

Längsstifte als kerbarme Welle-Nabe-Verbindung

Schäfer, G.; Korte, T.



Für die Optimierung und den Leichtbau im Bereich der Antriebstechnik ist eine kerbarme Gestaltung der im Kraftfluss liegenden Elemente eine ganz wesentliche Voraussetzung. Für die konstruktiv häufig anzutreffende Aufgabe der Verbindung von Wellen und Naben bieten sich Längsstiftverbindungen als Alternative zu Passfedern bei vergleichbar einfacher Fertigung an. Für die Erstellung von Auslegungsgrundlagen wurden in den letzten Jahren am Institut für Maschinenwesen umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse hier vorgestellt werden. Darüber hinaus wird ein zur Passfeder anschlusskompatibler Geometrieentwurf bewertet.

Longitudinal pin connections for transmission of torque provide a potential to improve drive systems compared to standard feather keys. Systematically variation of parameters in simulation and experiments enable a simple dimensioning of connections with one or more pins. At least a geometrical suggestion is given for a feather key compatible design with reduced notch factor.

Einleitung

Die Verbindung von Wellen und Naben gehört zu den grundlegenden Aufgaben des konstruktiven Gestaltens. Unter den in Frage kommenden stoff-, form- und reibschlüssigen Verbindungen, haben die Formschlüssigen aufgrund Ihrer leichten Montier- und Demontierbarkeit und des zusätzlich verfügbaren axialen Freiheitsgrades eine weite Verbreitung. Nachteil der formschlüssigen Verbindungen ist deren funktionsbedingte Kerbwirkung, die am Beispiel des bekanntesten Vertreters, der Passfederverbindung, immer wieder zu Bruchschäden führt. Der folgende Beitrag stellt eine ebenso einfache, bislang aber nur wenig beachtete kerbarme Alternative, den Längsstift, vor und gibt konstruktive Hinweise speziell auch unter dem Gesichtspunkt geometrischer Kompatibilität. Aus den am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal durchgeführten numerischen und experimentellen Untersuchungen mit statischen und dynamischen Torsions- und Biegebelastungen werden Grundlagen für die Auslegung und Einsatzgrenzen abgeleitet.

Geometrische Ausführungen

Den prinzipiellen Aufbau der Längsstiftverbindung mit einem Stift zeigt Abbildung 1. Die Drehmomentübertragung erfolgt dabei ähnlich der Passfederverbindung über ein zusätzliches Formschlusselement, den Längsstift.

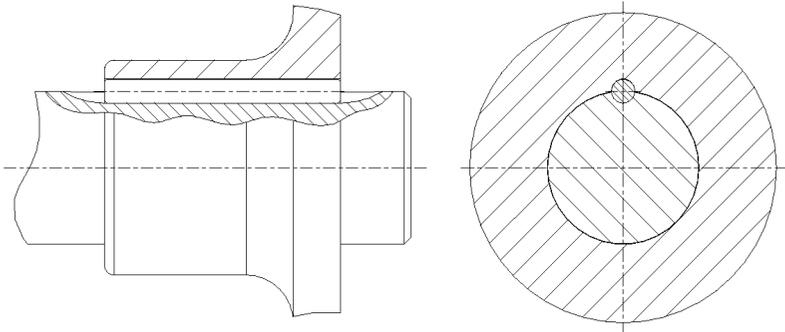


Abbildung 1: Längsstiftverbindung, prinzipieller Aufbau /4/

Der große Vorteil des runden Längsstiftquerschnitts ist der erheblich größere Kerbradius im Vergleich zur Passfeder, siehe dazu Abbildung 3, in der die Vergleichsspannungen beider Verbindungen mit identischem Wellendurchmesser bei gleicher Drehmomentbelastung und jeweils identischem linearelastischem Werkstoffverhalten mit identischer Farbskala dargestellt sind. Der schraffierte Bereich ist dabei höher belastet, als der Maximalspannungswert in der Längsstiftverbindung.

