

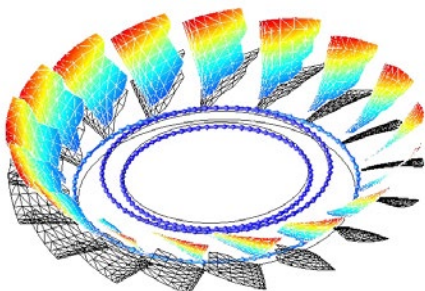
FE-Modellkorrelation einer Blisk

3D-Scanning-Laser-Doppler-Vibrometrie für treibstoffeffiziente Turbinen

Der Treibstoffverbrauch von Flugzeugen ist ein heißes Thema in der Debatte über den globalen Klimawandel. Ein wichtiger Faktor ist das Design des Flugzeugtriebwerks selbst. Um das Gewicht zu reduzieren und wirtschaftlichere Triebwerke zu bauen, wird die Verwendung von Blade-Integrated-Disks (Blisks) immer populärer. Blisks werden aus einem Stück gefräst, anders als im herkömmlichen Verfahren, bei dem die Rotorscheufeln einzeln an eine Nabenscheibe montiert werden.

BEDARF AN SCHWINGUNGS-TESTS UND MODELL-KORRELATION

Blisks reduzieren Gewicht und Komplexität, bringen aber technische Herausforderungen mit sich. Da sie aus einem einzigen Stück bestehen, weisen sie extrem niedrige Dämpfungswerte auf, die zu stark ausgeprägten Resonanzen führen. Eine ideale Blisk ist perfekt symmetrisch, sodass alle Schaufelsektoren die gleiche Geometrie und Materialeigenschaften aufweisen. In einem solchen Fall zeigen die Moden ebenfalls ein symmetrisches Verhalten und die Schwingungsenergie wird gleichmäßig auf alle Segmente verteilt. Kleinste Abweichungen im Herstellungsprozess führen jedoch zur Verstimmung der Resonanzen. Wenn eine Verstimmung auftritt, kann sich die Schwingungsenergie auf eine oder mehrere Schaufeln konzentrieren, was lokal zu erhöhten Schwingungsamplituden führt. Während des Realbetriebs führt dies zu höheren Bauteilspannungen und letztendlich zu einer verkürzten Lebensdauer der ganzen Blisk (Langzeitermüdung). Um die reale Beanspruchung der Blisk unter Betriebsbedingungen



vorherzusagen, zieht man detaillierte Finite-Elemente-Modelle (FEM) heran. Im ersten Schritt wird ein FE-Modell für ein perfekt symmetrisches Teil erstellt und mit experimentellen Daten überprüft. Im zweiten Schritt wird es hinsichtlich der beobachteten Verstimmung angepasst. Eine detaillierte FE-Korrelation ist daher unerlässlich für ein erfolgreiches Design und muss sehr exakt erfolgen.

3D-LASER-DOPPLER-VIBROMETRIE FÜR MODELL-KORRELATION

Laser-Doppler-Vibrometer messen das Vibrationsverhalten zuverlässig und berührungslos über den gesamten Frequenzbereich. Eine zusätzliche Massebeladung oder erhöhte Dämpfungswerte wie bei der Verwendung von berührender Sensorik, z. B. Beschleunigungsaufnehmern, tritt nicht auf. Damit ist die berührungsfreie Messung eine viel detailliertere und verlässlichere Basis für eine exakte Modellkorrelation. 3D-Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer liefern außerdem auf einfache und genaue Weise die vollständigen 3D-Schwingformen für alle Frequenzen in einem einzigen vollständigen Datensatz, der ideal für die Korrelation mit FE-Modellen verwendet werden kann.

Als Messobjekt dient hier eine Kompressor-Blisk mit 240 mm Durchmesser vom ITSM an der Universität Stuttgart. Sie besteht



Abbildung 1: Messaufbau einer Blisk mit 240 mm Durchmesser, gemessen mit einem PSV-3D Scanning Vibrometer.

aus Edelstahl und wurde in einem auf Präzisionsmechanik spezialisierten Unternehmen hochpräzise gefräst. Ein hochauflösender Geometrie-Scan zeigte nur sehr geringe geometrische Abweichungen in einer Größenordnung von 50 µm. Die Blisk wurde auf drei kleine Gummidämpfer gelegt, um sie von der Umgebung zu entkoppeln und Umgebungseinflüsse zu minimieren. Der SAM 1 Skalierbare Automatische Modalhammer regt die Struktur breitbandig bis 20 kHz an. Das verwendete PSV-500-3D Xtra Scanning Vibrometer benutzt eine Infrarotlichtquelle mit 3 mW Leistung, die eine aufwendige Oberflächenvorbereitung überflüssig macht, aber immer noch unbedenklich für das Auge ist. ►

