

Probabilistische Untersuchungen von Schaufeln moderner Hochdruckverdichter auf Grundlage gemessener Produktionsstreuungen

Teil 1: Messkampagne und Sensitivitätsanalyse der hochzyklischen Ermüdung

Kay Heinze^{1*}, Konrad Vogeler¹, Winfried-Hagen Friedl²

¹ Institut für Strömungsmechanik, Technische Universität Dresden

² Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

Zusammenfassung

Im Auslegungsprozess von Verdichterschaufeln ist die Anwendung von deterministischen Modellen zur Berechnung der hochzyklischen Ermüdung (High Cycle Fatigue) die Regel. Streuungen der hochzyklischen Ermüdung, die z. B. durch Verschleiß der Fertigungswerkzeuge (1) entstehen, werden durch Sicherheitsfaktoren und konservative Annahmen berücksichtigt. Mit dem Einsatz von probabilistischen Methoden kann der Einfluss dieser Produktionsstreuungen auf die hochzyklische Ermüdung der Schaufeln schon in der Auslegungsphase ermittelt werden und zu einem robusten Schaufeldesign beitragen.

Innerhalb einer Messkampagne wurden 500 Verdichterschaufeln aus Rolls-Royce Triebwerken zufällig ausgewählt und mit der optischen Streifenprojektionsmesstechnik gescannt. Aus jeder gescannten Schaufel wurden vorher definierte geometrische Parameter abgeleitet. Aufgrund der hohen Anzahl an gescannten Schaufeln kann so die Streuung jedes Schaufelparameters mit hoher statistischer Sicherheit mit einer Verteilungsfunktion und den zugehörigen Parametern beschrieben werden. Diese Verteilungsfunktionen sind wiederum die Eingangsparameter für die probabilistische Untersuchung, um den Einfluss der real gefertigten Verdichterschaufelgeometrie auf die hochzyklische Ermüdung zu bestimmen.

Durch die probabilistische Untersuchung wird das Verständnis des gesamten Systems enorm erweitert. Mittels den im Artikel verwendeten statistischen AuswertepLOTS der Häufigkeit und der Korrelation können interessante Bereiche ermittelt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Informationen aus dieser Auswertung für eine mögliche konstruktive Änderung hin zu einer Erhöhung der Lebensdauer zu verwenden.

Keywords: hochzyklische Ermüdung (HCF), optisches Streifenprojektionsverfahren, Monte-Carlo-Simulation, Sensitivitätsanalyse

*Kontakt: Dipl.-Ing. Kay Heinze, Technische Universität Dresden – Institut für Strömungsmechanik, George-Bähr-Strasse 3c, D-01062 Dresden, E-Mail: kay.heinze@tu-dresden.de

1 Einleitung

Abnutzung und Verschleiß der Fertigungswerkzeuge sowie Streuungen der Materialeigenschaften oder Rohlinggeometrie führen in einer Vielzahl von Produktionsprozessen zu geometrischen Abweichungen der gefertigten Bauteile von der im Auslegungsprozess ermittelten Geometrie. Diese Abweichungen spiegeln sich je nach Einsatzgebiet der Bauteile häufig in nicht zu vernachlässigenden Änderungen der aerodynamischen, strukturmechanischen oder strukturdynamischen Kenngrößen wider. In der herkömmlichen Auslegungsphase werden diese geometrischen Streuungen jedoch oftmals nicht berücksichtigt. Stattdessen wird mit einer deterministischen Rechnung unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren und konservativen Annahmen eine Punktlösung ermittelt.

Mit der Anwendung probabilistischer Methoden in der Auslegungsphase können die erwarteten Produktionsstreuungen schon vor der Bauteilfertigung innerhalb der Auslegungsphase berücksichtigt werden. Die statistische Auswertung der probabilistischen Untersuchung ermöglicht es, die Produktionsparameter mit dem größten Einfluss auf die Kenngrößen zu ermitteln (Sensitivitätsanalyse) oder Ausfallwahrscheinlichkeiten zu berechnen. Zudem können die Komponenten hin zu einem robusten Design optimiert werden. Der Nachteil der probabilistischen Untersuchung ist die oft zeitaufwendige Ermittlung der Parameterstreuungen und die notwendige hohe Anzahl an Rechnungen, um das gesamte System zu beurteilen. Dieser Mehraufwand im Auslegungsprozess ist jedoch vertretbar, wenn dadurch kostenintensive Rückholaktionen oder Redesigns vermieden werden können bzw. wenn dadurch ein Bauteil gefertigt wird, das bei minimalem Gewicht allen Belastungen standhält.

