wert. Ein Blick auf die Schwingformen

Änderung der Schwingform kommt (Abbildung 24). In

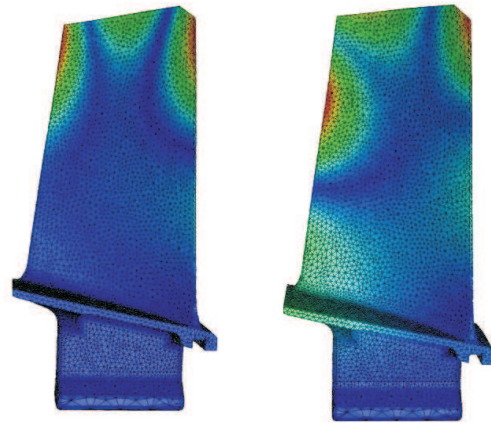


Abbildung 24. Schwingformen Mode 6

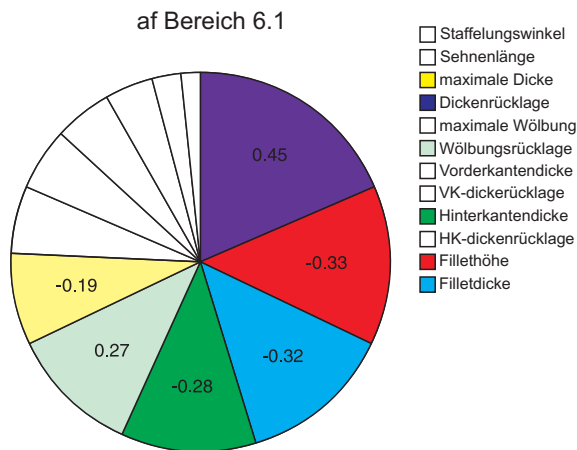


Abbildung 22. PieChart af Bereich 6.1

der Abbildung sind die maximalen Verschiebungen der Knoten dargestellt. Bei der linken Schaufel treten diese Verschiebungen an der Schaufelspitze auf. Die Schaufel flattert im oberen Schaufelblattbereich. In der rechten Abbildung treten diese Verschiebungen überwiegend am Rand des Schaufelblattes und im hinteren Bereich der Plattform auf. Die Schwingform ist eine Mischung aus Biegung und Torsion.

## 12 Vergleich der Simulation mit Messungen

Wie genau die geometrischen Variationen der Schaufel abgebildet werden können, wurde anhand von Eigenfrequenzmessungen überprüft. Dazu wurden am Institut für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen der BTU Cottbus die Eigenfrequenzen von zehn freistehenden Schaufeln gemessen. Die Schaufeln

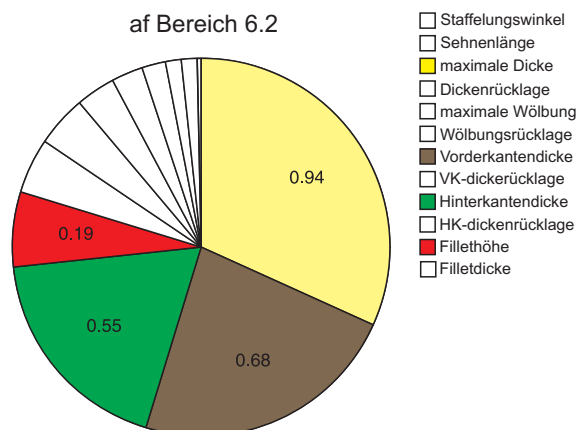


Abbildung 23. PieChart af Bereich 6.2



Abbildung 25. Messaufbau BTU Cottbus

zeigt, dass es durch die geometrische Variation zu einer wurden an der Vorderkante knapp über dem Fillet mit



Hammerschlag angeregt. An der Schaufelspitze im Bereich Hinterkante wurde die Bewegung der Schaufel mittels Laservibrometer gemessen. Abbildung 25 links zeigt den Aufbau der Eigenfrequenzmessung mit Hammer und Laserpunkt (roter Punkt). Die Eigenfrequenzmessung erfolgte schließlich freistehend (Abbildung 25 rechts). In Abbildung 26 sind die Übertragungsfunktionen der zehn Schaufeln zu sehen. Dabei haben sich zwei Modes herauskristallisiert, die um einen Mittelwert streuen. Während Schaufel 387 am linken Rand aller gemessenen

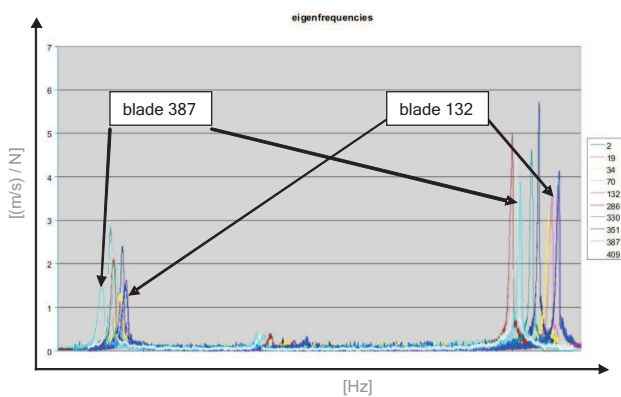


Abbildung 26. Übertragungsfunktion

Eigenfrequenzen zu finden ist, befindet sich Schaufel 132 am rechten Rand aller gemessenen Eigenfrequenzen. Die geometrischen Unterschiede der Schaufeln sind also auch in der Eigenfrequenzmessung sichtbar. Ein wesentlicher Unterschied der beiden Schaufeln ist an der Hinterkante erkennbar (Abbildung 27). Schaufel 387 hat im Gegensatz