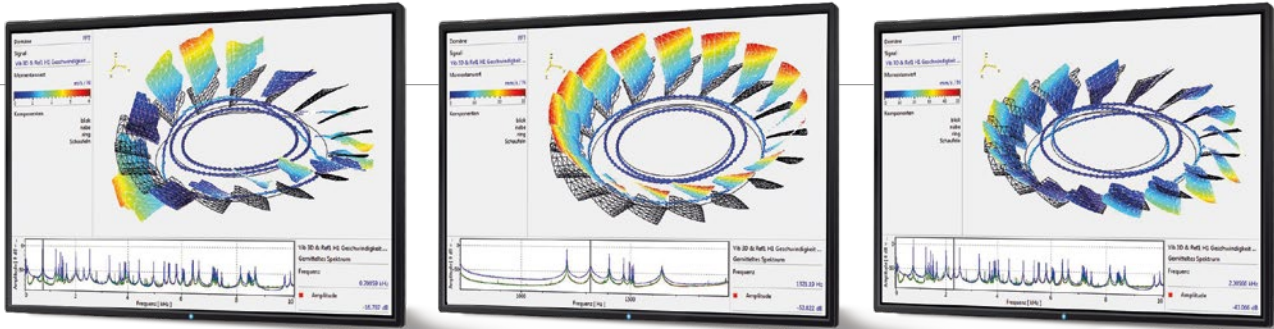


Abbildung 2: Ausgewählte Schwingformen der Blistk-Übertragungsfunktion bei 0,7 kHz, 1,3 kHz und 2,3 kHz von links nach rechts (siehe unten).

ERGEBNISSE

Abbildung 3 zeigt das über alle Messpunkte gemittelte Spektrum der gemessenen Übertragungsfunktion (FRF). In Abbildung 2 sind einige beispielhafte Schwingformen dargestellt. Abbildung 4 zeigt exemplarisch eine Frequenzaufspaltung der Doppelmoden, die für zyklisch-symmetrische Strukturen charakteristisch sind, und gibt den ersten Hinweis auf eine sehr geringfügige Verstimmung der Blistk, siehe oben.

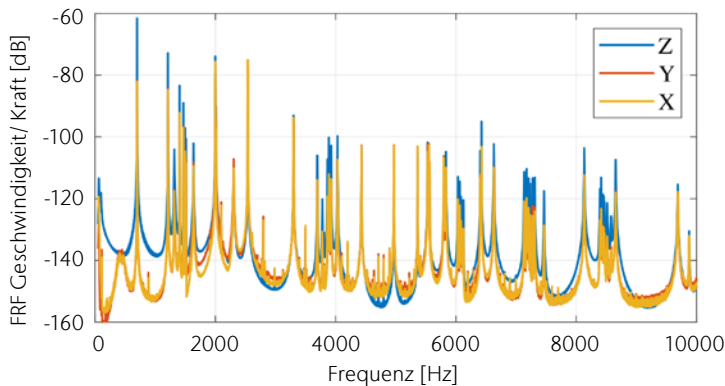


Abbildung 3: Spektrum der Blistk-Übertragungsfunktion (FRF).

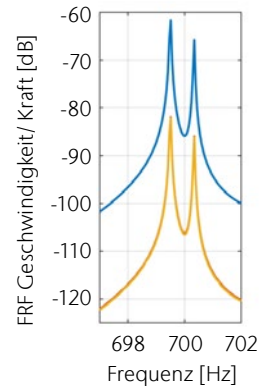


Abbildung 4: Das gezoomte FRF-Spektrum zeigt eine leichte Aufspaltung zweier symmetrischer Moden.

Zur weiteren Analyse und zum Vergleich mit dem FE-Modell wird der Datensatz als Universal File Format (UFF) exportiert und in der Modalanalyse-Software PolyWave von Polytec einer Modalanalyse unterzogen. Die Moden der ersten Modenfamilie werden dann mit den Moden der FE-Simulation für eine rein symmetrische Struktur verglichen. Tabelle 1 stellt die Frequenzen aus Test und Simulation einander gegenüber und zeigt die aus dem Test extrahierten Dämpfungswerte. Tabelle 1

enthält Daten für die erste Modenfamilie, bei der alle Schaufeln dieselbe erste Biegung aufweisen. Die Frequenzen von Test und FE stimmen hervorragend überein, was darauf hinweist, dass die Verstimmung generell gering ist. Nichtsdestotrotz weist die leichte Aufspaltung der Frequenzen der Doppelmoden (0,6 - 3 Hz, für Mittenfrequenzen von etwa 1 - 2 kHz) darauf hin, dass eine geringe Verstimmung eben doch vorhanden ist.

