



Flächenhafte Messung dynamischer Spannungsverteilungen an Turbinenschaufeln

Um dauerfeste Bauteile für den Einsatz in Maschinen und Anlagen, beispielsweise Turbinen, zu entwickeln, muss man die bei der Nutzung auftretenden Bauteilbeanspruchungen kennen. Innerhalb des Bauteils stellen sich, insbesondere durch dynamische Anregungskräfte verursacht, charakteristische schwingformabhängige Spannungsverteilungen ein. Die in einem ersten Entwicklungsschritt rein simulativ erarbeitete Lebensdauer des Bauteils muss durch Tests verifiziert werden. Dazu erfasst man messtechnisch die Spannungsmaxima der einzelnen Schwingmoden und gleicht sie mit den Modellwerten ab. Zur Messung von Beanspruchungen durch mechanische Schwingungen kommen standardmäßig Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Anwendung. Bei der DMS-Messung kommt der Positionierung der Streifen große Bedeutung zu, da die Spannungsmaxima in realen Bauteilen fertigungsbedingt von den simulativ bestimmten Positionen abweichen können. Darüber hinaus werden für die Bewertung mehrerer Schwingmoden zahlreiche DMS-Positionen benötigt. Es besteht daher großes Interesse daran, die Bauteilbeanspruchungen durch einzelne Schwingmoden flächenhaft und berührungsfrei zu erfassen.

In diesem Artikel wird am Beispiel der Messung dynamischer Dehnungen und Spannungen an Turbinenschaufeln gezeigt, wie diese Verifikation mit deutlich reduziertem Aufwand und erheblich gesteigerter Genauigkeit durchgeführt werden kann. In der Beispielanwendung wurden die so gewonnenen Messwerte mit Simulationen verglichen. Dabei wurde ein sehr hohes Maß an Übereinstimmung erzielt. Gemessene Asymmetrien der Schwingbeanspruchungen im realen Bauteil lassen sich auf Fertigungstoleranzen zurückführen und können in der Simulation nicht berücksichtigt werden.

Testaufwand minimieren – Qualität steigern



Bild 1: Mit DMS instrumentierte Turbinenschaufel

Die Suche nach Alternativen zu Dehnungsmessstreifen (DMS) ist naheliegend. Optische Methoden, wie die Bildkorrelation oder ESPI, verringern im Allgemeinen den Aufwand bei der Instrumentierung erheblich, haben aber ihre Grenzen bei der Dehnungsauflösung. Die Firmen MTU Aero Engines in München und Polytec in Waldbronn haben deshalb in enger Kooperation die Möglichkeiten der dynamischen Dehnungsmessung mit Hilfe der dreidimensional scannenden Laser-Doppler-Vibrometrie untersucht. Um das Verfahren mit der numerischen Simulation zu vergleichen, wurde ein modellhaftes Bauteil hergestellt, das zum einen mit der Finite-Elemente-Methode berechnet und zum anderen experimentell vermessen wurde. Eine Übertragung der Methode auf die für die MTU essentiellen Turbinen- und Verdichterschaufeln ist somit direkt möglich.

Berührungslose dynamische Dehnungs- und Spannungsmessung

Kern des neuen Verfahrens ist ein dreidimensional messendes PSV-400-3D Scanning Vibrometer, das mit drei Lasersensoren die Verteilung der Oberflächenschwingung auf einem Bauteil erfasst. Durch das Verfahren wird hierzu der dreidimensionale Schwingungsvektor in jedem Punkt eines vorher definierten Messgitters bestimmt.

Ein typischer Aufbau mit den drei Messköpfen und einer von einem Shaker angeregten Turbinenschaufel ist in Bild 2 zu sehen.



Bild 2: 3D-Scanning Vibrometer beim Test an einer Turbinenschaufel

Das Messgitter kann entweder aus einem Finite-Element-Modell importiert und dann mit dem realen Prüfling zur Deckung gebracht werden, oder es wird manuell definiert und die Geometrie der Messpunkte vermessen. An jedem Punkt des Messgitters werden mit Hilfe der so genannten Video-Triangulation die drei Laserstrahlen zur Deckung gebracht. Dies ermöglicht eine hochgenaue Messung sowohl der Geometrie als auch der dreidimensionalen dynamischen Verschiebungsvektoren an den Messpunkten.

