

# SCHAUFELSCHWINGUNGEN BEI REALEN VERDICHTER-INTEGRALRÄDERN (BLISK)

A. Kühhorn<sup>1</sup>, B. Beirow<sup>1</sup>, R. Parchem<sup>2</sup>, T. Klauke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BTU Cottbus, Lehrstuhl für Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen  
Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus

<sup>2</sup>Rolls-Royce Deutschland, Eschenweg 11, 15827 Blankenfelde-Mahlow

## 1. EINLEITUNG

Verbunden mit der Forderung nach immer umweltfreundlicheren, leistungsfähigeren und hinsichtlich ihres Treibstoffverbrauchs optimierten Flugtriebwerken nimmt die so genannte Integralbauweise von Verdichterlaufrädern einen immer größeren Stellenwert ein. Da die Fertigung dieser Strukturen aus einem Stück erfolgt, kann auf aufwendige und gewichtsintensive Schaufelfußkonstruktionen verzichtet werden. Dadurch sind strömungsgünstigere Schaufelgeometrien bei geringerem Gewicht gegenüber der konventionellen Bauweise möglich. Allerdings weist diese so genannte Blisk (**B**lisk **I**ntegrated **d**isk) – Bauweise hinsichtlich ihres strukturellen Verhaltens eine Reihe von Besonderheiten auf, die unter anderem auch durch die fertigungsbedingte Störung der Rotationssymmetrie hervorgerufen werden.

Basierend auf umfangreichen experimentellen Schwingungsuntersuchungen an realen Hochdruckverdichter-Blisks der Programme TP 400 und E3E und zugehörigen detaillierten numerischen FE-Simulationen werden zunächst die grundlegenden Schaufelschwingungsphänomene erläutert. Hierbei werden FE-Modelle verwendet, welche auf der Basis messtechnisch ermittelter „Mistuningverteilungen“ angepasst wurden („Model updating“) und auf deren Grundlage sich erregerordnungsabhängige Antworten berechnen lassen. In diesem Zusammenhang auftretende, mistuningbedingte Lokalisierungen der Schwingungsformen werden auch in Abhängigkeit der Größenverhältnisse von Schaufel zu Scheibe beschrieben. Des Weiteren findet der Einfluss applizierter Dehnungsmessstreifen hierbei Berücksichtigung. Mit dem Lokalisierungsgrad wird schließlich eine Kennzahl definiert, die eine quantitative Bewertung des Lokalisierungsphänomens gestattet. Abschließend gelingt es mittels Laserscanning-Untersuchungen Lokalisierungsphänomene zu visualisieren und somit am realen System nachzuweisen. Bemerkungen zum Umströmungseinfluss runden den Beitrag ab.



BILD 1. Vordere HPC-Bliskstufen

## 2. GRUNDSÄTZLICHES ZUM SCHWINGUNGS-VERHALTEN VON BLISKS

Das Schwingungsverhalten von Blisks weist eine Reihe von Besonderheiten auf, die hinsichtlich deren Lebensdauer von zentraler Bedeutung sind. Im Vordergrund stehen dabei ausgeprägte Kopplungen von Scheiben- und Schaufelbewegung sowie fertigungsbedingte Schaufelverformungen [1], welche letztlich zu kritischen Lokalisierungsphänomenen führen können.

### 2.1. Kopplungsphänomen

Bei der exemplarischen Betrachtung einer zunächst unverstimmten Testblisk mit 29 Schaufeln (BILD 1) sei zunächst eine Charakterisierung typischer Schwingungsformen vorgenommen. Obwohl diese letztlich immer eine gekoppelte - und sich im Idealfall eines perfekten Designs zyklisch rotationssymmetrisch darstellende - Bewegung von Scheibe und Schaufel beschreiben, ist es zunächst sinnvoll, eine prinzipielle Klassifizierung gemäß der genannten Substrukturen vorzunehmen. BILD 2 zeigt diesbezüglich eine mögliche Zuordnung über die anteilige Verzerrungsenergie.

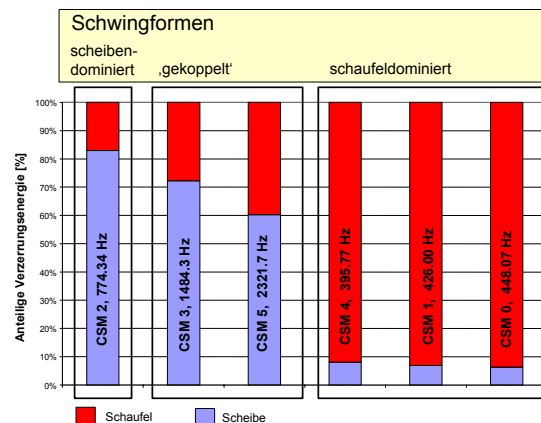


BILD 2: Einteilung von Schwingformen mittels anteiliger Verzerrungsenergie

Im Falle von scheibendominierten Schwingungsformen, welche durch eine Konzentration der Verzerrungsenergie in der Scheibe charakterisiert sind (BILDER 2 und 3), verhalten sich die Schaufeln annähernd als Starrkörper mit geringem Verzerrungsniveau. Die aerodynamische Erregung einer derartigen Schwingungsform stellt sich somit bzgl. der Lebensdauer der Schaufeln prinzipiell als unkri-

tisch dar, obwohl sich in diesem Fall große Schwingungsamplituden einstellen können. Letztgenannter Punkt kann bei amplitudenbasierten Modenidentifikationsverfahren [1], [2] im Rahmen von Dehnmessstreifenkalibrierungen für Rig-Tests Zuordnungsprobleme mit sich bringen. Die Einteilung der Schwingformen erfolgt gemäß ihrer Anzahl an Knotendurchmesserlinien (hier 2) und ggf. an Knotenkreisen (hier 0). Die maximale Anzahl möglicher Knotendurchmesserlinien richtet sich generell nach der Schaufelanzahl N. Bei geradem N beträgt sie N/2, bei ungerader Schaufelanzahl (N-1)/2.

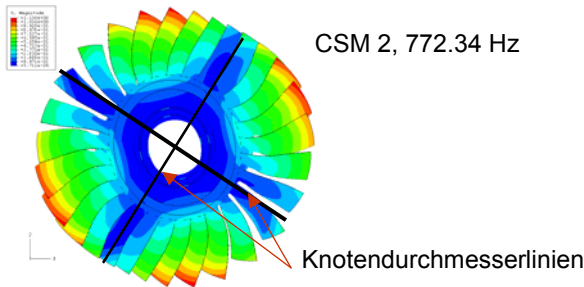


BILD 3. Scheibendominierte Schwingungsform (CSM 2)

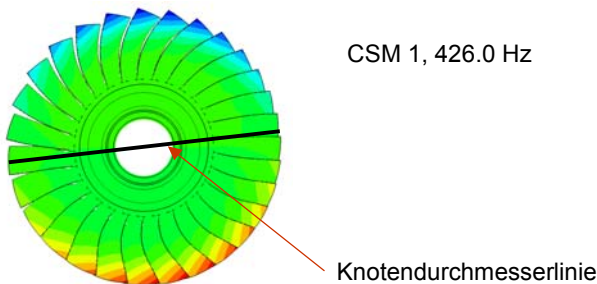


BILD 4. Schaufeldominierte Schwingungsform, CSM 1

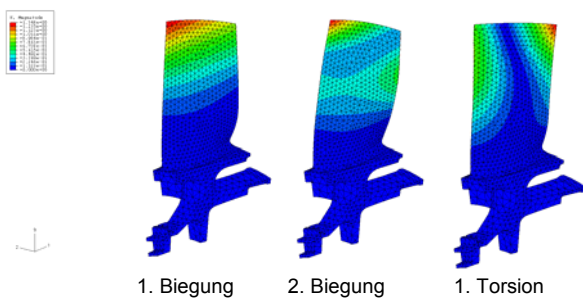


BILD 5. Schaufelgrundschwingungsformen

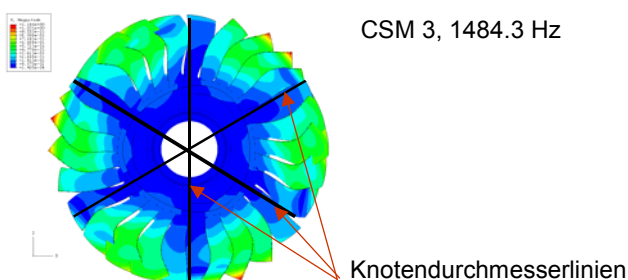


BILD 6. 'Gekoppelte' Schwingungsform, CSM 3

Schaufeldominierte Schwingformen verhalten sich entsprechend (BILDER 2 und 4), allerdings konzentriert sich die Gesamtverzerrungsenergie nunmehr auf die Schaufeln. Die Einteilung der Schaufelschwingungsformen (BILD 5) orientiert sich dabei an Moden des einseitig eingespannten Balkens. Fälle einer sich annähernden Verzerrungsenergieverteilung, wie in BILD 6 gezeigt, lassen sich dem Begriff 'gekoppelte' Schwingungsformen zuordnen.

