

Messung der Relativbewegung zwischen einer Achse und Nabe

Stök, M.; Schäfer, G.; Lohrengel A.

Das IMW war an der maschinenakustischen Ursachenfindung von knackenden Geräuschen in einer Industrieanlage beteiligt. Aufgrund des geringen zur Verfügung stehenden Bauraums ist ein Sensor entwickelt worden, der die Relativbewegung zwischen einer Achse und Nabe messen kann. Als Ursache für die Geräuschentwicklung konnte mit der Messung eine diskontinuierliche axiale Relativbewegung an der äußeren Nabenkante nachgewiesen werden.



The IMW was involved in identifying the origin of cracking noises in an industrial plant. Due to the limited space available, a sensor was developed that can measure the relative movement between an axle and hub. A discontinuous sliding movement on the outer edge of the hub can be detected as the cause of the noise.

Problemstellung

Das Institut für Maschinenwesen ist gebeten worden bei der Ursachensuche für die Geräuschentwicklung in einer Industrieanlage zu helfen. Im Vorfeld sind verschiedene Hypothesen zwischen dem Auftraggeber und dem IMW diskutiert worden, was für die knackenden oder metallisch schlagenden Geräusche verantwortlich ist.

Eine Hypothese zur Schallursache postuliert, dass es bei dem Presssitz der Achsen-Nabe-Verbindung bei einer Umdrehung an den Kanten zu einer axialen Mikrogleitbewegungen unter Stick-Slip-Konditionen kommt. Durch den plötzlichen Übergang im Kontakt von der Haftreibung in die Gleitreibung geht ein Impuls durch die Nabe, der an großen, frei schwingfähigen Blechen von Körperschall in Luftschall übergeht, was als Knacken oder metallischer Schlag wahrgenommen werden kann. Die axiale Relativbewegung von der Achse zur Nabe im Kantenbereich soll zur Überprüfung der Hypothese messtechnisch erfasst werden.

Anforderungen

Auf einer Achse sitzt eine in axialer Richtung unterbrochene Nabe, die durch eine näherungsweise räumlich konstante Querkraft beansprucht wird. Die Nabe sitzt auf Achsabsätzen, die mit einem Übergangsradius verrundet sind. Zwischen den beiden Nabenabschnitten hat die Achse eine verrundete Nut. An den Außenseiten ist die

Achse gelagert, wodurch der Sensor nur auf dem Übergangsradius appliziert werden kann. Der Abstand zwischen der Nabe und dem Lagergehäuse beträgt 40 mm. In radiale Richtung steht quasi unbegrenzter Bauraum zur Verfügung. Die halbe symmetrische Achsen-Nabe-Verbindung ist in Abbildung 1 zu sehen.

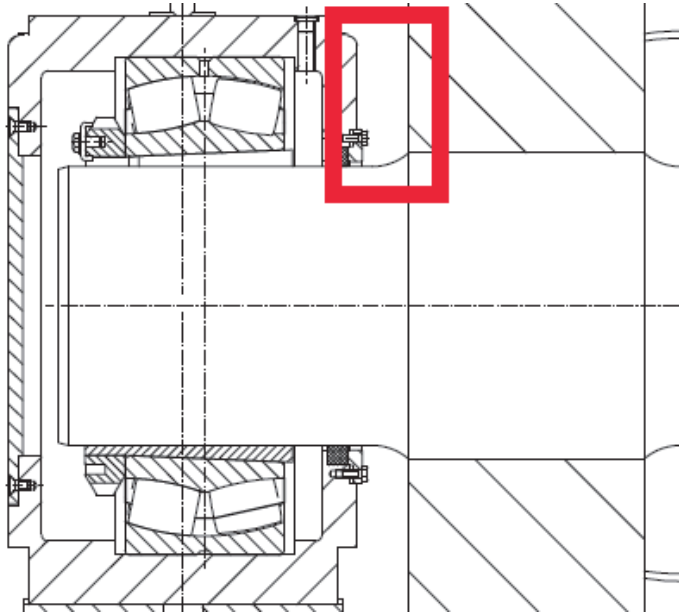


Abbildung 1: Die zu untersuchende Achse-Nabe-Verbindung mit markiertem Bauraum für den Sensor

Der Sensor soll die Relativbewegung zwischen der Achse und der Nabe möglichst direkt an den Kontaktflächen messen, damit eine Winkelschiefstellung zwischen Achse und Nabe aufgrund der Querkraft, nicht mitgemessen wird.

