

SCHWINGUNGSVERHALTEN VON HOCHDRUCKVERDICHTERSCHAUFELSCHEIBEN IN INTEGRALBAUWEISE (BLISK) UNTER BERÜCKSICHTIGUNG HÖHERER SCHWINGUNGSMODEN, ERZEUGUNG UND MESSUNG VON UMLAUFWELLEN, 3D-GEOMETRIEVERMESSUNG

U. Strehlau, A. Kühhorn; Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät für
Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen, Lehrstuhl für Strukturmechanik und
Fahrzeugschwingungen (SMF), Siemens-Halske Ring 14, 03046 Cottbus, Deutschland

Zusammenfassung

Die Forderung nach immer leistungsfähigeren, zugleich effizienteren und umweltfreundlicheren Triebwerken im Luftfahrtbereich führte in der jüngeren Vergangenheit mehr und mehr zum Einsatz von Verdichterlaufrädern in Integralbauweise. Hierbei wird auf die konventionelle Schaufel-Scheibe-Verbindung verzichtet, was vor allem zu einer Gewichtseinsparung und aufgrund günstigerer Spannungsverteilungen zu potentiell höheren Drehzahlen führt. Neben aufwändigeren Fertigungs- und Reparaturverfahren für eine sogenannte Blisk (**Blade integrated disk**) führt diese Art der Verdichterlaufscheiben zu einer Reihe von Besonderheiten hinsichtlich des strukturdynamischen Verhaltens, die unter anderem durch Fertigungsimperfectionen sowie Materialfehler hervorgerufen und durch Verschleiß verstärkt werden können. Diese Abweichungen der gefertigten, realen Geometrie von der idealen Geometrie, mit typischerweise identischen Schaufeln, wird als Mistuning bezeichnet. Zwar liegt dieses Mistuning im allgemeinen nur im Bereich von 0-2% (gemessen an der Eigenfrequenzverteilung der Schaufeln), jedoch können verstimmt Blisks unter Erregung deutlich größere Schwingungsantworten zeigen als ideale unverstimmt Blisks [1].

Das Schwingungsverhalten von Blisks im Bereich unterer Moden (1. Biegung, 1. Torsion und 2. Biegung) wird durch umfangreiche Arbeiten [2], [3] untersucht. Basierend auf diesen Arbeiten leistet diese Arbeit einen Beitrag zum besseren Verständnis der Auswirkungen des Mistunings in realen Hochdruckverdichterlaufscheiben, besonders in Bezug auf höhere Schwingungsmoden sowie Umlauf- bzw. Wanderwellen. Weiterhin wird auf die 3D-Vermessung von zwei realen Blisk-Geometrien zum Update des FE-Modells eingegangen.

1. HÖHERE MODEN

Um einen grundlegenden Eindruck vom Schwingungsverhalten zunächst idealer bzw. unverstimmter Blisks, auch im höheren Frequenzbereich von bis zu 20 kHz, zu erhalten, werden numerische Berechnungen des unverstimmten bzw. perfekten Modells durchgeführt. Dabei wird für eine zeitsparende Berechnung die zyklische Rotationssymmetrie der Struktur ausgenutzt, wodurch für die Berechnung der Eigenfrequenzen und Eigenformen nur die Betrachtung eines einzigen Sektors der Blisk notwendig ist.

1.1. Numerische Berechnungen des idealen Modells - Kopplungsdiagramm

Eine übersichtliche und gängige Darstellung der Eigenfrequenzen einer idealen Blisk wird im sogenannten Kopplungsdiagramm bereitgestellt. Hierbei werden die Eigenfrequenzen über der Anzahl der Knotendurchmesserlinien (CSM - cyclic symmetry mode, dt.: zyklisch symmetrische Schwingform, Anzahl der Knotendurchmesserlinien einer Schwingform) aufgetragen. Ein solches Kopplungsdiagramm ist für die Test-Blisk

Stufe 1 des Versuchsverdichters E3E/1 von Rolls-Royce im **BILD 1** dargestellt. Mit Hilfe der Auswertung der Verteilung der Verzerrungsenergie auf den Schaufel- und Scheibenteil des Sektors, lassen sich die errechneten Eigenfrequenzen im Kopplungsdiagramm in Modenfamilien einteilen. Dabei gibt es drei verschiedene Grundtypen, von denen jeweils ein Beispiel in **BILD 2** gezeigt wird. Als erste Gruppe sind die schaufeldominierten Modenfamilien (siehe BILD 2 (a)) zu nennen. Wichtigstes Kennzeichen für diese Familien ist die hohe Konzentration von Verzerrungsenergie in den Schaufeln. Ihr Anteil beträgt, gemessen an der Gesamtverzerrungsenergie, üblicherweise über 97%, kann in vielen Fällen auch höhere Werte annehmen. Die Eigenformen der Schaufeln einer solchen Modenfamilie sind für alle zyklisch symmetrischen Moden nahezu gleich und unterscheiden sich kaum von den Eigenformen des eingespannten Sektormodells. Werden die Eigenfrequenzen dieser Modenfamilien im Kopplungsdiagramm miteinander verbunden, so erscheinen nahezu horizontale Linien (siehe BILD 1). Des Weiteren gilt, je geringer die Standardabweichung der Frequenzen einer Modenfamilie, desto größer ist der Anteil der Verzerrungsenergie in den Schaufeln. Als zweite Gruppe sind die scheibendominierten Modenfamilien

(siehe BILD 2 (b)) zu nennen. Im Gegensatz zu den schaufeldominierten Modenfamilien liegt hier der Anteil der Verzerrungsenergie in den Schaufeln bei unter 10%, wobei auch Werte deutlich darunter auftreten. Werden die Eigenfrequenzen im Kopplungsdiagramm miteinander verbunden, zeigen sich diese Modenfamilien durch nahezu linear ansteigende Kurven (siehe BILD 1). Da die Eigenformen dieser Modenfamilien von der Scheibe dominiert sind, kommen sie bei Berechnungen des eingespannten Sektormodells nicht vor.

