

Dimensionierung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen mit dominierendem Kraftschluss unter dynamischen Lasten

Hilgermann, J. L.; Lohrengel, A.

Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen zeichnen sich durch ihr geringes Gewicht und ihre hohe Übertragbarkeit sowie ein kostengünstiges und modulares Fertigungskonzept aus. Trotz dieser entscheidenden Vorteile gegenüber der klassischen Pressverbindung fehlen wichtige Dimensionierungsvorschriften. Die Anwendung der Verbindung ist damit auf wenige Spezialanwendungen vor Allem in der Massenindustrie beschränkt. Der Artikel fasst die bisherigen Arbeiten zur Dimensionierung kraftschlüssig innenhochdruckgefügter Pressverbindungen zusammen.



Internal-high-pressure press-fit-connections are characterized by their low-weight-constructions, their high load transfer capability as well as their cost-effective and modular manufacturing concept. Despite these advantages, in contrast to classical press-fit-connections, dimensioning rules are missing. Application of the connection is limited to few applications in mass production. This article summarises previous research work. A review on research results for dimensioning internal-high-pressure press-fit-connections is given.

1 Das Fügeverfahren des Innenhochdruckfügen

Das Innenhochdruckfügen gehört nach VDI-Richtlinie 3146 zu den Innenhochdruckverfahren. **Bild 1** stellt das Einteilungsschema der Innenhochdruckverfahren dar.

Innenhochdruckfügen erfolgt durch plastische Aufweitung einer Hohlwelle unter Innendruck wodurch sich nach Druckrücknahme zwischen Welle und Nabe eine kraftschlüssige Verbindung ausbildet. **Bild 2** stellt den Fügeprozess qualitativ dar. Vor dem Fügen werden Welle und Nabe zu einander ausgerichtet. Beide Bauteile passen locker ineinander. Sie sind an ihren Kontaktflächen mit einem so genannten Fügepiel toleriert, welches die einfache Positionierung zu einander ermöglicht. Die Dichtungen werden mit dem Werkzeug in

der Welle ausgerichtet und fixiert, so dass ein Hohlraum in der Welle unterhalb der Nabe abdichtet wird. **Bild 2-I** zeigt den Zustand vor dem Fügen. Über die Ölbohrung im Inneren des Werkzeuges wird der Innenraum zwischen den Dichtungen mit Druck beaufschlagt. Hierbei weitet sich die Welle plastisch auf. Nachdem das Fügenspiel zwischen Welle und Nabe überwunden ist weiten sich beide Bauteile gemeinsam weiter auf: die Welle plastisch, die Nabe elastisch. **Bild 2-II** stellt den Zustand der Druckbeaufschlagung und des Fügens dar. Nach der Druckrücknahme verbleiben in der Nabe tangential Zugspannungen die für einen festen Presssitz auf der Welle sorgen. Beide Bauteile sind kraftschlüssig mit einander verbunden (**Bild 2-III**).

Die für das Fügen erforderlichen Drücke können 4000bar und darüber hinaus betragen. Entscheidend hierfür sind die Steifigkeiten von Welle und Nabe sowie der technisch erforderliche Pressfugendruck nach dem Fügen. In industriellen Anwendungen wird ein möglichst niedriger Fügedruck angestrebt um eine lange Standzeit der Hochdruckdichtungen zu gewährleisten. Übliche Fügedrücke liegen im Bereich von 1500bar bis 3000bar.

