

# Untersuchungen zu kombinierten reib-/formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen



Mänz, T

*Zur Übertragung von Drehmomenten und Drehzahlen kommen verschiedene Welle-Nabe-Verbindungen zum Einsatz. Diese können in der Regel in form- oder reibschlüssige Verbindungen unterschieden werden. Daneben gibt es gerändelte Pressverbindungen, die die Vorteile beide Gruppen vereinen. Grundlegende Kenntnisse zu Versagensmechanismen und zur Auslegung liegen jedoch nicht vor. In einem aktuellen Projekt soll diese Lücke geschlossen werden.*

*For the transmission of torque and rotational speed, different shaft-hub connections are used. These can generally be distinguished in form-fitting or frictional connections. Beyond that there are knurled interference fits that combine the advantages of both groups. However, basic knowledge of failure mechanisms and the dimensioning do not exist. In a current project, this gap should be closed.*

## 1 Einleitung

Welle-Nabe-Verbindungen müssen bei hoher Leistungsdichte, kostengünstiger Herstellung, einfacher Montage und Demontage auch hohe dynamische Belastungen (Servo- und Torquemotoren) ertragen. Montagefreundliche, formschlüssige Verbindungen sind, besonders bei Wechsellasten, nur begrenzt geeignet. Ein Ausschlagen der Verbindung durch Verschleiß und plastische Verformungen ist nicht selten. Pressverbindungen sind hierfür geeigneter. Kombinierte reib-/formschlüssige Pressverbindungen mit gerändelter Welle stellen eine Alternative dar. Die Vorteile liegen in der hohen Übertragungsfähigkeit und der geringen Toleranzempfindlichkeit bei gleichzeitig hoher Verdrehsicherheit.

Die Verbindung kann durch Umspritzen (Kunststoff) oder als Längspressverband hergestellt werden. Durch das axiale Einpressen einer gerändelten Welle mit Übermaß in eine „weichere“ glatte Nabe, z.B. aus Aluminium oder Stahl mit geringerer Festigkeit, wird während des Fügevorgangs gleichzeitig eine Gegenverzahnung in die Nabe geschnitten oder gedrückt (vgl. Abbildung 1). Da die Welle als Werk-

zeug und als Bauteil genutzt wird, sind Teilungsabweichungen prinzipbedingt ausgeschlossen.

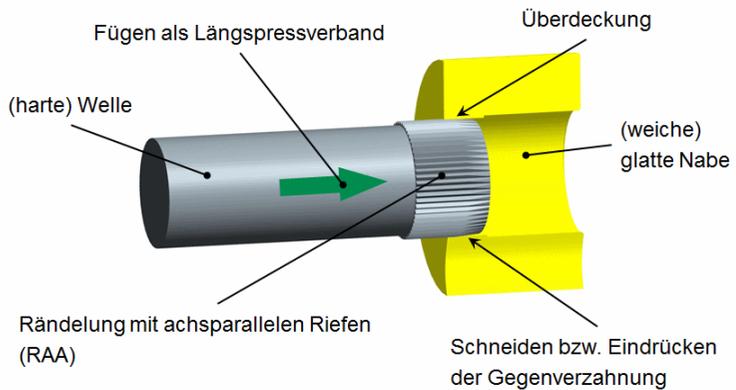


Abbildung 1: Fügen eines Rändelpressverbands

## 1.1 Problemstellung und Ziel

Trotz des häufigen Einsatzes liegen zurzeit weder die grundlegenden Kenntnisse zu den Versagensmechanismen des kombinierten Kontakts noch ausreichende praxisrelevante Auslegungs- und Konstruktionsvorschriften für gerändelte Pressverbindungen vor. Dies betrifft insbesondere unterschiedliche Werkstoffkombinationen, spanlose Fertigung und Montage sowie erhöhte Temperaturen.

Ziel des FVA-/AiF-Forschungsvorhabens (FVA-Nr. 658, IGF-Nr. 17086 N / 1) ist es, eine experimentell abgesicherte Auslegungsgrundlage für die Dimensionierung und den Festigkeitsnachweis von gerändelten Pressverbindungen zu entwickeln.

## 2 Vorgehensweise

Die Arbeiten im Projekt können in vier Bereiche unterteilt werden (vgl. Abbildung 2):

1. Versuche an einer abgewickelten Pressfuge  
Ziel: Durch einen messtechnisch gut zugänglichen Versuchsaufbau können zusätzliche Größen gemessen und ein breite-

res Verständnis der Verbindungseigenschaften geschaffen werden.