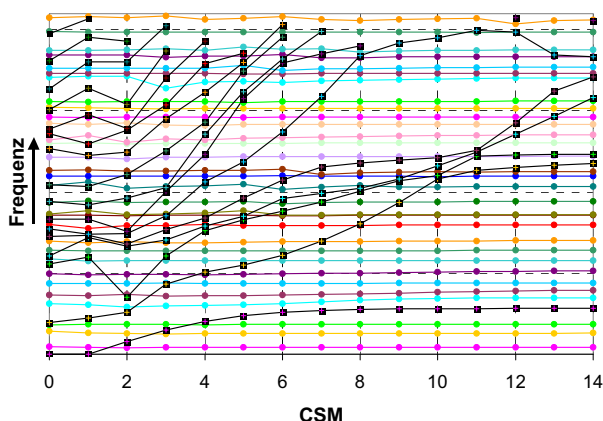


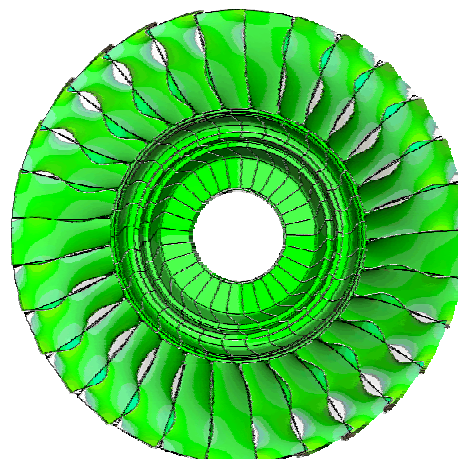
BILD 1. Kopplungsdiagramm E3E/1 Stufe1

Als Drittes treten die gemischten Modenfamilien (siehe BILD 2 (c)) auf. Hierbei teilt sich die Verzerrungsenergie im Mittel gleichmäßig zwischen dem Schaufel- und Scheibensegment auf. Wie bei den schaufeldominierten Modenfamilien sind die Eigenformen des CSM_{MAX} bei einer Berechnung der Schaufel unter eingespannten Randbedingungen wiederzufinden. Jedoch sind, wie bei den scheibendominierten Modenfamilien die Eigenformen nicht für alle zyklisch symmetrischen Moden konstant. Für die unteren CSMs ändern sich die Eigenfrequenzen und dazugehörige Eigenformen viel stärker als im Bereich höherer CSMs, bei denen Eigenfrequenzen und zugehörige Eigenformen nahezu konstant sind. Dieses Verhalten spiegelt sich im Kopplungsdiagramm durch tendenziell lineare Anstiege im Bereich der unteren CSMs und nahezu horizontale Verbindungen im Bereich höherer CSMs wider. Je geringer der Anstieg der Verbindungslinien der Eigenfrequenzen desto mehr Verzerrungsenergie befindet sich in den Schaufeln. Die Eigenformen der niedrigen CSMs sind eher scheibendominiert, wohingegen die Eigenformen der höheren CSMs schaufeldominiert sind.

Eine Zuordnung einzelner Eigenfrequenzen zur jeweiligen Modenfamilie bzw. Kategorie von Modenfamilien ist nicht immer eindeutig. Die wichtigsten Kriterien für die Zuordnung sind die Aufteilung der Verzerrungsenergie auf den Schaufel- bzw. Scheibenteil des Sektors, der Frequenzabstand zu den übrigen Eigenfrequenzen der jeweiligen Modenfamilie sowie der Vergleich der jeweiligen Eigenschwingungsformen.

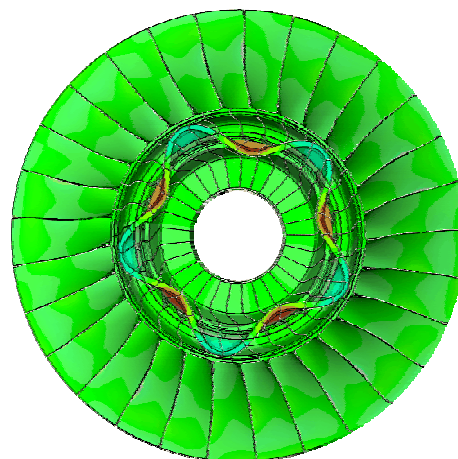
schaufeldominierte Eigenform;
98,6% der Verzerrungsenergie in den Schaufeln;
Blickrichtung stromauf

(a)



scheibendominierte Eigenform
4,1% der Verzerrungsenergie in den Schaufeln;
Blickrichtung stromauf

(b)



gemischte Eigenform;
44,6% der Verzerrungsenergie in den Schaufeln;
Blickrichtung stromab

(c)

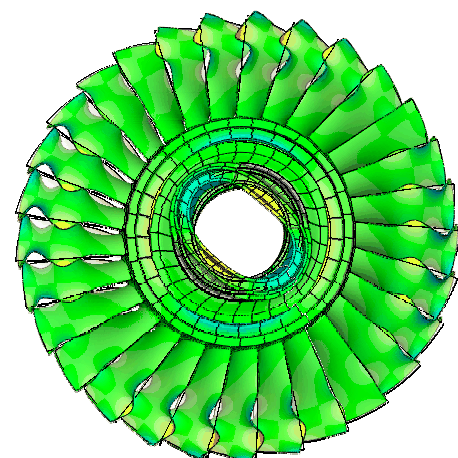


BILD 2. (a)-(c) Eigenformen verschiedener Grundtypen von Modenfamilien

1.2. Vergleich berechneter und gemessener Schwingformen

In diesem Abschnitt werden drei exemplarische Vergleiche von berechneten Eigenschwingungsformen des idealen, unverstimmten Systems, mit gemessenen Schwingformen der realen Blisk durchgeführt. Als Berechnungsgrundlage dient das zyklisch symmetrische Sektormodell der Versuchs-Blisk Stufe 1 des E3E/1 Versuchsverdichters. Für die Messung wird die reale Blisk auf Schaumstoff gelagert und mit Hilfe eines Shakers erregt. Die Antwortmessung wird mit einem Scanning Laser Vibrometer durchgeführt, wodurch nicht nur Schwingfrequenzen, sondern auch die dazugehörigen Schwingformen in axialer Richtung erfasst werden können. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in **BILD 3** dargestellt.

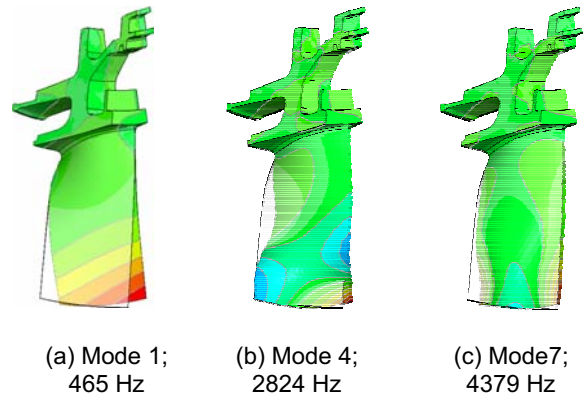


BILD 3. Versuchsaufbau

Die Ergebnisse der Berechnung und der Messungen werden in **BILD 4** gezeigt.

Dabei ist festzustellen, dass die berechneten und gemessenen Schwingformen rein qualitativ betrachtet eine gute Übereinstimmung zeigen. Die Frequenzabweichungen sind auf Geometrieabweichungen der realen Blisk vom Rechenmodell zurückzuführen, welche nicht auf den individuellen Schaufelverstimmungen beruhen.

Eigenformen der FEM-Berechnung (ideal CSM 14)



Schwingformen gemessen mit Scanning Laser Vibrometer

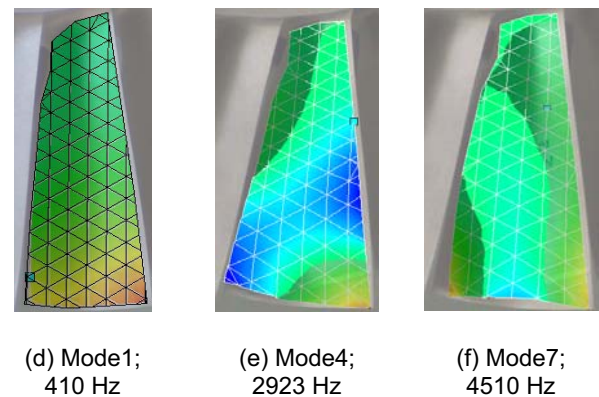


BILD 4. (a) - (f) Vergleich der Schwingformen Berechnung./Messung E3E/1 Stufe1

1.3. Identifikation der Verstimmungsverteilung

Um das Schwingungsverhalten verstimmter Blisks mit Hilfe eines FE-Vollmodells berechnen zu können, ist eine experimentelle Bestimmung der individuellen Schaufelverstimmung unverzichtbar. Es wird hierbei oft davon gesprochen, dass „Schaufeleigenfrequenzen“ („blade alone frequencies“) gemessen werden. Da aber immer das Messobjekt als Ganzes und nicht nur einzelne Schaufeln die Schwingungsantwort bilden, kann der Begriff der „Schaufeleigenfrequenz“ irreführend sein, da die jeweils gemessene Schaufel nicht vom Rest der Blisk isoliert ist. Aufgrund der geringen Schaufelmassen gerade für hintere Hochdruckverdichterrotoren (z. B. 3g für Rotor 6 des E3E/1 Versuchsverdichters) kommt für die Antwortmessung an den Schaufeln nur ein berührungsloses Messverfahren mit Hilfe eines Laser Vibrometers in Frage. Zur Erregung wird ein Miniaturimpulshammer verwendet. Um eine gute Reproduzierbarkeit des Erregerimpulses zu realisieren, wird der Miniaturimpulshammer in ein Gestell eingespannt, wodurch sichergestellt ist, dass die einzelnen Schaufeln jeweils an der gleichen Stelle mit etwa dem gleichen Impuls erregt werden. **BILD 5** zeigt den Messaufbau zur experimentellen Bestimmung der Verstimmungsverteilung.

