

Einflüsse auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen

Mörz, F.; Schäfer, G.

Im folgenden Artikel wird eine Übersicht zu den wichtigsten Einflussfaktoren auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen gegeben. Neben dem Einfluss von Fügelänge, Nabenwandstärke und Materialkombination wird auch der Fügevorgang von dünnwandigen Naben in Rändelpressverbindungen anhand aktueller Untersuchungsergebnisse diskutiert.



The following article is presenting a summary of the parameters that are influencing the joining process of knurled shaft-hub-connections. In addition to the influence of joining length, hub wall thickness and material combination, the joining process of thin-walled hubs in knurled shaft-hub-connections is discussed on the basis of current investigation results.

Prinzip der Rändelpressverbindungen

Rändelpressverbindungen sind eine spezielle Form der Welle-Nabe-Verbindung, die sich durch eine Kombination von reib- und formschlüssiger Kraftübertragung auszeichnet. Dazu wird einer der beiden Verbindungspartner mit einer Rändelung versehen und in den anderen Verbindungspartner eingepresst.

Grundsätzlich muss eine Härte- bzw. Festigkeitsdifferenz zwischen den beiden Verbindungspartnern vorhanden sein. Zur Herstellung solcher Verbindungen wird der härtere der beiden Verbindungspartner mit einer Rändelung versehen. Während des Fügevorgangs wird diese Rändelung in den weicheren Verbindungspartner abgebildet, wodurch ein Formschluss entsteht. Außerdem ist ein Übermaß zwischen den beiden Partnern vorhanden. Aufgrund dieses zusätzlichen Übermaßes entsteht gleichzeitig eine radiale Vorspannung zwischen den beiden Bauteilen der Verbindung.

In Abbildung 1 ist der prinzipielle Aufbau einer solchen Verbindung mit einer harten, gerändelten Welle und einer glatten Nabe dargestellt. Die Umkehrung, also die Paarung einer innengerändelten Nabe mit einer glatten Welle ist ebenso denkbar.

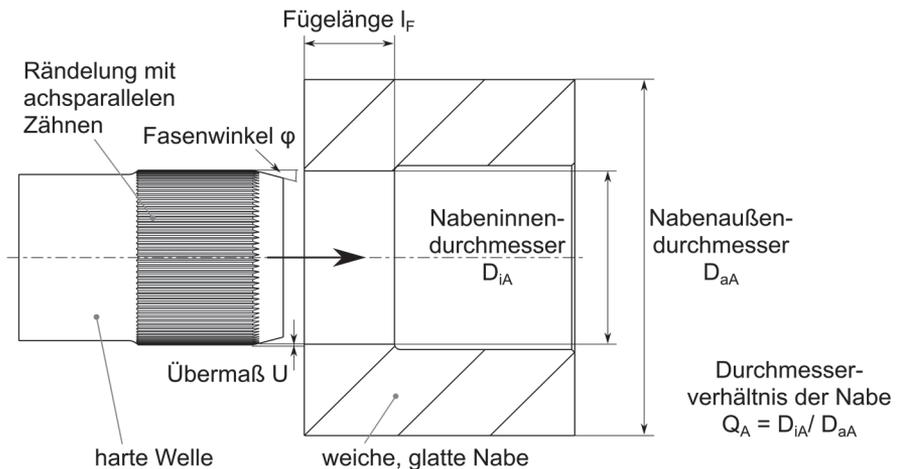


Abbildung 1: Prinzip der Rändelpressverbindung: Einpressen und/oder Einschneiden einer harten gerändelten Welle (siehe links) in eine weiche, glatte Nabe (siehe rechts)

Herstellungsverfahren der Rändelung

Für die Verwendung in Rändelpressverbindungen eignen sich aufgrund des axialen Fügevorgangs vorwiegend achsparallele Rändel der Form RAA nach DIN82 /1/.

Diese Rändelungen können auf unterschiedliche Art und Weise hergestellt werden. Die konventionellen Verfahren zur Herstellung solcher Rändelungen sind das Rändelformen und das Rändelfräsen. Dabei wird die Rändelung mit einem oder mehreren sogenannten Rändelrädern auf einer Drehmaschine in das Werkstück geformt oder gefräst /2/.

Darüber hinaus können mit weiteren, speziellen Verfahren wie dem Rändelwalzen, dem Wälzfräsen oder dem rekursiven Axialumformen ebenfalls Rändelungen erzeugt werden. Dafür sind jedoch spezielle Fertigungsmaschinen und Werkzeuge erforderlich /3/.