Aus der Simulation der Pressverbindung wird eine Relativbewegung zwischen der Nabenkante und der Achse von $\pm 34,5 \mu\text{m}$ erwartet. Der Sensor sollte diesen Bereich also gut auflösen und muss gleichzeitig in den Bauraum passen. Abstandstaster oder Lasersensoren entfallen hierfür aufgrund Ihrer Längsausdehnung, sodass eine Eigenentwicklung geplant wurde.

Sensorentwicklung

Um den Sensor nicht unnötig kompliziert zu bauen, sollen handelsübliche DMS auf einem Körper verklebt werden. In /1/ wird zur Messung paralleler Kräfte der

Doppelbiegebalken in unterschiedlichen Ausführungen vorgeschlagen. Alle Entwürfe eint eine Bohrung in der Mitte des Sensors. Wird der Doppelbiegebalken auf Scherung belastet, bilden sich an jeder Stirnfläche des Sensors zwei Bereiche aus, in dem der Biegebalken einmal auf Zug und einmal auf Druck belastet wird. Diese vier Bereiche können zu einer Biegevollbrücke verschaltet werden. In Abbildung 2 sind die beiden Dehnungsbänder und die DMS-Positionen auf der Stirnseite des Sensors erkennbar.

Aufgrund der Kreisbohrung würde der Sensor jedoch recht hoch werden und nicht mehr die Verschiebung möglichst dicht an der Nabenkante messen. Mit einer FEM Simulation ist die Geometrie des Sensors iterativ optimiert worden. Das Ziel war es die Stirnseiten des Sensors und die zu applizierende Fläche möglichst zu minimieren, gleichzeitig soll die Dehnungen über die Messgitterlänge möglichst homogen sein. Dies stellt einen Zielkonflikt dar, denn eine homogene Dehnung über das Messgitter wird durch einen großen Bohrungsdurchmesser und eine kleine Stirnfläche über einen möglichst kleinen Bohrungsdurchmesser erreicht.

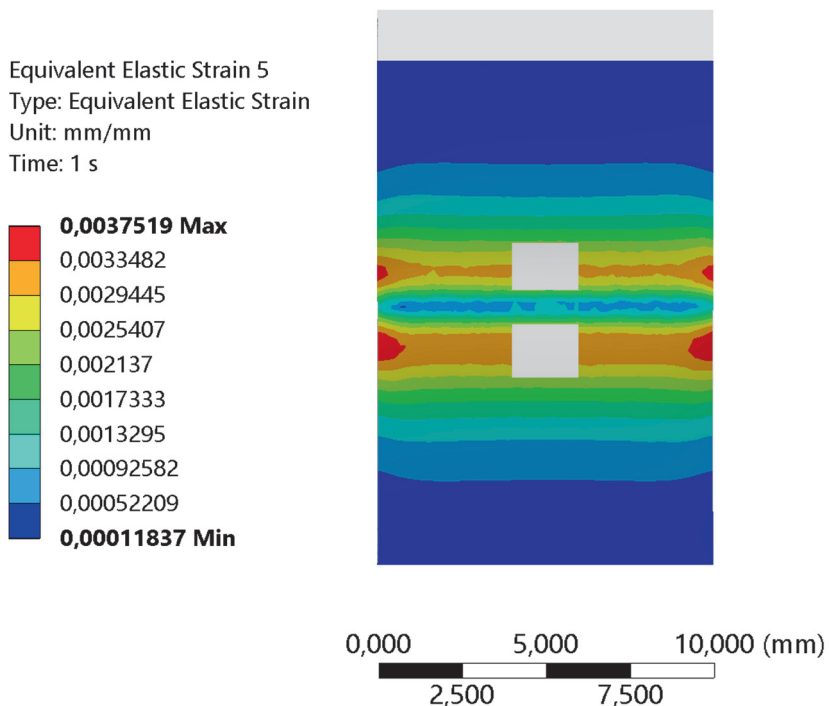


Abbildung 2: Stirnseite des Sensors mit den beiden Dehnungsbändern und der Position der Messgitter als weiße Flächen

Die kleinsten linearen Messgitter mit Anschlussbändchen haben nur eine Länge von 0,3 mm auf einem 2 x 1,2 mm Träger. Hinzu kommt dann jedoch noch ein Lötstützpunkt, der die zu beklebende Fläche erheblich vergrößert. Eine Alternative stellen vorverkabelte DMS dar, bei denen die kürzesten linearen Messgitter eine Länge von 1 mm auf einem 3,8 x 3,5 mm Träger haben. Aus der Größe der DMS ergibt sich der minimale Abstand zwischen den beiden Dehnungsbändern und damit der minimale Bohrungsdurchmesser.

