

Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen

Tan, L.

Welle-Nabe-Preßverbindungen werden häufig durch konstruktiv bedingte Diskontinuitäten, z.B. Bohrungen oder Nuten, gestört. Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit dieser geschwächten Verbindungen wurden mit Finite-Element-Methode, Dehnungsmeßstreifen und Spannungsoptik untersucht. Die Störungen bedingen einerseits eine örtliche Spannungszunahme und damit eine Begrenzung der übertragbaren Lasten infolge Kerbwirkung, andererseits verursachen diese Störungen eine Änderung des elastischen Verhaltens.

Shrink-fit assemblies are often disturbed by longitudinal or radial holes or longitudinal notches. The strength and force-transmit ability of these disturbed assemblies were researched with finite-element method, strain gauges and photoelasticity. The disturbances cause local stress concentrations, limit the transmittable forces and change the elastic behavior in the assemblies in comparison with the axially symmetric shrink-fit assemblies.

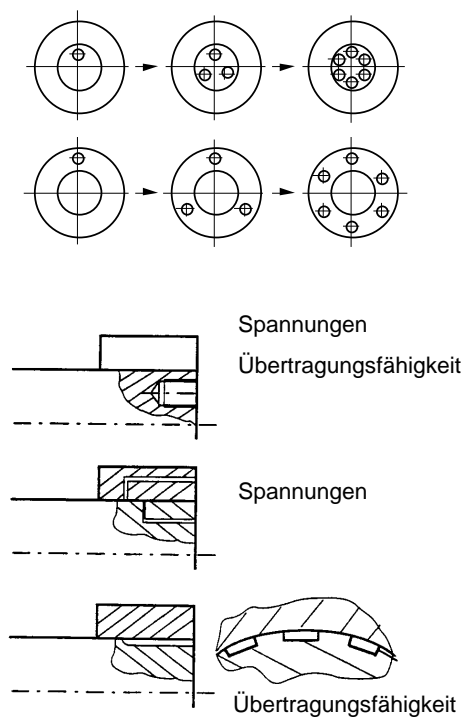


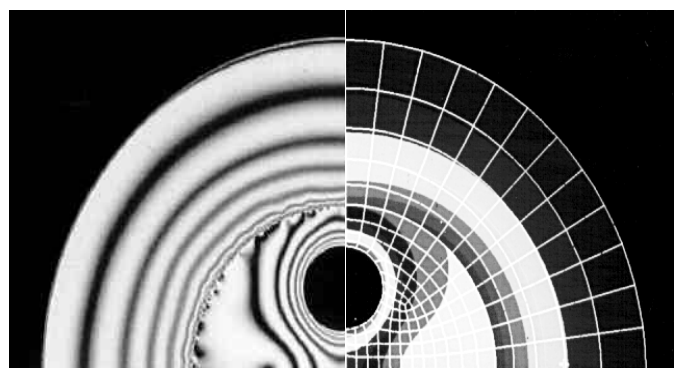
Bild 1: Übersicht über die untersuchten geometrischen Bauformen

1 Spannungserhöhung und Verminderung der Übertragungsfähigkeit

Aufgrund der nicht rotationssymmetrischen Geometrie vermindert sich im Vergleich mit rotationssymmetrischen Preßverbindungen die Übertragungsfähigkeit der geschwächten Verbindungen, gleichzeitig erhöht sich die Spannung am Bohrungsrand oder an der Zahnkopfkante. Die Abhängigkeiten der Spannungserhöhung und Übertragungsfähigkeitsverminderung von den Geometrieparametern werden mit analytischen Ansätzen und FEM numerisch untersucht und meßtechnisch sowohl an spannungsoptischen Modellversuchen als auch an ausgeführten Verbindungen verifiziert. **Bild 2** zeigt die Verteilung der Hauptschubspannung in einer Welle mit zwei exzentrischen Axialbohrungen.