Der Einfluss unterschiedlicher Fertigungsverfahren auf Rändelpressverbindungen wird aktuell im Rahmen eines FVA Forschungsprojektes untersucht: FVA 658II „Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle“ AiF Nr.: 20172 N/1.

Abtragen der Zahnköpfe der Rändelung

In einem weiteren Fertigungsschritt können nach dem Herstellen der Rändelung die Zahnspitzen der Rändelung abgetragen werden. Dadurch ist es möglich definierte Außendurchmesser-Toleranzen am Zahnkopf der Rändelung für den Einsatz in

Rändelpressverbindungen zu erzielen (vgl. Abbildung 2). Aufgrund dessen sind dabei auch kleinere Korrekturen der Rändelung z.B. bei nicht vollständig ausgebildeten Rändelspitzen möglich, siehe hierzu auch /4/.

Neben der fertigungsgerechten Tolerierung wird eine Verbesserung der Zentrierung der Verbindungspartner, welche durch die flachen Zahnköpfe besser zueinander geführt werden, erwartet. Dies ist u. A. Forschungsgegenstand in aktuellen Untersuchungen /5/.

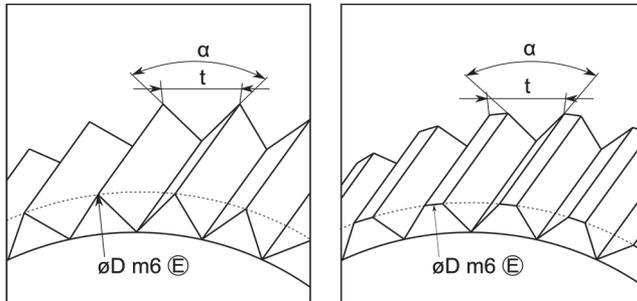


Abbildung 2: Gegenüberstellung einer Rändelung mit spitzen Zahnköpfen (links) und einer Rändelung mit abgetragenen Zahnsitzen (rechts) mit Bemaßung und Tolerierung

Fügen von Rändelpressverbindungen

Für die Ausbildung von Rändelpressverbindungen beim Fügevorgang spielen folgende Faktoren eine Rolle:

- die Materialkombination
- die Gestaltung der Fase am gerändelten Verbindungspartner
- das Übermaß
- die Nabenwandstärke bzw. das Durchmesser Verhältnis Q_A
- der Aufbau der Fügevorrichtung

Materialkombination

Beim Fügen von Rändelpressverbindungen wird die Rändelung, welche sich auf dem härteren Verbindungspartner befindet, in den weicheren Verbindungspartner eingebracht. Gebräuchlich sind Stahl/Stahl-Verbindungen mit einem gehärteten und einem ungehärteten Verbindungspartner, sowie Stahl/Aluminium-Verbindungen. Grundsätzlich können die Verbindungspartner aber aus verschiedensten Materialien bestehen, solange eine gewisse mindest Härte-Differenz zwischen den Bauteilen eingehalten wird.

Bader gibt in /5/ dazu Richtwerte für schneidend gefügte Rändelpressverbindungen an: Hier sollte das Härteverhältnis für Stahl/Stahl- und Stahl/Aluminium-

Verbindungen mindestens 1,8:1 betragen. Für Stahl/Messing-Kombinationen wird das Mindest-Härteverhältnis mit 1,6:1 angegeben.

Lätzer gibt in /7/ für Rändelpressverbindungen mit Stahl/Aluminium-Kombinationen ein Mindest-Härteverhältnis von 2,5:1 an.

Fase

Je nach Ausgestaltung der Fase am gerändelten Verbindungspartner kann zwischen schneidendem (spanabhebendem) oder umformendem Fügevorgang unterschieden werden. Liegt der Fasenwinkel ϕ zwischen 5° - 15° , stellt sich ein vorwiegend umformender Fügevorgang ein. Liegt der Fasenwinkel ϕ im Bereich zwischen 15° - 60° stellt sich ein umformend/spanabhebender Fügevorgang ein. Für Fasenwinkel ϕ größer 60° kann von einem rein schneidenden Fügevorgang gesprochen werden /7/. In einer neueren Veröffentlichung wird der Bereich für den umformend/spanabhebenden Fügevorgang mit etwa 45° - 60° angegeben /8/.

