

Innenhochdruckfügen - eine Versuchs-Parameterauswahl

Hilgermann, J.; Yanikömer, T.

Eine große Anzahl möglicher Versuchsparameter erfordert eine lange und intensive Versuchsdurchführung. Die Methoden der „Design of Experiments“ (DoE) helfen die notwendige Anzahl der Versuche zu verringern. Simulationstechniken helfen Haupteinflussparameter zu finden und Versuche durch sinnvolle Parameterkombinationen zu verringern. Im Vorfeld der Versuche werden wichtige Abhängigkeiten der Parameter untereinander qualitativ bewerten. Die Haupteinflussparameter werden ausgewählt und repräsentative Versuche durchgeführt. Dieses Vorgehen wird am Beispiel innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen dargestellt.



A great number of possible test parameters require long and intensive experimentation. Methods of “Design of Experiments” (DoE) help reducing the number of trials. Simulation technologies help finding the main influence parameters and though help reducing the number of experiments. In the run-up to experimentation the qualitative dependency on parameters among each other can be estimated. Main influencing parameters are chosen and representative experiments are carried out. Using the example of insight-high-pressure-fit shaft-to-collar-connections this procedure is being demonstrated.

1 Das Verfahren des Innenhochdruckfügens

Durch Aufweiten einer Hohlwelle unter Innendruck und plastischer Verformung der Welle verbleibt nach Druckrücknahme zwischen Welle und Nabe ein Passfugendruck.

Bild 1 zeigt schematisch den Fügeprozess des Innenhochdruckfügens. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet (Bild 1 a). Das Aufweitewerkzeug, die so genannte Fügsonde wird in der Welle unterhalb der Nabe positioniert. Die Sonde verfügt über zwei Dichtungen, die den Raum unterhalb der Nabe in der Welle abdichten. Durch die Sondenbohrung im Inneren des Werkzeuges wird ein Hydromedium unter Druck im verbleibenden Volumen zwischen der Welle und den Dichtungen zugeführt. Hierbei weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe auf (**Bild 1 b**). Nachdem das FügeSpiel überwunden ist, legt sich die Welle an die Nabe an und beide Bauteile expandieren weiter. Durch die gezielte Materialkombination wird die

Welle plastisch verformt, die Nabe weitet sich elastisch. Nach dem Erreichen des maximalen Fügedrucks und Halten des Drucks erfolgt die vollständige Druckrücknahme. Die Welle und Nabe federn zurück. Dabei verbleiben in der Nabe tangentielle Zugspannungen, die für einen festen Presssitz auf der Welle sorgen (**Bild 1 c**).

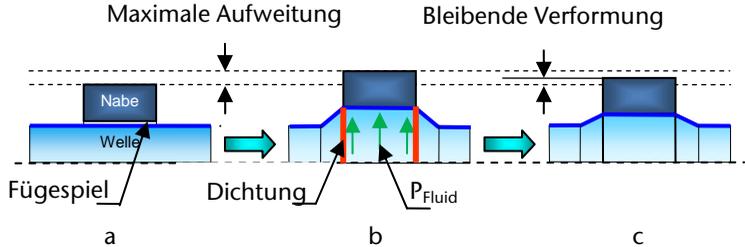


Bild 1: Prinzipskizze des Innenhochdruckfügens einer Welle-Nabe-Verbindung

1.1 Ziele des Forschungsvorhabens

Bisherige Forschungsarbeiten zum Thema Verschleiß- und Versagensursachen innenhochdruckgefügter Pressverbindungen betrachteten statische Lasten. In dem aktuellen Forschungsvorhaben soll eine Erweiterung der Untersuchungen auf die dynamische Übertragbarkeit von Drehmomenten und Umlaufbiegung erfolgen, um Aussagen über das Betriebsverhalten der Verbindung zu ermöglichen. Ziel des Vorhabens ist den Einfluss geometrischer sowie werkstoff- und prozesstechnischer Gegebenheiten auf das Verschleißverhalten darzulegen und eine Aussage zur Betriebsfestigkeit zu ermöglichen.

Zu diesem Zweck werden am Institut für Maschinenwesen theoretische und experimentelle Arbeiten durchgeführt.

2 Schädigungsmechanismen

Die Drehmomentein- bzw. -ausleitung im vorderen Teil der Pressverbindung bewirkt eine unterschiedliche Verdrillung, die schon bei relativ geringer Drehmomentbelastung zur Überschreitung der maximalen Reibschubspannung und damit zu einer Relativbewegung, dem so genannten Schlupf, führt.