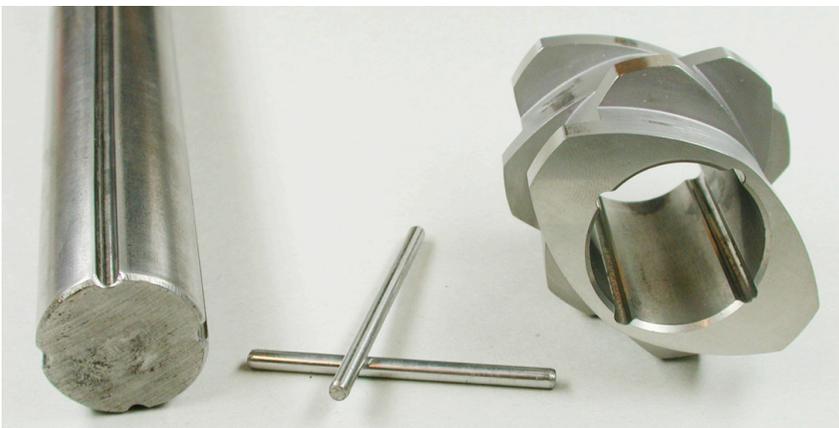


Abbildung 2: Extruderwelle mit Längsstiftverbindung

Neben der Nutzung in untergeordneter Funktion als Positionierelement, gibt es bislang nur vereinzelte Anwendungen als drehmomentleitende Welle-Nabe-Verbindung, eine davon zeigt Abbildung 2. Für die geringe Verbreitung dieses Maschinenelements sind einerseits, die lange Zeit vorhandenen Fertigungsschwierigkeiten (Verlaufen der Bohrung) und andererseits wohl die kaum vorhandenen Auslegungsrichtlinien verantwortlich.

Untersuchungen

Um die in einzelnen Lehrbüchern, wie z.B. /1/, vorhandenen Auslegungsgrundlagen für den Einzelstift bezüglich Flächenpressung und Stiftscherbeanspruchung anwendungsspezifisch zu erweitern, wurden in den letzten Jahren am Institut für Maschinenwesen (IMW) in der Arbeitsgruppe Welle-Nabe-Verbindungen numerische und experimentelle Arbeiten durchgeführt.

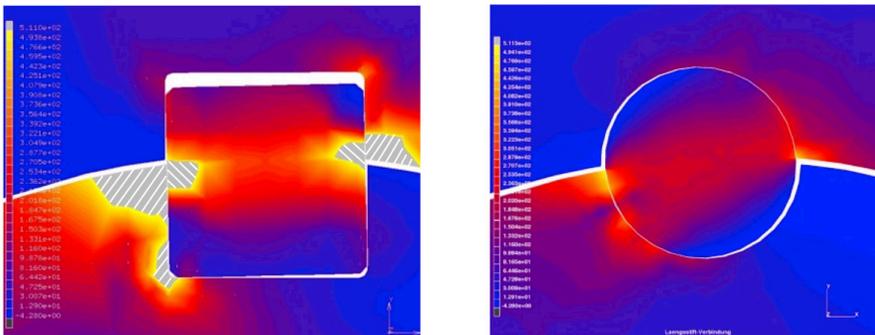


Abbildung 3: Vergleichsspannung nach v. Mises bei gleichem Wellendurchmesser und Drehmoment in einer Passfederverbindung (PFV, links) und einer Längsstiftverbindung (LSV, rechts), gleiche Farbskala, womit die schraffierten Bereiche bei der PFV höher beansprucht sind als der Maximalwert der LSV.

Ausgehend von dem ersten Vergleich in Abbildung 3 wurden zunächst Parameterstudien zur Stifanzahl n_s , zum Stiftdurchmesser D_s und zu den beiden Außenabmessungen Verbindungsbreite l_f und Nabenaußendurchmesser D_{aA} durchgeführt. Die Längen und Durchmesser wurden jeweils in Bezug zum Fügedurchmesser D_{aI} betrachtet.

