

Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten spielbehafteter Längsstiftverbindungen

Birkholz, H.

Für den Festigkeitsnachweis spielbehafteter Längsstift-Verbindungen existieren zurzeit keine erweiterten Dimensionierungsgrundlagen, in der Fachliteratur werden lediglich einfachste Berechnungsgleichungen zur Auslegung gegen Flächenpressung und Abscheren des Stiftes angegeben. Der Einfluss verschiedener Geometrieparameter bleibt dabei unberücksichtigt. Am Institut für Maschinenwesen wurden umfangreiche Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten drehmoment-belasteter Längsstiftverbindungen durchgeführt.

For the check of longitudinal pin connections with clearance no extended sizing bases are existing, in the technical literature only simplest calculation equations are indicated. The influence of different geometry parameters remains unconsidered. At the Institut für Maschinenwesen extensive investigations were executed to find out the behavior of torque-loaded longitudinal pin connections.

1 Stand der Technik

Längsstiftverbindungen bestehen aus axial am Umfang angeordneten Stiften als Mitnehmerelemente. Die Stifte können dabei nach Anzahl und Anordnung variieren. Unterlagen zur Auslegung spielbehafteter Längsstiftverbindungen existieren nicht. Es erscheint aber zulässig, die Angaben für spielfreie Verbindungen als Anhaltspunkte zu verwenden. Auch diese Auslegungshinweise fallen aber sehr kurz aus. Am Institut für Maschinenwesen wurden im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojektes erste Dimensionierungsgrundlagen für spielbehaftete Längsstiftverbindungen erarbeitet. Zur Absicherung der numerischen Rechnungen wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

2 Experimentelle Untersuchungen

Zu Durchführung statischer Verdrehversuche wurden Verbindungen mit folgender Geometrie ausgewählt:

- $D_{al} = 20\text{mm}$
- $n_S = 3$ und $n_S = 4$

- $Q_S = 0,125$
- $Q_A = 0,65$
- $l_f/D_{al} = 0,625$ und $l_f/D_{al} = 1$.

Wellenwerkstoff: 42CrMo4
 $R_m = 1100\text{ N/mm}^2$
 $R_e = 900\text{ N/mm}^2$

Nabenwerkstoff: CK45
 $R_m = 850\text{ N/mm}^2$
 $R_e = 450\text{ N/mm}^2$

Stiftwerkstoff: 115CrV5 Silberstahl
 $HC = 55$

Die Variation der Fügelänge wurde trotz identischer Probenkörper durch Ausmessen und nachfolgendes Verschieben der Nabe auf der Welle auf das notwendige Maß realisiert. Es wurden sowohl für $n_S=3$ als auch für $n_S=4$ Versuche für die Verhältnisse $l_f/D_{al} = 0,625$ und $l_f/D_{al} = 1$ gefahren. Die Daten für Verdrehwinkel und Lastmoment wurden elektronisch aufgezeichnet. Nach dem Start der Aufzeichnung erfolgte die Lastaufgabe. Das Drehmoment wurde bis zum Versagen der Verbindung durch Nachführung gesteigert, das Abschalten erfolgte automatisch bei Überschreiten des Grenzdrehwinkels. **Bild 1** bis **Bild 4** zeigen exemplarisch die durchgeführten Untersuchungen.



Bild 1: Abscheren der Stifte in der Verbindung 3W1_N15. $n_S = 3$, $l_f/D_{al} = 0,625$

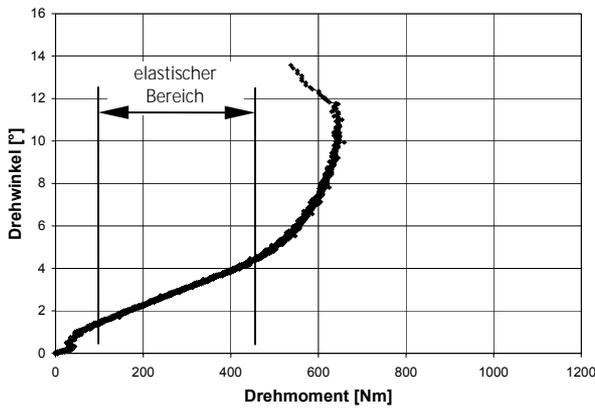


Bild 2: Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf des Prüflings 3W1_N15. $n_s=3$, $l_f/D_{al} = 0,625$