Die Dehnung wird aus der Änderung der Verschiebungen zwischen benachbarten Punkten berechnet (Bild 3). Hierzu müssen sowohl die Verschiebungsdaten als auch die Geometriedaten der Messpunkte mit hoher Genauigkeit bekannt sein. Beides wird durch das PSV-400-3D gewährleistet. Mit Hilfe der Materialparameter E-Modul und Querkontraktionszahl wird aus der Dehnungsverteilung die dynamische Spannungsverteilung ermittelt.

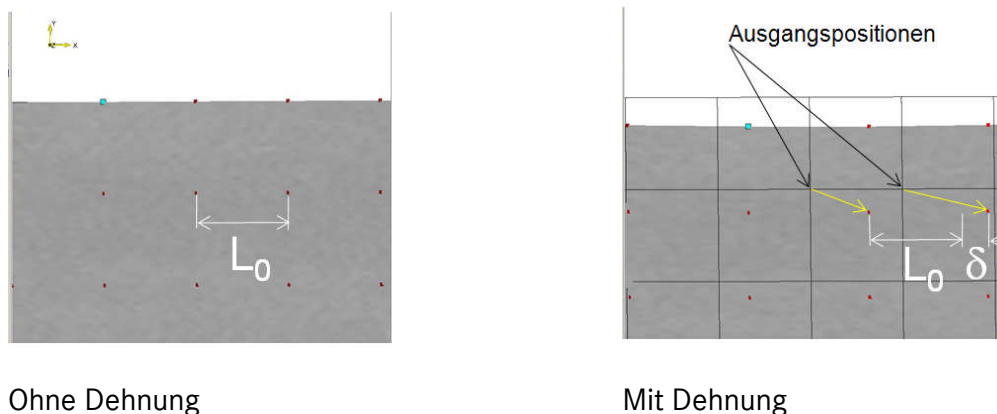


Bild 3: Verschiebung der Messpunkte durch Dehnung

Da die Messpunkte virtuell festgelegt werden, lassen sich nahezu beliebige Messpunktdichten erzielen, die weit über denen von Tests mit DMS liegen. Dieser Umstand kommt der Verifikation von Simulationsergebnissen zugute, wie im Folgenden zu sehen ist.

Neben der erhöhten Qualität der Ergebnisse kommt die schnelle Einsatzfähigkeit des Scanning Vibrometers zum Tragen. Tests können in kurzer Zeit durchgeführt und der Erfolg von Modifikationen zeitnah verifiziert werden, ohne auf die Neuinstrumentierung warten zu müssen

Verifikation der Simulation durch Probemessung an einer Plattenstruktur

Zur praktischen Prüfung des Verfahrens wurde ein Probekörper aus Aluminium gefertigt. Es handelt sich um eine Platte mit den Abmessungen ca. 80 mm x 34 mm und einer Dicke von 3 mm. Die Platte ist an einem Ende mit definierten Radien auf 15 mm verdickt (Bild 4), um sie unter definierten Bedingungen einspannen zu können.