Drehmomentbelastung, numerisch

Die zuvor genannten numerischen Parameterstudien wurden von Birkholz /4/ am IMW für eine Spielsitzpassung zwischen Welle und Nabe mit einem Fügedurchmesser $D_{aI} = 32$ mm beginnend durchgeführt. Durch die reibungsfreie

Spielsitzpassung wurde die Aufgabe der Drehmomentübertragung eindeutig den Längsstiften zugewiesen um deren Übertragungsverhalten analysieren zu können.

In Abbildung 4 ist das Verhalten bei unterschiedlichen Stiftanzahlen bei sonst konstanten Bedingungen (Stift-, Wellen-, Nabenaußendurchmesser, Nabendlänge und Drehmoment) anhand der normierten Vergleichsspannung nach v. Mises über der Axialkoordinate der Verbindung dargestellt. Die Drehmomenteinleitung erfolgt von links bei $z/l_w = 0$, mit l_w als Länge der Welle im numerischen Modell. Verbindungen mit einem oder zwei Stiften zeigen hier deutlich erhöhte Spannungswerte. Ab drei Stifte ist die weitere Spannungsreduzierung recht gering, so dass drei oder vier Stifte fertigungsgerecht erscheinen.

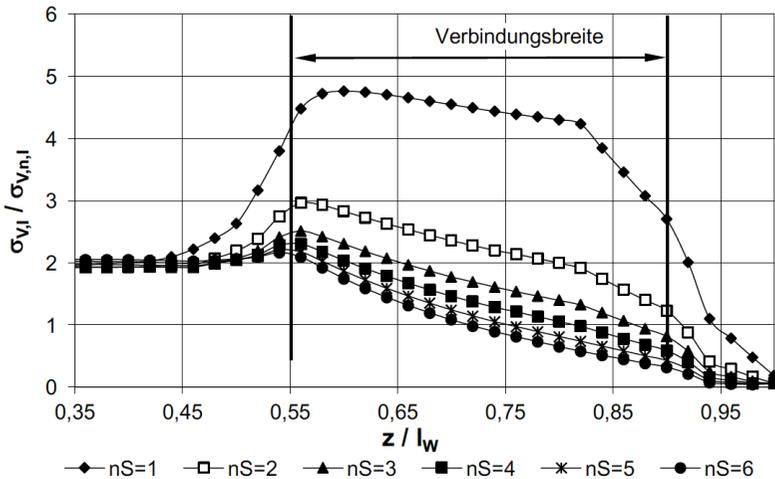


Abbildung 4: Verlauf der bezogenen Vergleichsspannung in der Wellennut für verschiedene Stiftanzahlen n_S . $D_{al} = 32$ mm, $Q_S = 0,125$, $Q_A = 0,5$, $l_f/D_{al} = 0,625 / 4$

Abbildung 5 zeigt für die günstige Stiftanzahl $n_s = 4$ den Einfluss unterschiedlicher Stiftdurchmesser. Betrachtet man die Spannungsüberhöhung an der lasteinleitungsseitigen Nabenkante ($z/l_w = 0,55$) in Kombination mit der Beanspruchung im freien (genuteten) Wellenquerschnitt ($0,3 < z/l_w < 0,5$), so erkennt man für das Stiftdurchmesserverhältnis von $Q_S = 0,1875$ ein sehr ausgewogenes Verhalten. Damit können drei bis 4 Stifte mit einem Stiftdurchmesserverhältnis von $Q_S = 0,1875$ (bis 0,2) als ideale Auslegung gelten.