Die Bereiche einer Pressverbindung, in denen eine Relativbewegung (Schlupf) zwischen Welle und Nabe unter Flächenpressung stattfindet, bezeichnet Gropp als Gleitzonen. Zur Ausbildung dieser Bereiche ist insbesondere der Kraftfluss maßgeblich verantwortlich. /3/

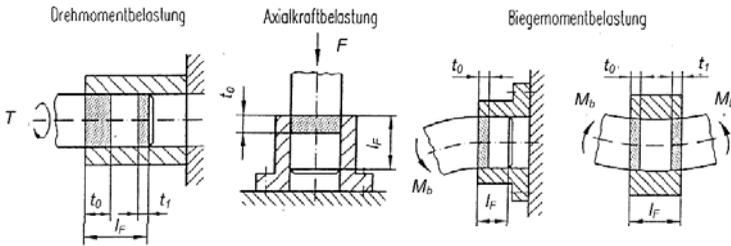


Bild 2: Pressverbindungen mit Gleitzonen bei Drehmoment-, Axialkraft- und Biegemomentbelastung (prinzipielle Darstellung), /3/

In diesen Gleitzonen führt die Relativbewegung bzw. das Aufeinanderreiben der Fügepartner unter Flächenpressung und dynamischer Beanspruchung zum Schwingungsverschleiß und schädigt das Bauteil durch Reibkorrosion. Obwohl in zahlreichen Forschungsvorhaben die besondere Bedeutung der Flächenpressung und des Schlupfes untersucht wurden, fehlen für unter Innenhochdruck gefügten Welle-Nabe-Verbindungen gesicherte Erkenntnisse über die qualitative Wirkung der Flächenpressung und den so genannten tribologisch unschädlichen Schlupf.

/4/, /5/ und /6/ beschreiben auf Basis grundlegender Untersuchungen zum Thema Reibdauerbruch, dass sowohl die Flächenpressung als auch der Schlupf einen relevanten Einfluss auf den Schwingverschleiß haben.

Unter dynamischer Belastung mit örtlichem Wechselgleiten verringern sich, mit zunehmender Lastwechselzahl, die Größen der Gleitzone, der Gleitwege und die Gleitarbeit. Mit dieser Verringerung ist eine Erhöhung der Übertragungsfähigkeit, dem so genannten Hochtrainieren, verbunden.

Bei trocken sowie bei mit Ölen bzw. Schmierstoffen gefügten Pressverbindungen bildet sich, bei einer dynamischen Belastung mit örtlichem Wechselgleiten entsprechender Größe, Passungsrost, welcher meist einen Anriss in der Welle zur Folge hat. Typisch für einen Reibdauerbruch ist, dass der Riss nicht direkt unterhalb der Nabe, sondern im geringen Abstand von der Nabenkante in der Gleitzone beginnt. Bei trocken gefügten Pressverbindungen tritt dies schneller auf als bei den mit Schmierstoffen gefügten Verbindungen.

3 Auswahl der Haupteinflussparameter für die DoE

Die wichtigsten Einflussgrößen der Reibdauerbeanspruchung sind die Interaktion von Belastungen (Passfugendruck) und gleichzeitigen Relativbewegungen (Schlupf) in der Kontaktzone /7/. Sowohl der Passfugendruck, als auch der Schlupf sind von einer Vielzahl von

Einflussparametern abhängig. Würden alle möglichen Parameter innerhalb einer DoE untersucht, so würde sich eine nicht mehr realisierbare Anzahl notwendiger Versuchen ergeben. Für die Auswahl geeigneter Parameterkombinationen werden am Institut für Maschinenwesen im Vorfeld der Versuchsdurchführung umfangreiche Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt. Ziel ist die qualitative Erfassung und Bewertung von Einflussparametern auf die Passfugendruckverteilung und den Schlupf.

Die wichtigsten Einflussparameter auf den Passfugendruck sind der Fügedruck p_F , die Nabelnänge l_F , das Nabdurchmesser Verhältnis Q_i/Q_a , die Drucküberstandslänge $l_{ü}$, die Werkstoffkombination und das Fügspiel s_F (vgl. /8/). **Bild 3** zeigt über der normierten Nabelnänge drei Passfugendruckverteilungen. Bei allen drei Verläufen wurden die Werkstoffkombination, der Fügedruck p_F und das Fügspiel s_F konstant gehalten. Aus der Variation der Nabelnänge l_F , des Nabdurchmesser Verhältnis Q_i/Q_a und der Drucküberstandslänge $l_{ü}$ ergeben sich drei unterschiedliche Passfugendruckverläufe.