Eine allgemein übliche Darstellungsform möglicher Schwingungsformen wird mit einem so genannten Kopplungsdiagramm (BILD 7) bereitgestellt. Hierin sind Bereiche schaufeldominierter Schwingungsformen markiert. Es wird deutlich, dass sich die in den markierten Bändern angesiedelten Frequenzen mit wachsender Knotendurchmesserlinienanzahl asymptotisch jeweils einem Grenzwert annähern, welcher der tatsächlichen 'Blade Alone'-Frequenz, d. h. der zugehörigen Schaufeleigenfrequenz bei vollkommen starrer Scheibe, nahe kommt. Außerhalb dieser Bänder nimmt der Scheibeneinfluss mit wachsendem Abstand zu.

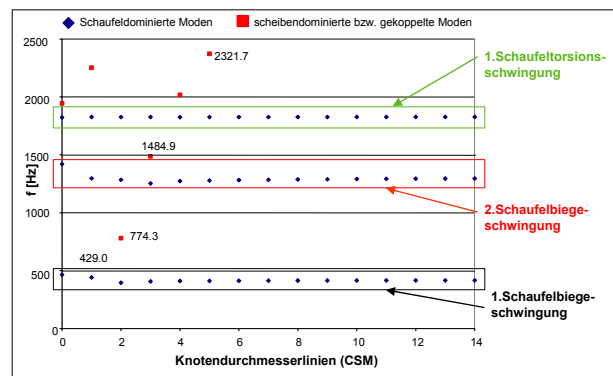


BILD 7. Kopplungsdiagramm

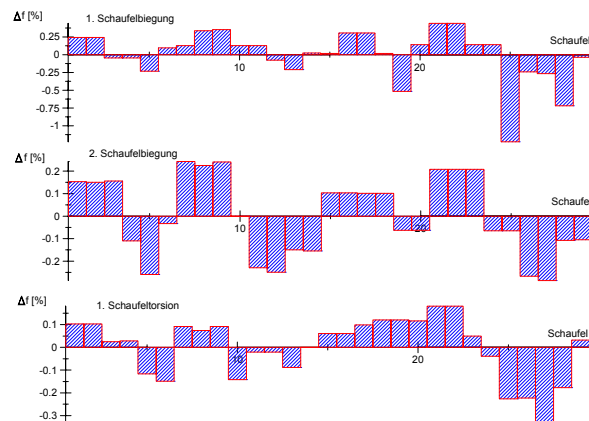


BILD 8. Typische Mistuningverteilung:  $\Delta f_k = \frac{f_k - \bar{f}_k}{\bar{f}_k}$

## 2.2. Schaufelverstimmung

Infolge unvermeidbarer Fertigungseinflüsse (Mistuning) erhalten die Schaufeln von Blisks jeweils verschiedene 'Blade-Alone'-Frequenzen und somit ein individuell unterschiedliches Schwingungsverhalten, man spricht in diesem Zusammenhang von Schaufelverstimmung. BILD 8 enthält

für die Schaufelgrundschwingformen entsprechend mess-technisch ermittelte, auf ihren jeweiligen Mittelwert bezo-gene, Mistuningverteilungen der Testblisk mit 29 Schau-feln. Infolge unterschiedlicher Schaufeleigenfrequenzen geht zunächst die zyklische Rotationssymmetrie verloren. Hieraus wiederum resultiert einerseits die Aufspaltung ursprünglich doppelter Eigenwerte. Andererseits erhalten vorab gerade Knotendurchmesserlinien einen krummlinigen Verlauf erhalten.

Die BILDER 9 und 10 zeigen Schwingungsformen ver-stimmter Laufräder, welchen jeweils dieselbe Mistuning-verteilung zu Grunde liegt. In BILD 9 sind dabei Moden dargestellt, die sich auf den ersten Blick von jenen der unverstimmten Blisk nicht unterscheiden und Schwin-gungsformen mit einer Knotendurchmesserlinie (1. Ord-nung) zugeordnet werden können. Eine Fourieranalyse der abgewickelten Schwingformen ausgewählter Punkte an den Schaufelspitzen verdeutlicht jedoch an Hand der auftretenden Nebenbänder, dass sich die Moden im wesentlichen aus der nullten, der dominierenden ersten und der zweiten Ordnung zusammensetzen. Die Schwingfor-men erhalten daher die Bezeichnung ‚modified cyclic sym-metry mode‘ 1 (MCSM 1). Im unverstimmten Fall wäre nur die erste Ordnung (CSM 1) enthalten. Des weiteren tritt eine Aufspaltung zugehöriger Eigenfrequenzen zu Tage.

In BILD 10 wird die Auswirkung der Verstimmung noch deutlicher: Obwohl die Eigenfrequenzen beider Schwin-gungsformen annähernd identisch sind, ist eine sich an zyklischer Rotationssymmetrie orientierende Einordnung kaum mehr möglich. Dies verdeutlichen auch die entspre-chenden Fourieranalysen, welche nunmehr von einer erheblich breiteren Verteilung anteiliger Ordnungen ge-prägt sind. In der Praxis können Moden vorkommen, wel-che Anteile aller möglicher Ordnungen enthalten. Diese sind häufig dadurch charakterisiert, dass die Schwingbe-wegung auf wenige oder gar nur eine Schaufel konzent-riert ist. Man spricht in diesem Fall von lokalisierten Schwingformen.