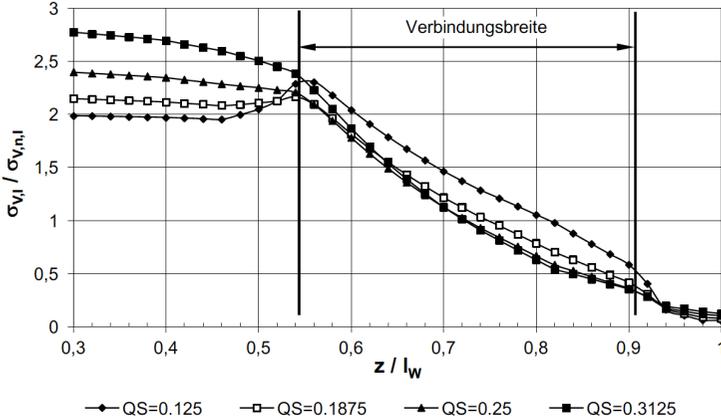


Abbildung 5: Verlauf der bezogenen Vergleichsspannung im Nutgrund der Wellennut für variierende Q_S . $D_{al} = 32 \text{ mm}$, $Q_A = 0,5$, $l_f/D_{al} = 0,625$, $n_S = 4/4$

In Abbildung 6 sind die Torsionsformzahlen, ausgewertet nach DIN 743 /3/, für unterschiedliche Stiftanzahlen und -durchmesser dargestellt, mit $Q_S = D_S/D_{al}$. Damit gilt bei der empfohlenen Geometriekonstellation eine Torsionsformzahl α_{kt} von 2 bis 2,2 für die Welle. Im Vergleich dazu gilt nach /1/ Tab. 15.3 für die Passfedernut $\alpha_{kt} = 2,8$.

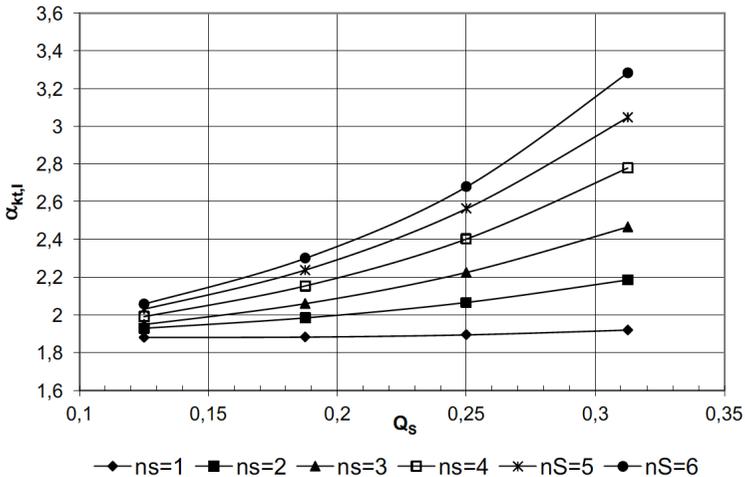


Abbildung 6: Torsionsformzahlen der Welle für verschiedene Q_S und $n_S/4$

Drehmomentbelastung, experimentell

In einem weiteren DFG-Vorhaben /5/ wurden ergänzende numerische und umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Bauteilen mit einem Fügedurchmesser $D_{aI} = 32$ mm durchgeführt. Die Parametervarianten sind in Tabelle 1 angegeben. Aufgrund des möglichen Reibkorrosionseinflusses wurden die dynamischen Untersuchungen mit $1,5 \times 10^7$ Lastwechseln und in Stichversuchen bis 3×10^7 Lastwechsel gefahren.

Tabelle 1: *Parametervariation für experimentelle Untersuchungen /5/*

Parameter	Ausprägung		
Stifftanzahl n_S	1		3
Stiftdurchmesser D_S	4 mm ($Q_S = 0,125$)		6 mm ($Q_S = 0,1875$)
Außendurchmesser Nabe D_{aA}	45 mm ($Q_A = 0,71$)		64 mm ($Q_A = 0,5$)
Verbindungsbreite l_F	32 mm ($l_F/D_{aI} = 1$)		45 mm ($l_F/D_{aI} = 1,4$)
Passung Welle / Nabe	Spielpassung (0,6‰ bez. Spiel ξ)		Übermaßpassung (1‰ bez. Übermaß ξ)
Ausführung Stift	Zylinderstift		Hohlspannstift
Material Nabe	C45		EN-GJL-250
Verbindungsart	Längsstiftverbindung		Passfederverbindung
Beanspruchung	Dyn. Torsion		Dyn. Biegung
	R = 0,1	R = -1	

Neben den günstigen Parametervarianten ($Q_S = 0,1875$ und $l_F/D_{aI} = 1$) der numerischen Untersuchungen /4/ wurden Vergleichsversuche mit einem Stift oder einer Passfeder, mit Presssitz zwischen Welle und Nabe alternativ zum Schiebeseitz und Hohlspannstiften (DIN 8752 /2/) alternativ zum Vollstift gefahren.