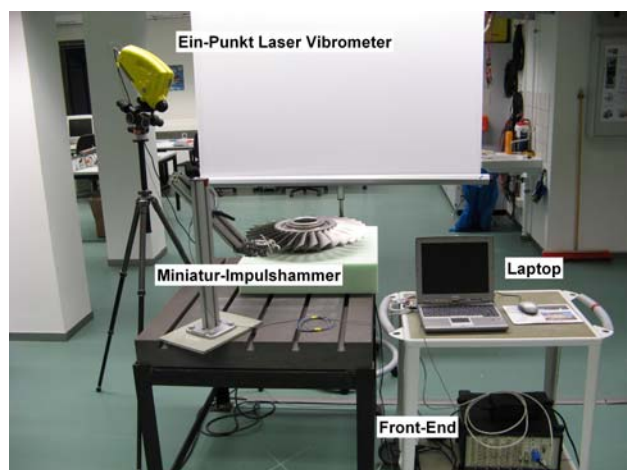


BILD 5. Versuchsaufbau [2] zur Messung der Verstimmungsverteilung

Die Messkette zur Bestimmung der individuellen Verstimmungsverteilung ist in **BILD 6** dargestellt.

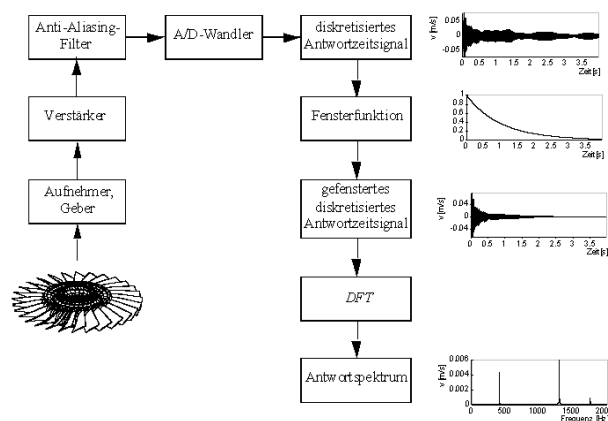


BILD 6. Messkette [2] zur Messung der Verstimmungsverteilung

Zur Erregung höherer Moden im Frequenzbereich bis zu 20 kHz muss die Schaufel möglichst nahe am Fuß erregt werden, da sie dort ein ausreichend steifes Verhalten zeigt. **BILD 7** zeigt dazu einen Vergleich verschiedener Erregerspektren, die mit dem Miniaturimpulshammer erzeugt werden. Dabei stellt die x-Achse die Frequenzen, die y-Achse den Abstand der Erregerposition zur Schaufelspitze und die z-Achse die Amplitude des Autospektrums dar. Als Messobjekt dient die Stufe 6 des E3E/1 Versuchsverdichters.

Um die Schaufeleigenfrequenzen eindeutig zu identifizieren wird ein am Lehrstuhl entwickeltes und patentiertes Verfahren (DE/03.04.07/DEA102007016369) verwendet. Hierbei werden alle Schaufeln, bis auf die aktuell zu messende Schaufel, durch das Anbringen von Zusatzmassen „verstimmt“, wie es in **BILD 8** zu sehen ist. Diese zusätzliche Massenverstimmung führt dazu, dass alle nicht gemessenen Schaufeln aus dem Verstimmungsbereich heraus geschoben werden, wodurch die zyklische Symmetrie gestört und das Mitschwingen dieser Schaufeln unterdrückt wird.

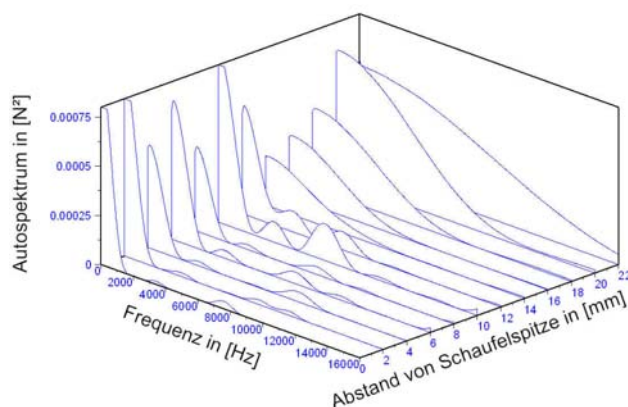


BILD 7. Wasserfalldiagramm von Erregerspektren verschiedener Erregerpositionen auf der Schaufel

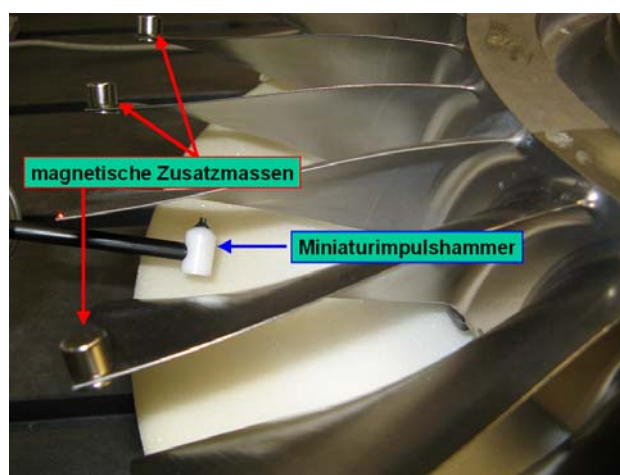


BILD 8. Massenverstimmung mit Magnetmassen

In der Übertragungsfunktion gibt es nun nicht mehr eine Vielzahl von Resonanzstellen, sondern nur noch eine Einzige (siehe **BILD 9**), was die Identifikation der Schaufeleigenfrequenz f_1 erleichtert. Ohne die zusätzliche Massenverstimmung erschweren störende Nebenpeaks diese Identifikation.