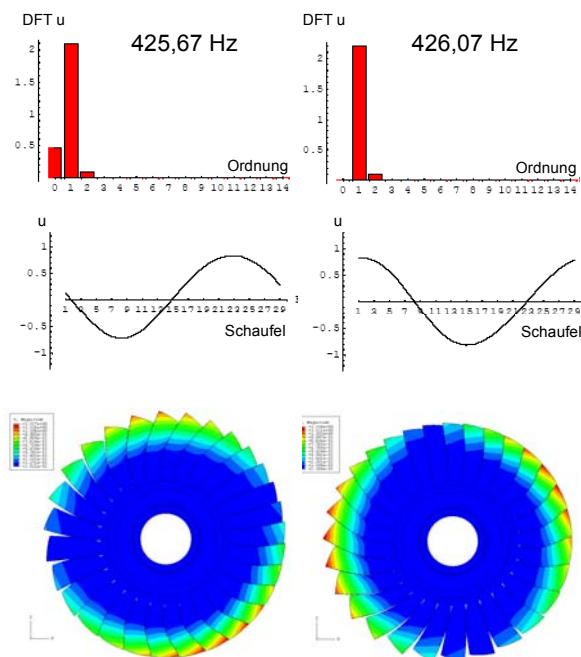


BILD 9: Schwingformen einer verstimmten Blisk, MCSM 1

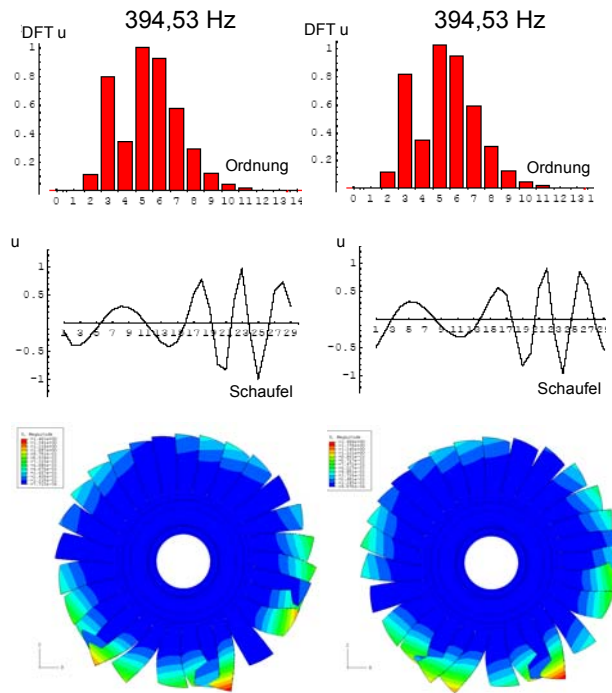


BILD 10: Schwingformen einer verstimmten Blisk

### 3. LOKALISIERUNGSPHÄNOMEN

Wird eine lokalisierte Schwingungsform im Betrieb ange-facht, ergeben sich gegenüber einem perfekten, unver-stimmten Design Überhöhungen der maximalen Schwin-gungsamplitude, welche den Faktor 2 übersteigen können [1], [3]. In [4] konnte im Rahmen einer optimierten Suche nach dem schlimmst möglichen Mistuningmuster bei ei-nem Turbinenlaufrad gar ein Überhöhungsfaktor von mehr als 5 nachgewiesen werden. Besonders kritisch ist die Tatsache, dass in diesem Fall das Verzerrungsniveau einzelner, von der Lokalisierung betroffener Schaufeln besonders groß wird und sich somit negativ auf die Le-bensdauer auswirkt.

Zur Quantifizierung von Lokalisierungen ist es sinnvoll, mit dem Lokalisierungsgrad eine Kennzahl zu definieren, mit der sich Lokalisierungsphänomene effektiv beurteilen lassen. Ausgangspunkt für die Ableitung einer derartigen Kennzahl seien zunächst Modeabwicklungen für unver-stimmte Systeme (BILD 11).

#### Axiale Verschiebungen

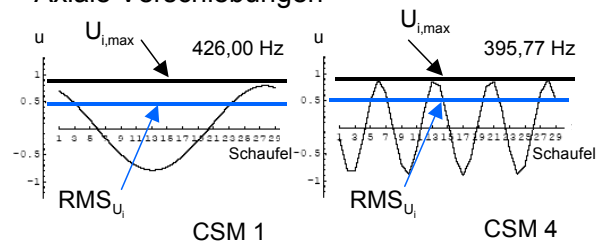


BILD 11: Modeabwicklungen CSM 1 und 4 (unverstimmt)

Die in BILD 11 enthaltenen Modeabwicklungen der axialen Verschiebungen an den Schaufelspitzen entsprechen jeweils einer ungestörten Sinuswelle. Der quadratische Mittelwert des Verlaufs bei N Schaufeln berechnet sich allgemein gemäß

$$(1) \text{RMS}_{u_{i,\text{tuned}}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{i,j}^2}$$

und speziell unter Berücksichtigung des Maximalwertes bei einer rein sinusförmigen Abwicklung

$$(2) \text{RMS}_{u_{i,\text{tuned}}} = \frac{u_{i,\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

Für das Verhältnis zwischen maximaler Schaufelauslenkung und quadratischem Mittelwert ergibt sich somit

$$(3) \zeta_{u_{\text{tuned}}} = \frac{u_{i,\text{max}}}{\text{RMS}_{u_{i,\text{tuned}}}} = \sqrt{2}$$

für  $\text{CSM } 1 \leq \text{CSM } i \leq \text{CSM}_{\text{max}}$

Für den Sonderfall eines so genannten ‚Umbrella-modes‘, d. h. einer Schwingungsform ohne Knotendurchmesserlinien erhält man

$$(4) \zeta_{u_{\text{tuned}}} = \frac{u_{i,\text{max}}}{\text{RMS}_{u_{i,\text{tuned}}}} = 1 \text{ für } \text{CSM}_i = \text{CSM } 0$$

Bei der Betrachtung von Abwicklungen verstimmter Moden (BILD 12) wird deutlich, dass es zu erheblichen Abweichungen von rein sinusförmigen Verläufen kommt. Im Extremfall sind Schwingungsformen denkbar, die durch die Auslenkung einer einzigen Schaufel charakterisiert sind, während alle anderen Schaufeln in Ruhe verbleiben. Für den quadratischen Mittelwert einer derartig vollständig lokalisierten Schwingungsform (normiert) ergibt sich ein Minimalwert:

$$(5) \text{RMS}_{u_{\text{mistuned,min}}} = \sqrt{\frac{1}{N} u_{i,\text{max}}^2} = \sqrt{\frac{1}{N}} u_{i,\text{max}}$$

Somit lässt sich für das Verhältnis zwischen betragsmäßiger maximaler Schaufelauslenkung und quadratischem Mittelwert ein oberer Grenzwert angeben gemäß:

$$(6) \zeta_{u_{\text{mistuned,max}}} = \frac{u_{i,\text{max}}}{\text{RMS}_{u_{\text{mistuned,min}}}} = \sqrt{N}$$

Dieser Grenzwert hängt somit ausschließlich von der Schaufelanzahl N ab.

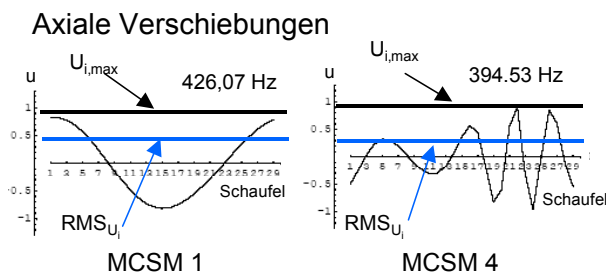


BILD 12: Modeabwicklungen MCSM 1 und 4 (verstimmt)

Mit den in (3) bzw. (4) und (6) definierten Grenzwerten stehen nunmehr Eckwerte fest, mit denen sich in Abhängigkeit von Verhältnis  $\zeta$  über eine Geradengleichung ein Lokalisierungsgrad definieren lässt. Es ergibt sich:

$$(7) \text{LokaGra} = \frac{100}{\sqrt{N} - \sqrt{2}} (\zeta - \sqrt{2}) \quad [\%]$$

für  $\text{CSM } 1 \leq \text{CSM } i \leq \text{CSM}_{\text{max}}$

bzw.

$$(8) \text{LokaGra} = \frac{100}{\sqrt{N} - 1} (\zeta - 1) \quad [\%] \text{ für } \text{CSM } 0,$$

mit

$$(9) \zeta = \frac{u_{i,\text{max}}}{\text{RMS}_{u_i}}$$

Aus den Definitionen (7) und (8) ergibt sich, dass unverstimmte Systeme einem Lokalisierungsgrad von Null entsprechen. Für die in BILD 12 dargestellten Modeabwicklungen, welchen eine fiktive sinusförmige Mistuningverteilung einer Standardabweichung von 1,44 % zu Grunde liegt, ergeben sich Lokalisierungsgrade von 0,35 % (MCSM 1) und 23,14 % (MCSM 4).