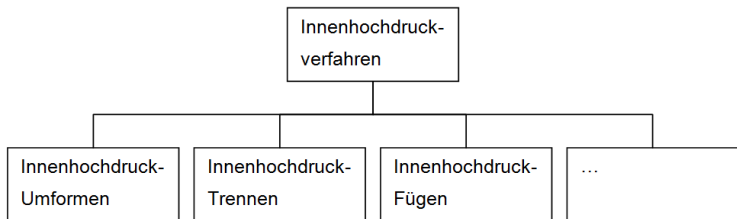


Bild 1: Einteilungsschema der innenhochdruckverfahren nach VDI-3146

Das Verfahren bringt fertigungstechnische Vorteile zu herkömmlichen Pressverbindungen. Die Schaffung eines kraftschlüssigen Presssitzes erfordert gewöhnlich auf einander abgestimmte Presspassungen deren Fertigung zumeist kostspielig ist. Das Fügen mehrerer Naben auf einer Welle erfordert Wellenabsätze wodurch sich Gewicht und Bau- raum der Welle erheblich erhöht. Für die Ausbildung einer kraftschlüssigen Verbindung durch Innenhochdruckfügen ist die Einhaltung üblicher Fertigungstoleranzen an den Kontaktflächen von untergeordneter Bedeutung. Das Fügenspiel zwischen der Welle und der Nabe ermöglicht das einfache Positionieren der Bauteile zueinander. Das Fügen mehrerer Naben auf einer Welle ist hierdurch ohne zusätzliche Wellenabsätze möglich. Die Variationsbreite der Prozessparameter ermöglicht die Einstellung des Passfugendruckverlaufes und beeinflusst so die Kerbwirkung zwischen den zu fügenden Bauteilen. Eine große Drucküberstandslänge generiert am Fugenrand ein Kanten-

kneifen, ähnlich dem bei konventionellen Pressverbindungen. Geringe Drucküberstandslängen vermindern die Kerbwirkung und schaffen einen Passfugendruckabfall zum Nabenrand hin.

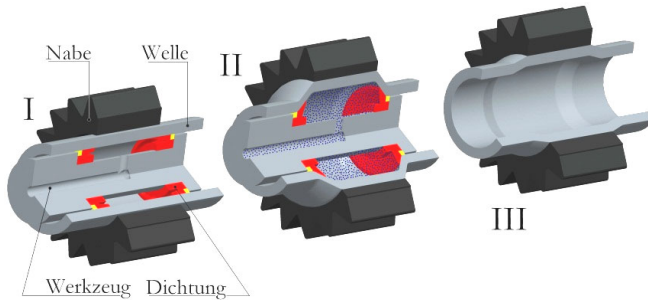


Bild 2: Prinzipdarstellung des Innenhochdruckfügens

2 Schädigungsmechanismen

Am Institut für Maschinenwesen wurden umfangreiche Versuche unter dynamischer Torsion und Umlaufbiegung durchgeführt, die eine Erweiterung der Versuchsdaten und des Wissens zur dynamischen Übertragbarkeit schaffen.

Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen war die Lebensdauerbewertung hinsichtlich des Einflusses von Passungsrost infolge eines Relativschlupfes zwischen Welle und Nabe und die daraus resultierende Schädigung. Für die Schaffung eines umfangreichen Verständnisses der Vorgänge im Kontakt wurden FE-Simulationen durchgeführt, welche an Bauteilversuchen und mit Hilfe aufwendiger Messtechnik verifiziert wurden. Der Schlupf in der Verbindungsfuge wurde mit Hilfe eines Laservibrationsinterferometers im Torsionsschwingversuch gemessen und mit den Ergebnissen der FE-Untersuchung verglichen. Des Weiteren wurde das Klaffmoment durch Messung der Radialdehnungen experimentell aufgenommen und mit den Computermodellen verglichen. Ebenso wurde das experimentell ermittelte statische Rutschmoment zur Verifikation der numerischen Modelle herangezogen. In allen Fällen wurde eine Übereinstimmung der Ergebnisse aus Versuch und Simulation gefunden und so das numerische Modell verifiziert.

In den durchgeführten Bauteilversuchen wurden drei wesentliche Schädigungsmechanismen und Versagensursachen gefunden:

- das Durchrutschen der Nabe infolge von Verschleiß unter umlaufender Biegelast

- der Bruch der Welle als Folge einer unzulässig hohen Umlaufbiegespannung und Kerbwirkung am Nabenrand
- das Reißen der Wellen im unbeanspruchten Wellenabschnitt infolge einer unzulässigen Erwärmung durch Torsionswechselschubspannungen

Ein Bauteilversagen als Folge einer Passungsrostbildung konnte nicht nachgewiesen werden. Zwar trat in einigen Proben eine Passungsrostbildung auf, diese führte jedoch bis zur untersuchten Schwingspielzahl von 10^7 Lastwechseln nicht zum Bauteilversagen.