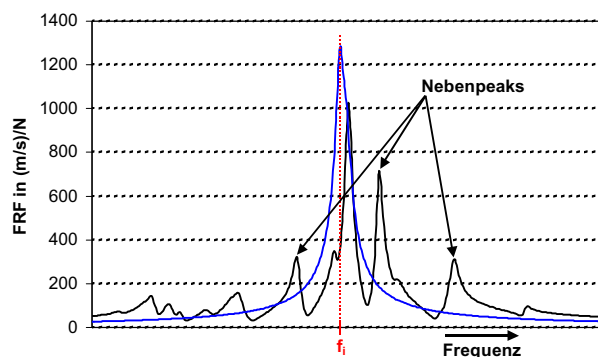
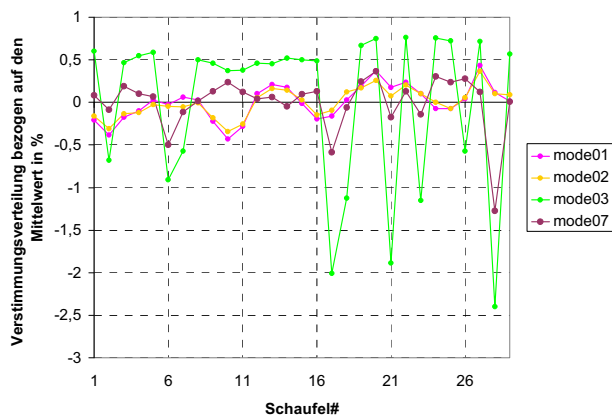
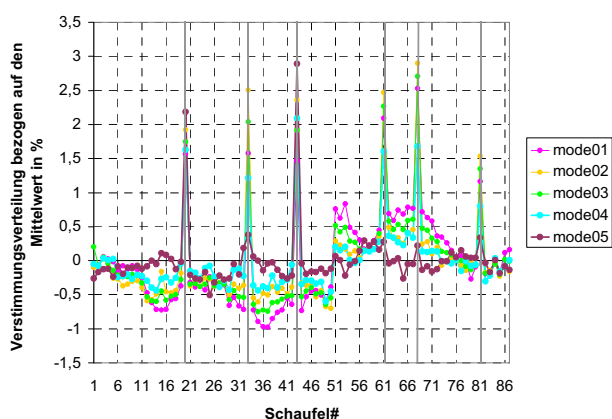


BILD 9. Übertragungsfunktionen E3E/1 Stufe6 ohne (schwarz) und mit (blau) Massenverstimmung

Mit Hilfe der Methodik der Massenverstimmung werden neben den ersten drei Moden des Rotors 1 und 6 für den Rotor 1 der Mode 7 (Tramline) sowie für den Rotor 6 die Moden 4 (2. Torsion) und 5 (Tramline) messtechnisch bestimmt. Die Ergebnisse sind in **BILD 10** dargestellt. Darin sind die, für jede Schaufel gemessenen, Resonanzfrequenzen bezogen auf deren Mittelwert dargestellt.



(a)



(b)

BILD 10. Verstimmungsverteilungen des Versuchsverdichters E3E/1 für Stufe 1 (a) und Stufe 6 (b)

Die grauen Linien im BILD 10 (b) dienen der Kenntlichmachung instrumentierter Schaufeln. Wie leicht zu erkennen ist, wirkt sich die Instrumentierung sehr stark auf das Schwingungsverhalten der Schaufeln aus. Der verwendete keramische Klebstoff, welcher in mehreren Schichten zur Isolation und zum Schutz des Messgitters aufgetragen wird, führt aufgrund der zusätzlichen Steifigkeit zu einer deutlichen Erhöhung der Schaufeleigenfrequenzen der instrumentierten Schaufeln [2]. Dieser Effekt ist nicht nur für die drei Grundmoden, sondern auch für die beiden gemessenen höheren Moden 4 und 5 in BILD 10 (b) erkennbar. Allein die Instrumentierung führt unter Anregung zu stark lokalisierten Schwingformen, was für untere Moden in [3] nachgewiesen wird.

1.4. Frequency veering

In früheren Arbeiten [4], [5] fällt dem sogenannten „Frequency veering“ in Hinsicht auf das Verhalten beschauelter Scheiben eine besondere Rolle zu. Diesbezüglich wird festgestellt, dass das Frequency veering die Sensibilität gegenüber der Verstimmung erhöht.

1.4.1. Definition: „Frequency veering“

Frequency veering ist definiert als das Konvergieren und daraufhin Abdrehen (veering apart) bzw. Divergieren von Eigenwerten eines Systems, wenn diese über einen bestimmten Systemparameter aufgetragen werden [4]. Im Fall der beschauelten Scheiben sind die Eigenwerte des Systems die Eigenfrequenzen und die Anzahl der zyklisch symmetrischen Moden entspricht dem Parameter über welchem die Eigenfrequenzen aufgetragen werden. Frequency veering Erscheinungen sind aufgrund der Darstellungsform im Kopplungsdiagramm leicht zu identifizieren.

1.4.2. Frequency veering bei E3E/1 Stufe 1

Im Kopplungsdiagramm der Stufe 1 des Versuchsverdichters E3E/1 sind im unteren Frequenzbereich Modenfamilien zu erkennen, bei denen sich Frequency veering zeigt. Für niedrige CSMs nähern sich die Eigenfrequenzen zweier Modenfamilien zunächst an, bevor sie dann für höhere CSMs wieder auseinanderlaufen. Im BILD 11 ist dieser Bereich vergrößert dargestellt.

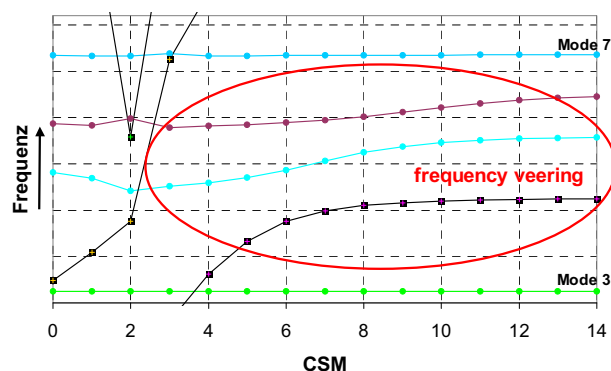


BILD 11. Kopplungsdiagramm für E3E/1 Stufe 1 im Frequency veering Bereich

1.4.3. Modenfülligkeit und Lokalisierungsfaktor

In einem Experiment soll im Folgenden untersucht werden, welche Effekte dieser Frequency veering Bereich auf die Modenfülligkeit und den Lokalisierungsgrad (LokalGrad) haben. Diese Kennzahlen sind als Beurteilungsgrößen zu betrachten, welche die Abweichung der Schwingform einer verstimten Blisk bezüglich der Schwingform einer unverstimten Blisk beschreiben [2].

Die Modenfülligkeit gibt dabei, unabhängig von der Schaufelanzahl, an wie viele harmonische Anteile in einer

Schwingform enthalten sind, wenn die Auslenkungen bzw. Momentanwerte einer umlaufenden Abwicklung der Blisk betrachtet werden. Im unverstimmten Fall weicht die Schwingform nicht von einer reinen Sinusform ab, wobei nur ein Fourierkoeffizient in der diskreten Fouriertransformation (DFT) der Abwicklung vorhanden ist. Die Modenfülligkeit nimmt in diesem Fall den Wert 0% an. Für verstimmte Systeme erreicht die Modenfülligkeit den maximalen Wert von 100%, falls alle Fourierkoeffizienten in der DFT der Abwicklung gleich stark vertreten sind.

Der Lokalisierungsgrad ist ein Maß für die Größe der Amplitudenabweichungen der Schaufeln untereinander bei einer bestimmten Schwingform und ebenfalls unabhängig von der Schaufelanzahl. Schwingen alle Schaufeln mit der gleichen Amplitude, so beträgt der Lokalisierungsgrad 0%. Schwingt hingegen lediglich eine Schaufel und alle anderen befinden sich in Ruhe, so wird der Lokalisierungsgrad mit 100% maximal, wobei die gesamte Schwingungsenergie in einer Schaufel konzentriert ist.