Jeder Sensor ist, inklusiver der gesamten Messkette, individuell eingemessen worden um das von der Biegevollbrücke gemessene Signal in einen Weg umrechnen zu können.

Messung an der Achsen-Nabe-Verbindung

Auf der Achse sitzen zwei Nabenabschnitte, an deren Außenseite zum Lager hin jeweils ein Sensor appliziert wird. Mit diesen sollen die Relativbewegungen zwischen der Achse und der Nabe gemessen werden. Da die Geräuschentwicklung nur an einzelnen Verbindungen auftritt, wird zu Vergleichszeiten an knackenden und an geräuschlosen Verbindungen gemessen. Insgesamt werden 4 Relativbewegungen aufgezeichnet. Die Verläufe der vier Signale sind in Abbildung 3 für die geräuschlosen und in Abbildung 4 für die knackende Verbindung dargestellt. Bei den Verläufen der Verschiebungen B und C sind Peaks zu erkennen, die auf eine Übertragungsunterbrechung der Telemetrie zurückzuführen sind und zu einem Vollausschlag des Signals führen. Diese treten regelmäßig an der immer gleichen Position auf.

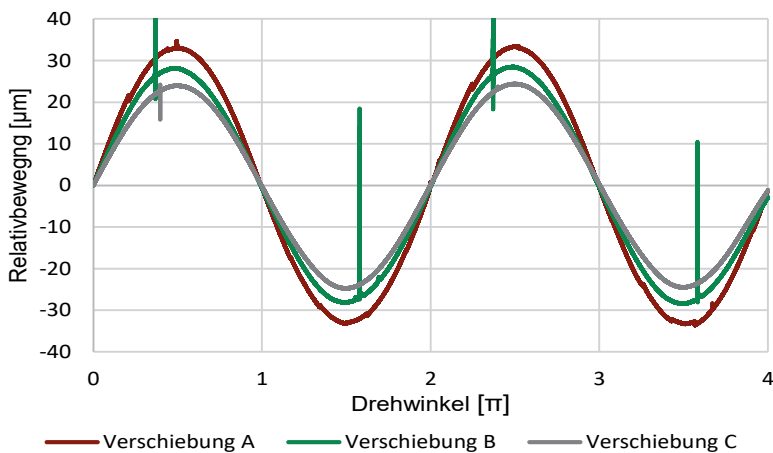


Abbildung 3: Gemessene Relativbewegungen an den Verbindungskanten geräuschloser Verbindungen

In allen vier Pressverbindungen kommt es an der äußeren Kante der Pressverbindung zu einer Relativbewegung. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Pressverband versagt und die gesamte Nabe sich axial auf der Achse verschiebt. Die Relativbewegung resultiert aus den unterschiedlichen Durchbiegungen der Achse und Nabe resultierend aus den unterschiedlichen Biege widerstandsmomenten. Die Achse biegt sich unter der Querkraft stärker durch als die Nabe. In einem weiten mittleren Bereich sitzt die Nabe fest auf der Achse, nur zu den Rändern hin kommt es zu einer relativen Verschiebung der Oberflächen. An drei Verbindungen ist die Verschiebung ein kontinuierliches Gleiten, welches in Abbildung 3 zu sehen ist. Bei der Verbindung D kommt es immer wieder zu Sprüngen im Signal, vgl. Abbildung 4. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Gleitreibungs- und Haftreibungskoeffizient deutlich unterschiedlich sind. Es kommt somit immer wieder zu einem Anhaften der Oberflächen (Stick-Slip). Es bauen sich Kräfte auf, bis diese groß genug sind die Haftung zu überwinden und durch das schlagartige Rutschen ein Impuls entsteht, der als Körperschall durch die Nabe läuft. An Oberflächen, die frei schwingen können, wird der Körperschall in Luftschall gewandelt, was als ein Knacken wahrgenommen wird.