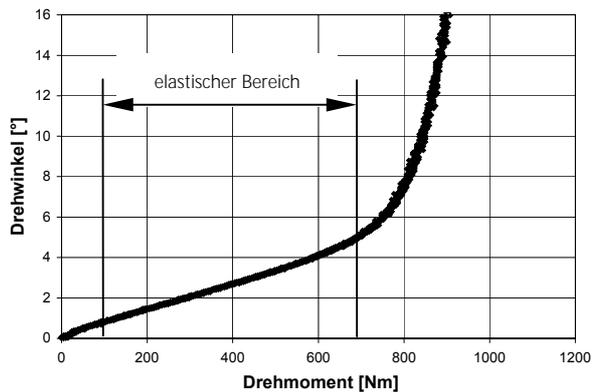


Bild 3: Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf des Prüflings 3W6_N3. $n_s=3$, $l_f/D_{al} = 1$



Bild 4: Verbindung 3W6_N3. $n_s = 3$, $l_f/D_{al} = 1$

Allen getesteten Verbindungen gemein war ein Setzeffekt im unteren Drehmomentbereich bis ca. 100 Nm, der den Ausgleich der Abweichungen (Setzen der Verbindung) darstellt. Ein komplettes Versagen der Nabe (Aufreißen) konnte in keinem Fall beobachtet werden. **Bild 5** zeigt die aus den Versuchen gemittelten Werte für die elastische Grenze und das Maximalmoment.

Die Rückrechnung der Wellenbeanspruchung für das elastische Grenzmoment unter Berücksichtigung der aus den Parameteruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse überschreitet die Elastizitätsgrenze $R_e = 900 \text{ N/mm}^2$ der Welle deutlich,

tätsgrenze $R_e = 900 \text{ N/mm}^2$ der Welle deutlich,

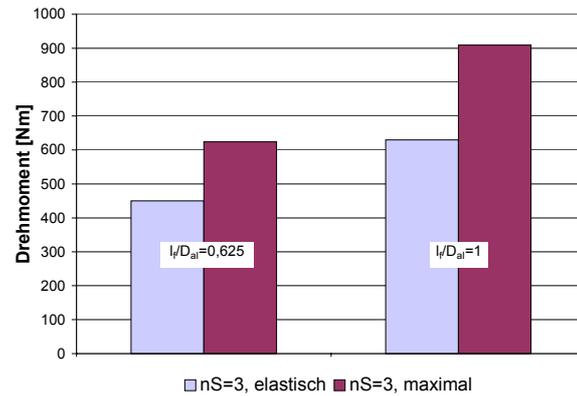


Bild 5: gemittelte Drehmomente aus den Versuchen für $n_s = 3$

damit liegt die Auslegung gegen die Wellenstreckgrenze auf der sicheren Seite. Zu Berücksichtigen ist jedoch die Festigkeit der Stifte, bei zu geringer Festigkeit kann es vor Erreichen der Wellenstreckgrenze zu einem Versagen der Verbindung kommen.

Die Erfassung der am realen Bauteil auftretenden Spannungen kann u.a. durch Dehnungsmessstreifen erfolgen. Zur Überprüfung der Ergebnisse der FE-Rechnungen wurden zwei Verbindungen im Prüfstand durch Drehmoment statisch belastet und die Beanspruchungen ermittelt. Die Dehnungsmessstreifen wurden u.a. im Bereich der Nabennut auf die Stirnseite der Nabe am Verbindungsbeginn an der Stelle der geringsten Nabenwandstärke appliziert.