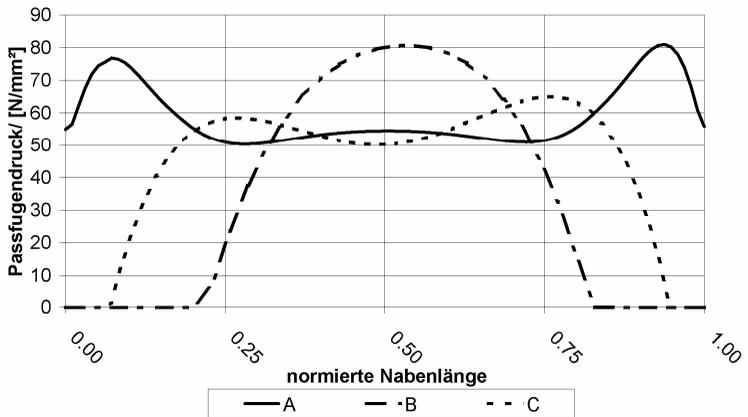


Bild 3: Passfugendruckverteilung bei einem Fügedruck von 2800bar, einem Fügspiel von 0,05mm, St52 Welle – 42CrMoV Nabe

- Verlauf A: dünnwandige, lange Nabe mit einer großen Drucküberstandslänge gefügt ($l_F/D_F=2$, $D_i/D_a=0,73$; 3mm Drucküberstandslänge)
- Verlauf B: gängige Nabe ($l_F/D_F=0,8$, $D_i/D_a=0,64$; $l_{ü}=1,5$ mm)
- Verlauf C: dickwandige, kurz gebaute Nabe ohne Drucküberstandslänge gefügt ($l_F/D_F=0,56$; $D_i/D_a=0,56$; $l_{ü}=0$ mm)

Die leichte Asymmetrie der Passfugendruckverteilung beruht auf der untersuchten Asymmetrie der Nabengeometrien und ändert an den Ergebnissen der qualitativen Betrachtung nichts. Passfugendruckver-

teilungen andere Parameterkombinationen ähneln jeweils einem der drei dargestellten Verläufe und können über die simulationsgestützte Ermittlung der Passfugendruckverteilung zugeordnet werden.

In Abhängigkeit der Schlupfamplitude erkennt /9/ unterschiedliche Abriebverhalten. Der Materialabtrag ist bis $15\mu\text{m}$ klein, so dass Mikrorisse an der Oberfläche von diesem Abtrag nicht beeinflusst werden und der Rissfortschritt ungehindert in die Tiefe fortschreitet. Ab $30\mu\text{m}$ Schlupfamplitude werden Mikrorisse der Oberfläche durch den Oberflächenverschleiß abgetragen. Das Risswachstum in die Bauteiltiefe wird damit unterbunden.

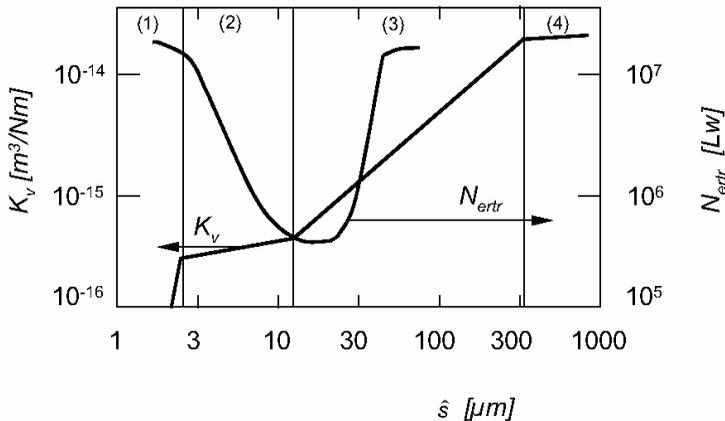


Bild 4: Verschleißrate K_v in Abhängigkeit der Lastspielzahl und der Schlupfamplitude /9//7/

/9/ trägt die Schlupfamplitude über der Verschleißrate K_v und der Schwingenspielzahl bis zur Reibermüdung N_{entr} auf. Er unterteilt die Darstellung in vier Bereiche (**Bild 4**):

1. Haften bis ca. $2\mu\text{m}$ Schlupf
2. lokal auftretender Schlupf bis ca. $15\mu\text{m}$
3. große Schlupfamplituden bis ca. $300\mu\text{m}$
4. reversierendes Gleiten über $300\mu\text{m}$

Infolge der Bildung von Reibkorrosion erhöht sich in der Gleitzone die Reibungszahl μ . Das maximal übertragbare Drehmoment wird hierdurch erhöht. Dieser Vorgang wird als Trainiereffekt bezeichnet. Mit Hilfe der Finiten Elemente wird der Einfluss des Trainiereffektes auf die Schlupfamplitude qualitativ bewertet werden. In Abhängigkeit der Schlupfamplitude ändert sich das Verschleiß- und Versagensverhalten der Pressverbindung. Je nach Einfluss des Trainiereffektes auf die Schlupfamplitude kann ein nach /9/ unkritisch zu bewertenden

der Schlupf in Folge des Trainiereffektes hinsichtlich der ertragbaren Lastspielzahl als kritisch bewertet werden und umgekehrt.