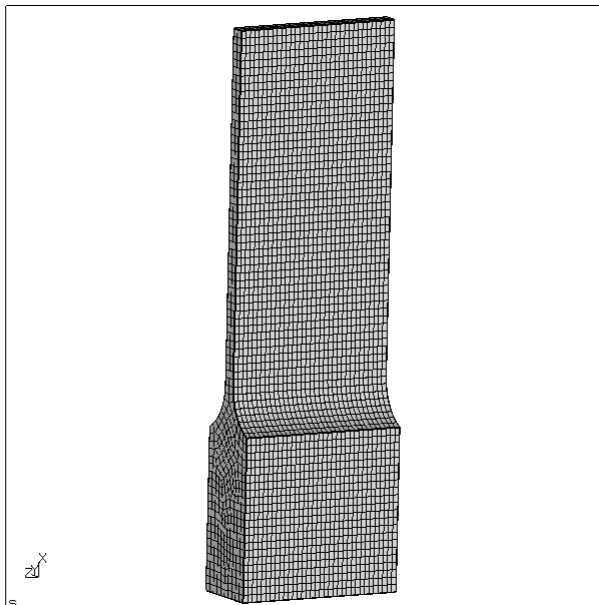


Bild 4: Probekörper mit FE-Gitter



Die Platte wurde mit Hilfe des FE-Simulationsprogramms Calculix modelliert und berechnet. In der Simulation wurden die Eigenmoden bis 16 kHz mit den zugehörigen Schwingformen, Dehnungs- und Spannungsverteilungen berechnet.

Messung, Auswertung und Visualisierung erfolgt in der Software des PSV Messsystems. In einem Übersichtsscan mit breitbandiger Anregung wurden die simulierten Schwingformen identifiziert und die zugehörigen Frequenzen ermittelt. Danach wurden die einzelnen Schwingformen jeweils mit Sinusanregung exakt vermessen. Eine automatisierte Video-Triangulation gewährleistete während der Messung, dass die drei Laser an jedem Messpunkt exakt aufeinandertrafen. Gleichzeitig wurde die tatsächliche 3D-Geometrie mit einer Auflösung von ca. 15 µm erfasst.

Primäre Messgröße der Schwingungsmessung ist der 3D-Geschwindigkeitsvektor an jedem Messpunkt. Dieser kann im Frequenzbereich verlustfrei in einen 3D-Verschiebungsvektor umgewandelt werden. Aus den Verschiebungen werden anschließend Dehnungen und Spannungen berechnet. Die Dehnungs- und Spannungsverteilungen werden mit der PSV Software visualisiert.

Mit dem PSV-400-3D Scanning Vibrometer ist es möglich, das Koordinatensystem frei zu definieren und mit dem Koordinatensystem der Simulation abzugleichen. Dadurch liegen die Ergebnisse der Messung und der Simulation im selben Koordinatensystem vor. Ein Vergleich der Dehnungs- und Spannungsverteilungen zwischen Messung und Simulation ist deshalb problemlos möglich. Die Bilder 5 - 7 zeigen einen Vergleich der Verschiebungen, Dehnungsverteilungen und Spannungsverteilungen für eine ausgewählte Schwingungsmode bei 15 kHz.

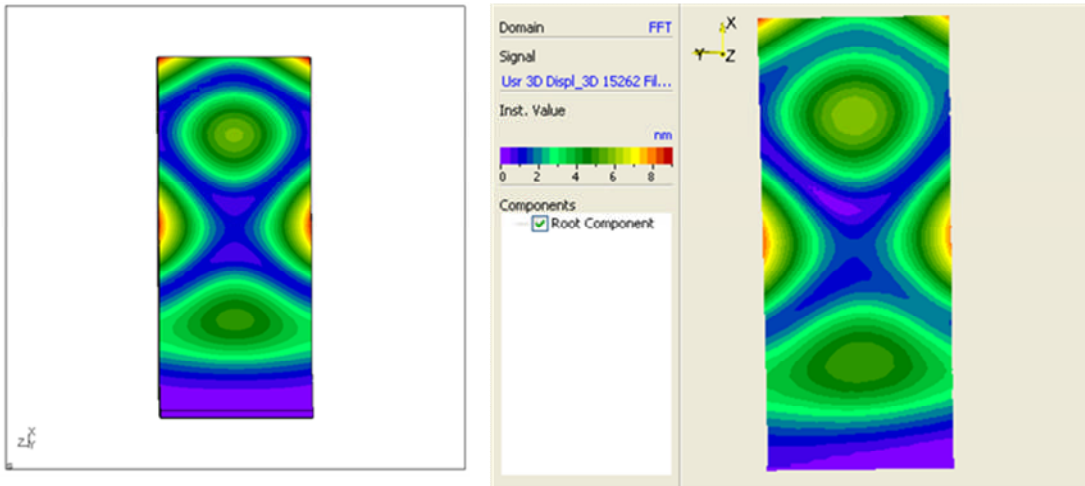


Bild 5: 3D-Verschiebungen (Amplitude); Simulation (links), Messung (rechts)