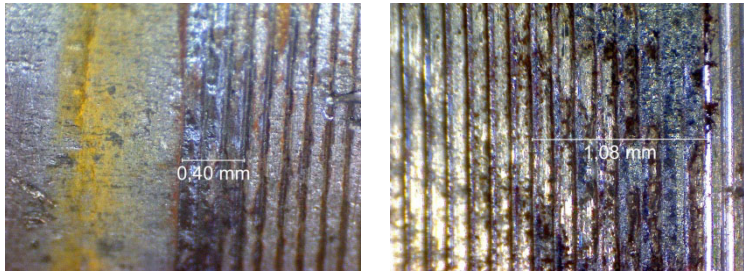


Bild 3: Oberfläche der Welle links (206-fache Vergrößerung) und Nabe rechts (216-fache Vergrößerung) nach dynamischer Beanspruchung unter Torsionslast

Bild 3 zeigt die Oberflächen von Welle und Nabe bei etwa 200-facher Vergrößerung nach dynamischer Torsionslast dar. Deutlich erkennbar sind die Drehriefen auf der Oberfläche der Nabe. Durch den Fügevorgang und der einhergehenden plastischen Verformung der Welle formen sich diese Riefen in die Welle ein. Der Unterschied in der Oberflächencharakteristik der Welle zwischen freiem Wellenende links und Fügestelle rechts ist ausgeprägt. Zudem finden sich Oberflächenschäden im Bereich des Nabenrandes auf der Wellenoberfläche im Bereich bis etwa 0,4mm ins Nabeninnere. Oberflächenschäden finden sich ebenso auf der Nabe. Korrosionsspuren sind insbesondere auf der Wellenoberfläche erkennbar. Diese befinden sich direkt an der Nabenkante und in den ausgeformten Drehriefen. Die Korrosion ist im Vergleich zu den übrigen Oberflächenschäden nicht ausgeprägt und hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Lebensdauer.

Bild 4 zeigt die Oberflächen von Welle und Nabe bei etwa 200-facher Vergrößerung nach Umlaufbiegebelastung. Die Drehriefen der Welle sind durch Materialabtrag und Verschleiß nicht mehr erkennbar. Die Oberfläche der Welle ist ebenso verschliffen und weist keine ausgeformten Drehriefen mehr auf. Auf der Welle ist im Nabenübergang ein schmaler Korrosionsstreifen mit Rissen erkennbar. Ausgehend vom Korrosionsstreifen nach links war die Fügestelle zwischen Welle und

Nabe, rechts vom Korrosionsstreifen war das freie Wellenende. Auf der Nabe ist am Nabenrand, **Bild 4** – rechts unten, ein schmaler korrosionsstreifen erkennbar. Risse konnten hier jedoch nicht nachgewiesen werden. Die Risse in der Welle führten zum Bauteilversagen.

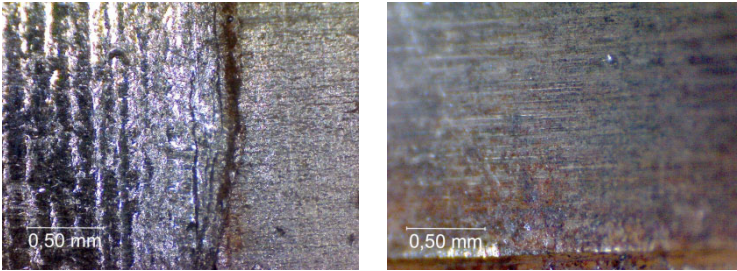


Bild 4: Oberfläche der Welle links (200-fache Vergrößerung) und Nabe rechts (206-fache Vergrößerung) nach dynamischer Beanspruchung unter Umlaufbiegung

Bild 5 zeigt den Verlauf des Fatigue-Fretting-Damage-Parameters (FFDP) und des modifizierten FFDP (mFFDP) über die normierte Nabenlänge 1 bei dynamischer Torsionslast. Die absoluten Werte der Schädigungsparameter wurden an ihren jeweiligen Maximalwerten normiert. Die Ergebnisse lassen sich qualitativ auch auf andere Bauteilgrößen und Laststufen übertragen.

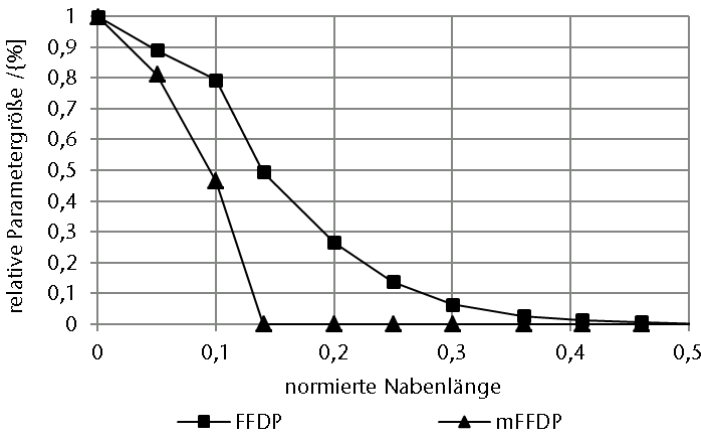


Bild 5: FFDP und modifizierter FFDP relativer Schädigungsparameter über die normierte Nabenlänge unter dynamischer Torsionslast