Abbildung 7 zeigt eine Welle aus der Versuchsreihe a in Abbildung 8 mit dem typischen 45°-Bruch unter Torsion, wobei die Reibkorrosionsspuren zu großen Teilen erst als Folgeschaden der Rissentstehung aufgetreten sind.

In Abbildung 8 sind die ermittelten Dauerfestigkeiten nach DIN 743 /3/ in Kerbwirkungszahlen umgerechnet dargestellt. Aus dem Vergleich der Versuchsreihen a und g ist das Potential der Längsstiftverbindung gut zu erkennen, die Kerbwirkungszahl der Längsstiftverbindung mit drei Stiften liegt 37% unter dem Wert der Passfederverbindung. Bei Wechseltorsion ($R = -1$) wurden zwar auch „Dauerfestigkeiten“ bei $1,5 \times 10^7$ berechnet, die beobachteten Reibkorrosionsschäden lassen aber einen solchen Betrieb, zumindest ohne Ölschmierung, nicht nachhaltig erscheinen.

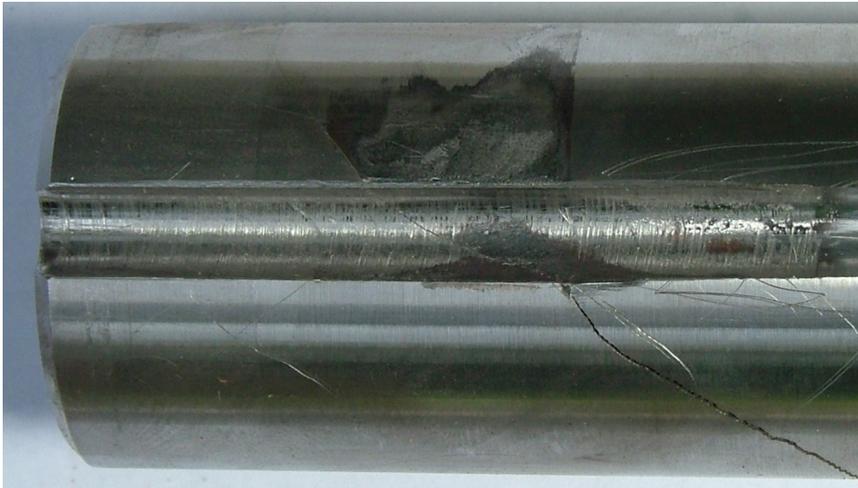


Abbildung 7: Wellenbruch 3_0,1875_0,5_1, $R = 0,1$, 1100 Nm +/- 900 Nm Torsionsbelastung /5/

Vergleich der experimentell ermittelten Kerbwirkungszahlen bei $R = 0,1$ und $R = -1$