#### 2. Versuche an zylindrischen Verbindungen

Ziel: Bestimmung der statischen und dynamischen Übertragungsfähigkeit von Drehmomenten sowie der Übertragungsfähigkeit bei kombinierter statischer Torsions- und dynamischer Biegebelastung.

#### 3. Numerische Untersuchungen

Ziel: Ermittlung von zusätzlichen, messtechnisch nicht erfassbaren Größen (z. B. Passfugendruck und Eigenspannungen) mittels FEM-Berechnungen, die zur Entwicklung des Versagensmodells benötigt werden.

#### 4. Entwicklung eines Versagensmodells

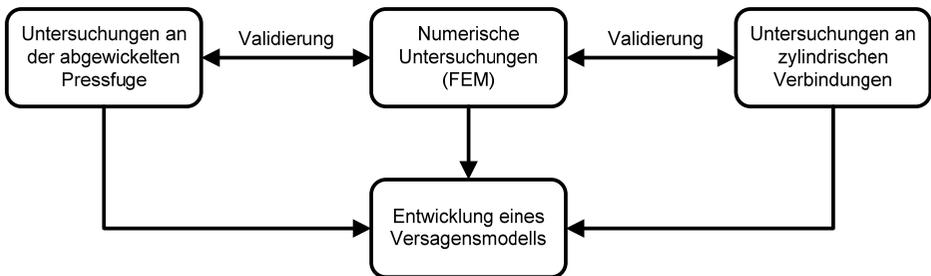


Abbildung 2: Vorgehen zur Entwicklung eines Versagensmodells für Pressverbindungen mit gerändelter Welle

In den einzelnen Bereichen werden die wesentlichen Einflussgrößen auf die Übertragungsfähigkeit untersucht. Diese sind:

- Werkstoffpaarung
- Rändelteilung  $t$  (siehe Abbildung 3, links,  $\alpha = 90^\circ$ )
- Übermaß  $U$
- Fasenwinkel  $\phi$  (siehe Abbildung 3, rechts)
- Fugenlänge  $l_F$
- Nabenußendurchmesser  $D_A$
- Temperatur

Im Folgenden werden numerische Untersuchungen zur abgewickelten Pressfuge sowie experimentelle Untersuchungen an der zylindrischen Verbindung vorgestellt.

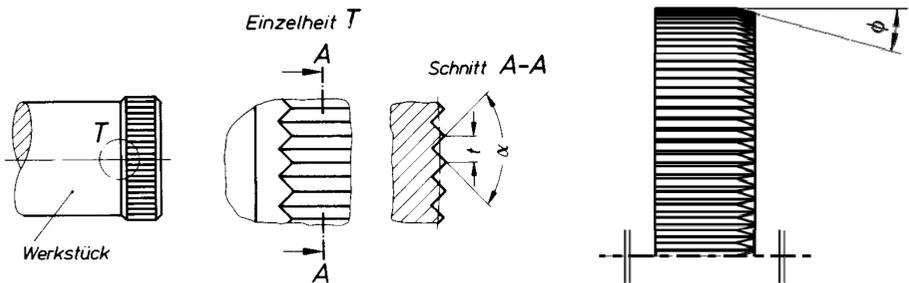


Abbildung 3: Rändel RAA mit achsparallelen Riefen nach DIN 82 /1/

### 3 Numerische Untersuchungen zur abgewickelten Pressfuge

#### 3.1 Vorgehensweise

Durch den messtechnisch gut zugänglichen Versuchsaufbau bei Verbindungen mit einer abgewickelten Pressfuge können die numerischen Berechnungen des Fügevorgangs sehr gut validiert werden. Die Erkenntnisse beim Modellaufbau können dann für die numerischen Untersuchungen an den zylindrischen Verbindungen genutzt werden.

Bei den numerischen Berechnungen musste berücksichtigt werden, dass es sich aufgrund der starken Verformungen um ein hochgradig nichtlineares Problem handelt, für das sich die klassischen FE-Programme mit impliziten Solvern nicht eignen. In diesem Forschungsprojekt wird daher der explizite Solver LS-Dyna eingesetzt. Die hohen Umformgrade haben weiterhin zur Folge, dass die üblichen Kennwerte zur Beschreibung der Werkstoffeigenschaften (E-Modul, Querkontraktionszahl, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung) nicht ausreichen. Zusätzlich zu diesen Werten werden die Fließkurven bis hin zu hohen Dehnungen benötigt, die nicht aus einem Zugversuch hervorgehen. Daher wurden zusätzlich Stauchversuche durchgeführt, mit denen die Werkstoffeigenschaften bis zu einer Dehnung von über 40% ermittelt werden konnten /3/.