Im Gegensatz zu den in den numerischen Untersuchungen eingesetzten abweichungsfreien Geometrien sind real ausgeführte Verbindungen immer mit Abweichungen behaftet. Diese Tatsache ist bei der Auswertung der Messungen zu berücksichtigen. Die abweichungsbehaftete Verbindung wurde mit einem Drehmoment $T = 350 \text{ Nm}$ belastet und die Messwerte aufgezeichnet. Dies wurde für jede mögliche Einbaustellung durchgeführt, die Ergebnisse sind in **Bild 6 a-d** für die einzelnen Einbaustellungen dargestellt.

Die Auswirkungen der Teilungsabweichungen lassen sich durch Mittelwertbildung unterdrücken. Gemittelt wurden die Umfangsspannungen auf der Stirnseite der Nabe für jede Einbaustellung. Dieser Wert stellt den mit "abweichungsfrei" bezeichneten Grafen dar und symbolisiert einen für alle Einbaustellungen identischen Traganteil.

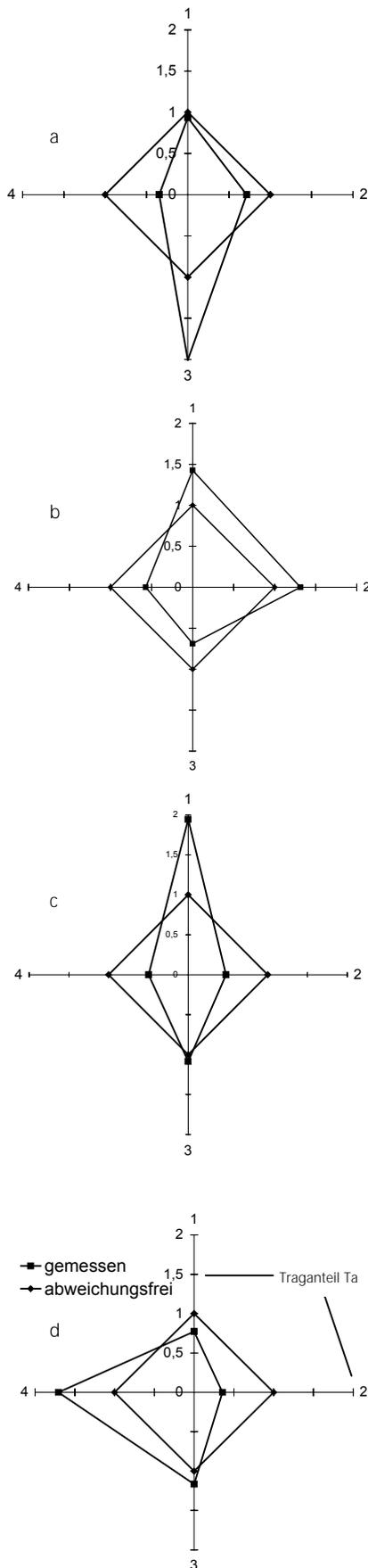


Bild 6: Traganteile der einzelnen Stifte in den 4 verschiedenen Einbaustellungen. $D_{al} = 32$ mm; $Q_A = 0,65$; $Q_S = 0,125$, $n_S = 4$

"Gemessen" bezeichnet den real auftretenden Spannungswert. Dieser Wert wurde auf den Wert der abweichungsfreien Verbindung bezogen und bildet den Traganteil T_a :

$$T_a = \frac{\text{gemessener Wert}}{\text{abweichungsfrei}}$$

Damit lassen sich Aussagen zur optimalen Einbaustellung treffen. Mit einem auf den abweichungsfreien Zustand bezogenen maximalen Traganteilfaktor $T_a = 2$ stellen Bild 6 a und Bild 6 c die ungünstigste Einbaustellung dar. Die beste Einbaustellung ergibt sich nach Bild 6 b mit einem Wert $T_a \approx 1,5$.