Abhängig von der geometrischen Form der Störungen entstehen zum Teil sehr starke Kerbwirkungen, die besonders bei Sackbohrungen im Bereich des Bohrungsgrundes zu dreidimensionalen Spannungszuständen mit gleichachsigem Spannungszustand führen und damit als Ursache vieler bisher nicht geklärter Schadensfälle detektiert werden können. Auch die Störung an unterbrochenen Preßfügen mit z.B. Kerbzahnprofil führt zu Beanspruchungen und damit zu Berechnungsmethoden, die mit dem rotationssymmetrischen Spannungszustand nur bedingt zu vergleichen sind.

Im Vergleich zur ungestörten Preßverbindung erhöht sich die Spannung am Bohrungsrand oder an



a) Spannungsoptikmodell b) FE-Modell

Bild 2: Verteilung der Hauptschubspannung

der Zahnkopfkante. Die Spannungserhöhung wird mit einer Formzahl k relativ zur ungestörten Verbindung dargestellt:

$$k = v_{max} / v_{ungestört}$$

Die maximale Bohrungsrandspannung liegt an der dünnsten Stelle der Bohrungswand, nämlich am zur Nachbarbohrung, zur Fügefläche oder zur Stirnfläche nächstliegenden Punkt. Dünnere Bohrungswand führt zu stärkerer Beanspruchung. Für Welle oder Nabe mit Sackbohrungen sind die maximalen Spannungen an der Stirnfläche und an der Bohrerkegelspitze. Der Bohrungsinnenrand wird durch die Stützwirkung des ungestörten Teiles schwächer beansprucht als an der Stirnfläche. Der Spannungszustand an der Stirnfläche stimmt mit dem ebenen Spannungszustand zusammen und kann als 2-di-

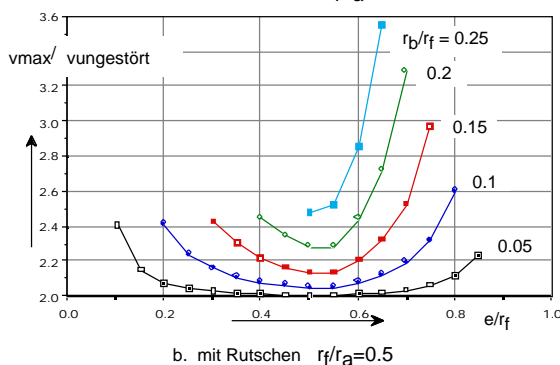
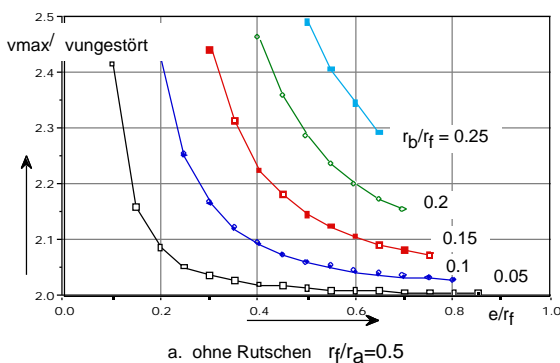


Bild 3: Formzahl für Welle mit 2 Axialbohrungen

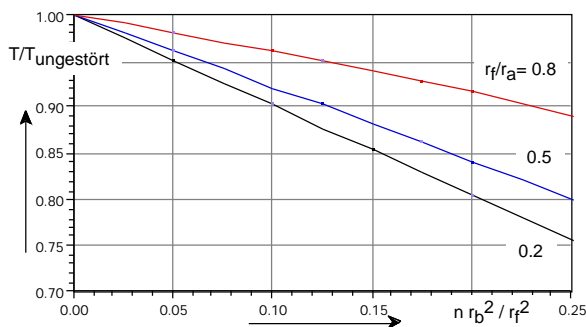


Bild 4: Übertragungsfähigkeit für Welle mit Axialbohrungen

mensional-Problem gelöst werden.

Für ungestörte Nabe auf Zahnwelle oder Keilwelle treten Spannungsspitzen an der Zahnkopfkante sowohl in der Welle wie auch in der Nabe auf.