1.4.4. Experimentelle Anordnung der Frequency veering Untersuchung an E3E/1 Stufe1

In diesem messtechnischen Versuch werden die Kennzahlen Modenfülligkeit sowie Lokalisierungsgrad innerhalb und außerhalb des Frequency veering Bereiches der Stufe 1 des E3E/1 Versuchsverdichters untersucht und verglichen. Der Versuchsaufbau gleicht prinzipiell dem im BILD 2 dargestellten. Für dieses Experiment wird jedoch mit dem Scanning Laser Vibrometer nicht die axiale Antwort einer einzelnen Schaufel, sondern ringförmig die axialen Schwingungsantworten aller Schaufelspitzen nahe der Eintrittskanten gemessen. **BILD 12** zeigt die Messpunkte auf der Test-Blisk Stufe1 des E3E/1 Versuchsverdichters.



BILD 12. Messpunkte des Ringscans

Im **BILD 13** sind die über alle 29 Schaufeln gemittelten Übertragungsfunktionen (I-IV), sowie für die markierten Resonanzstellen die Momentanwertabwicklungen aller Schaufeln mit zugehöriger DFT, für verschiedene Frequenzbereiche, zu sehen. Die erste Übertragungsfunktion (I) repräsentiert den Frequenzbereich der ersten Torsion (Mode 3), die vierte Übertragungsfunktion (IV) liegt im Bereich des Tramline Modes (Mode 7). Beide Übertragungsfunktionen liegen außerhalb des Frequency veering Bereiches. Die zweite und dritte Übertragungsfunktion (II) und (III) repräsentieren

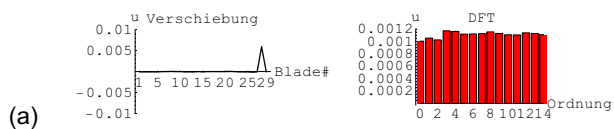
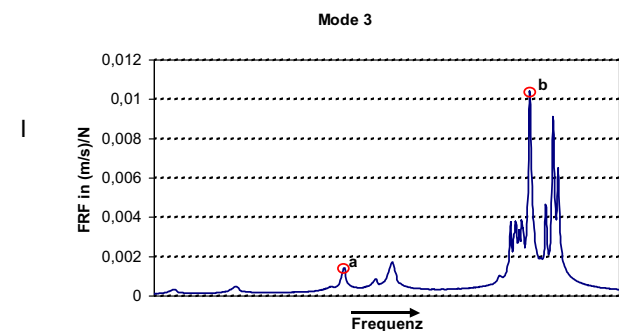
hingegen den Bereich des Frequency veering. Der Lokalisierungsgrad mit ca. 10% und die Modenfülligkeit mit ca. 6% nehmen innerhalb des Frequency veering Bereiches relativ kleine Werte an. Dagegen liegen die Werte außerhalb des Frequency veering Bereiches mit ca. 60% Lokalisierungsgrad und ca. 50% Modenfülligkeit deutlich höher.

Die Tendenz niedriger Werte für Modenfülligkeit und Lokalisierungsgrad im Frequency veering Bereich und hoher Werte außerhalb des Frequency veering Bereiches zeigt sich auch in anderen, an dieser Stelle nicht ausgewerteten, Resonanzstellen. Die Messungen verdeutlichen daher für die Stufe 1 des E3E/1 Versuchsverdichters, dass die Kennwerte Modenfülligkeit und Lokalisierungsfaktor nicht auf eine größere Sensibilität gegenüber dem Mistuning im Frequency veering Bereich hinweisen und somit für eine Bewertung des Mistuningeinflusses im Frequency veering Bereich möglicherweise ungeeignet sind. Weitere experimentelle Untersuchungen zu diesem Thema werden folgen.

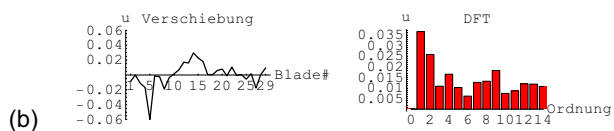
2. ERZEUGUNG UND MESSUNG VON UMLAUFWELLEN

2.1. Frühere Arbeiten

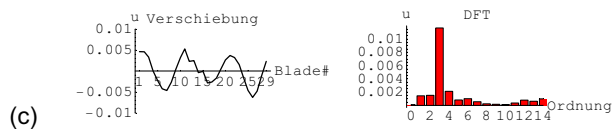
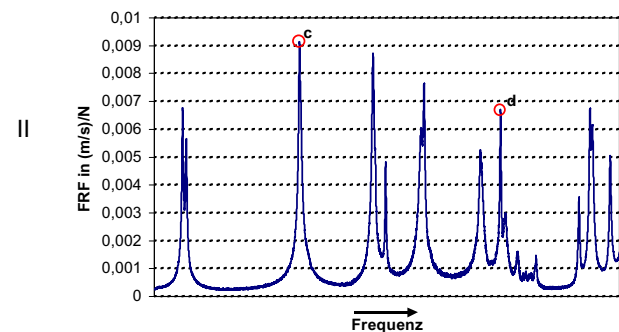
Seit der jüngeren Vergangenheit gibt es zum Thema der Erzeugung und Messung von Umlauf- bzw. Wanderwellen in beschauelten Scheiben mehrere Veröffentlichungen, wobei meist ruhende Testobjekte untersucht werden [6]-[8]. Analysen am drehenden Testobjekt werden von [9] unter großem experimentellen Aufwand in einer Vakuumkammer durchgeführt. Erregt wird meist berührungslos mit Hilfe von magnetischen oder akustischen Aktuatoren. Aber auch eine berührende Erregung mit Hilfe von Piezoaktuatoren, welche auf den unteren Teil der Schaufeln aufgeklebt werden, führt zur Erregung von Wanderwellen [8]. Zur Erfassung der Antwortsignale werden ausschließlich berührungslose, optische [6], [7], [9] oder elektromagnetische [8] Verfahren verwendet.



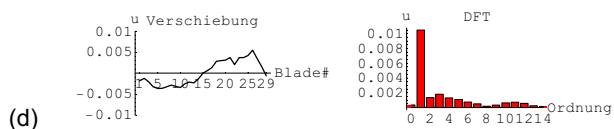
LokalGrad: 99,9% Modenfülligkeit: 94,9%



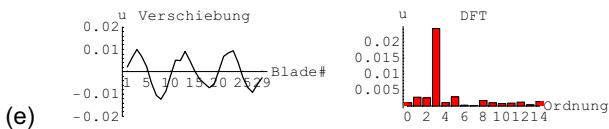
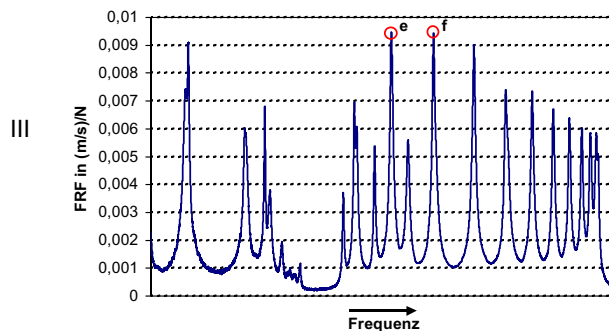
LokalGrad: 58,9% Modenfülligkeit: 32,0%