Zur Modellierung des Einflusses des Trainiereffektes auf den Schlupf wurde ein Finite-Elemente-Modell erstellt und der Fügevorgang sowie die anschließende Drehmomentbeaufschlagung virtuell durchgeführt. In einem ersten Schritt wird auf Basis der Simulationsergebnisse der Schlupf in der Kontaktzone ermittelt, indem die Differenz der Knotenverschiebungen in der Kontaktzone ausgelesen wird. Dem Modell liegt ein globaler Reibwert von $\mu=0,2$ zu Grunde. Für die lokale Reibwerterhöhung in der Gleitzone wird der Reibwert lokal in der Gleitzone in einem zweiten Schritt um 0,2 auf $\mu=0,4$ und in einem weiteren Schritt um weitere 0,2 auf $\mu=0,6$ angehoben und der Schlupf erneut ausgelesen. Hierzu wurde der Reibwert als temperaturabhängiger Werkstoffkennwert definiert. Über die Zuweisung einer Temperatur in der Kontaktzone wird der Reibwert lokal zugeordnet. Es wurde weder für die Welle noch für die Nabe ein thermischer Ausdehnungskoeffizient definiert, so dass kein Einfluss der Temperaturdehnung im Modell existiert und Randeffekte damit ausgeschlossen werden.

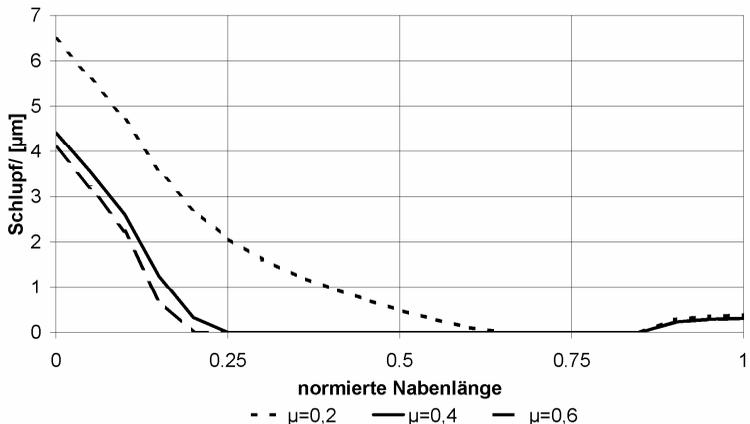


Bild 5: Schlupf in Abhängigkeit der lokalen Reibungszahl, für eine innenhochdruckgefügte Welle-Nabe-Verbindung: Nabenlänge $l_F=20\text{mm}$, Nabdurchmesser Verhältnis $Q_a/Q_i=0,64$, Fügedruck $p_F=2800\text{bar}$, Torsionsmoment $T=150\text{Nm}$

Bild 5 zeigt beispielhaft den Verlauf der Schlupfverteilung in der Verbindungsfuge einer innenhochdruckgefühten Welle-Nabe-Verbindung (Nabenlänge $l_F=20\text{mm}$, Nabdurchmesser Verhältnis $Q_a/Q_i=0,64$, Fügedruck $p_F=2800\text{bar}$). Die drei dargestellten Verläufe geben Auskunft über den zu erwartenden Schlupf bei einem konstan-

ten Drehmoment von $T=150\text{Nm}$. Die erste Kurve ($\mu=0,2$) stellt die Schlupfverteilung der noch unbeanspruchten Probe dar. Die beiden anderen Kurven ($\mu=0,4$ und $\mu=0,6$) geben den Schlupf bei einem lokalen Reibwerterhöhung in der Schlupfzone von $\mu=0,4$ bzw. $\mu=0,6$ an. Dieser Zustand wird nach Abschluss des Trainiereffektes erreicht. Erkennbar ist, der signifikante Abfall des maximalen Schlupfes von der unbeanspruchten Probe zur Probe mit ausgeprägtem Passungsrost. Ebenso verringert sich die Schlupftiefe erkennbar. Der Unterschied der Schlupfamplitude und der Schlupftiefe (Gleitzone) ist zwischen dem lokalen Reibwert von $\mu=0,4$ und $\mu=0,6$ in der Schlupfzone vernachlässigbar.