Die Ergebnisse der FE-Analysen konnten durch die experimentellen Untersuchungen bestätigt werden. Die ermittelten Einflussfaktoren liegen auf der sicheren Seite.

3 Weitere Untersuchungen

3.1 Wahl der geeigneten Passung

Die Frage nach einer Empfehlung für eine einzuhaltende Passung für spielbehaftete Längsstift-Verbindungen erfordert einige grundsätzliche Überlegungen. Anhaltswerte sind in der Literatur lediglich für übermaßbehaftete Verbindungen zu finden.

Grundsätzlich kommt für eine spielbehaftete Längsstift-Verbindung nur eine Spielpassung in Betracht. Zusätzlich ist die Frage der Zentrierung der Welle zur Nabe von Bedeutung.

Für eine Passfeder-Verbindung ist eine einzuhaltende Passung P9 für die Passfeder angegeben. Diese bezieht sich auf die Breite der Passfeder, die in der Wellen- und Nabennut eingesetzt wird. Auf Grund der Geometrie der Längsstift-Verbindung mit ihrem kreisförmigen Stiftquerschnitt kann dieser Wert sowohl aus Montagegründen als auch aus Passungsgründen (P9 entspricht einer Presspassung) nicht als Anhaltswert dienen. Für eine Passfeder mit Rückenspiel ist eine Passung zwischen Welle und Nabe mit Passung Welle/Nabe H7/k6 [DIN_6892] angegeben. Damit erfolgt die Zentrierung der Nabe auf der Welle über diese Passung.

Da jegliche spielbehaftete Verbindung eine Zentrierung über das Mitnehmerelement ausschließt, wie sie bspw. mit einer Flankenzentrierung bei Zahnwelle-Verbindungen anzutreffen ist, wird auch für spielbehaftete Längsstift-Verbindungen eine Passung H7/k6 für die Verbindung Welle/Nabe empfohlen.

Zylinderstifte ungehärtet nach DIN EN ISO 2338, 1998-02 bzw. gehärtet nach DIN EN ISO 8734, 1998-03 werden in den Passungen $D_S m6$, $D_S h8$ und $D_S h11$ gefertigt. Dies entspricht den genormten Toleranzfeldern für Zylinderstifte nach DIN 7.

Nach DIN 7157 wird eine Passung H7m6 als Treibstift bezeichnet, der mittels Presse oder (schwer) mit Handhammer zu fügen ist. Als Einsatzgebiet werden einmalig aufzubringende Riemenscheiben, Zahnräder sowie Kupplungs-naben angegeben. Eine Passung H7m6 kommt für einen Einsatz im Bereich spielbehafteter Längsstift-Verbindungen demnach nicht in Frage.

Eine Kombination H7/h6 mit einem maximalen Spiel von $22\mu\text{m}$, bezogen auf den untersuchten Wellendurchmesser mit $D_{al} = 32\text{mm}$ sowie eine Kombination H8/h9 mit einem maximalen Spiel $58\mu\text{m}$ wird nach DIN 7157 als Gleitstift bezeichnet. Die Teile sind von Hand verschiebbar. Passungen H6/h8, H7/h8 sowie H8/h8 liegen innerhalb dieses Fensters. Für maximale Übermaße, resultierend aus diesen Passungen, wurden Parameterrechnungen an ausgewählten Verbindungen durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Vergleichsspannungen in der Welle mit steigendem Spiel marginal absanken. Für die Nabe ergaben sich minimal ansteigende Werte. Ein mit steigendem Spiel gering ansteigender Wert für die Flächenpressung in der Wellen- und Nabennut erklärt sich mit der minimal geringer werdenden Anlagefläche. Der Verdrehwinkel der Nabe nahm genau um den Betrag des realisierten Spiels zu.

Für eine Längsstift-Verbindung wird empfohlen, eine Passung H6/h8, H7/h8 oder H8/h8 für das System Wellen-/Nabennut - Stift einzuhalten. Dies bietet den Vorteil, nach DIN 7 genormte Stiftgrößen einsetzen zu können.