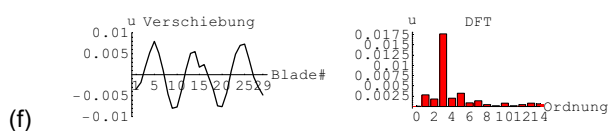
LokalGrad: 13,4% Modenfülligkeit: 6,7%



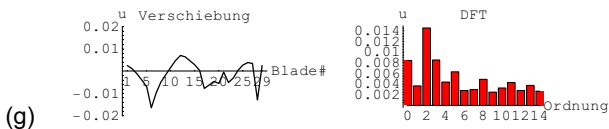
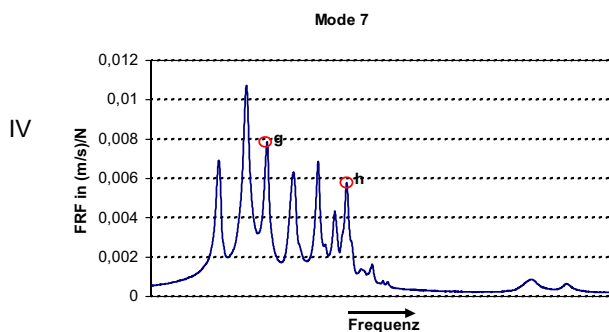
LokalGrad: 12,0% Modenfülligkeit: 6,8%



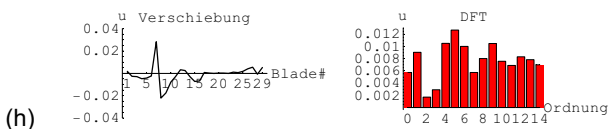
LokalGrad: 5,0% Modenfülligkeit: 4,2%



LokalGrad: 10,1% Modenfülligkeit: 5,3%



LokalGrad: 34,7% Modenfülligkeit: 30,1%



LokalGrad: 51,1% Modenfülligkeit: 57,2%

BILD 13. Übertragungsfunktionen I-IV und zugehörige Abwicklungen mit DFT a-h

2.2. Theoretischen Vorbetrachtung

Die folgenden Betrachtungen basieren im Wesentlichen auf [11].

Für das Modell eines vereinfachten, symmetrischen Rotors, bei dem die Schaufeln mit jeweils einem Freiheitsgrad als Starrkörper gleicher Masse und gleicher Koppelsteifigkeiten abgebildet werden gilt die Bewegungsdifferentialgleichung:

$$(1) \quad \ddot{M}\ddot{\vec{x}} + D\ddot{\vec{x}} + K\vec{x} = \vec{0},$$

wobei M die Massenmatrix (Diagonalmatrix), D die Dämpfungsmatrix (zyklisch-symmetrisch) und K die Steifigkeitsmatrix (zyklisch-symmetrisch) ist.

Mit dem Ansatz:

$$(2) \quad \vec{x}(t) = \vec{\Phi}_k \cdot e^{\lambda t}$$

ergeben sich die Eigenwerte des Systems zu:

$$(3) \quad \lambda_{i+} = -\delta_i + j\omega_{Di}$$

$$(4) \quad \lambda_{i-} = -\delta_i - j\omega_{Di}$$

mit $i = 0 \dots (n-1)$, wobei n der Schaufelanzahl des Rotors entspricht. Im Folgenden werden nur Eigenwerte mit positivem Imaginärteil betrachtet und es gilt $\lambda_{i+} = \lambda_i$.

Aufgrund der identischen Schaufeln bzw. Sektoren des Rotors treten alle Eigenwerte doppelt auf. Lediglich λ_0 und, im Falle einer geraden Schaufelanzahl, $\lambda_{n/2}$ treten einfach auf.

Die komplexen Eigenvektoren $\vec{\Phi}_k$ und $\vec{\Phi}_{n-k}$ der doppelt vorkommenden Eigenwerte λ_i führen zu gegeneinander verschobenen, orthogonalen Eigenformen, welche schematisch in **BILD 14** für den Fall $k=1$ dargestellt sind. k beschreibt die Anzahl der Knotendurchmesserlinien und wird auch als Erregerordnung (kurz *EO*) bezeichnet.

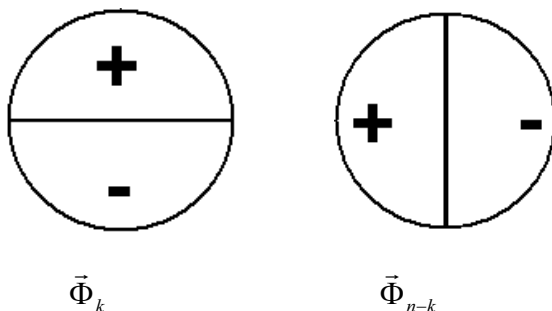


BILD 14. Stehende Eigenformen gleicher Eigenwerte
Eine Linearkombination der Eigenvektoren in der Art:

$$(5) \quad \vec{\Psi}_k = \vec{\Phi}_k + j\vec{\Phi}_{n-k} \quad \text{sowie:}$$

$$(6) \quad \vec{\Psi}_{n-k} = \vec{\Phi}_k - j\vec{\Phi}_{n-k}$$

führt zu komplexen Eigenformen, die im ruhenden System

umlaufen. Eine schematische Darstellung zeigt **BILD 15**.

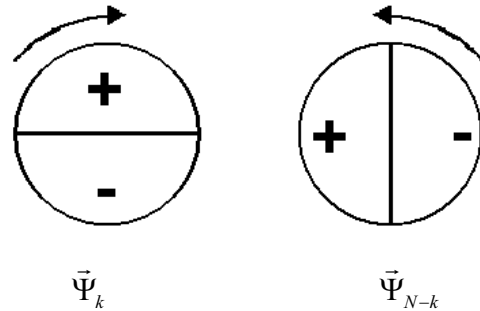


BILD 15. Drehende Eigenformen aus Linearkombination

Aufgabe des Versuchs ist es, diese drehenden Eigenformen mit Hilfe von Shakern an mehreren Positionen anzuregen. Dabei muss die räumliche und zeitliche Verteilung der Erregerkraft zur drehenden Eigenform passen, damit diese erregt werden kann.

2.3. Beschreibung des Versuchsaufbaus

Im Versuch sollen mit einem möglichst geringen experimentellen und finanziellen Aufwand die Erzeugung und die Messung von Wanderwellen nachgewiesen werden. Dazu wird im Gegensatz zu früheren Arbeiten kein Versuchsobjekt mit einfacher Geometrie, sondern eine reale Blisk verwendet werden, deren Bauart im Bereich des Hochdruckverdichters in heutigen Flugzeugtriebwerken üblich ist. Die zu untersuchende Blisk soll dabei ruhend gelagert sein. Eine denkbare Konfiguration, in der sich das Versuchsobjekt wie im Triebwerksbetrieb dreht, ist schon allein wegen der üblichen Drehzahlen, welche im Bereich des Hochdruckverdichters bei ca. 15.000 min⁻¹ [10] liegen und zahlreicher anderer Probleme [9] nicht mit vertretbarem Aufwand bereitzustellen. Die ruhende Lagerung des Versuchsobjektes setzt allerdings eine präzise phasenversetzte Anregung voraus, um Wanderwellen einer bestimmten Erregerordnung zu erzeugen. So wird die im Triebwerk örtlich konstante Anregung einer rotierenden Scheibe durch eine „rotierende“ Anregung einer ruhenden Scheibe imitiert.