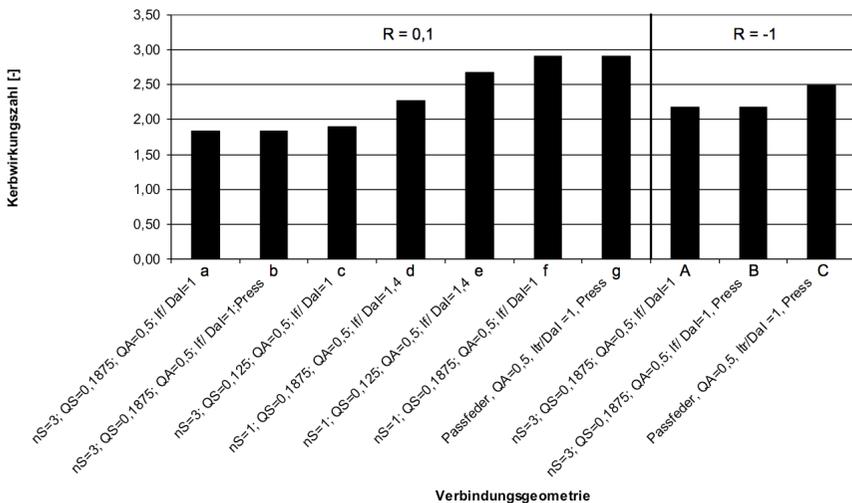


Abbildung 8: Vergleich der in /5/ experimentell ermittelten Kerbwirkungszahlen

Abbildung 9 zeigt das „abgestimmte“ Anrissverhalten der dünnwandigen Stahlriben mit einem Durchmesserverhältnis von $Q_A = 0,71$. Die dünnwandigen

Gussnaben waren den Wellen deutlich unterlegen und bestimmend für die Verbindungstragfähigkeit. An dieser Stelle zeigt sich der negative Einfluss der gewölbten Kontaktfläche in der Nabennut, der zu erheblichen zusätzlichen radialen Kraftkomponenten bei Torsionsübertragung führt. Hier ist die klassische Passfeder im Vorteil.

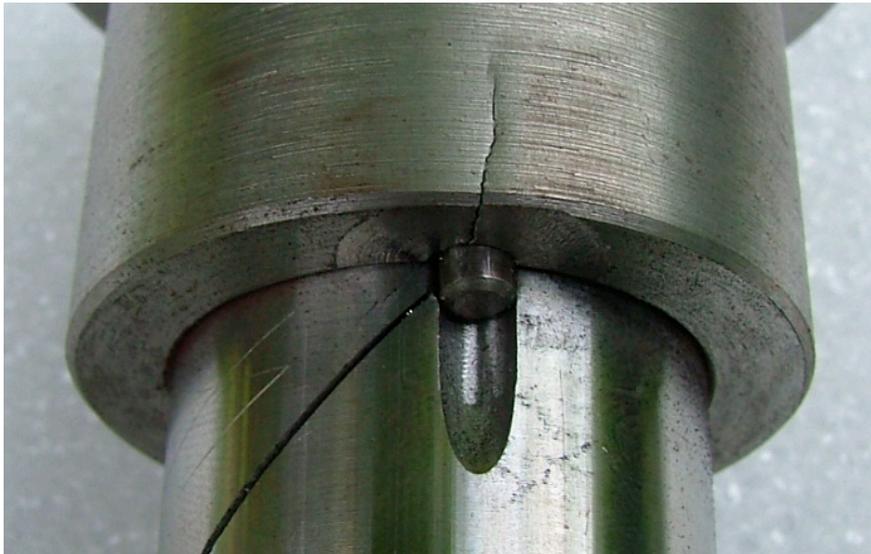


Abbildung 9: Wellenbruch 3_0,125_0,71_1, $R = 0,1$, 770 Nm +/- 630 Nm
Torsionsbelastung /5/

Stiftbrüche wurden bei sämtlichen Untersuchungen mit Vollstiften nicht beobachtet, lediglich bei den Untersuchungen mit Hohlspannstiften nach DIN 8752 /2/ kam es bei Schwellbelastung ($R = 0,1$) und Spielsitz zwischen Welle und Nabe zu massiven bleibenden Verformungen der Hohlspannstifte, siehe Abbildung 10, in deren Folge keine Dauerfestigkeit ermittelt werden konnte. Für den Fall der Presspassung zwischen Welle und Nabe konnte mit den Hohlspannstiften eine Dauerfestigkeit bis 3×10^7 Lastwechsel trotz Reibkorrosionsbildung nachgewiesen werden.