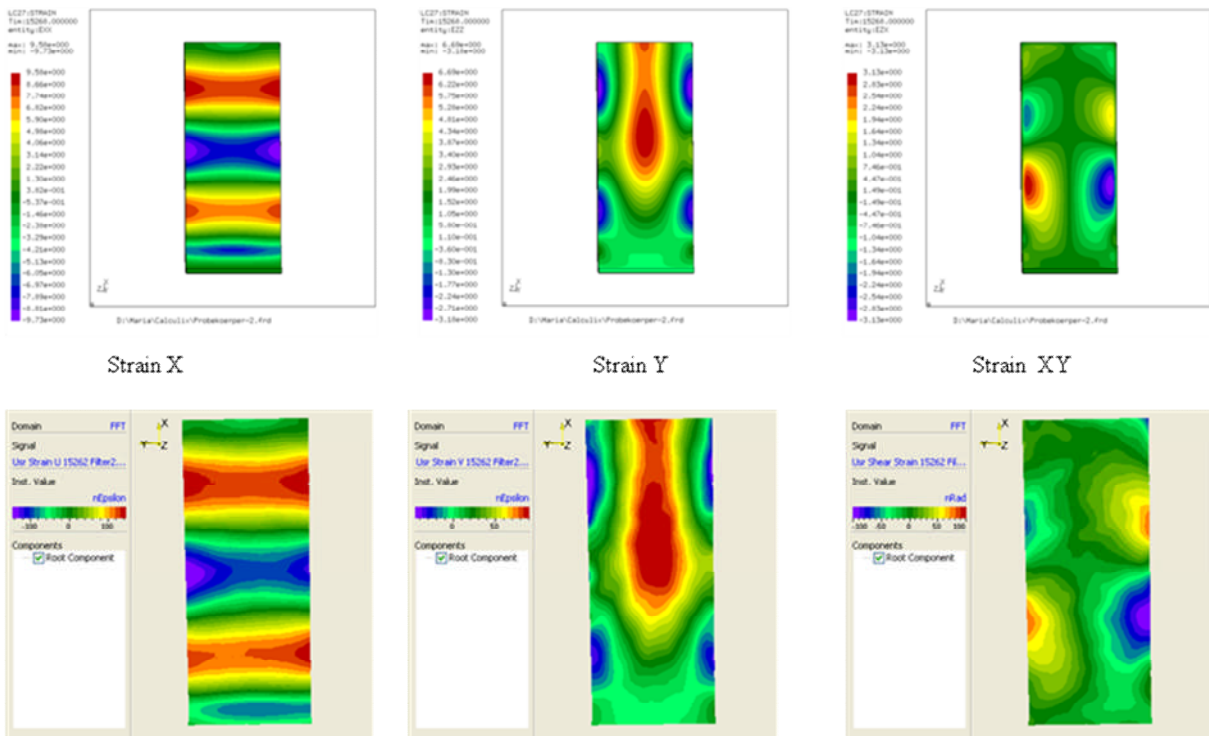


Bild 6: Dehnungsverteilungen; Simulation (oben), Messung (unten)