Zum Nabenrand bei $x=0$ stellt sich bei beiden Verläufen ein absolutes Maximum ein. Vergleicht man die Werte aus **Bild 5** mit denen mikroskopischen Aufnahmen in **Bild 3** ist eine gute Übereinstimmung erkennbar. Auf Grund der lokalen Schädigung am Nabenrand und dem steileren Verlauf des mFFDP zum Nabenrand hin wird das Schädigungsverhalten der Oberfläche durch den mFFDP etwas besser wiedergegeben. Der potentiell gefährdete Ort wird mit dem mFFDP gut wiedergegeben.

3 Analytische Ansätze zur statischen Auslegung

Für die Bestimmung des Passfugendruckes existieren in der Literatur verschiedene Ansätze. Wesentliche Arbeiten wurden von /1/, /2/ und /3/ veröffentlicht.

Die in /2/ erläuterte Formel dient einer konservativen Dimensionierung und gibt die verlässlichsten Werte für den mittleren Passfugendruck:

$$p = Y_{Dil} Y_{IF} Y_{ReI} Y_{pi} \frac{\left[p_i - k_{f,I} \ln \left(\frac{1}{Q_I} \right) \right] \frac{1}{E_A} \left(\frac{1+Q_A^2}{1-Q_A^2} + \nu_A \right) + \frac{2 \cdot Q_I^2}{E_I (1-Q_I^2)} k_{f,I} \ln(Q_I)}{\frac{1}{E_A} \left(\frac{1+Q_A^2}{1-Q_A^2} + \nu_A \right) + \frac{1}{E_I} \left(\frac{1+Q_I^2}{1-Q_I^2} + \nu_I \right)}$$

Die Faktoren Y_{xx} beschreiben empirische Funktionen zur Berücksichtigung der Quereinflüsse aus der Fügelänge, der Streckgrenze, der Drucküberstandslänge und dem Fügedruck.

Bild 6 stellt den analytisch berechneten Passfugendruck den mit der Finiten-Elemente-Methode numerisch ermittelten Druck gegenüber. Die Balken entsprechen jeweils den drei oben beschriebenen analytischen Ansätzen. Die eingetragene Linie entspricht dem Ergebnis aus der numerischen Berechnung. Der analytisch ermittelte Passfugendruck stimmt für kleine Drucküberstandslängen gut mit der numerischen Lösung überein. Für große Drucküberstandslängen ergibt sich eine große Diskrepanz zwischen dem Ergebnis des analytischen Modells und dem numerischen Ergebnis. Die in /2/ vorgestellte Gleichung überschätzt hierbei den mittleren Passfugendruck nicht und stellt damit ein sicheres konservatives Auslegungskriterium dar. Eine erste Abschätzung der Übertragbarkeit sowie eine erste Parameterstudie innenhochdruckgefügter Pressverbindungen können analytisch mit der oben angegebenen Formel erfolgen.

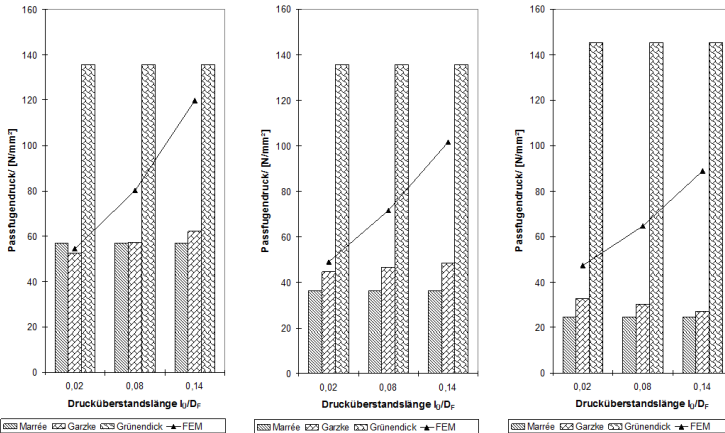


Bild 6: Vergleich der analytischen Lösung des mittleren Passfugendruckes mit der Finiten-Elemente-Simulation ($Q_I=0,76$, $p_r=3000\text{bar}$, $s_f/D_F=0,002$): links: $l_f/D_F=0,56$ und $Q_A=0,72$; mitte: $l_f/D_F=0,80$ und $Q_A=0,63$; rechts: $l_f/D_F=2,00$ und $Q_A=0,56$