Am Lehrstuhl für Turbomaschinen und Strahlantriebe der Technischen Universität Dresden wurden in bisherigen Projekten probabilistische Untersuchungen an Verdichter- und Turbinenkomponenten sowie am Sekundärluftsystem und Getriebekomponenten durchgeführt. Dieser Beitrag zu den Weimarer Optimierungs- und Stochastiktagen 6.0 zeigt eine probabilistische Untersuchung am Beispiel der hochzyklischen Ermüdung einer Verdichterschaufel.

2 Scansystem und Parametrisierung der Messdaten

Die Aussagefähigkeit der probabilistischen Untersuchung hängt in starkem Maße von der Güte der stochastischen Eingangsparameter ab. So kann der reale Einfluss der Produktionsstreuungen auf die hochzyklische Ermüdung nur ermittelt werden, wenn die Streuungen der Geometrie bekannt sind. Um diese Streuungen möglichst genau zu erfassen, wurden die Oberflächen von über 500 Verdichterschaufeln mit dem optischen Streifenprojektionsverfahren gescannt.

Auf Basis eines geometrischen Parametermodells wurden anschließend aus den gescannten Daten jeder Schaufel die Geometrieparameter berechnet. Mit der statistischen Auswertung der berechneten geometrischen Parameter konnten schließlich die Verteilungsarten und Verteilungsparameter ermittelt werden (2).

Abbildung 1 zeigt das Scansystem GOM ATOS SO am Lehrstuhl für Turbomaschinen und Strahlantriebe der TU Dresden.



Abbildung 1: Scansystem GOM ATOS SO

3 Übertragung der geometrischen Streuungen auf das parametrisierte FE-Netz

Während der probabilistischen Untersuchung muss das FE-Netz entsprechend den Realisierungen der geometrischen Parameter angepasst werden. Die Grundlage für diese Übertragung der geometrischen Parameter auf das FE-Netz bildet ein automatisierter Prozess, der in einem ersten Schritt charakteristische zweidimensionale Profilschnitte des Schaufelblatts neu aufbaut. Alle Profilschnitte führen zu einem quasi-3D Modell des angepassten