Im gezeigten Beispiel wurden für die Passfugendruckverteilung 6 Einflussparameter bestimmt, deren Kombination jedoch 3 unterschiedliche Passfugendruckverteilungen generiert. **Bild 3** zeigt, dass durch die Auswahl der Haupteinflussparameter Passfugendruckverteilung und Schlupf auf das dynamische Schädigungsverhalten innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen, sowie die mit Hilfe der Simulation durchgeführte Suche nach charakteristischen Parameterkombinationen die Versuchszahl verringert werden kann. So würde sich bei 6 untersuchten Versuchsparametern mit jeweils zwei Parameterwerten $(1, 0) m=2^6=64$ Versuche ergeben. Mit der Forderung einer statistischen Absicherung von mindestens 3 Versuchen je Parameterkombination ergeben sich $m=3 \cdot 2^6=192$ durchzuführende Versuche. Wird der Schlupf und der Passfugendruck als wichtigste Versuchsparameter ausgewählt und diese zu je drei Stufen untersucht $(-1, 0, 1)$ und eine statistische Absicherung von mindestens 3 Versuchen je Parameterkombination durchgeführt, so ergibt sich eine deutliche Verringerung der Versuchszahl auf insgesamt $m=3 \cdot 3^2=27$ Versuche.

Bild 5 verdeutlicht den Einfluss der Passungsrostbildung auf die Schlupfamplitude und die Schlupftiefe. In Kombination mit /9/ ergibt sich für die unbeanspruchte Probe eine zu erwartende Lebensdauer von ca. $1 \cdot 10^6$ Lastwechsel. Nach dem Abschluss der Passungsrostbildung würde sich auf Grundlage der Schlupfamplitude und /9/ eine Lebensdauer von ca. $1 \cdot 10^7$ ergeben. Nach /10/ ist die Reibwerterhöhung nach 150.000 Lastwechseln abgeschlossen. Der Einfluss der Schädigung infolge der hohen Schlupfamplituden und der weiteren Schädigungsverlauf nach Beendigung des Trainiereffektes und geringeren Schlupfamplituden und Schlupftiefen können nur im Experiment untersucht werden und Gegenstand aktueller Forschungstätigkeiten.

4 Zusammenfassung

Moderner Simulationstechnologien helfen die große Zahl möglicher Versuchsparameter und eine damit verbundene lange und intensive

Versuchsdurchführung zu mindern. Im Vorfeld der Versuche werden wichtige Abhängigkeiten der Parameter untereinander qualitativ bewerten und die Haupteinflussparameter ausgewählt. Versuchsergebnisse können nicht untersuchten Parameterkombinationen mit Hilfe der Simulation zugeordnet werden. Des Weiteren helfen Simulationen Zusammenhänge zwischen Parametern zu erkennen, Versuchsergebnisse vorherzusagen und zu deuten.

5 Literatur

- /1/ Grünendick, T.: Experimentelle Untersuchungen an innenhochdruckgefühten Wellen. IMW - Institutsmitteilung Nr. 28, Clausthal 2003
- /2/ Grünendick, T.: Die Berechnung innenhochdruckgefühter Pressverbindungen. Papierflieger, Clausthal 2005, ISBN: 3-89720-795-8
- /3/ Gropp, H.; Klose, D.: Grundlegende Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum Übertragungsverhalten dynamisch belasteter Pressverbindungen. VDI Berichte 1384, VDI-Tagung in Fulda, 28./29. April 1998, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- /4/ Funk, W.: Der Einfluss der Reibkorrosion auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenelemente. Dissertation, TH Darmstadt, 1968
- /5/ Julius, A.: Reibkorrosion – Zum Mechanismus des Reibdauerbruchs. FKM-Forschungsheft 18, 1972
- /6/ Kreitner, L.: Die Auswirkungen von Reibkorrosion und Reibdauerbeanspruchung auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenteile. Dissertation, TH Darmstadt, 1976
- /7/ Glögger, C.: Untersuchungen an spannungshomogenisierten und zylindrischen Pressverbindungen unter Torsionsbelastung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2003.
- /8/ Garzke, M.: Auslegung innenhochdruckgefühter Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung. Dissertation, TU Clausthal, 2001.
- /9/ Vingsbo, O.; Söderberg, S.: On Fretting Maps. Wear 125, 1988
- /10/ Gropp, H.: Das Übertragungsverhalten dynamisch belasteter Pressverbindungen und die Entwicklung einer neuen Generation. Habilitation, TU Chemnitz, 1997