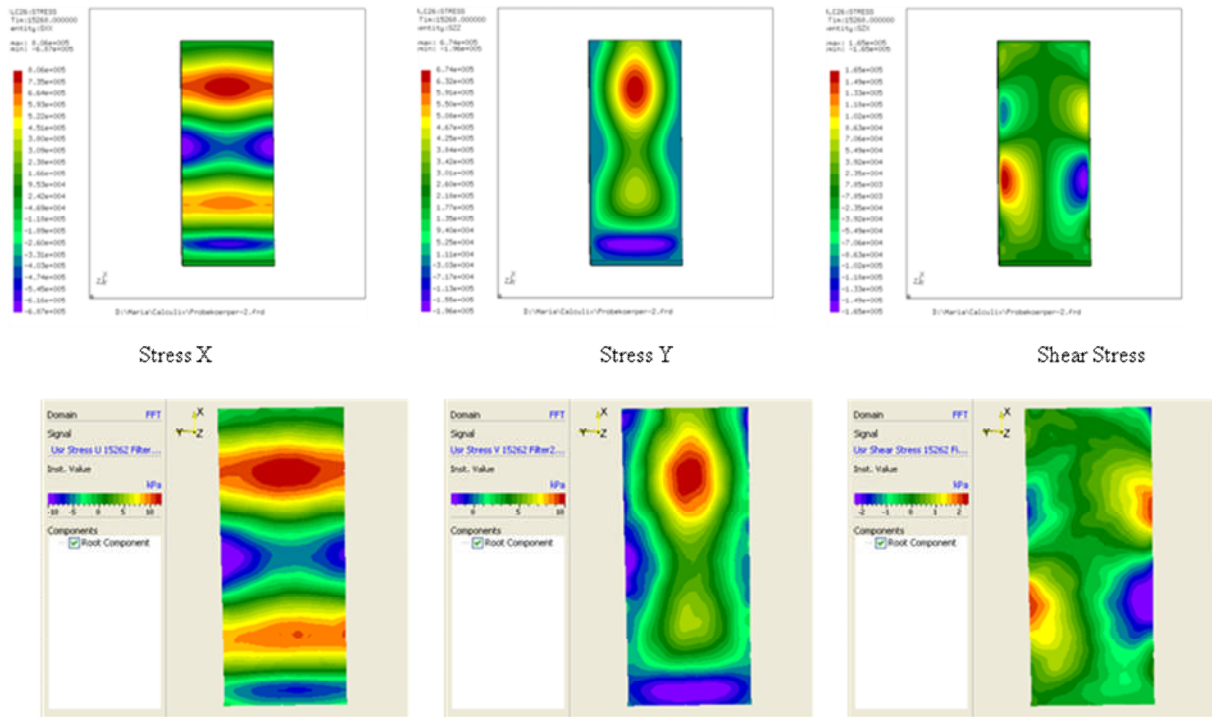


Bild 7: Spannungsverteilungen; Simulation (oben), Messung (unten)

Zusammenfassung

Der Ansatz, an einem vereinfachten, aber trotzdem praxisnahen Modell die Funktionalität der dynamischen Dehnungsmessung mit dem PSV-400-3D Scanning Vibrometer zu erproben, hat sich als äußerst zielführend erwiesen. Die Schwingformen sowie die Dehnungs- und Spannungsverteilung lassen sich an dem Modell präzise und zügig messen.

Die Ergebnisse für die Dehnungs- und Spannungsverteilungen zeigen sehr gute Übereinstimmungen mit der Simulation, sowohl qualitativ als auch quantitativ.

Durch seine sehr hohe Empfindlichkeit und durch die Möglichkeit, die Dehnungen hochaufgelöst in allen Raumrichtungen zu messen, eignet sich das berührungslose PSV-400-3D Scanning Vibrometer hervorragend, um die Simulationsergebnisse mit den bei realen Bauteilen



auftretenden Dehnungs- und Spannungsverteilungen zu vergleichen. Bei der Berechnung der Betriebsfestigkeit liegt der Nutzen, neben den oben genannten Eigenschaften, in der Reduktion der Instrumentierungszeiten und -kosten, vor allem aber in der gesteigerten Messgenauigkeit. Durch das berührungsfreie Messverfahren können sämtliche Einflüsse der Messtechnik auf das Schwingverhalten des Bauteils ausgeschlossen werden. Die gesamte Messung kann zügig innerhalb weniger Stunden durchgeführt werden.

Autoren – Kontakt

Dr. Ulrich Retze, MTU Aero Engines GmbH, München • ulrich.retze@mtu.de

Matthias Schüssler, Polytec GmbH, Waldbronn • m.schuessler@polytec.de