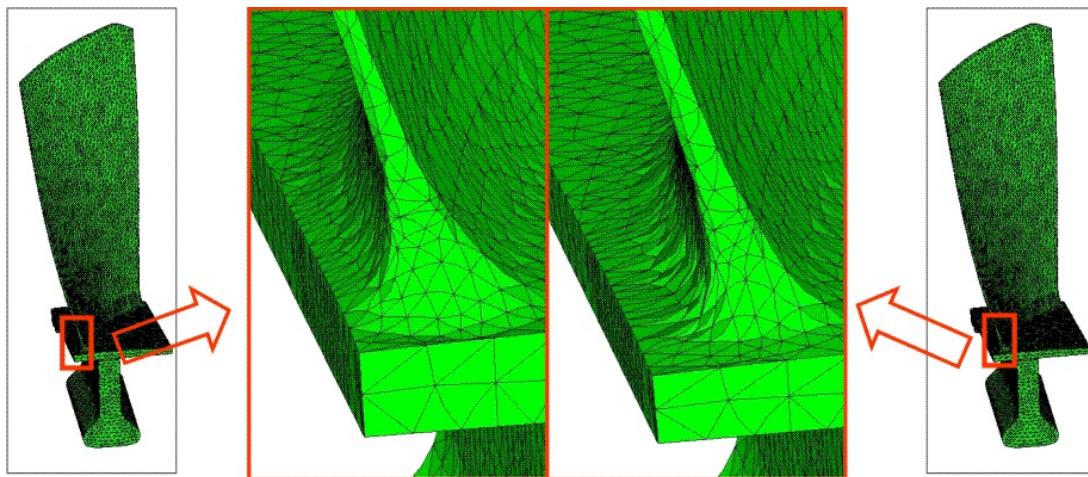


Abbildung 2: "Meshmorphing"-Resultate

Schaufelblattprofils. Auf Grundlage dieses quasi-3D Modells wird anschließend das Meshmorphing des FE-Netzes im Schaufelblatt durchgeführt. Die verbleibende Geometrie der Plattform und des Schaufelfusses wird ebenfalls mittels Meshmorphing variiert. Für das Meshmorphing werden die Morphingalgorithmen des Programms HyperMorph von

Altair verwendet (3). Abbildung 2 zeigt zwei gemorphte FE-Netze. Diese FE-Netze unterscheiden sich in der Größe des Fillets (Übergang Plattform zu Schaufelblatt) und in der Plattformdicke.

Die Verifizierung dieser Prozesskette wurde anhand von Fehlfarbenbildern durchgeführt. An diesen Fehlfarbenbildern kann die Abweichung zwischen gescannter Schaufel und gemorphten FE-Netz dargestellt werden. Diese Bilder zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Scan und FE-Netz.

4 Probabilistische Untersuchung der hochzyklischen Ermüdung

Die Verteilungen mit den entsprechenden Verteilungsparametern der realen geometrischen Schaufelparameter dienen als stochastische Eingangparameter für die probabilistische Untersuchung. In der probabilistischen Untersuchung wurde eine Monte-Carlo-Simulation (MCS) auf Basis des Latin-Hypercube-Samplings durchgeführt (4). Für die hier vorgestellte Untersuchung wurden nur die Streuungen des Schaufelblatts berücksichtigt.

Im ersten Schritt der MCS werden durch die zufällige Auswahl der geometrischen Parameter aus den Eingangparameterverteilungen insgesamt 200 Realisierungen, unter Berücksichtigung der Korrelationen, erzeugt. Diese entsprechen den real gefertigten Verdichterschaukeln. Anschließend werden für jede Realisierung die geometrischen Parameter mit der Prozesskette aus Abschnitt 3 auf das FE-Modell übertragen und es wird eine FE-Analyse durchgeführt. In der Auswertung der MCS können die Ergebnisgrößen wiederum als Verteilungsfunktionen dargestellt werden. Zur Durchführung der MCS wurde das lehrstuhleigene Programm ProSi verwendet.

Ein möglicher Ansatz zur Auswertung der hochzyklischen Ermüdung (im weiteren Verlauf mit Schwingfestigkeit bezeichnet) soll am Beispiel des Mode 6 aufgezeigt werden. Die Schwingfestigkeit wird für jeden Knoten des FE-Netzes berechnet. Um die Schwingfestigkeit auszudrücken, wird der Rolls-Royce Parameter af verwendet. Je kleiner af ist, desto geringer ist die Schwingfestigkeit.

Abbildung 3 zeigt einen Häufigkeitsplot von af für Druck- und Saugseite der Verdichterschaukel. In dieser Darstellung ist die prozentuale Häufigkeit angezeigt, wie viele Realisierungen eine vorher definierte Grenze unterschreiten. In der Abbildung sind zwei ausgeprägte Bereiche zu sehen, an denen die Schwingfestigkeit diese Grenze unterschreitet. Der Bereich A befindet sich an der Schaufelspitze. In diesem Bereich erreichen 100% der Realisierungen die Grenze (rote Färbung). Auch die Lösung des deterministischen Modells (in der Abbildung als Referenz bezeichnet) liegt in diesem Bereich. Im Bereich B, der sich am Schaufelfuss befindet, erreichen ungefähr 50% der Realisierungen die Grenze (grüne Färbung). Mit der Auswertung der probabilistischen Simulation wurde neben der deterministischen Lösung ein zweiter Bereich aufgefunden, in dem die Grenze mehrfach unterschritten wird. Mit Hilfe der probabilistischen Simulation kann somit das ganze, den Produktionsstreuungen zugrunde liegende System, verstanden werden.