Um den Rechenaufwand für die FE-Berechnungen zu minimieren, wurde das Modell der Verbindung mit abgewickelter Pressfuge auf einen Zahn beschränkt. Dafür wurde der Ausschnitt (vgl. Abbildung

4, links, schwarzer Kasten) so gewählt, dass die Symmetrieebene des Versuchsaufbaus weiterhin genutzt werden kann (Strich-Punkt-Linie). Die Steifigkeiten der Rändelaufnahme sowie der weggeschnittenen Bereiche der gerändelten Platte in vertikaler Richtung wurden mittels einer FE-Berechnung (ANSYS) bestimmt und durch Federn auf der im Bild oberen Schnittfläche in das eigentliche FE-Modell integriert (stabförmige Beam-Elemente, Abbildung 4, rechts).

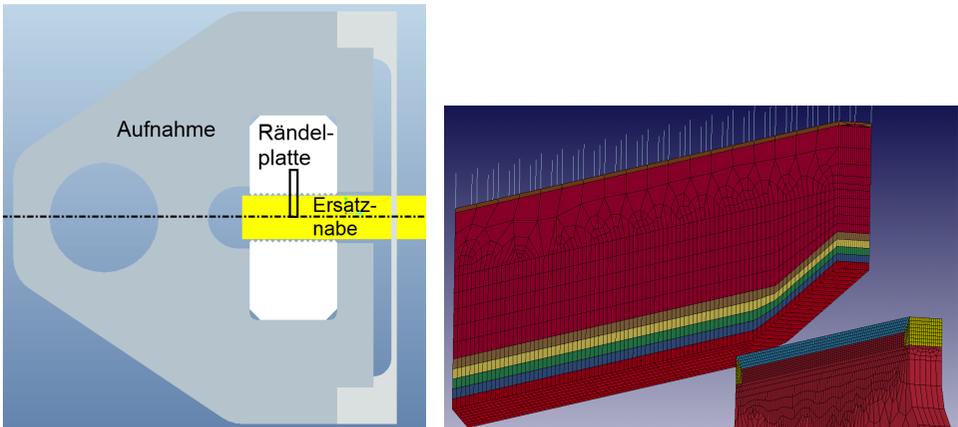


Abbildung 4: Vereinfachung des Modells mit abgewickelter Pressfuge auf einen Zahn

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der Einpress- (schwarz) und Radialkräfte (grau) aus dem Versuch (durchgezogene Linien) und der Berechnung (gestrichelte Linien). In beiden Fällen ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen.

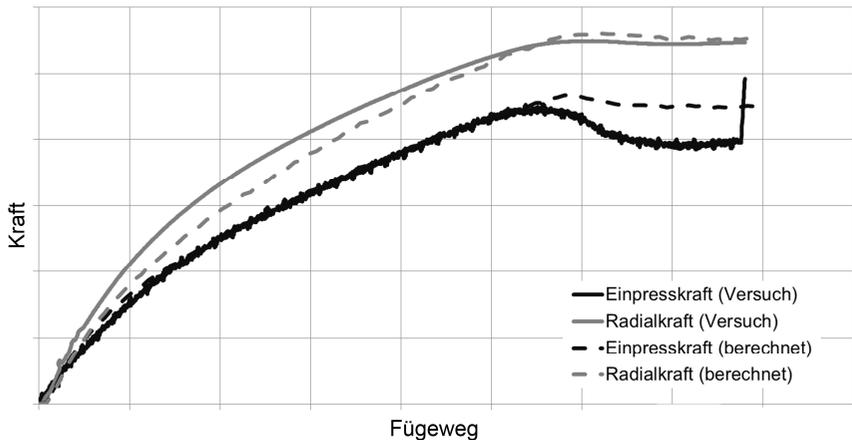


Abbildung 5: Vergleich der Einpress- und Radialkräfte aus Versuch und Berechnung

## 4 Experimentelle Untersuchungen an den zylindrischen Verbindungen

### 4.1 Vorgehensweise

Im Rahmen der Untersuchungen an den zylindrischen Verbindungen liegt der Fokus auf den folgenden 3 Bereichen:

- Einpressverhalten
- Statische Drehmomentübertragung
- Dynamische Belastbarkeit.

Ziele der Untersuchungen des Einpressverhaltens sind die Ermittlung der für die Montage notwendigen Fügekkräfte sowie das Verhalten bezüglich der Verzahnung der Nabe, also ob der Verzahnungsvorgang primär umformend oder zerspanend ist. Aufgrund der großen Anzahl an Variationen wurde ein D-optimaler Versuchsplan mit 35 Versuchen abgeleitet.