3.2 Einfluss der Innenbohrung einer Welle auf das Beanspruchungsverhalten der Verbindung

Das Spannungs- und Verformungsverhalten einer längsgenutzten Welle unter reiner Drehmomentbelastung hängt hauptsächlich von der Geometrie der Nuten ab. Im Inneren unterscheidet es sich nicht von der Beanspruchung eines zylindrischen Stabes unter Torsion, die Linien gleicher Torsionsspannung laufen konzentrisch um den Mittelpunkt. Dieser Bereich wird bei den hier betrachteten Längsstiftwellen vom Radius der Stiftnut, mithin dem Durchmesser Verhältnis $\text{Stiftdurchmesser}/\text{Außendurchmesser der Welle}$ $Q_S = D_S/D_{al}$, sowie der

Stiftanzahl, wenngleich in deutlich geringerem Maße, beeinflusst. Je größer Q_S , desto höher die Abweichung von der Kreisform und damit die Beeinflussung des Spannungsverlaufs.

Bild 7 zeigt den Schubspannungsverlauf in Abhängigkeit vom Radius einer Längsstift-Welle.

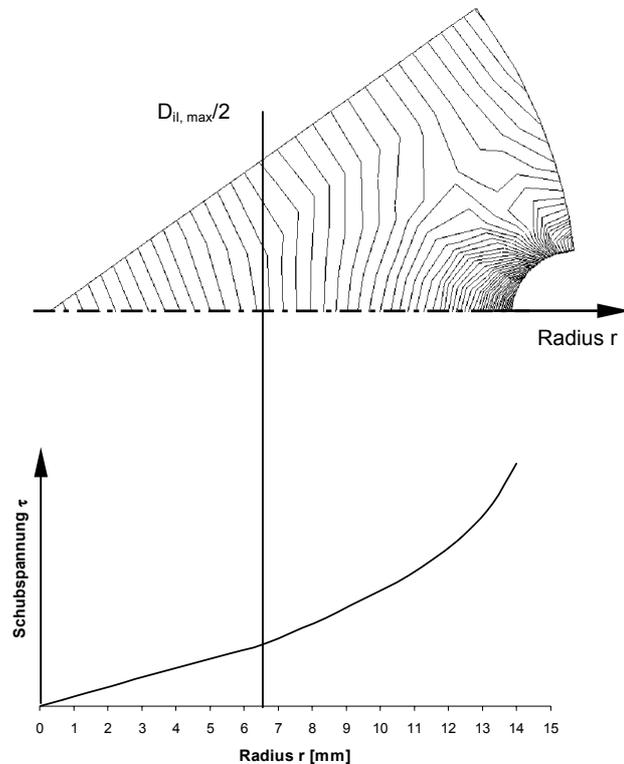


Bild 7: Schubspannungsverlauf in Abhängigkeit vom Radius einer Längsstift-Welle

Von Innen nach Außen wachsen die Schubspannungen in einer torsionsbeanspruchten Welle proportional zum Radius, d.h. der Maximalwert der Spannung tritt an der Außenseite der Welle auf. Analog zu den Vorgängen in einer Zahnwellen-Verbindung kann nun ein Grenzdurchmesser $D_{il,max}$ definiert werden, ab dem die Spannungslinien in einer genutzten Welle nicht mehr konzentrisch um den Wellenmittelpunkt verlaufen. Bis dahin stimmt der Verlauf der Schubspannungen in dieser Welle mit dem Spannungsverlauf in einer ungenutzten Welle gleichen Flächenträgheitsmomentes überein. Betrachtet man beide Wellen im Bereich $D_{il} < D_{il,max}$, verhalten sich auch der Spannungsgradient und die Verdrehung beider Wellen konstant zueinander. Für $D_{il} > D_{il,max}$ ändert sich der Spannungsverlauf, der Spannungsgradient steigt an, bis die Spannung im Nutgrund ihren Maximalwert erreicht (Bild 7).