Die Erregerkraft F_i der i -ten Schaufel ergibt sich dabei zu:

$$(7) \quad F_i = A \cdot \cos\left(\Omega t + 2\pi \cdot i \frac{EO}{n}\right),$$

wobei A die Amplitude der harmonischen Erregersignale, Ω die Erregerkreisfrequenz, EO die Erregerordnung und n die Schaufelanzahl der verwendeten Blisk ist. Wird der zweite Term der Winkelfunktion in Gleichung (7) durch Ω dividiert ergibt sich der Zeitversatz Δt_i zweier Signale an benachbarten Schaufeln zu:

$$(8) \quad \Delta t_i = \frac{1}{f_{er}} \cdot EO \cdot \frac{i}{n},$$

wobei f_{er} die Erregerfrequenz ist und

$$(9) f_{er} = \frac{\Omega}{2\pi}$$

gilt. Da aufgrund des experimentellen und finanziellen Aufwandes nicht an jeder Schaufel erregt werden kann, muss der Zeitversatz Δt_i mit dem Faktor $N + 1$, wobei N die Anzahl der Schaufeln ist, an denen zwischen zwei Erregerstellen nicht erregt wird, multipliziert werden, um den tatsächlich im Experiment verwendeten Zeitversatz $\Delta t_{i(N+1)}$ zwischen zwei benachbarten Erregerstellen zu erhalten.

Die phasengesteuerten Signale werden mit Hilfe eines Rechners erzeugt, der maximal 16 „Output“-Kanäle zur Verfügung stellt. Zur Erregung werden Shaker verwendet, welche über geklebte Koppelstellen mit der Blik verbunden werden. Eine elektromagnetische Erregung kann für die realen Verdichterlaufräder nicht angewendet werden, da der verwendete Werkstoff Titan keine ferromagnetischen Eigenschaften besitzt. Die Antwortmessung wird mit Hilfe eines Scanning Laser Vibrometers erfolgen, mit dem es im getriggerten Betrieb möglich ist, drehende Schwingformen zu messen und zu visualisieren. Die Antwortmessung auf den Schaufeln mit Hilfe von üblichen Beschleunigungssensoren ist nicht möglich, da hierdurch das zu messende System zu stark beeinflusst werden würde.

Erste Voruntersuchungen zeigen eine erwartete Frequenzaufteilung (frequency splitting), der im unverstimmten Modell gleichen doppelten Eigenwerte, des realen verstimmten Systems. Eine zu starke Aufteilung der Eigenfrequenzen kann die Erzeugung der Wanderwelle schwierig gestalten.

3. 3D-GEOMETRIEVERMESSUNG

3.1. Ziel der Vermessung

Denkbare Ursachen für das unterschiedliche strukturdynamische Verhalten der Schaufeln einer Blik sind zum einen Materialinhomogenitäten und zum anderen Geometrieabweichungen aufgrund von Fertigungstoleranzen und Verschleiß. In der Literatur wird das Mistuning meist auf Geometrieabweichungen zurückgeführt. Daher ist eines der Ziele für die 3D-Geometrievermessung der messtechnische Nachweis, dass das Mistuning durch Dickenabweichungen der Schaufeln untereinander maßgeblich hervorgerufen wird. Um diesen Nachweis zu führen soll eine reale Verdichterlaufscheibe digitalisiert und mit Hilfe der digitalisierten Daten das FE-Modell mittels Mesh-Morphing an die reale Geometrie angepasst werden. Zeigt sich dann im angepassten Rechenmodell das gleiche Schwingungsverhalten wie bei der realen Geometrie, so ist der Nachweis erbracht, dass Geometrieabweichungen maßgeblich das Mistuning hervorrufen.

3.2. Mögliche Messverfahren

Für die Vermessung kommen zum einen berührende, taktile und zum anderen berührungslose, optische

Verfahren in Frage. Bei den optischen Verfahren gibt es die Möglichkeit laserbasiert oder streifenoptisch zu messen. Die Entscheidung, welches Verfahren die besten Ergebnisse erzielt, hängt im Wesentlichen von der Messaufgabe selbst ab. Selbst wenn die Entscheidung für ein Messprinzip gefallen ist, gibt es eine Vielzahl von weiteren Parametern, die sich auf die Güte des Mess- und Auswertungsergebnis auswirken [12].

Die Besonderheiten dieser Messaufgabe liegen zu einen in der Blik-Geometrie an sich und zum anderen in der großen Anzahl von FE-Knotenpunkten, an denen der SOLL-IST-Vergleich durchgeführt werden soll. Aufgrund dieser großen Anzahl ist eine taktile Vermessung nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar. Eine laserbasierte Messmethode wäre für diese Punktzahl ebenfalls sehr aufwändig und hätte den zusätzlichen Nachteil einer höheren Messungenauigkeit, als bei streifenoptischen Verfahren. Aus diesen Gründen wird die Vermessung streifenoptisch basierend auf einem Weißlichtstreifenprojektionsverfahren durchgeführt.

3.3. Durchführung der Messung für Test-Blik Stufe 1 des E3E/1 Hochdruckverdichters

Zunächst wird die Geometrie mit Hilfe eines streifenoptischen Messsystems digitalisiert. Dies erfolgt mit einem 400mm Messfeld, welches in **BILD 16** schematisch dargestellt ist. Jede Perspektive enthält dabei ca. 800.000 Messpunkte.



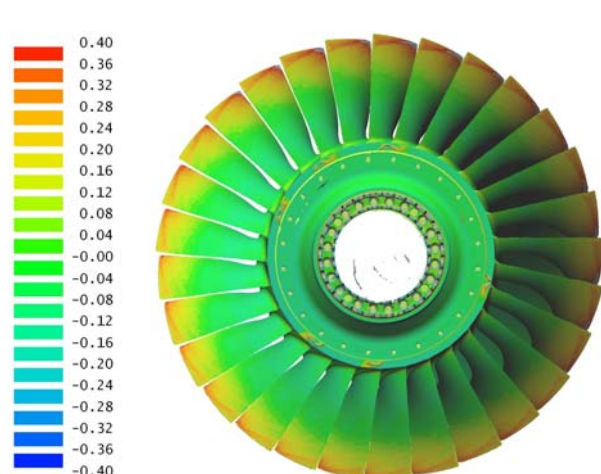
BILD 16. Messfeld der Digitalisierung

Um die gesamte Geometrie abschattungsfrei zu digitalisieren, werden von jeder Schaufel zwölf Perspektiven aufgenommen. Mit den Aufnahmen der Scheibe werden so insgesamt ca. 400 einzelne Aufnahmen gemacht. Die digitalen Daten, nehmen ca. 2,8 GByte Speicherplatz in Anspruch und werden an die ideale CAD-Geometrie angepasst bzw. gefittet. Der gefittete Datensatz hat eine Größe von ca. 65 MByte.

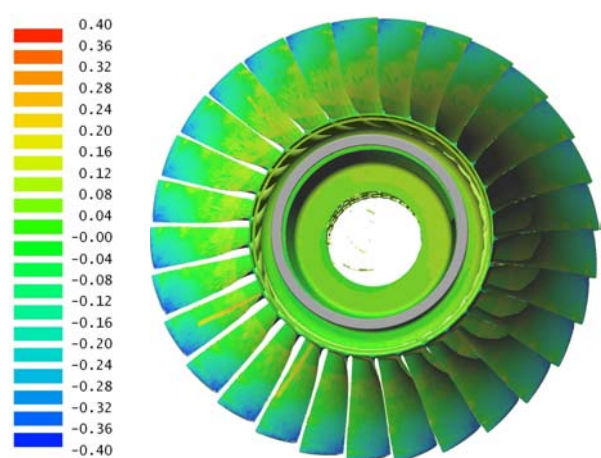
3.4. SOLL-IST-Vergleich der Stufen 1 und 6 in Form von Falschfarbenbildern

Mit Hilfe des gefitteten Datensatzes wird ein SOLL-IST-Vergleich für die Stufen 1 und 6, zunächst mittels Falschfarbenbildern (**BILD 17**) dargestellt. Die Abweichungen der gemessenen IST-Geometrie von der idealen, getunten SOLL-Geometrie werden dabei in

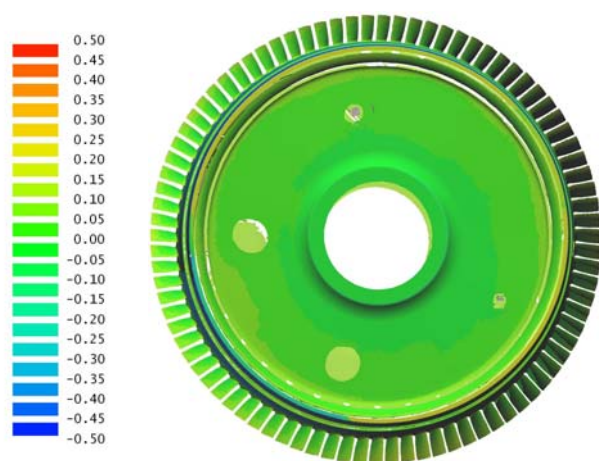
Millimetern angegeben.