Abbildung 10: Deformation der Hohlspannstifte 3_0,1875_0,5_1_HSP /5/

Kombinierte Drehmoment- und Biegebelastung, experimentell

Die Versuche mit kombinierter Belastung wurden nur mit den Spielsitzpaarungen (0,6‰ bezogenes Spiel) bei $M_{t,m}/M_{b,a} = 0,5$ mit $\sigma_{b,a} = 124$ MPa und $\tau_{t,m} = 32$ MPa gefahren. Als Ergebnis davon versagten in den Versuchen trotz der dreifachen Stiftabstützung alle Verbindungsvarianten mit erheblichen Reibkorrosionsschäden, siehe Abbildung 11, wobei der Bruchort nicht an der Nabenkante, sondern sehr weit unter der Nabe liegt. Analog zu den Passfederverbindungen ist ein überlagerter zylindrischer Pressverband auch für die Längsstiftverbindung bei Querkraft- oder Biegebelastung sehr empfehlenswert.



Abbildung 11: Wellenbruch 1_0,1875_0,5_1,4, kombinierte Belastung (stat. Torsion + Umlaufbiegung) /5/

Passfeder mit halbrundem Fuß, numerisch

Die Ergebnisse zur Kerbreduzierung speziell in der meistens gefährdeten Welle, in Kombination mit dem Wunsch einer möglichst großen Kompatibilität zu gängigen Anbauteilen mit Passfedergeometrie führt zu einer bislang als Sonderform zu bezeichnenden Symbiose aus Rundstiftfuß und Passfederkopf, siehe Abbildung 13. Vor dem Hintergrund der gebrochenen dünnwandigen Naben mit Längsstiften in Abbildung 9 ist hier ebenfalls eine Verbesserung erwartbar. Um die grundsätzlich sinnvolle Mischform bewerten zu können, wurden in /6/ numerische Untersuchungen mit den in Tabelle 2 angegebenen Werkstoffkombinationen dazu angestellt. Der Fügedurchmesser beträgt auch hier $D_{al} = 32$ mm.

Tabelle 2: Werkstoffdaten für die bilineare Simulation

Element	Welle	Nabe	Passfeder
Werkstoff	42CrMo4	C45E	C45E
Streckgrenze Re [MPa]	750	370	430
Tangentenmodul [MPa]	3289	1962	2026

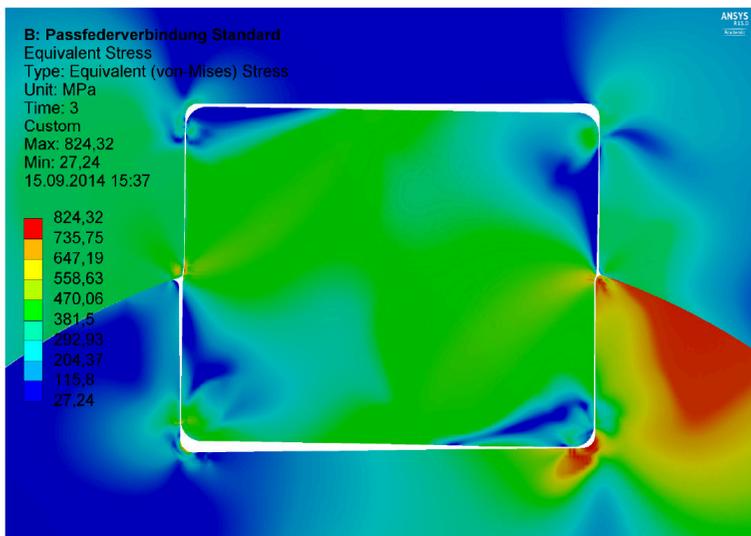


Abbildung 12: Vergleichsspannung nach v. Mises bei einer Torsionsbelastung von 600 Nm /6/