Auf der Fügefläche einer geschwächten Preßverbindung ist der Fugendruck ungleichmäßig verteilt. Die Übertragungsfähigkeit der geschwächten Verbindung vermindert sich im Vergleich zur ungestörten Verbindung mit gleichem Übermaß. Ingenieurmäßig kann man die Verminderung der Übertragungsfähigkeit mit einem durchschnittlichen Fugendruck p quantitativ ausdrücken:

$$= T/T_{ungestört} = p / p_{ungestört}$$

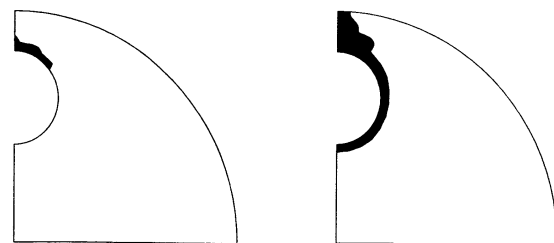
2. Einflußfaktoren

2.1 Einfluß der Montagebedingung

Auf der Fügefläche einer geschwächten Verbindung wirken nicht nur radialer Fugendruck, sondern auch tangentialer Fugenschubkraft. Wenn der Reibbeiwert beim Fügevorgang nicht groß genug ist, entsteht örtliches Rutschen in der Umfangsrichtung. Dadurch erhöht sich die Spannung am Bohrungsrand. Bestimmung der Beanspruchungen mit dem Grenzwert $\mu_{montage} = 0$ liegt also auf der sicheren Seite. Der durchschnittliche Fugendruck p und die dadurch bestimmte Übertragungsfähigkeit sind praktisch unabhängig von der Montagebedingung.

2.2 Einfluß der teilplastischen Verformung

Wenn die maximale Spannung gleich der Streckgrenze des Werkstoffs ist, wird der Preßverband elastisch am stärksten beansprucht. Um die Festigkeit des Werkstoffs besser auszunutzen, können plastische Verformungen unter bestimmten Bedingungen



a) $\bar{u}/\bar{u}_{egrenz}=1.1$

b) $\bar{u}/\bar{u}_{egrenz}=1.4$

Bild 5: Plastische Zonen einer Welle mit 2 Bohrungen ohne Montagereibung

zugelassen werden.

Mit zunehmendem Übermaß entstehen und vergrößern sich plastische Zonen an den stark beanspruchten Stellen (**Bild 5**). Die kritischen Stellen, die früher vollplastisch werden können, sind die dünnste Stelle der Bohrungswand zwischen Nachbarbohrungen, zwischen Bohrung und Fügefläche, zwischen Bohrung und Stirnfläche, der Zahnkopf und die Stelle zwischen Zahnkopfkanten in der Nabe.

Solange keine kritische Stelle vollplastisch verformt

ist, übt die verbleibende elastische Zone eine ausreichende Stützwirkung auf die plastischen Zonen aus. Der durchschnittliche Fugendruck bleibt daher praktisch weiterhin proportional dem Übermaß wie im elastischen Bereich. Der Faktor μ gilt also praktisch auch für den teilplastischen Bereich.

Als Steifigkeitsbedingung darf keine kritische Stelle vollplastisch werden. Als Festigkeitsbedingung darf die maximale plastische Dehnung nicht größer als die zulässige plastische Dehnung.