Wenn von einem Torsionsstab hohe Festigkeit, geringe Verdrehung und geringes Gewicht gefordert werden, ist auf eine Hohlwelle zurückzugreifen. Bei ihr sind die achsnahen Werkstoffpartien, die zur

Festigkeit wenig, zum Gewicht aber viel beitragen, ausgespart. Versieht man also die Welle mit einer zentrischen Bohrung, deren Durchmesser die Bedingung $D_{il} < D_{il, \max}$ erfüllt, ist ein unverändertes Beanspruchungsverhalten im Bereich der Nut zu erwarten. **Bild 8** zeigt eine längsgenutete Welle im Übergangsbereich $D_{il} \cong D_{il, \max}$. Deutlich ist der beginnende nicht mehr konzentrische Verlauf der Schubspannungen in der Welle zu erkennen.

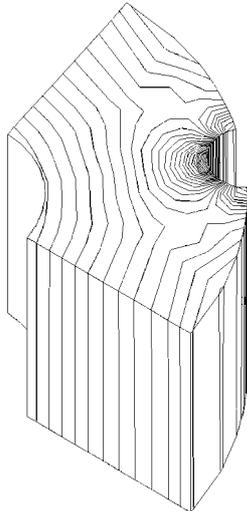


Bild 8: Schubspannungsverlauf einer längsgenuteten Welle im Übergangsbereich

Vergleiche der Beanspruchung an Längsstiftverbindungen mit Voll- und Hohlwelle zeigen, dass die Spannungsüberhöhung am Verbindungsbeginn sowie die Torsionsspannungen im Bereich reiner Torsion unabhängig vom Innendurchmesser der Welle sind, wenn die die Bedingung $D_{il} < D_{il, \max}$ eingehalten wird. Gleiches gilt für die Flächenpressung am Verbindungsbeginn sowie die Beanspruchungen im Stift und in der Nabe.

Zur Bestimmung des Grenzdurchmessers $D_{il, \max}$ wurde eine große Anzahl Parameterrechnungen mit variierenden Stiftanzahl und Stiftdurchmesser Verhältnis Q_S durchgeführt. Dabei konnte ermittelt werden, dass der Einfluss der Stiftanzahl auf den Grenzdurchmesser erheblich geringer ausfällt, als eine Änderung des Stiftdurchmesser Verhältnisses. Aus diesem Grund erfolgt die Angabe des Verhältnisses Q_I , bis zu dem keine Beeinflussung des Beanspruchungsverhaltens der Verbindung festgestellt wurde, für eine 6-Stift-Verbindung. Diese Angabe liegt auf der sicheren Seite, da sich Verbindungen mit weniger Mitnehmerelementen bei konstantem Q_S geringfügig günstiger verhalten. **Bild 9** zeigt den Verlauf der Grenze für Q_I bei zugehörigen Q_S . Der Bereich unter der Kurve stellt den "siche-

ren" Bereich dar, oberhalb der Kurve erfolgt ein Ansteigen der Beanspruchungen in der Welle.