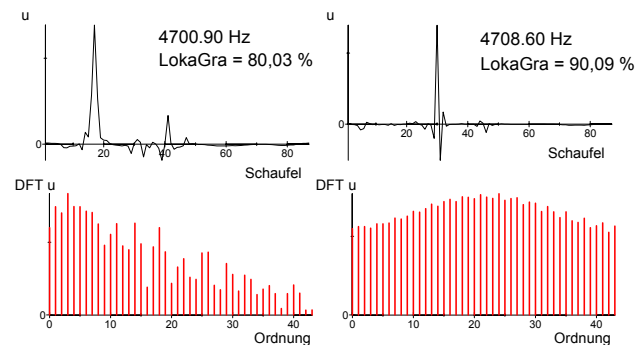


BILD 13: Modeabwicklungen einer verstimzten Testblisk mit 87 Schaufeln (FEM-Berechnung)

BILD 13 zeigt stark lokalisierte Modeabwicklungen einer im Vergleich zum vorherigen Fall weiter stromabwärts platzierten Verdichterstufe mit 87 Schaufeln. Der Darstellung liegt eine FEM-Berechnung an einem Modell zu Grunde, welches auf der Basis einer messtechnisch ermittelten Mistuningverteilung abgeglichen wurde [1]. Zwei wesentliche Aspekte begünstigen hier die hohen Lokalisierungsgrade von über 80 bzw. 90%: Zum einen führen die Schaufeln in beiden Fällen Torsionsbewegungen aus, d. h. eine Schwingform, die von vorne herein mit den axialen Scheibenbewegungen wenig koppelt. Zum anderen gestaltet sich das Massenverhältnis zwischen Scheibe und Schaufel extremer im Vergleich zu vorderen Stufen, wodurch die Kopplungsproblematik ebenfalls weniger stark in Erscheinung tritt.

#### 4. BEMERKUNGEN ZU ERZWUNGENEN SCHWINGUNGSANTWORTEN

Wie sich Mistuning letztlich auf die maximal zu erwartenden Schaufelamplituden auswirkt, lässt sich erst auf der Grundlage von erzwungenen Schwingungsantworten klä-

ren. Zu diesem Zweck seien nachfolgend im Sinne einer statistischen Betrachtung exemplarisch für eine Testblisk Berechnungen der maximalen Schaufelüberhöhungen infolge Mistunings im Vergleich zu einem perfekten Design dargestellt (BILD 14). Die Vorgabe der insgesamt 500 Mistuningverteilungen basiert auf einer Latin-Hypercube-Verteilung zugeordneter Standardabweichungen vom jeweiligen Mittelwert. Dargestellt ist die Situation für die Schaufelgrundbiegung bei einer Anregung gemäß der 8. Erregerordnung. Der Fall eines perfekten Designs ohne jegliche Verformung entspricht einer Standardabweichung von Null und einem Verhältnis der Amplituden  $U_{\max, \text{mistuned}}/U_{\max, \text{tuned}}$  von 100%.

Weiterhin im Diagramm enthalten ist eine Berechnung, die auf der Grundlage der messtechnisch ermittelten Mistuningverteilung realisiert wurde. Aus der Lage der Messsituation wird folgendes deutlich: Würde die Blisk mit einer geringeren Verformung gefertigt, hieße dies, dass auch die Standardabweichung verringert würde. BILD 14 verdeutlicht jedoch, dass sich hieraus nicht unbedingt ein Vorteil ergeben würde, im Gegenteil, es bestünde die Gefahr, dass die Messsituation in den Bereich maximaler Verschiebungsüberhöhungen geschoben wird. Erst eine Fertigung nahe des perfekten Designs würde eine Amplitudenverringerung garantieren, allerdings dürfte ein derartiges Vorhaben aus Kostengründen kaum praxisrelevant sein.

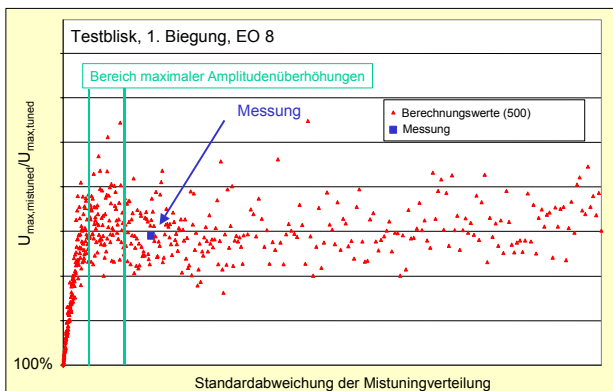


BILD 14: Maximale Überhöhung axialer Verschiebungen infolge Mistunings bei Anregung mit Engine Order 8

## 5. EINFLUSS VON DEHNUNGSMESSSTREIFEN

Die Erprobungsphase von Hochdruckverdichtern ist durch eine Reihe von Rig-Tests gekennzeichnet. Zur Überwachung des Testbetriebs wird eine Instrumentierung von Dehnungsmessstreifen (DMS) vorgenommen, welche überwiegend auf Schaufeln platziert werden. Zulässige Grenzwerte der DMS-Signale werden vorab im Rahmen einer DMS-Kalibrierung [2] festgelegt. BILD 15 zeigt eine typische DMS-Instrumentierung einer hinteren Hochdruckverdichter-Blisk. Schon eine vergleichende Betrachtung der Abmaße von Schaufel und DMS lässt vermuten, dass die DMS ihrerseits das Schwingungsverhalten der Schaufel beeinflussen werden.

Die Gegenüberstellung messtechnisch ermittelter 'Blade-Alone' - Frequenzverteilungen vor und nach der DMS-Applizierung (BILD 16) belegt, dass die DMS zu einer punktuellen zusätzlichen Verformung führen können.

Diese äußert sich unabhängig von der jeweils applizierten Schaufel und schwingungsformübergreifend in einer Frequenzerhöhung, der offensichtlich eine Versteifung durch die DMS zu Grunde liegt. Die Versteifung steht dabei mit dem verwendeten Keramikklebematerial in Zusammenhang, welches infolge seiner Temperaturbeständigkeit an die Stelle üblicher Folienklebung tritt.



BILD 15: DMS-Instrumentierung einer Testblisk

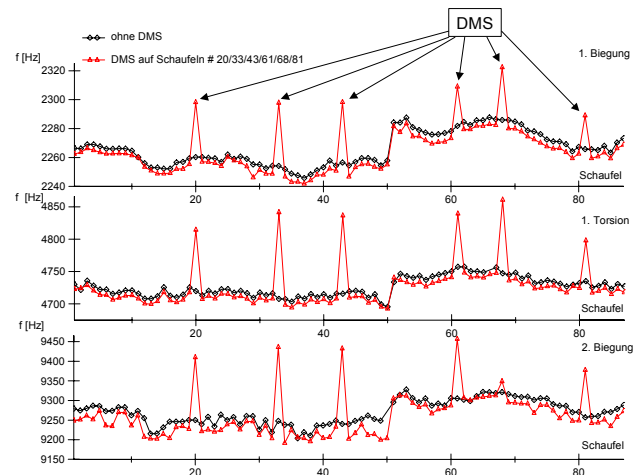


BILD 16: DMS-Einfluss auf die Verteilung von 'Blade-Alone'-Frequenzen

Messtechnische Untersuchungen an Blisks unterschiedlicher Geometrie und Schaufelanzahl belegen weiterhin, dass die DMS-Applizierung die maximale Abweichung der Frequenzverformung vom Mittelwert um annähernd den Faktor 6 nach oben verschieben kann (BILD 17). Des weiteren resultiert aus der DMS-Applizierung ein merklicher Anstieg der Dämpfung.

Die offensichtliche Abhängigkeit der DMS-induzierten Verformung von der Geometrie lässt sich in einfacher Weise mit Hilfe einer normierten Schaufellänge beschreiben (BILD 18). Dabei wird der wachsende Einfluss der DMS für immer kürzer werdende Schaufeln hinterer Stufen

für alle Schaufelgrundschwingformen deutlich. Es ist zu erwarten, dass hieraus auch zusätzliche Lokalisierungsphänomene resultieren. Erst für das Laufrad mit der größten Schaufelausdehnung (normierte Schaufellänge = 1) kann zumindest für die 1. Schaufelbiegung und -torsion keine zusätzliche Frequenzverschiebung mehr nachgewiesen werden.

