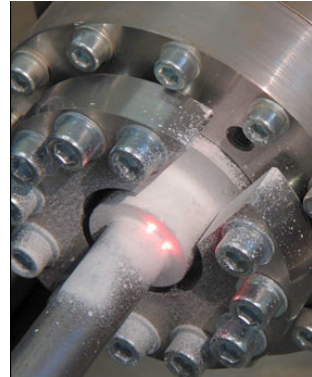


Schlupfmessung an Pressverbindungen mittels Laserinterferometrie

Hilgermann, J. L.; Thoden, D.

Im Rahmen eines von der DFG (Deutsche-Forschungs-Gemeinschaft) geförderten Forschungsprojektes zur Dimensionierung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen wurden Schlupfmessungen an Bauteilproben mit Hilfe eines Laserinterferometers durchgeführt. Ziel war es den mit Hilfe der Numerik ermittelten Schlupf messtechnisch zu verifizieren. Hierzu wurde am Nabenrand eine Messung durchgeführt und mit den Ergebnissen der Computersimulation verglichen. Der Artikel beschreibt das Messprinzip und stellt erste Messergebnisse vor.



Within the context of a research project sponsored by the DFG (Deutsche-Forschungs-Gemeinschaft) for dimensioning internal high-pressure press fit connections slip-measurements were carried out. The goal was to compare the results taken by numerical simulations with measurements on real test-specimen. Measurements at the collar-front were carried out and compared directly with the results of the simulation. The article describes the measuring principle and depicts measurement results.

1 Schlupfmessung mittels eines Laserinterferometers

Der Verdrehwinkel von Welle und Nabe wurde mit einem Rotationslaservibrometer aufgenommen und in die Zielgröße Schlupf umgerechnet. Der Verdrehwinkel wurde am Außenradius der Welle und am Außenradius der Nabe getrennt voneinander und möglichst zeitnah aufgenommen. Die Zeitdifferenz von zwei zusammengehörenden Messungen an Welle und Nabe betragen hierbei jeweils weniger 2 Minuten. Im Anschluss wurde der relative Verdrehwinkel zwischen Welle und Nabe ausgelesen und in die Zielgröße Schlupf umgerechnet.

1.1 Das Messverfahren

Für die Schlupfmessung wurde ein Rotationslaservibrometer der Firma Polytec eingesetzt (Controller OFV-4000, Messkopf OFV-400). Das Messverfahren der Laserinterferometrie ermöglicht die berührungslöse Schwingungserfassung. Der am Messobjekt reflektierte Strahl wird mit einem Referenzstrahl interferiert. Die Intensität des Laserstrahls ist Abhängig von seinem Spitzenwert I und der Phasenverschiebung beider Strahlen zueinander.

$$i(\Delta\Phi) = I \cdot (1 - \cos \Delta\Phi)$$

Die durch den Abstand des Messobjektes vom Laservibrometer hervorgerufene Phasendifferenz des Messstrahls in Bezug zum Referenzstrahl ist ausschließlich vom Abstand des Messobjektes und der Wellenlänge des verwendeten Lasers abhängig und konstant.

$$\Delta\Phi = 4\pi \cdot \frac{L}{\lambda}$$

Bewegt sich das Messobjekt mit einer Geschwindigkeit v entlang des Laserstrahls, so ändert sich der Abstand des Messobjektes in Abhängigkeit der Zeit. Der Messstrahl erfährt eine zusätzliche, zeitabhängige Phasendifferenz

$$\Delta\Phi = 4\pi \cdot v \cdot \frac{t}{\lambda} = 2\pi \cdot f_D \cdot t \rightarrow f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda}$$

worin f_D die Dopplerfrequenz darstellt. Die Dopplerfrequenz ist die Frequenz, mit der sich die vom Objekt zurückgeworfene Frequenz von der Ausgangsfrequenz unterscheidet. Aus der Gleichung geht hervor, dass sie proportional zur Objektgeschwindigkeit ist. Mit einer Photodiode lässt sich die Dopplerfrequenz im Vergleich zum Referenzstrahl leicht ermitteln und elektronisch auswerten

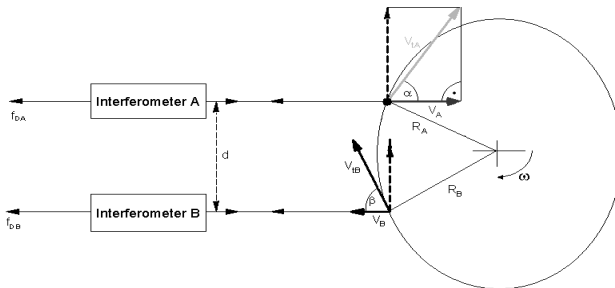


Bild 1: Funktionsweise einer Rotationslaservibrometer-Messung an einem drehenden oder dreherschwingenden Objekt (/1/)