Abbildung 27. Vergleich Hinterkante

zu Schaufel 132 eine dünnere Hinterkante. Mit den Korrelationen aus der Messkampagne bedeutet dies, dass das Schaufelblatt von Schaufel 387 dünner ist als von Schaufel 132. Wie die Auswertung der MCS gezeigt hat, besitzen Dicke und Eigenfrequenz der Schaufel eine positive Korrelation. Im nächsten Schritt wurden die Schaufelblätter der zehn gemessenen Schaufeln mit dem o.g. Algorithmus zur Profilvariation aufgebaut. Der Profilaufbau der einzelnen Schaufeln erfolgte mit den Messdaten aus der Messkampagne. Anschließend wurde das FE-Netz auf die erstellten Profile gemorpt (siehe Kapitel 8) und eine Modalanalyse in Abaqus durchgeführt.

Es wurde die gleiche freistehende Lagerung verwendet wie bei der Eigenfrequenzmessung. Eine Auswertung der Modalanalyse hinsichtlich Schwingformen hat gezeigt, dass in den gemessenen Eigenfrequenzbereichen die 1. und 2. Torsion vorliegen. In Tabelle 1 ist die prozentuale Abweichung der Eigenfrequenzen aus Messung und Modalanalyse zu sehen. Die Abweichung für Mode

Schaufel	Abweichung in %	
	Mode 2	Mode 4
2	4.34	-0.36
19	2.24	0.07
34	2.20	-0.95
70	2.46	-1.47
132	2.24	-1.20
286	2.44	-2.42
330	1.20	-0.66
351	2.28	-0.03
387	1.39	0.98
409	2.52	-0.57

Tabelle 1. Vergleich der Eigenfrequenzen

2 (1. Torsion) liegt im Bereich von 1,39% bis 4,34%, wobei die Abweichung von neun der zehn Schaufeln nicht mehr als 2,52% beträgt. Für den Mode 4 (2. Torsion) liegt die Abweichung zwischen 0,03% und 2,42%. Berücksichtigt man, die möglichen Fehlerquellen (u.a. aus Messkampagne, Profilaufbau, Messung der Eigenfrequenzen) so ist der Unterschied zwischen den gemessenen und den simulierten Eigenfrequenzen gering. Neben den genannten Fehlerquellen muss auch der Einfluss der geometrischen Variation von Plattform und Schaufelfuß bedacht werden. Mögliche geometrische Variationen in diesen Bereichen wurden in dem hier diskutierten Prozess nicht berücksichtigt.

### 13 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper wurde ein Prozess vorgestellt, der eine Übertragung der geometrischen Variationen des Schaufelblattes auf ein existierendes FE-Netz ermöglicht. Diese Prozesskette ist Grundlage für die durchgeführte Monte-Carlo-Simulation aus der Informationen hinsichtlich Eigenfrequenzen und HCF-Belastung gewonnen werden konnten. Neben den Streuungen der Eigenfrequenzen, die eine Betrachtung der Resonanzschwingungen nicht mehr nur bei einer Drehzahl, sondern über einen Drehzahlbereich zulassen, konnte aufgrund der geometrischen Streuungen eine Schwingformänderung innerhalb eines Modes ermittelt werden. Zudem verschiebt sich der Bereich mit dem maximalen af-Wert in Abhängigkeit von den geometrischen Variationen. Zusätzlich konnten die Parameter mit

dem größten Einfluss auf  $\omega$ -Wert und Eigenfrequenz gefunden werden. Der Vergleich zwischen den gemessenen Eigenfrequenzen von zehn Schaufeln am Institut für Strukturdynamik und Fahrzeugschwingungen der BTU Cottbus mit der Modalanalyse der zehn Schaufeln in Abaqus zeigt eine Abweichung von maximal 4,34% bzw. 2,42% für die 1. und 2. Torsion. Um noch genauere Ergebnisse zu erhalten, kann zum einen eine Vorrichtung für eine identische Lagerung der Schaufeln zur Eigenfrequenzmessung verwendet werden. Weiterhin würde eine Parametrisierung des Schaufelfußes und der Plattform sinnvoll sein, um diese geometrischen Streuungen mit in dem Morphingprozess einzubinden. Dann könnte das komplette Profil einer Schaufel mit allen geometrischen Variationen nachgebildet werden.

### Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramm III. Die Autoren danken Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die finanzielle Unterstützung.

### Literatur

- [1] Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G. *Statistik*. Springer Verlag, Berlin, 2001.
- [2] Gasch, R.; Knothe, K. *Strukturdynamik - Band 2: Kontinua und ihre Diskretisierung*. Springer Verlag, Berlin, 1989.
- [3] Holtzhausen, S.; Schreiber, S.; Stelzer, R. *Automated 3D measuring of compressor blades and analysis of measurement results*. ASME paper no: GT2009-59902, to be published, Orlando, 2009.
- [4] IVB Jena. Kolibri flex 100—50. [www.ivb-jena.de](http://www.ivb-jena.de), September 2008. PDF file.
- [5] Lange, A.; Vogeler, K.; Schrapp, H.; Clemen, C. *Ein parametrisches Modell für Verdichterschaufeln zur Abbildung von geometrischen Abweichungen in der numerischen Simulation*. Probabilistik-Workshop TU Dresden, Dresden, 2008.
- [6] Voigt, M. *Probabilistische mechanische Auslegung von Turbinen*. Technische Universität Dresden, Dresden, 2005.