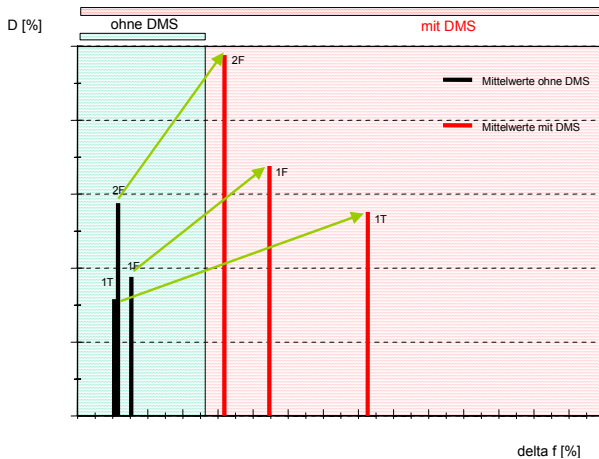


BILD 17: Einfluss der DMS auf Mistuning und Dämpfung (6 verschiedene Testblisks unterschiedlicher Geometrie berücksichtigt)

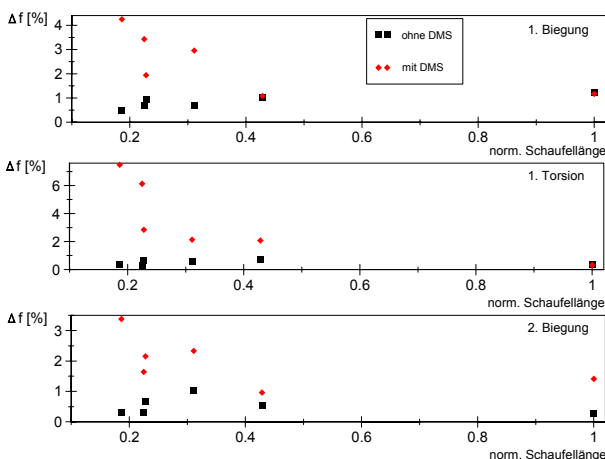


BILD 18: Maximales Mistuning bei Testblisks unterschiedlicher Geometrie in Abhängigkeit von der DMS - Applizierung

Als Konsequenz der versteifenden Wirkung der verwendeten DMS sollte die Auswahl der zu applizierenden Schaufeln in der Art erfolgen, dass insbesondere jene Schaufeln mit einem niedrigen Frequenzniveau berücksichtigt werden. Auf diese Weise könnte dem Umstand entgegengetreten werden, dass Schaufeleigenfrequenzen nach der Applizierung aus dem ursprünglichen Mistuningband herausgeschoben werden. Dies brächte die Gefahr mit sich, dass mögliche Resonanzen anderer Schaufeln bei Hochläufen unter Umständen nicht mehr erkannt werden könnten.

## 6. LASERSCANNING STEHENDER BLISKS

Für die Visualisierung von Schwingungsformen an realen Blisks wird mit dem Laserscanningverfahren eine Methodik

bereit gestellt, mit der es gelingt, das Auftreten vorab diskutierter Lokalisierungsphänomene am realen System nachzuweisen. Zu diesem Zweck wird die vorab vorgestellte Blisk mit 29 Schaufeln auf Schaumstoff gelagert und mit einer Shakerankopplung versehen (BILD 19). Das Laserscannen unter Gleitsinuserregung erfolgt flächig und wird infolge von Abschattungseffekten auf 26 Schaufeln begrenzt. Die Blisk ist bereits mit DMS appliziert, deren Anbindung wahlweise über den temperaturbeständigen Keramikkleber (K-DMS) oder klassisch über Folien (F-DMS) erfolgt. Die Folienanbindung ist bei dieser vorderen Stufe auf Grund der hier vergleichsweise geringen Temperaturen im Bereich von ca. 100°C im Betrieb noch möglich. In Abschnitt 4 wurde bereits angemerkt, dass bei dieser Blisk für die Schaufelgrundbiegung und -torsion keine Frequenzverschiebung aus der DMS-Applizierung resultiert, wohl aber für die zweite Biegung (BILD 18). Da die Berechnung der Schwingformen über ein Phasentrennungsverfahren erfolgt, wird zusätzlich ein Referenzbeschleunigungssensor im Bereich des Shakerankopplungspunktes appliziert.

BILD 20 fasst eine Auswahl gekoppelter Schwingungsformen zusammen, die jenen eines perfekten Designs sehr nahe kommen und eine entsprechende Zuordnung nach allerdings gekrümmten („modifizierten“) Knotendurchmesserlinien gestatten. Dass die untersuchte Blisk ein verstimmt System darstellt, bei dem die zyklische Rotationsymmetrie verloren geht, reflektiert sich deutlicher über die Aufspaltung der zugeordneten Eigenfrequenzen (MCSM 2-5).

Des weiteren gelingt es, eine Reihe durch Lokalisierungsphänomene geprägte Schwingformen der Bereiche 1. und 2. Schaufelbiegung zu visualisieren (BILD 21). Eine genauere Betrachtung verrät darüber hinaus, dass deren überwiegender Teil offensichtlich durch die DMS-Applizierung hervorgerufen bzw. zumindest begünstigt wird. Dies gilt insbesondere für die mittels Keramikkleber befestigten DMS auf den Schaufeln 3, 9 und 12, welche formal einen höheren Steifigkeitsbeitrag verglichen mit den Folien-DMS leisten. Es sei in diesem Zusammenhang nochmals angemerkt, dass infolge der DMS-Applizierung keine merkliche Frequenzverstimmung festgestellt werden konnte und dennoch Lokalisierung auftritt. Eine Ausnahme stellt der Mode bei 401,7 Hz dar, bei dem die nicht instrumentierten Schaufeln 21 bis 24 von Lokalisierung geprägt sind. Eine genauere Betrachtung verdeutlicht jedoch, dass es sich hierbei um einen Mischmode handelt, der sich aus der Lokalisierung und einer Einknotendurchmesser-schwingungsform zusammensetzt.