Zur Erfassung von Winkelgeschwindigkeiten werden zwei in einem Gehäuse eingebaute Laservibrometer verwendet. Das Messprinzip ist in **Bild 1** dargestellt. Jedem Punkt am Umfang eines Objektes mit der Winkelgeschwindigkeit ω , kann eine Tangentialgeschwindigkeit v_t zugeordnet werden. Die Geschwindigkeit kann durch zwei orthogonale Komponenten beschrieben werden. Der Winkel α und β geben hierbei jeweils die Ebenen an, bei der eine Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung wirkt:

$$f_{DA} = \frac{2 \cdot v_A}{\lambda} \text{ mit } v_A = \omega \cdot R_A \cdot \cos \alpha \quad \text{und} \quad f_{DB} = \frac{2 \cdot v_B}{\lambda} \text{ mit } v_B = \omega \cdot R_B \cdot \cos \beta$$

Mit $d = R_A \cdot \cos \alpha + R_B \cdot \cos \beta$ für den Laserabstand ergibt sich bei der Addition der Einzel-Dopplerfrequenzen:

$$f_D = f_{DA} + f_{DB} = \frac{2 \cdot d \cdot \omega}{\lambda}$$

Die Winkelgeschwindigkeit ist somit der Dopplerfrequenz proportional. Über die Integration der Winkelgeschwindigkeit erhält man den Verdrehwinkel des Messobjektes. Von außen einwirkende Störungen in Form von translatorischen Schwingungen haben keinen Einfluss auf das Messsignal, wenn diese resultierenden überlagerten Geschwindigkeiten auf v_A und v_B gleichförmig sind.

1.2 Durchführung der Messung

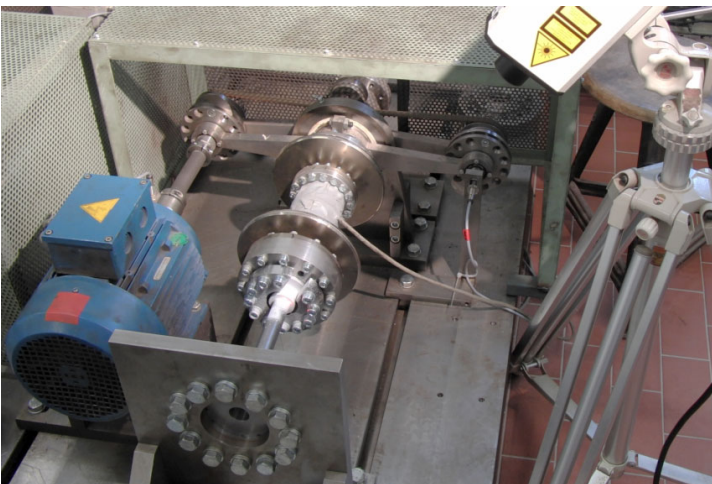


Bild 2: Versuchsaufbau für die Schlupfmessung mittels eines Laservibrometers

Bild 2 stellt den Messaufbau des Laserkopfes neben dem Prüfstand dar. Der Prüfstand ist auf einem federn gelagertem Maschinenbett montiert und so schwingungstechnisch vom Hallenfundament entkoppelt. Der Laser wurde neben dem Prüfstand aufgestellt und erfährt so keine äußeren Schwingungen des Prüfstandes. Die vom Prüfstand erzeugten Schwingungen wirken translatorisch und gleichförmig auf das Messobjekt. Sie haben damit keinen Einfluss auf das Messsignal.

Zwei zeitnahe, separate Messungen des Verdrehwinkels an Welle und Nabe wurden durchgeführt. Hierzu wurde der Laser auf die Welle direkt neben dem Nabenauslauf fokussiert und das Signal mit 2048Hz abgetastet und aufgenommen. Im Anschluss wurde der Laser auf den Außenradius der Nabe am Nabenauslauf fokussiert und das Signal nochmals aufgenommen. Über ein Makro in Excel wurden die lokalen Maxima und Minima des Verdrehwinkels der Welle und der Nabe gesucht und gemittelt. Die jeweiligen Mittelwerte wurden von einander subtrahiert und in die Zielgröße Schlupf umgerechnet. Der so ermittelte Schlupfwert entspricht damit nicht dem Schlupf am Nabenauslauf in der Verbindungsfuge, sondern entspricht einer Relativverschiebung zwischen Wellen- und Nabenaußendurchmesser am Nabenauslauf. Die zeitgleiche Messung der Verdrillung der Nabe wurde nicht durchgeführt. Die zusätzliche Messung würde zu einem zusätzlichen Messfehler führen. Auf Grund des zu erwartenden kleinen Messsignals hätte sich hierdurch ein zu großer Messfehler ergeben, welcher die präzise und einfache Messung mit dem Rotationslaservibrometer verfälscht hätte. Stattdessen wurden die ermittelten Messergebnisse für den direkten Vergleich mit den FE-Simulationen herangezogen.