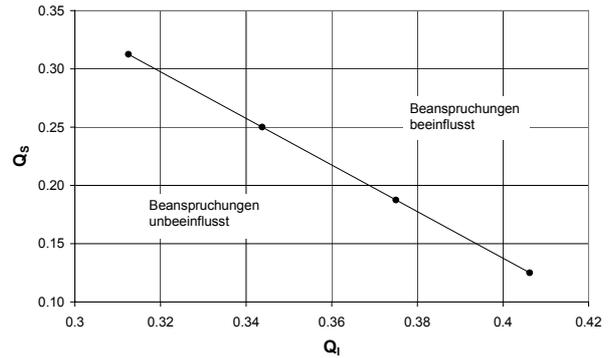


Bild 9: Grenzwerte für Q_I bei zugehörigem Q_S

In **Bild 10** ist der Anstieg der Vergleichsspannung über $Q_{I, \max}$ hinaus bis zu einem Verhältnis $Q_I = 0,5$ dargestellt. Dieser Wert stellt eine sinnvolle Einsatzgrenze für eine Hohlwelle in einer Längsstiftverbindung dar, weiterreichende Werte können jedoch extrapoliert werden. Die Vergleichsspannung $\sigma_{V, \text{Hohl}}$ wurde auf den Wert der Spannung $\sigma_{V, \text{Voll}}$ bei $Q_{I, \max}$ (entspricht einer Vollwelle) bezogen.

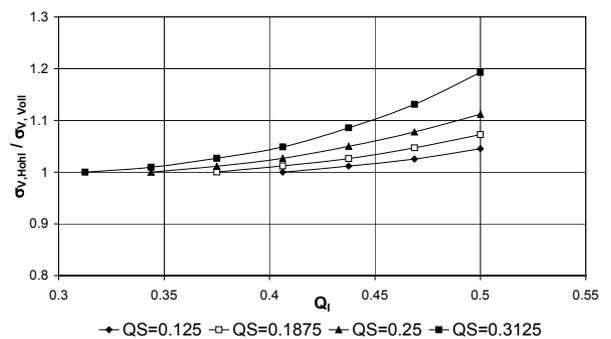


Bild 10: Überhöhung der Vergleichsspannungen am Verbindungsbeginn bei Überschreitung von $D_{il, \max}$ bis zu einem Verhältnis $Q_I = 0,5$ für verschiedene Q_S .

4 Auslegungshinweise

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Parameteruntersuchungen zum Drehmomentübertragungsverhalten Ein- und mehrstiftiger Verbindungen zusammengefasst.

- Stiftdurchmesser/Stiftanzahl: Mit zunehmender Stiftanzahl steigt die Vergleichsspannung im Bereich reiner Torsion (vor Verbindungsbeginn) ebenso wie bei konstanter Stiftanzahl mit Zunahme des Stiftdurchmessers. Beide Parameter beeinflussen ebenfalls die Vergleichsspannungsüberhöhung am Verbindungsbeginn. Eine Auswahlhilfe gibt **Bild 11**.

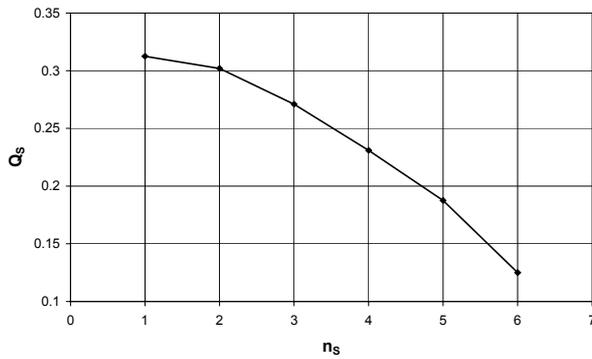


Bild 11: Verlauf der für die Wellenbeanspruchung optimalen Kombination Stiftdurchmesser-verhältnis Q_S und Stiftnzahl n_S . Der Graph beschreibt einen Überhöhungsfaktor = 1.

- **Verbindungsbreite:** Für Stiftnzahlen $n_S = 1$ bis $n_S = 3$ ist ein erheblich größerer Einfluss auf die Vergleichsspannungsüberhöhung in der Welle zu konstatieren als bei darüber hinaus gehenden Stiftnzahlen. Mit steigender Stiftnzahl sinkt auch das optimale Breitenverhältnis immer weiter ab, bis es bei ca. $l_f/D_{al} = 0,625$ einen konstanten Wert annimmt. Als Konstruktionshinweis kann ein Bereich für die Verbindungsbreite einer Längsstiftverbindung von ($n_S = 1$) $1,5 \cdot l_f \geq l_{f,opt} \geq 0,6 \cdot l_f$ ($n_S = 6$) empfohlen werden. Je nach Stiftmaterial können jedoch abweichende Verbindungsbreitenverhältnisse auftreten.
- **Nabenaußendurchmesser:** Ab einem Nabenaußendurchmesserverhältnis $Q_A \leq 0,5$ ist für $Q_S = 0,125$ kein Einfluss mehr festzustellen. Mit $Q_S = 0,125$ ist die Realisierung dünner Nabewandstärken möglich. Der Einfluss einer verminderten Restwandstärke der Nabe auf die Nabenvergleichsspannung zeigt **Bild 12**.