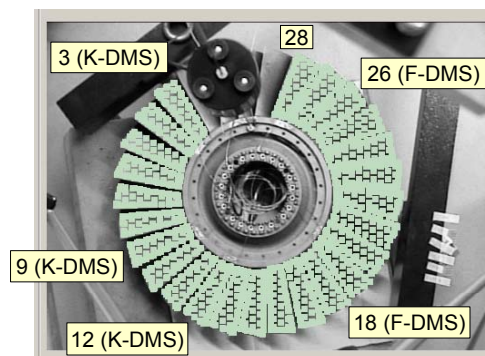


BILD 19: Shakerankopplung und Verteilung der 1585 Scanpunkte

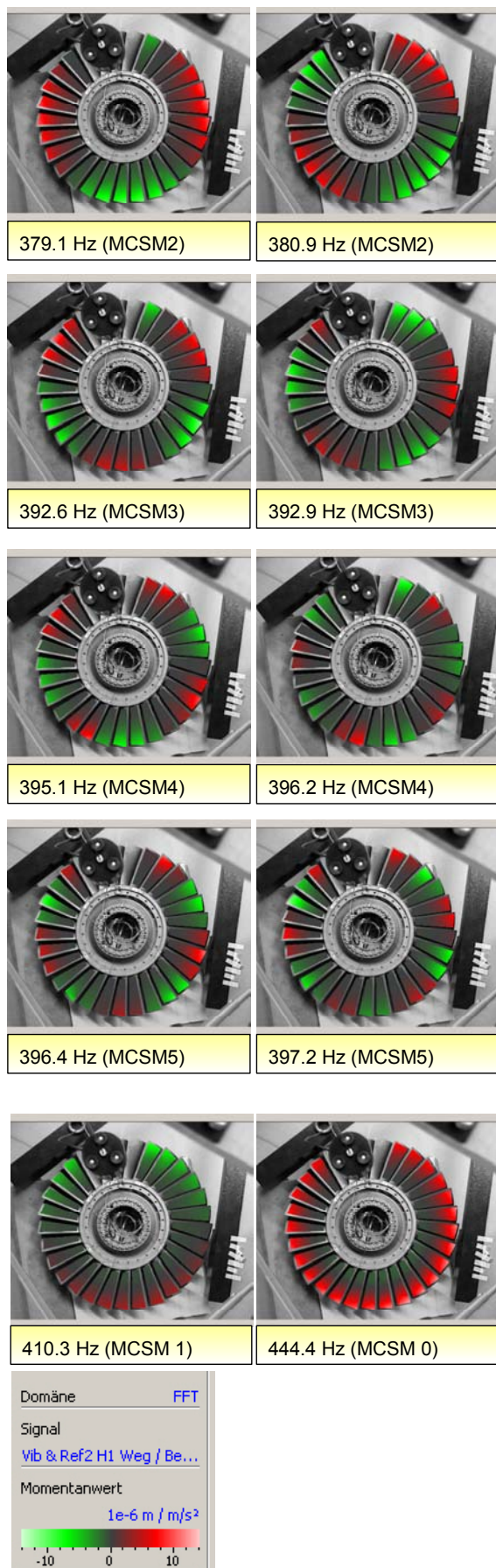


BILD 20: Schwingformen MCSM x (Bereich 1. Biegung)

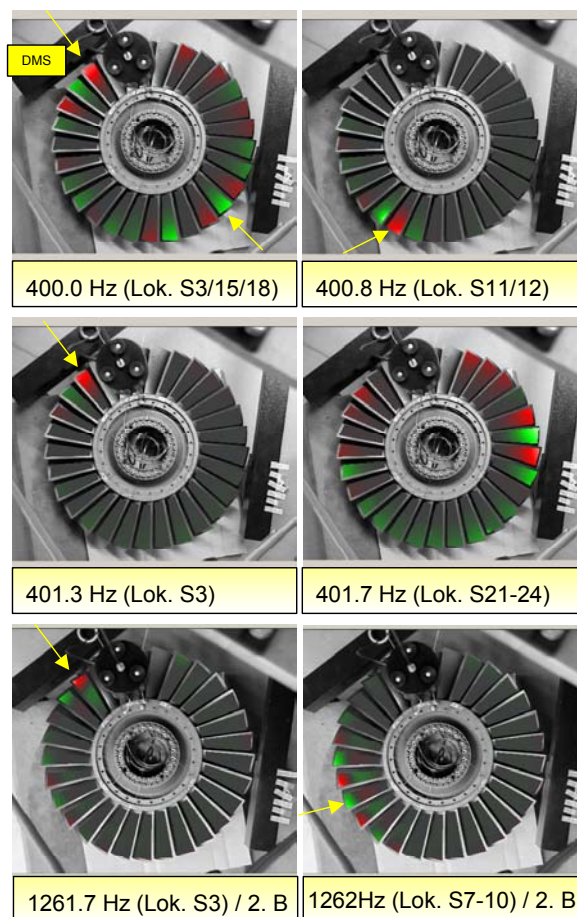


BILD 21: Lokalisierte Schwingformen der Bereiche 1. und 2. Biegung / Auswahl

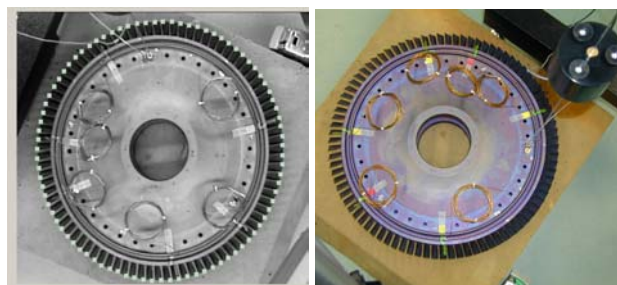


BILD 22: Ringförmige Anordnung von 87 Scanpunkten und Shakeranbindung

Für weitere Laserscanninguntersuchungen sei nochmals die bereits im Abschnitt 4 vorgestellte und weiter stromabwärts platzierte Testblik mit 87 Schaufeln aufgegriffen, die bezüglich des Masseverhältnisses von Scheibe und Schaufeln das entgegengesetzte Extremum darstellt. In diesem Fall erfolgt der Scanvorgang nicht flächig, sondern ringförmig mit jeweils nur einem Scanpunkt pro Schaufel an der Auslaufkante nahe der Schaufelspitze (BILD 22), so dass Abwicklungen der Schwingungsmoden darstellbar sind. Die Blik ist mit insgesamt 6 K-DMS bestückt, die auf den Schaufeln 20, 33, 43, 61, 68 und 81 platziert sind (BILD 15). Es sei an dieser Stelle nochmals daran erinnert, dass die ‚Blade-Alone-Frequenzen‘ der instrumentierten Schaufeln eine das ursprüngliche Mistuningband über-treffende zusätzliche Verstimmung erhalten.

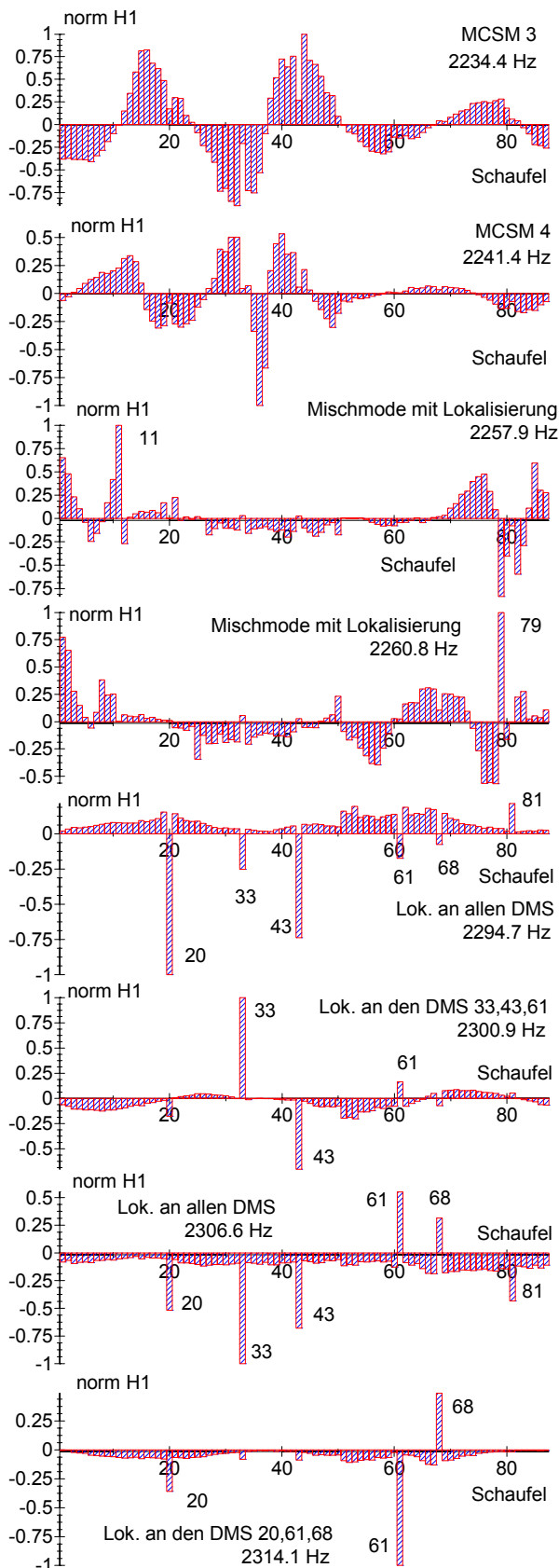


BILD 23: Modeabwicklungen im Bereich der 1. Schaufel-  
biegung (Auswahl)