Ziel der statischen Drehmomentversuche ist die Feststellung der maximalen Übertragbarkeit sowie die Versagensursache der Verbindungen. Dafür werden diese statisch bis zum Versagen belastet. Neben dem Drehmoment wird der Verdrehwinkel aufgezeichnet.

Die Untersuchungen zur dynamischen Belastbarkeit umfassen reine Torsionsuntersuchungen zur Lebensdauer und zur Zeitfestigkeit. Untersuchte Spannungsverhältnisse sind  $R = 0,2$  und  $R = -1$ . Die Versuche zur Lebensdauer werden nach dem Treppenstufenverfahren nach /4/ durchgeführt. Innerhalb der Zeitfestigkeitsbereiche werden 3 Lasthorizonte berücksichtigt. Weiterhin werden Untersuchungen unter kombinierter Belastung (dynamische Biegung, statisches Torsionsmoment) auf jeweils drei verschiedenen Lasthorizonten durchgeführt.

## 4.2 Ausgewählte Versuchsergebnisse

### 4.2.1 Einpressverhalten

Beim Einpressen der Welle in die Nabe wird die weichere Nabe von der gerändelten Welle verzahnt. Das Verhalten bei der Verzahnung der Nabe ist abhängig vom Fasenwinkel. Bei Wellen ohne Fase – dies entspricht einem Fasenwinkel von  $90^\circ$  – wird die Verzahnung rein zerspanend erzeugt, während Wellen mit Fase eine umformende Verzahnung der Nabe zur Folge haben. Abbildung 6 zeigt die qualitativen Verläufe von Verbindungen mit unterschiedlichen Fasen. Aufgrund der D-optimalen Versuchsplanung gibt es keine Verbindungen, die sich nur in den 3 Fasenwinkeln unterscheiden, weshalb die Verläufe zur besseren Vergleichbarkeit auf die maximale Einpresskraft normiert wurden. Es zeigt sich, dass die Kraft bei der Verbindung mit  $90^\circ$ -Fase zunächst stark ansteigt, dann jedoch auf konstantem Niveau bleibt. Die Gesamtkraft entspricht also in etwa der Zerspanungskraft, die sich über den Einpressweg nicht ändert. Da durch die Zerspanung Material aus der Verbindung herausgetragen wird, treten nur geringe Pressungen und Reibkräfte auf. Nachdem die Nabe über die gesamte Verbindungslänge  $l_F$  verzahnt wurde, fällt die Zerspanungskraft ab, während die kleine Reibkraft weiterhin vorhanden ist.

Die Fügekraft bei den Verbindungen mit Fase ist dagegen stärker von der Reibkraft geprägt. Zu Beginn des Fügevorgangs steigt die Kraft aufgrund der Verformung der Nabe ebenfalls stark an. Allerdings steigt die Fügekraft bis zu einem Fügeweg der der Verbindungslänge  $l_F$  entspricht, weiter an, da sich die Kontaktfläche in der Passfuge bei konstanter Pressung vergrößert und somit die Reibkraft ansteigt. Nachdem die Nabe komplett verzahnt wurde, bleibt die Fügekraft bis zum Erreichen des Anschlags auf einem hohen Niveau. Der qualitative Verlauf wird vom Fasenwinkel ( $5^\circ$  oder  $15^\circ$ ) wenig beeinflusst.

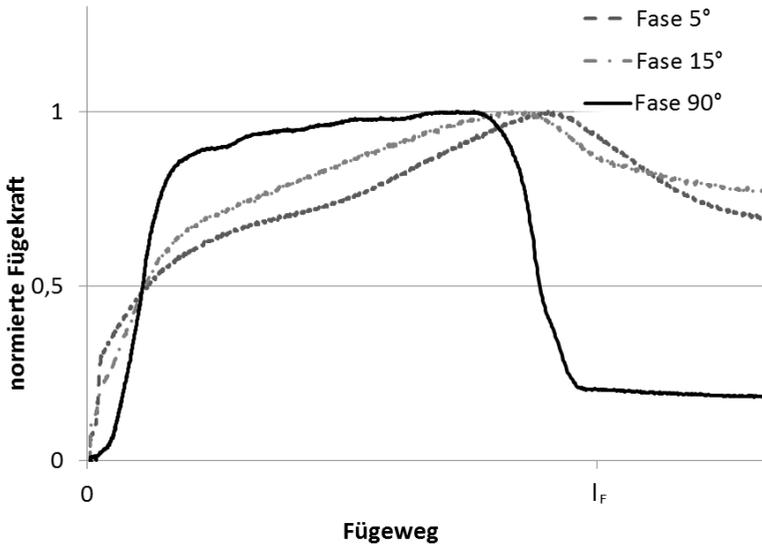


Abbildung 6: Fügekraft über Fügeweg

#### 4.2.2 Statische Drehmomentübertragung

In den statischen Torsionsversuchen konnte eine sehr hohe Drehmomentübertragbarkeit nachgewiesen werden. An dieser Stelle soll exemplarisch ein Vergleich zu einer glatten Pressverbindung gezeigt werden.