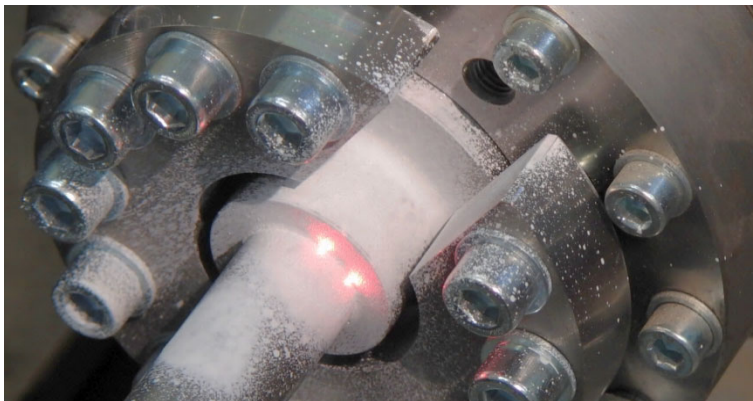


Bild 3: Fokussierung des Laserstrahls zur Verdrehwinkelmessung

Bild 3 stellt die Fokussierung des Messstrahls auf der Welle dar. Zur Verbesserung des Messergebnisses wurde Entwicklerspray auf die Versuchsprobe gesprüht. Erst durch die Zerstreuung des Laserlichts wird erreicht, dass genug reflektiertes Licht auf den Sensor im Laser-vibrometer trifft.

2 Ergebnisse

Bild 4 stellt erste Ergebnisse der Schlupfmessung dar. Über die logarithmische Zeitachse sind die Lastwechsel der Probe aufgetragen. Als Linien dargestellt sind die jeweiligen Messergebnisse der Schlupfmessung. Hierbei beträgt der eingetragene Schlupfwert eine Relativverschiebung zwischen dem Außendurchmesser der Welle und der Nabe am Nabenanfang. Die grau schattierten Flächen entsprechen den Ergebnissen der numerischen Simulation mittels Finite-Elemente-Methode. Da der Messstrahl nicht für jede Messung auf exakt die gleiche Stelle fokussiert werden konnte, unterliegt das Messsignal zusätzlichen Schwängen. Um einen Vergleich mit den Simulationsdaten dennoch zu ermöglichen wurden die Schlupfdaten in einem Band von $\pm 0,5\text{mm}$ am Nabenrand ausgelesen und berechnet. Das sich so ergebende Schlupffeld ist im **Bild 4** grau dargestellt.

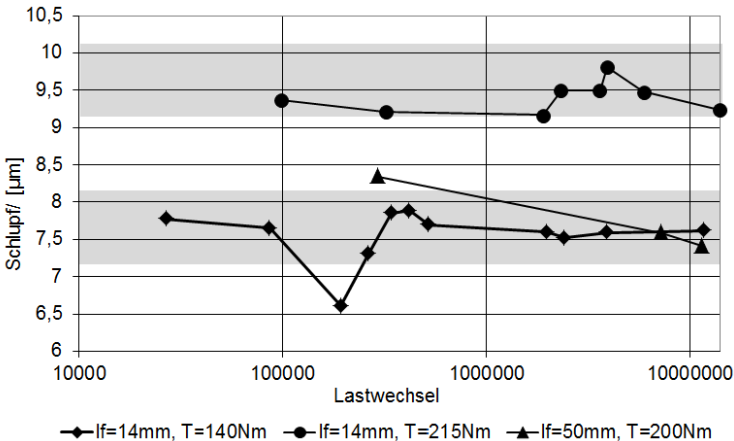


Bild 4: Messergebnisse der Schlupfmessung

Die Messergebnisse stimmen mit den berechneten Werten aus der FE-Simulation überein. Zu erkennen ist eine konstante Schlupfamplitude über die gesamte Prüfdauer. Obwohl ein Trainiereffekt der Versuchsproben nachgewiesen werden konnte und damit eine Erhöhung des

Reibkoeffizienten μ in der Verbindungsfuge stattfindet ist dieser Effekt nicht durch die Messung des Schlupfes nachweisbar. Erklärt wird dieser Zwiespalt mit dem im Vergleich zu konventionellen Pressverbindungen geänderten Passfugendruckverlaufes über die Fügelänge der Verbindung. Zum Nabenrand hin zeigen innenhochdruckgefügte Pressverbindungen einen Abfall des Passfugendruckes auf. Eine Erhöhung des Reibwertes im Nabenein- und Auslauf bewirkt somit keine bzw. eine vernachlässigbare Änderung des Schlupfverhaltens.

Die gewonnenen Erkenntnisse eines konstanten Schlupfverlaufes über die Lebensdauer waren grundlegend neu und führten zu einer Änderung der Berechnung des Schädigungsverhaltens innenhochdruckgefügter Pressverbindungen.

3 Zusammenfassung

Das Messverfahren der Laserinterferometrie ermöglicht die einfache und genaue Messung des Schlupfes in einer Welle-Nabe-Verbindung. Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens zur Dimensionierung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen wurde die Schlupfmessung mittels Laserinterferometer durchgeführt um Erkenntnisse über die Vorgänge im Kontakt zu erlangen und die numerischen Modell zu verifizieren. Der Artikel beschreibt das Messprinzip und stellt erste Ergebnisse der Schlupfmessung an einer innenhochdruckgefügten Probe vor. Durch das Verfahren konnte ein tiefgreifendes Verständnis der Vorgänge in der Kontaktfuge gewonnen werden.

4 Literatur

/1/ Polytec Schulungsunterlage Einpunkt-Laservibrometer, 2007