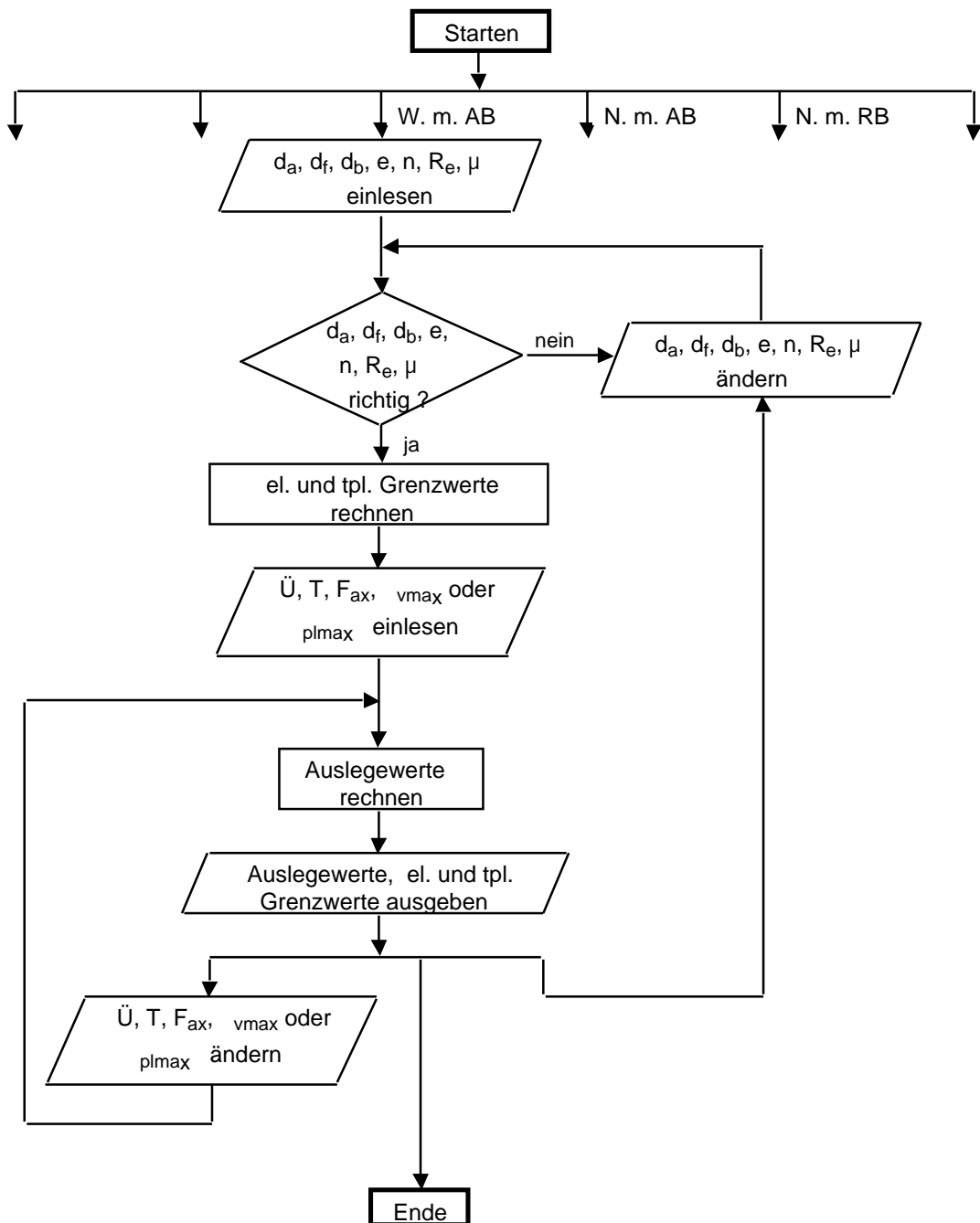


Bild 6: Flußdiagramm des Programms "prsvb"

In einem Beispiel einer Welle mit 2 Bohrungen erhöht sich die Übertragungsfähigkeit durch Zulassung plastischer Verformung um 40%.

2.3 Einfluß des Oberflächenhärtens

Da die Steifigkeitsbedingungen ausschließlich durch Geometrieparameter bestimmt und praktisch unabhängig vom Materialparameter E_{pl} sind, ist eine weitere Erhöhung der Übertragungsfähigkeit durch Oberflächenhärtens im allgemeinen nicht zu erwarten. Die durch Steifigkeits- und Festigkeitsbedingung begrenzte Übertragungsfähigkeit gilt also auch grundsätzlich für Preßverbände aus inhomogenen Werkstoffen.