Eine getrennte Sensitivitätsanalyse für diese beiden Bereiche ergab, dass die Streuungen unterschiedlicher Schaufelparameter Einfluss auf die Schwingfestigkeiten im Bereich A und im Bereich B haben. Im Bereich A hat die Position der maximalen Dicke den größten Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Im Bereich B dagegen hat die maximale Dicke des Schaufelblatts selbst den größten Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Eine Zunahme der maximalen Schaufelblattdicke führt zu einer Versteifung des Schaufelblatts und damit zu einer größeren Belastung im Schaufelfuss.

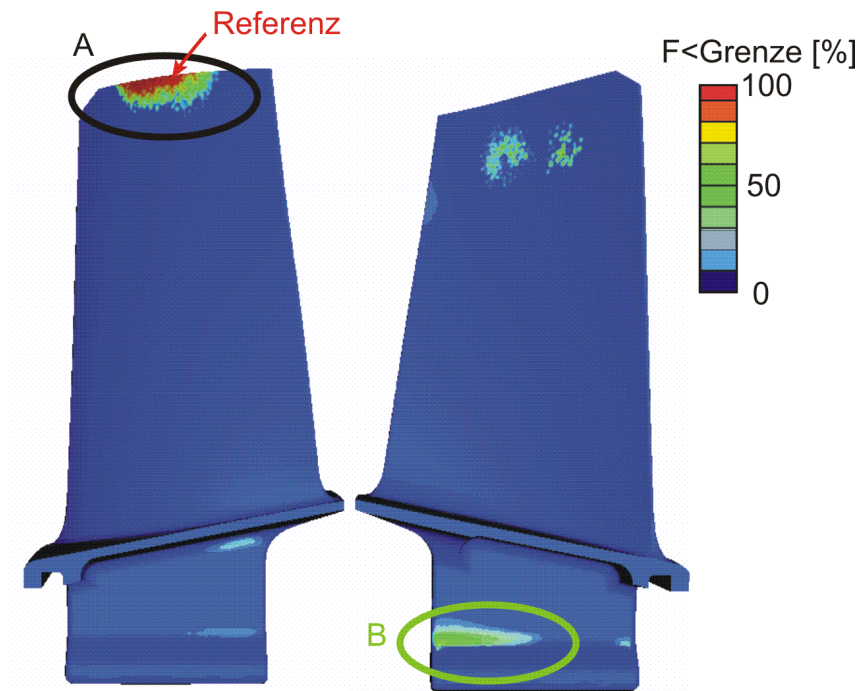


Abbildung 3: Häufigkeitsplot von af für den Mode 6

Abbildung 4 zeigt einen Korrelationsplot der Verdichterschaufel. In dieser Darstellung sind die linearen bzw. monoton nichtlinearen Korrelationen zwischen der Schwingfestigkeit und dem geometrischen Parameter maximale Dicke für jeden Knoten zu sehen. Eine

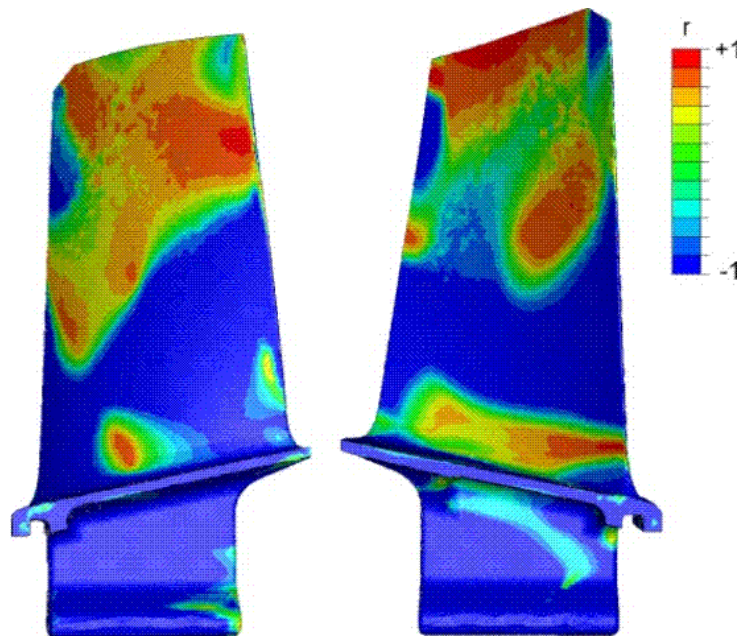


Abbildung 4: Korrelationsplot zwischen der Schwingfestigkeit af und der maximalen Dicke von Mode 6