Abbildung 7 zeigt den Drehmoment-Verdrehwinkel-Verlauf einer gerändelten Pressverbindung (durchgezogene Linie). Das Drehmoment ist auf das linear-elastisch übertragbare Drehmoment normiert. Ein Abscheren der Zähne am Zahnfuß tritt etwa bei dem 3fachen des elastisch übertragbaren Drehmoments auf. Nach dem Abscheren der Zähne fällt das Drehmoment recht langsam ab, da der Passfugendruck noch immer vorhanden ist.

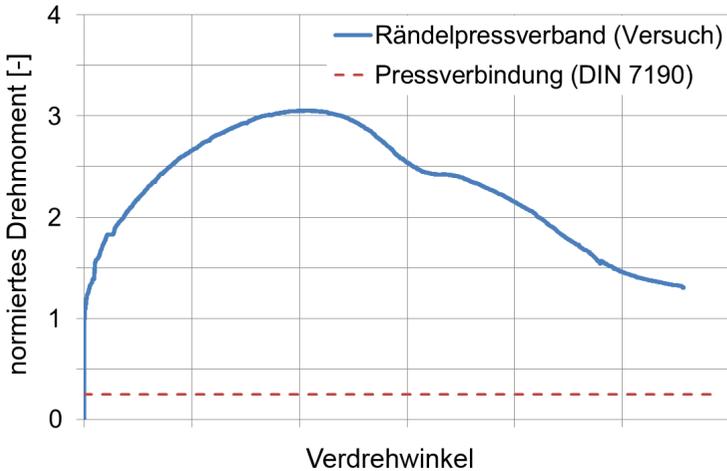


Abbildung 7: Drehmoment über Verdrehwinkel eines untersuchten Rändelpressverbands sowie elastisch übertragbares Drehmoment einer Pressverbindung nach DIN 7190 /2/ vergleichbarer Geometrie (Sicherheiten = 1, Fertigungstoleranzen wurden vernachlässigt)

Als Vergleich dient eine nach DIN 7190 /2/ ausgelegte rein elastisch beanspruchte Pressverbindung (gestrichelte Linie). Soweit möglich wurde die Geometrie von der gerändelten Pressverbindung übernommen (Werkstoffe, Verbindungslänge, Passfugendurchmesser, Nabenaußendurchmesser). Bezüglich der Sicherheiten wurde der beste Fall angenommen (Sicherheit = 1, keine Fertigungstoleranzen). Daraus ergibt sich ein übertragbares Drehmoment von etwa einem Viertel der Übertragbarkeit des Rändelpressverbands.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Pressverbindungen mit gerändelter Welle sind aufgrund verschiedener Vorteile wie Spielfreiheit bei hoher Verdrehsicherheit sowie prinzipbedingt nicht vorhandene Teilungsabweichungen eine Alternative zu reinen form- oder reibschlüssigen Welle-Nabe Verbindungen. Dabei bieten sie eine im Vergleich zu Pressverbindungen hohe statische Drehmomentübertragbarkeit.

In noch folgenden Arbeitsschritten werden umfangreiche dynamischen Untersuchungen durchgeführt sowie Berechnungsgrundlagen entwickelt, um die Auslegung gerändelte Pressverbände ermöglichen zu können.

## **6 Danksagung**

Der Autor bedankt sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung, sowie bei der AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung des Projekts „Untersuchungen an Pressverbindungen mit gerändelter Welle“ (FVA-Nr. 658, IGF-Nr. 17086 N / 1).

## **7 Literatur**

- /1/ DIN 82, Rändel, Deutsche Norm, 1973
- /2/ DIN 7190, Pressverbände, Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln, Deutsche Norm 2001
- /3/ Mänz, T.: Ermittlung von Werkstoffdaten zur Berechnung großer plastischer Verformungen mittels Finite-Elemente-Methoden, Institutsmittteilung Nr. 37, IMW Clausthal 2012
- /4/ Hück, M.: Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. Zeitschrift für Werkstofftechnik, Heft 14, SS. 406-417, 1983