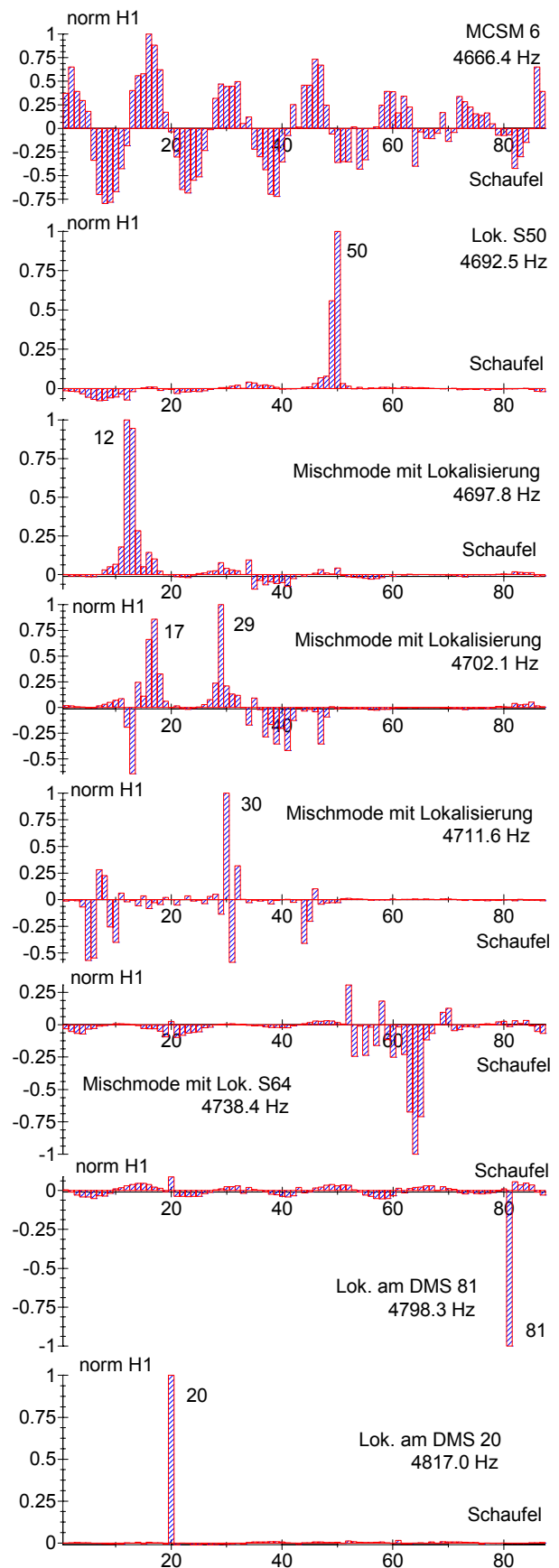


BILD 24: Modeabwicklungen im Bereich der 1. Schaufel-  
torsion (Auswahl)

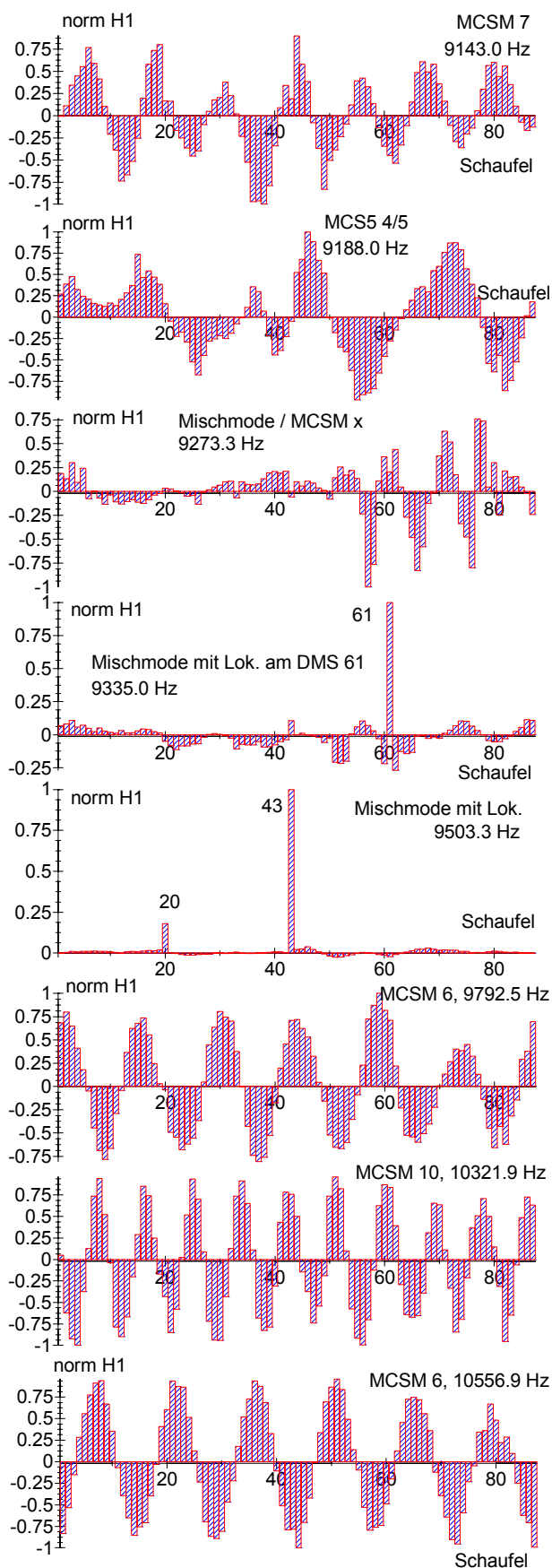


BILD 25: Modeabwicklungen im Bereich der 2. Schaufelbiegung (Auswahl)

Die Darstellungen der BILDER 23, 24 und 25 zeigen eine Auswahl von Schwingformen in den Bereichen 1. und 2. Schaufelbiegung sowie 1. Schaufeltorsion. Generell lassen sich die auftretenden Schwingformen nach MCSMs, Mischformen oder ausgeprägt lokalisierten Schwingformen einteilen. Speziell im Bereich der 1. Schaufelbiegung lassen sich dabei Schwingformen nachweisen, die ausschließlich an allen mit DMS bestückten Schaufeln gleichzeitig lokalisieren (z. B.  $f = 2294,7$  und  $2306,6$  Hz, BILD 23). Dass die Lokalisierung unterschiedlich stark ausfällt ist sowohl mit der Überlagerung der ursprünglichen Verformung als auch mit variierenden Positionen und Orientierungen der DMS auf der jeweiligen Schaufel zu begründen.

Besonders markant in Gestalt einer fast ausschließlichen Bewegung einer Einzelschaukel stellen sich einige Lokalisierungen im Bereich der 1. Schaufeltorsion dar (BILD 24). Es gelingt sogar, eine nahezu vollständig lokalisierte Schwingungsform mit einem Lokalisierungsgrad von über 99,8% nachzuweisen (TAB. 1). Aber auch unabhängig von der DMS-Applizierung treten Lokalisierungen mit überdurchschnittlichen Lokalisierungsgraden auf, wie etwa für die Schaufel 50 ( $f = 4695,5$  Hz). Generell ist das Kopplungsverhalten der Schaufeln untereinander bei Torsion weniger stark ausgeprägt, so dass derart isolierte Schwingformen plausibel sind. Es sei bemerkt, dass sich bereits im Rahmen der Ermittlung so genannter 'Driving-Point-Functions' bei Darstellung über die Schaufelabwicklung das wenig ausgeprägte Kopplungsverhalten bei einigen Torsionsfrequenzen in einem im Extremfall vollkommen isolierten Peak zeigte [1].