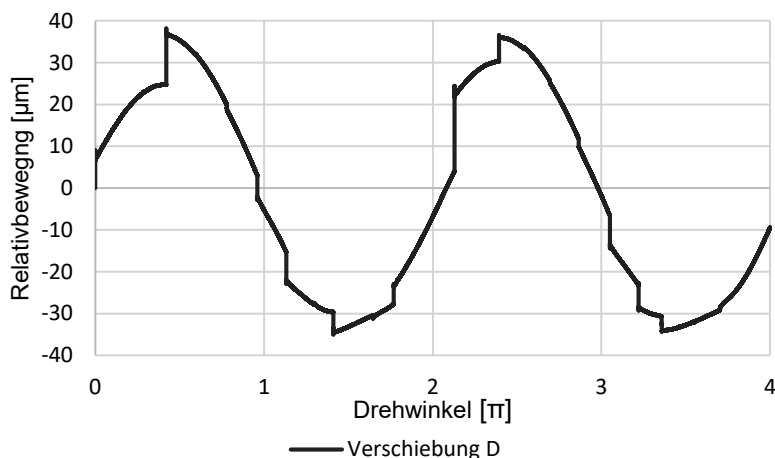


Abbildung 4: Gemessene Verschiebung D an der knackenden Verbindung

Um sicher zu gehen, dass die Sprünge im Wegsignal der Achse-Nabe-Verbindung mit den Knackgeräuschen übereinstimmen sind an der Nabe zusätzlich Beschleunigungssensoren angebracht worden. Um auch kleine Sprünge im Wegsignal gut sichtbar zu machen, ist die Ableitung des Verschiebungssignals gebildet worden. Dieses ist mit den Beschleunigungssignalen gegenübergestellt worden. Bei jedem Sprung im Wegsignal ist auch ein Peak im Beschleunigungssignal zu finden. Es ist jedoch nicht bei jedem Beschleunigungspeak ein Sprung im Wegsignal. Dies liegt darin begründet, dass über den Umfang der Nabe nur ein Verschiebungssensor appliziert wurde und somit nur die Verschiebung an diesem einem Punkt gemessen

wird. Eine Verschiebung die nicht hier stattfindet kann vom Sensor nicht erfasst werden und somit ist kein Sprung im Wegsignal vorhanden. In Abbildung 5 sind die beiden Signale gegenübergestellt.

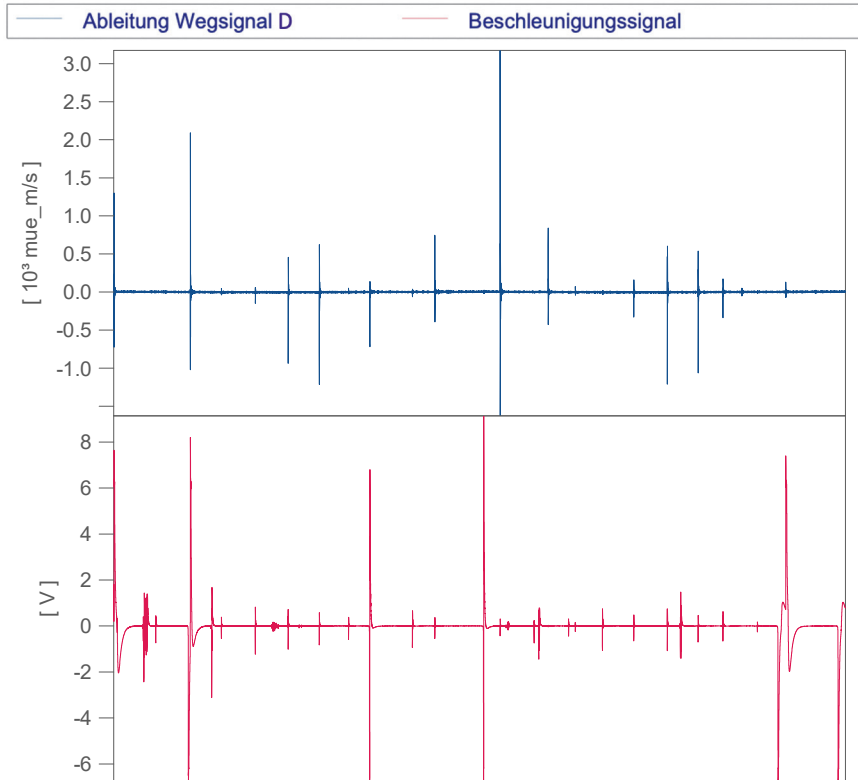


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Ableitung des Weg- und des Beschleunigungssignals

Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse

Die Relativbewegung im Kontakt von Achse und Nabe kann in einer Simulation berechnet werden, vgl. Abbildung 6. Das gelöste Modell wurde dem IMW zur Auswertung vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt. Die gemessene axiale Verschiebung in der Verbindungsfuge kann in der Simulation als „Sliding distance“ also Verschiebungsweg mit dem Kontakt-Tool ausgewertet werden. Die Sliding distance wird aus den drei im Raum möglichen Verschiebungen, per dreidimensionalem Pythagoras, berechnet. Für den zylindrischen Achse-Nabe-Kontakt sind dies die

axiale, radiale und tangentielle Verschiebung. Da die Verbindung als eine Presspassung ausgeführt ist, entfällt eine radiale Verschiebung. Da kein Drehmoment übertragen wird, ist eine tangentielle Verschiebung von der Achse und Nabe ebenfalls zu vernachlässigen. Die relative Verschiebung kann somit nur noch eine axiale Verschiebung der Oberflächen zueinander sein. In der Mitte der Pressverbindung ist ein dunkelblauer Bereich zu sehen, in diesem kommt es zu keiner Verschiebung. Der Pressverband versagt somit nicht in dem Sinne, dass sich die gesamte Nabe axial verschiebt.

An der linken Seite des dargestellten Kontaktes befindet sich das Achsenende im Lager. Die Verschiebung oben im Kontakt beträgt etwa 36 µm, seitlich in der neutralen Faser 11,5 µm und unten 56 µm. Die unterschiedlich starke Verschiebung zwischen der Ober- und der Unterseite des Kontaktes liegt darin begründet, dass der Kontakt reibbehaftet ist. Aufgrund des höheren Drucks auf der oberen Kontaktseite wirken höhere Reibkräfte, die ein Abgleiten der Flächen vermindern. Gegenätzlich ist es unten, aufgrund des geringeren Anpressdrucks können die Flächen hier besser aneinander abgleiten. In der neutralen Faser entsteht ein „Offset“ durch die Durchbiegung im Vergleich zur unbelasteten Verbindung.

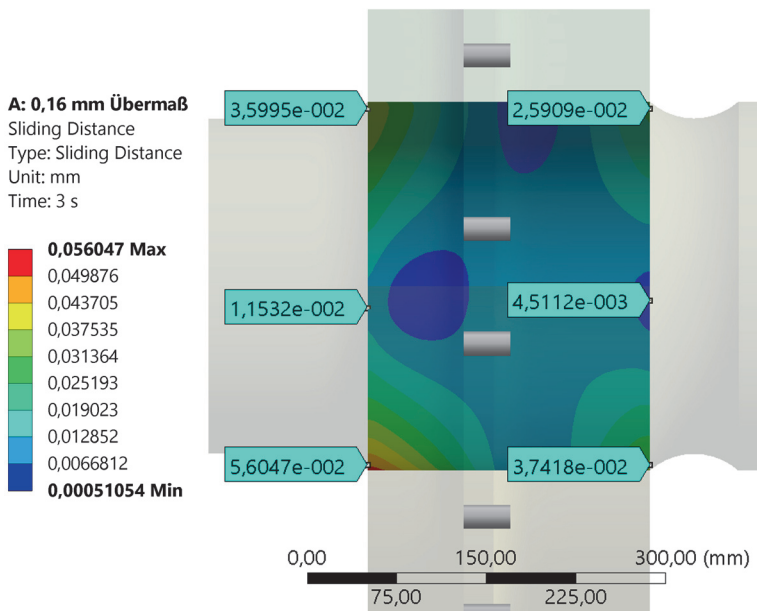


Abbildung 6: Relativbewegung der Kontaktflächen im Pressverband

Um die Amplitude beim Umlauf der Achse zu berechnen, wird die Verschiebungsdifferenz zwischen der oberen Verschiebung und der neutralen Faser, sowie der neutralen Faser und der unteren Verschiebung berechnet. Damit ergibt sich die Amplitude zu

$$A = \frac{(36 \mu\text{m} - 11,5 \mu\text{m}) + (56 \mu\text{m} - 11,5 \mu\text{m})}{2} = 34,5 \mu\text{m}. \quad (1)$$

Die gemessene Amplitude an den Verbindungen treffen dieses Ergebnis sehr gut.

Zusammenfassung

Mit dem am IMW entwickelten und gefertigten Sensor konnte der Nachweis erbracht werden, dass es zu einer diskontinuierlichen Relativbewegung zwischen der Achse und der Nabe an der äußeren Kante des knackenden Pressverbands kommt. Die Messungen stimmen dabei gut mit den aus Simulationen erwarteten Verschiebungen überein.

Literatur

- /1/ HBM GmbH: Der Weg zum Messgrößenaufnehmer, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2008