dunkelrote Färbung steht für eine stark positive Korrelation. Eine dunkelblaue Färbung steht für eine stark negative Korrelation. In Bereichen mit grüner Färbung besteht keine Korrelation zwischen der maximalen Dicke und der minimalen Schwingfestigkeit.

Die Auswertung des Häufigkeitsplots ergab zwei Bereiche, in denen die Schwingfes-

tigkeit die Grenze unterschreitet. Der Korrelationsplot zeigt dazu im Schaufelfuss eine negative Korrelation zwischen Schaufelblattdicke und Schwingfestigkeit an. Eine Verringerung der maximalen Schaufelblattdicke führt in diesem Bereich somit zu einer Erhöhung der Schwingfestigkeit. Im Bereich A, an der Schaufelspitze, hat die maximale Dicke kaum bzw. sehr wenig Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Die grüne Färbung an der Schaufelspitze des linken Bildes verdeutlicht dies. Erweitert man den Bereich A, zeigt sich, dass die maximale Dicke und die Schwingfestigkeit miteinander positiv korrelieren. Eine Vergrößerung der Schaufelblattdicke würde also zu einer Erhöhung der Schwingfestigkeit in diesem Bereich führen. Letztendlich gibt der Korrelationsplot einen Hinweis, wie das Schaufelblatt ausgelegt werden kann, um die Schwingfestigkeiten im Mode 6 in den Bereichen A und B zu erhöhen.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag zu den Weimarer Optimierungs- und Stochastiktagen 6.0 wird zunächst ein Prozess vorgestellt, der das Übertragen geometrischer Schaufelparameter auf ein FE-Netz ermöglicht. Mit diesem Prozess als Grundlage wird anschließend eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, um den Einfluss der Produktionsstreuungen auf die hochzyklische Ermüdung der Schaufel zu ermitteln.

Mit dem Einsatz des Häufigkeits- und Korrelationsplots zur statistischen Auswertung der Monte-Carlo-Simulation an Mode 6 werden die Möglichkeiten der probabilistischen Untersuchung verdeutlicht. Das Verständnis des gesamten, den Produktionsstreuungen zu Grunde liegenden, Systemverhaltens wird erweitert.

Danksagung

Diese Arbeit wurde innerhalb des Projekts "Optifer Plus" in Zusammenarbeit mit Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG durchgeführt. Der Dank gilt vielen Rolls-Royce Mitarbeitern für ihre hilfreiche Unterstützung und dem Bundeswirtschaftsministerium für die finanzielle Förderung (Förderkennzeichen: 20T0306B). Während der Arbeit wurden akademische Lizenzen der Programme Abaqus und HyperWorks eingesetzt.

Literatur

Klauke, T.; Kühhorn, A.; Beirow, B.; Parchem, P., Blade vibration phenomena of HPC blisks considering manufacturing effects and strain gauge application. *ASME Turbo Expo, GT2008-50683*.

Lange, A.; Vogeler, K.; Schrapp, H.; Clemen, C. Introduction of a parameter based compressor blade model for considering measured geometry uncertainties in numerical simulation. *ASME Turbo Expo, GT2009-59937*.

Roa, J. S.; Narayan R. Lifing of turbomachinery blades - a process driven approach. *ASME Turbo Expo, GT2008-50231*.

Voigt, M.; Mücke, R.; Vogeler, K.; Oevermann, M. Probabilistic lifetime analysis for turbine blades on a combined direct monte carlo and response surface approach. *ASME Turbo Expo, GT2004-53439*.