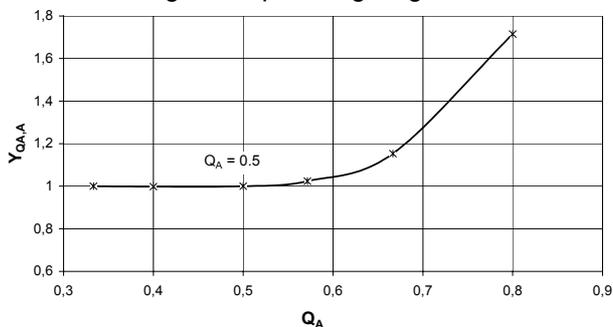


Bild 12: Einfluss des Nabenaußendurchmessers auf die Vergleichsspannung in der Nabenut

- **Stiftüberstand:** Ein Stiftüberstand am Verbindungsbeginn führt zu einer leicht verminderten Wellenbeanspruchung, jedoch steigt die Na-

benbeanspruchung deutlich stärker. Bis zu $l_{Ü} / D_{al} = 0,3$ erfolgt ein Angleich der Beanspruchungen in Welle und Nabe, darüber hinaus wird die Nabe erheblich stärker beansprucht.

- **Hohlwelle:** Bei Einsatz einer Hohlwelle gilt: Bei $D_{il} \leq D_{imax}$ erfolgt kein Einfluss der Beanspruchungen (Bild 9). Bei Verhältnissen bis $Q_I = 0,5$ sind die Werte aus Diagramm (Bild 10) zu berücksichtigen.
- **Stiftform:** kein negativer Einfluss bei Abrundung am Verbindungsbeginn, positiver Einfluss auf die Welle bei Verwendung nierenförmiger Stifte. Hier ist jedoch der Fertigungsaufwand zu berücksichtigen.
- **weiches Stiftmaterial:** Die Beanspruchungen lassen sich bei Verbindungen mit großen Spannungsüberhöhungen vermindern.

Zeichen und Benennungen

D_{aA}	Außendurchmesser des Außenteils (Nabe) [mm]
D_{al}	Außendurchmesser des Innenteils (Welle) [mm]
D_{iA}	Innendurchmesser des Außenteils ($\approx D_{al}$) [mm]
D_{il}	Innendurchmesser des Innenteils [mm]
D_{imax}	maximaler Bohrungsdurchmesser einer Hohlwelle, bis zu dem keine Beeinflussung stattfindet [mm]
D_S	Stiftdurchmesser [mm]
l_f	Verbindungsbreite [mm]
n_S	Anzahl der Mitnehmerelemente [-]
Q_A	Durchmesserverhältnis des Außenteils ($= D_{iA}/D_{aA}$) [-]
Q_I	Durchmesserverhältnis des Innenteils ($= D_{il}/D_{al}$) [-]
Q_S	Durchmesserverhältnis Stiftdurchmesser/Außendurchmesser des Innenteils ($= D_S/D_{al}$) [-]
$Y_{Q_A,A}$	Einflussfaktor Nabenaußendurchmesser [-]
σ_V	Vergleichsspannung nach GEH [N/mm ²]
$\sigma_{V,I}$	Vergleichsspannung nach GEH in der Wellennut [N/mm ²]
$\tau_{n,I}$	Torsionsnennspannung der ungeschwächten Welle [N/mm ²]