1. Biegung		1. Torsion		2. Biegung	
f [Hz]	LokaGra [%]	f [Hz]	LokaGra [%]	f [Hz]	LokaGra [%]
2234,4	13,37	4666,4	12,92	9143,0	10,93
2241,4	36,38	4692,5	82,79	9188,0	8,98
2257,9	33,30	4697,8	63,35	9273,3	25,42
2260,8	32,85	4702,1	43,98	9335,0	76,41
2294,7	59,35	4711,6	53,62	9503,3	<b>97,39</b>
2300,9	64,85	4738,4	57,01	9792,5	6,43
2306,6	47,84	4798,3	95,64	10321,9	<b>2,46</b>
2314,1	74,20	4817,0	<b>99,84</b>	10556,9	2,69

TAB 1. Lokalisierungsgrade der in den BILDERN 23-25 dargestellten Modeabwicklungen

Der Bereich der 2. Schaufelbiegung stellt sich bezüglich des Lokalisierungsgrades am gegensätzlichsten dar (BILD 25). So lassen sich scheibendominierte MCSMs mit Lokalisierungsgraden bis unter 2,5 % (TAB. 1) hier am saubersten nachweisen. Darüber hinaus können aber auch extreme Lokalisierungen mit Lokalisierungsgraden von bis zu 97,4 % festgestellt werden. Die Lokalisierungen treten sowohl als direkte Folge der DMS-Instrumentierung als auch unabhängig davon auf (in BILD 25 nicht dargestellt).

## 7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurde eine Reihe grundlegender Aspekte des Schwingungsverhaltens integraler Verdichteraufläufer mit einer Fokussierung auf die Schaufeln aufbereitet. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf fertigungsbedingte Verformungen gerichtet, aus denen letztlich durch Lokalisierung geprägte Schwingungsformen resultieren. Mit dem Lokalisierungsgrad wurde eine Kennzahl definiert, welche in Abhängigkeit des quadratischen Mittelwerts und des be-

tragsmäßigen Maximums der Schwingungsform sowie der Schaufelanzahl eine effektive Quantifizierung von Lokalisierungsphänomenen gestattet. Mittels Berechnungen erzwungener Schwingungsantworten konnte gezeigt werden, dass sich Schaufelschwingungsamplituden infolge Mistunings gegenüber einem perfekten Design wesentlich vergrößern. Des weiteren wurde im Rahmen von Untersuchungen realer Blisks nachgewiesen, dass für Testläufe vorgenommene DMS-Instrumentierungen einzelner Schaufeln in Abhängigkeit von der Geometrie zu erheblichen zusätzlichen Verstimmungen führen, welche innerhalb von Bewertungen der Lebensdauer zu berücksichtigen sind. Mittels Laserscanning-Untersuchungen konnten schließlich für zwei stehende Testblisks unterschiedlicher Geometrien verschiedene Schwingungsformen visualisiert werden. Dabei gelang es nachzuweisen, dass nahezu vollständig lokalisierte Schwingungsformen, bei denen sich die Schwingbewegung auf nur eine einzige Schaufel konzentriert, tatsächlich auftreten. Derartige Schwingungsformen sind von Lokalisierungsgraden von annähernd 100% gekennzeichnet.

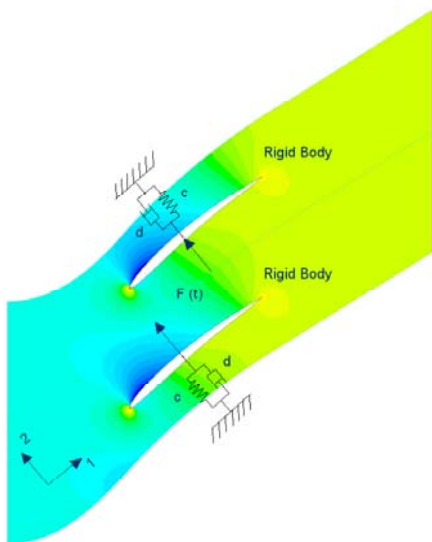


BILD 26: Gekoppeltes Fluid-Struktur-Modell mit 2 Kompressorschaukeln [5], [6]

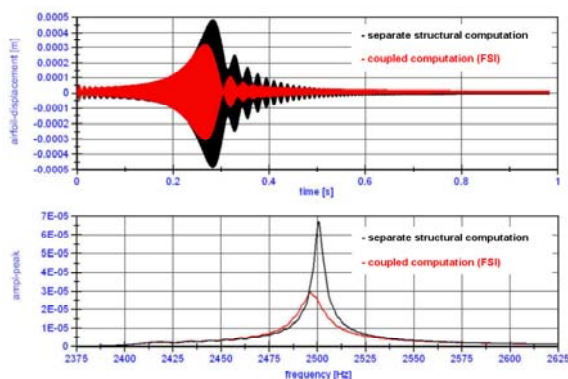


BILD 27: Einfluss der Umströmung auf die Schaufelschwingungsantwort in 2-Richtung [5], [6]

Wie sich Mistuning im Betrieb von Triebwerken tatsächlich auswirkt, lässt sich abschließend erst klären, wenn die Wechselwirkung von Schaufelbewegung und Umströmung in die Betrachtungen mit einbezogen wird. Aerodynami-

sche Dämpfung, mitschwingende Luftmassen und Abstützeffekte spielen in diesem Zusammenhang eine Rolle. Ausgehend von gekoppelten Berechnungen der Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) werden diesbezüglich zur Zeit am Lehrstuhl vereinfachte Modelle für den Auslegungsprozess von Verdichterschaukeln entwickelt. Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in [5] und [6] sowie in BILD 27 dokumentiert.

An die vorab dargestellten Erkenntnisse schließen sich eine Reihe von Fragestellungen an, deren Beleuchtung Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein wird. Hierzu gehört beispielsweise generell die messtechnische Untersuchung weiterer Blisks hinsichtlich Mistuning, DMS-Einfluss und Schwingungsformen sowie darauf aufbauend eine statistische Aufbereitung der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Bliskgeometrie. Von besonderem Interesse ist die Berücksichtigung des DMS-Einflusses in zukünftige DMS-Applizierungs- und Kalibrierungsstrategien. Mit der Auswertung von DMS-Signalen im Rahmen der Laserscanningmessungen könnte den Erkenntnissen zum DMS-Einfluss ein weiterer Baustein hinzugefügt werden, der einen direkten Bezug zu Fragen der Lebensdauer herstellt.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Rolls-Royce Deutschland für die fachliche und finanzielle Unterstützung für die in dieser Veröffentlichung dargestellten Untersuchungen. Die Untersuchungen sind Teil des Vorhabens DeSK Blisk Validierung (FKZ: 80121978), welches durch das Land Brandenburg und mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (efreinfo@mw.brandenburg.de) gefördert wird.

## LITERATUR

- [1] Beirow, B., Kühhorn, A., Golze, M., Parchem, R., Johann, E.: Experimentelle und numerische Untersuchungen hinsichtlich einer Festigkeitsauslegungsoptimierung von Hochdruckverdichter-Schaukel-scheiben unter besonderer Berücksichtigung von Mistuningeffekten; DGLR-Kongress 2003, München.
- [2] Witte, H., Pianka, C.: Validierung einer Verdichter-Schaukel-scheibe (Blisk) in der Erprobung – Echtzeit-Signalanalyse und iterative Modell-anpassung, VDI-Berichte Nr. 1550, 2000.
- [3] Beirow, B., Kühhorn, A., Golze, M., Klauke, Th., Parchem, R.: Experimental and Numerical Investigations of High Pressure Compressor Blades Vibration Behaviour Considering Mistuning; 10<sup>th</sup> International NAFEMS World Congress, 17.-20. Mai 2005 in Malta, ISBN 1 874 376 03 4.
- [4] Petrov, E. P., Ewins, D. J.: Analysis of the Worst Mistuning Patterns in bladed Disk Assemblies. Journal of Turbomachinery, Vol. 125, pp- 623-631, October 2003.
- [5] Schrape, S., Kühhorn, A.: FSI of a Simplified Aero Engine Compressor Cascade Configuration. GAMM Annual Meeting, March 27-31, Berlin, 2006.
- [6] Schrape, S., Kühhorn, A., Golze, M.: Simulation fluidgedämpfter Strukturschwingungen mittels partioniertem Kopplungsansatz via MpCCI. Fachbeitrag in NAFEMS Magazin, Nr. 2-2006, Ausgabe 4, NAFEMS Kontakt DACH und Nordic, Juli 2006.