3. Konstruktionsregeln

Im Bezug auf den Bohrungsdurchmesser sind die Bohrungswand zwischen Bohrung und Fügefläche und die zwischen Nachbarbohrungen in einer durch Axialbohrungen geschwächten Welle, die zwischen Bohrung und Fügefläche in einer durch Axialbohrungen geschwächten Nabe und die zwischen Bohrung und Stirnfläche in einer durch Radialbohrungen geschwächten Nabe so dick wie möglich zu konstruieren.

4. Rechnerunterstützte Auslegung

Für die rechnerunterstützte Auslegung der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich wurde ein FORTRAN-Programm entwickelt. Das auf einem PC (Personal-Computer) implementierbare Programm ist sowohl im Batch-Betrieb wie auch interaktiv lauffähig. Die Programmführung erfolgt so, daß das Benutzerhandbuch nicht gebraucht wird. Während eines interaktiven Auslegungsvorgangs wird der Konstrukteur bei einem Eingabefehler oder einer unverträglichen Geometrie durch wiederholten Hinweis auf dem Bildschirm aufgefordert, die eingegebenen Daten noch einmal zu überprüfen und zu korrigieren. In Dialogform wird der Konstrukteur durch die einzelnen Programmteile geführt. Alle Eingabe- und Ausgabedaten werden nicht nur auf dem Bildschirm angezeigt sondern auch in einer Ausgabedatei in der Festplatte gespeichert. Das EDV-Programm ist unabhängig von den Gegebenheiten spe-

zieller EDV-Anlagen und auf verschiedene Betriebssysteme portierbar.

5. Berechnungsbeispiel

Eine ungestörte Nabe auf einer durch zwei Sackbohrungen geschwächten Welle.

Außenradius der Nabe	$r_a = 100 \text{ mm}$
Fugenradius	$r_f = 50 \text{ mm}$
Schrumpfsitzlänge	$L = 80 \text{ mm}$
Bohrungsanzahl	$n = 2$
Bohrungsradius	$r_b = 10 \text{ mm}$
Bohrungstiefe	$h_b = 40 \text{ mm}$
Radius der Bohrkegelspitze	$r_e = 0.8 \text{ mm}$
Exzentrizität der Bohrungen	$e_x = 30 \text{ mm}$
Streckgrenze der Welle	$R_{e_W} = 300 \text{ N/mm}^2$
Reibbeiwert	$\mu = 0.1$
Elastizitätsmodul	$E = 210000 \text{ N/mm}^2$
Übermaß	$\ddot{U} = 0.1 \text{ mm}$

i. Elastische Grenzwerte

Übermaß	$\ddot{U} = 0.1194 \text{ mm}$
Axialkraft	$F_{ax} = 229039 \text{ N}$
oder Drehmoment	$T = 11452 \text{ Nm}$
max. Spannung	$v_{max_W} = 300 \text{ N/mm}^2$
max. Spannung	$v_{max_N} = 219.35 \text{ N/mm}^2$

ii. Teilplastische Grenzwerte

Übermaß	$\ddot{U} = 0.2182 \text{ mm}$
Axialkraft	$F_{ax} = 418629 \text{ N}$
oder Drehmoment	$T = 20931 \text{ Nm}$
max. Spannung	$p_{l_W} = 0.211\%$
max. Spannung	$v_{max_N} = 400.93 \text{ N/mm}^2$

iii. Auslegewerte

Übermaß	$\ddot{U} = 0.1 \text{ mm}$
Axialkraft	$F_{ax} = 191862 \text{ N}$
oder Drehmoment	$T = 9593 \text{ Nm}$
max. Spannung	$v_{max_W} = 251.31 \text{ N/mm}^2$
max. Spannung	$v_{max_N} = 183.75 \text{ N/mm}^2$

6. Literatur

FVA Forschungsheft 421 (1993)