Die während des Fügens vollplastifizierte Welle fließt in die bearbeitete Oberflächenkontur hinein und wirkt somit verzahnend. Wird der Innendurchmesser der Nabe gedreht so ergeben sich für die tangentiale und axiale Wirkrichtung unterschiedliche Reibkoeffizienten. Die Verwendung von geschliffenen Naben in Verbindung mit dem Innenhochdruckfügen ist unüblich.

4 Dynamische Beanspruchbarkeit

/3/ stellt erste Arbeiten zur Dimensionierung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter umlaufender Querkraftbiegung vor. In seiner Arbeit stellt er eine Dimensionierungsgleichung zur Bestimmung der tribologisch zulässigen Grenzbiegekraft $F_{br,gr}$ vor:

$$\frac{F_{br,gr}}{F_{bk}^*} = 1,7 \sqrt{\frac{1}{A(p_F^*)} \cdot \left(\frac{s_{0,zul}}{D_F} - 6 \cdot 10^{-6} \right)}$$

/3/ konnte für $s_{0,zul}/D_F=33 \cdot 10^{-6}$ keine Schädigung infolge Passungsrost feststellen. Neuer Untersuchungen am Institut für Maschinenwesen zur Übertragbarkeit innenhochdruckgefügter Pressverbindungen und umlaufender Querkraftbiegebelast zeigt die gute Abbildung des Schädigungsverhalten über eine Wöhlerlinie.

/2/ beschreibt erste Versuchsergebnisse zur dynamischen Übertragbarkeit von Drehmomentlasten an innenhochdruckgefügtten Pressverbindungen und fand erste Oberflächenschädigungen ab einer dynamischen Lastziffer von $\eta_{\text{dyn}} > 1,5$. Die Arbeiten beziehen sich auf eine elastische Aufweitung der Nabe. Neue Untersuchungen am Institut für Maschinenwesen konnten bei Fügedrücken die zur teilplastischen Aufweitung der Nabe führten keine nennenswerten Schädigungen der Oberflächen feststellen.

5 Zusammenfassung

Die analytische Dimensionierung innenhochdruckgefügtter Pressverbindungen mit dominierendem Kraftschluss wurde für statische und dynamische Betriebslasten vorgestellt.

Die Dimensionierung unter dynamischen Lasten erfolgt getrennt für Torsion und Biegung. Unter dynamischer Torsionswechsellast bei elastischer Aufweitung der Nabe, ist ab einer dynamischen Lastziffer $\eta_{\text{dyn}} > 1,5$ mit Oberflächenschäden und dem Versagen der Verbindung zu rechnen. Für Welle-Nabe-Verbindungen mit teilplastischer Aufweitung der Nabe konnten keine nennenswerten Schädigungen an der Fügeoberfläche nachgewiesen werden.

6 Literatur

- /1/ Marré, M.: Grundlagen der Prozessgestaltung für das Fügen durch Weiten mit Innenhochdruck. Dissertation 2009. TU Dortmund. Shaker Verlag. ISBN 978-3-8322-8361-2
- /2/ Garzke, M.: Auslegung innenhochdruckgefügtter Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung. Dissertation 2001. TU Clausthal. VDI-Verlag. ISBN 3-18-335001-7
- /3/ Grünendick, T.: Die Berechnung innenhochdruckgefügtter Pressverbindungen. Dissertation 2004. TU Clausthal. Papierflieger. Clausthal-Zellerfeld. 2005
- /4/ Paysan, G.: Ein Wirkzonenkonzept zur Simulation des Verschleiß- und Tragverhaltens reibkorrosionsgefährdeter Maschinenelemente. Dissertation. Berlin. 2000
- /5/ Vidner, J.; Leidich, E.: Enhanced Ruiz criterion for the evaluation of crack initiation in contact subjected to fretting fatigue. International Journal of Fatigue. Bd. 29 (2007) Seiten 2040-2049