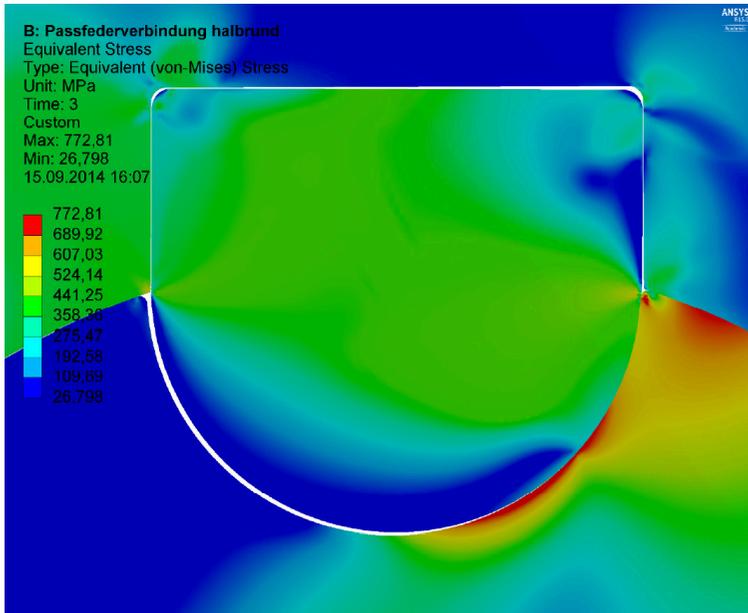


Abbildung 13: Vergleichsspannung nach v. Mises bei einer Torsionsbelastung von 600 Nm /6/

Beide Verbindungen wurden mit nur einem Formschlusselement simuliert, um den Anspruch der Kompatibilität zu erfüllen. Die Mischform zeigt hier eine signifikant niedrigere Vergleichsspannung nach v. Mises. Deutlicher wird dies noch bei der lokalen Auswertung der Hauptspannungen in der Wellennutecke, die bei der normalen Passfeder extrem hohe Zugspannungen aufweist. Im Sinne einer Optimierung und zur Nutzung von Leichtbaupotentialen ist mit der Mischform eine schnittstellenkompatible Lösung verfügbar.

Zusammenfassung

Der Längsstift realisiert mit seinem kreisrunden Querschnitt den ideal großen Kerbradius in den beteiligten Bauteilen und führt damit zu einer wirksamen Kerbspannungsreduzierung. Dieser Effekt konnte sowohl numerisch als auch experimentell nachgewiesen werden. Für eine sinnvolle Auslegung konnte eine Stifanzahl von drei bis vier Stiften mit einem Durchmesser von ca. 0,2 x Wellendurchmesser ermittelt werden. Bei zusätzlichen Biegebelastungen sollte auf spielfreien Sitz zwischen Welle und Nabe geachtet werden. Durch die mit aktuellen Fertigungstechnologien erreichbaren Genauigkeiten sind auch die historischen Probleme der Teilungsabweichungen zwischen den Längsstiftbohrungen und deren Verläufen zwischen Welle und Nabe gelöst.

Speziell für den Fall einer Kundenschnittstelle bietet die abschließend dargestellte Mischform aus Längsstift und Passfeder eine interessante Lösung zur Tragfähigkeitssteigerung an der meist limitierenden Welle.

Literatur

- /1/ Kabus, K.; Rieg, F.; Weidemann, F.; Engelken, G.; Hackenschmidt, R.: Maschinenelemente - Funktion, Gestaltung und Berechnung. 16. Aufl. München: Hanser, 2007. – ISBN 978-3-446-40897-5
- /2/ Norm DIN EN ISO 8752, 10.2009. Spannstifte (-hülsen) – Geschlitzt, schwere Ausführung
- /3/ Norm DIN 743, Teil 1 bis 4, 12.2012. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- /4/ Birkholz, Hagen: Auslegung von Längsstift-Verbindungen mit mehreren Mitnehmerelementen unter Drehmomentbelastung. Dissertation TU Clausthal: Papierflieger, 2005. – ISBN 3-89720-769-9
- /5/ Korte, Thomas; Dietz, Peter; Schäfer, Günter: Gestaltung und Dimensionierung spielbehafteter Längsstiftverbindungen. Abschlussbericht DFG-Vorhaben DI 289/23-2, 2008
- /6/ Runge, Fridtjof: Benchmark Formschlussverbindungen. Bachelorarbeit TU Clausthal, 2014