Mode	$f_{FEsim.}$ [Hz]	$f_{gemessen}$ [Hz]	Δf [-]	$\xi_{gemessen}$ [-]
1	701.8	699.5	0.3%	2.8×10^{-5}
2	701.8	700.3	0.2%	2.8×10^{-5}
3	1216.0	1212.1	0.3%	3.4×10^{-5}
4	1216.0	1212.7	0.3%	3.0×10^{-5}
5	1300.4	1320.0	-1.5%	1.5×10^{-5}
6	1408.9	1405.8	0.2%	3.1×10^{-5}
7	1408.9	1406.5	0.2%	2.8×10^{-5}
8	1471.9	1469.2	0.2%	2.8×10^{-5}
9	1471.9	1469.8	0.1%	2.4×10^{-5}
10	1498.0	1495.1	0.2%	2.8×10^{-5}
11	1498.0	1496.0	0.1%	2.8×10^{-5}
12	1510.0	1508.3	0.2%	2.8×10^{-5}
13	1510.0	1508.3	0.1%	2.7×10^{-5}
14	1514.8	1512.9	0.1%	2.7×10^{-5}
15	1514.8	1515.0	-0.0%	2.7×10^{-5}

Tabelle 1: Modenfrequenzen aus FE und Test sowie Dämpfungswerte aus der experimentellen Modalanalyse.

Dies wird durch den Vergleich der Modenformen aus FE und Test mittels einer MAC-Analyse (engl. model assurance criterion) bestätigt, siehe Abbildung 5. Wie üblich zeigen MAC-Werte nahe 1 eine hohe Ähnlichkeit der Modenformen an, kleinere Werte zeigen Abweichungen in der Modenform an. Moden niedriger Ordnung korrelieren hier ausgezeichnet, einige der höheren Moden zeigen hingegen niedrigere MAC-Werte.

SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die 3D-Scanning-Laser-Doppler-Vibrometrie ist eine hervorragende Methode für das hochgenaue Erfassen von detaillierten Daten von herausfordernden Objekten wie Blisks. Die Extraktion der modalen Daten mit PolyWave ermöglicht eine detaillierte Korrelation mit FE-Moden. Die Ergebnisse aus Simulation und Test stimmen im Allgemeinen sehr gut überein. Alle Moden der Simulation finden sich auch in den Messergebnissen wieder, und die Übereinstimmung der Frequenzen ist generell sehr gut. Eine detaillierte Analyse der gemessenen Schwingungsdaten zeigt leichte Verstimmungseffekte in der realen Blisk, was nicht im idealisierten,

Eine detailliertere Studie (siehe Referenzen unten) zeigt, dass diese Abweichungen in den Modenformen sich sehr gut durch leichte geometrische Abweichungen erklären lassen. Diese leichten Geometrie-Abweichungen brechen die Symmetrie der Modenformen durch Lokalisierung, sodass die Schwingungsamplituden bei einigen Schaufeln größer sind als bei anderen.

ersten FE-Modell auf Basis des CAD-Modells berücksichtigt ist. Diese Verstimmungseffekte führen zur Frequenzaufspaltung von doppelten Moden und zu Abweichungen bei den Schwingformen höherer Ordnung. Diese Ergebnisse ermöglichen ein FE-Modell Update, die Erstellung eines verbesserten FE-Modells, das die Verstimmung nun berücksichtigt. Dieses verbesserte FE-Modell ist unerlässlich für die genaue Vorhersage der Ermüdung im realen Betrieb. Bisher wurde die Analyse nur für die Moden der ersten Modenfamilie der Blisk durchgeführt. Da aber Daten bis zu 10 kHz erfasst wurden, können auch höhere Modenfamilien mit dem gleichen Detaillierungsgrad untersucht werden. ■

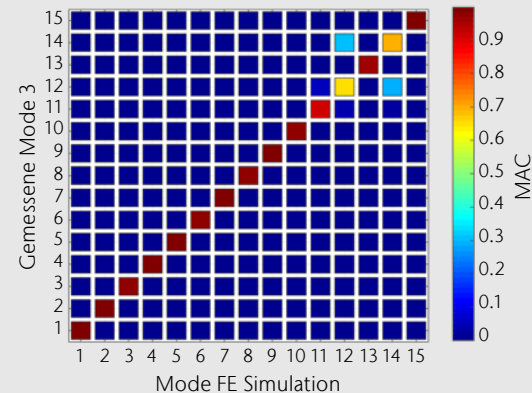


Abbildung 5: MAC-Diagramm (model assurance criterion) für Moden aus dem Test und aus der Simulation (FE).

Kontakt

Patrick Buchwald, Christian U. Waldherr
und Prof. Tekn. Dr. Damian M. Vogt
Institut für Thermische Strömungsmaschinen
und Maschinenlaboratorium (ITSM)
Universität Stuttgart

patrick.buchwald@itsm.uni-stuttgart.de

Dr. Jochen Schell
Leitung Applikation
Dr. Heinrich Steger
Leitung Strategisches Produktmarketing
Polytec GmbH

info@polytec.de

Referenz

Patrick Buchwald et al.
Paper presented at the APVC conference in Sydney,
Australia, Nov. 2019.