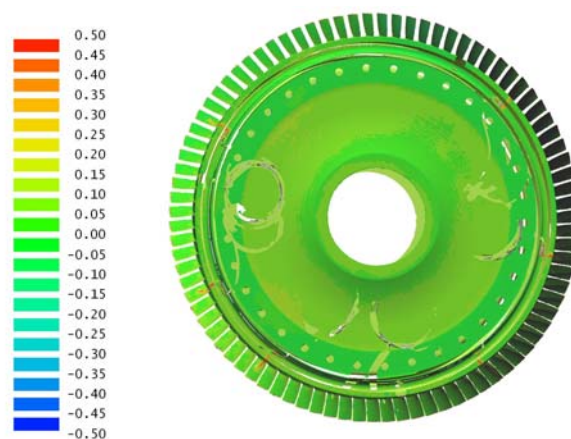
(a)



(b)



(c)



(d)

BILD 17. Soll-Ist-Vergleich in Form von Falschfarbenbildern des E3E/1 Versuchsverdichters; Stufe 1 stromab (a) und stromauf (b) sowie Stufe 6 stromab (c) und stromauf (d)

3.5. Vorläufiges Ergebnis der 3D-Geometrieermessung

Mit den Geometrieermessungen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist reale Blisks abschattungsfrei zu digitalisieren. Des Weiteren sind Größe und Ort der Abweichungen der IST-Geometrie von der SOLL-Geometrie deutlich geworden. Da vor allem die spezielle Auswertung der Messdaten keine alltägliche Aufgabe für eine 3D-Geometrieermessung darstellt, ist mit der Digitalisierung und der bisherigen Auswertung ein erheblicher Erfahrungsgewinn verbunden, der die Ergebnisse und Genauigkeiten zukünftiger Messungen und Auswertungen positiv beeinflussen wird. Eine Auswertung der Messdaten für eine FE-Knoten Anpassung ist bisher nicht erfolgt. Als problematisch stellen sich die große Punktzahl und die Messungenauigkeiten im Kantenbereich der Schaufeln dar. Eine Aufbereitung der Messdaten wird demnächst erfolgen.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Auf der Grundlage numerischer Berechnungen, sowie zahlreicher Schwingungsmessungen ist mit dieser Arbeit ein Beitrag für ein tieferes Verständnis für die Schwingungen von Hochdruckverdichterlaufrädern in Integralbauweise geschaffen worden. Konkret konnte im Rahmen eines Vergleichs berechneter und gemessener Schwingformen eine gute Übereinstimmung auch für höhere Moden nachgewiesen werden. Die Verstimmungsverteilungen einer Auswahl höherer Moden der Stufen 1 und 6 konnten mit Hilfe einer zusätzlichen Massenverstimmung messtechnisch ermittelt werden. Besonderheiten, welche sich erst im Bereich höherer Moden zeigen, wie das Frequency veering werden experimentell untersucht. Hierbei zeigte sich dass die Kennwerte Modenfälligkeit und Lokalisierungsgrad nicht geeignet sind, um im Frequency veering Bereich die Sensibilität gegenüber dem Mistuning einzuschätzen. Die Erzeugung und Messung der Wanderwellen steht am Anfang der experimentellen Untersuchungen, erste Ergebnisse werden innerhalb der nächsten Monate

erwartet. Im Rahmen der 3D-Geometrievermessung werden Erkenntnisse gewonnen, die für eine weitere Auswertung der Messdaten zum Anpassen des FE-Knotennetzes an die IST-Geometrie und für weitere Messungen dieser Art sehr wertvoll sind.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Rolls-Royce Deutschland für die fachliche und finanzielle Unterstützung der in dieser Veröffentlichung dargestellten Untersuchungen. Die Untersuchungen sind Teil des Forschungsvorhabens VIT II (Virtual Turbo machinery II), welches durch das Land Brandenburg gefördert wird.

LITERATUR

- [1] Whitehead, D. S., "Effect of Mistuning on the Vibration of Turbomachine Blades Induced by Wakes", Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.: 8, Issue: 1, pp: 15-21; 1966.
- [2] Klauke, T., „Schaufelschwingungen realer integraler Verdichterräder im Hinblick auf Verstimmung und Lokalisierung“; Der Andere Verlag 2007, Cottbus.
- [3] Kühhorn A., Beirow B., Parchem R., Klauke T.; „Schaufelschwingungen realer Verdichter-Integralräder (Blisk)“; DGLR-Tagung, Jahrbuch 2006
- [4] Kenyon, J. A., Griffin, J. H.; "Frequency Veering Effects on Mistuned Bladed Disk Forced Response"; Journal of Propulsion and Power, Vol.: 20, No.: 5, September-October 2004, pp. 863-870.
- [5] Castanier, Matthew P.; "Modelling and Analyses of Mistuned Bladed Disk Vibration: Status and Emerging Directions"; Journal of Propulsion and Power; Vol. 22, No 2, March-April 2006, pp. 384-396.
- [6] Judge, John A., Ceccio, Steven L.; Pierre, Christophe; "Traveling-Wave Excitation and Optical Measurement Techniques for Non-contacting Investigation of Bladed Disk Dynamics"; The Shock and Vibration Digest; Vol. 35 No. 3, May 2003, pp. 183-190.
- [7] Jones, Keith, W., Cross, Charles J.; "Traveling Wave Excitation System for Bladed Disk"; Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 1, January-February 2003, pp. 135-141.
- [8] Judge, J., Pierre, C., Mehmed, O.; "Experimental Investigation of Mode Localization and Forced Response Amplitude Magnification for a Mistuned Bladed Disk"; Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, Vol.: 123, Issue: 4, pp. 940-950, Oct. 2001.
- [9] Sever, Ibrahim Ata: „Experimental Validation of Turbomachinery Blade Vibration Predictions“, PhD-Thesis; Department of Mechanical Engineering Imperial College London, March 2004.
- [10] Bräunling, Willy J. G.; „Flugzeugtriebwerke - Grundlagen, Aero-Thermodynamik, Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten und Emissionen“; 2. Auflage; Springer Verlag; Hamburg April 2004; ISBN 3-540-40589-5.
- [11] Belz, Joachim; „Aeroelastik von Triebwerksbeschaufelungen“; unveröffentlichtes Vorlesungsskript für Graduiertenschule; DLR – Institut für Aeroelastik, Göttingen 2008.
- [12] Padelt, Steffen, „Punktgenau-3D-Digitalisierungsverfahren für die Produktentwicklung“; Digital Engineering Magazin, Ausgabe 7 September/Okttober 2007.