Fasen mit großen Fasenwinkeln haben einen geringeren Platzbedarf in axialer Richtung. Wird die Fase jedoch so groß gewählt, dass ein schneidender Fügevorgang stattfindet, dann wird radial nur wenig oder kein Material in der Nabe verdrängt. Die Flächenpressung zwischen den Verbindungspartnern ist geringer als bei umformend gefügten Verbindungen. In experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass schneidend gefügte Rändelpressverbindungen den umformend gefügten Rändelpressverbindungen hinsichtlich der dynamischen Drehmomentübertragungsfähigkeit unterlegen sind /9/.

Übermaß

Das Übermaß zwischen Welle und Nabe ist eine wichtige Einflussgröße für die Drehmomentübertragungsfähigkeit, aber auch für die erforderliche Fügekraft zum Fügen der Verbindung. Inwieweit das zwischen den Bauteilen vorhandene Übermaß während des Fügens auch in der Rändelpressverbindung umgesetzt wird hängt von verschiedenen Faktoren ab:

Bei einem schneidenden Fügevorgang wird das Material des weicheren Verbindungspartners in Form von Spänen beim Fügen der Rändelpressverbindung ausgebracht. Aufgrund dessen kann hier vor einer geringen Nabenaufweitung durch das Fügen ausgegangen werden.

Beim umformenden Fügevorgang muss jedoch sichergestellt sein, dass das umgeformte Material des weicheren Verbindungspartners in die Freiräume der Rändelung des gerändelten Verbindungspartners fließen kann bzw., dass das Volumen in den Rändelzwischenräumen ausreichend groß ist. Dabei kommt es gleichzeitig zu einer radialen Aufweitung der Nabe, welche zu einer Vergrößerung dieser Zwischenräume führen kann. Dies sollte besonders bei dünnwandigen Naben berücksichtigt werden. Sofern hierzu keine genaueren Informationen vorliegen, sollte die Nabenaufweitung experimentell ermittelt werden.

Nabenwandstärke

Für eine maximale Drehmomentübertragungsfähigkeit von Rändelpressverbindungen sollten möglichst dickwandige Naben eingesetzt werden. Es empfiehlt sich ein Naben Durchmesser Verhältnis von mindestens $Q_A=0,5$.

Häufig sind so dickwandige Naben in praktischen Anwendungen aber aus Platzgründen nur mit enormen Aufwand oder gar nicht zu realisieren. Für eine platzsparende Rändelpressverbindung kann hier die Nabenwandstärke reduziert werden.

Mit einer verringerten Nabenwandstärke geht eine Reduzierung der maximal übertragbaren Lasten einher. Zudem können zusätzliche Vorkehrungen für einen erfolgreichen Fügeprozess nötig werden.

Aktuelle Untersuchungen /5/ haben gezeigt, dass sehr dünnwandige Naben ($Q_A=0,8$) eine zusätzliche Abstützung des Nabenmaterials während des Fügevorgangs erforderlich machen. Aufgrund der verwendeten Rändelgeometrie (Rändel mit abgetragenen Zahnköpfen; Übermaß $U_{geom}=0,33mm$; Fase $\phi=15^\circ$; umformender Fügevorgang) und den verwendeten Materialkombinationen (16MnCr5_{gehärtet}/C45 und C45/EN-AW5083) entstehen während des Fügevorgangs Spannungen, die zu einer vollständigen Plastifizierung der Nabe führen. Dementsprechend kann die Nabe während des Fügens radial ausweichen und die Rändelpressverbindung wird nur mit einem sehr geringen Übermaß oder unzureichend ausgebildet.

In solchen Fällen können Stützringe zur radialen Abstützung der Nabe verwendet werden, um ein Ausweichen der plastifizierten Bereiche zu verhindern. Diese Stützringe sind in aktuellen Forschungsarbeiten aufgrund der Probengeometrie radial teilbar ausgeführt. Ein dreiteiliger Aufbau ermöglicht hier eine gleichmäßige Anlage der Stützringe über dem Nabenausendurchmesser, die verwendeten Stützringe werden an die Flügelänge $l_F=6mm$ und $l_F=15mm$ angepasst (vgl. Abbildung 3). Die Ringe werden vor dem Fügen drehmomentgesteuert mit einer minimalen Vorspannung in Anlage gebracht. Damit wird sichergestellt, dass es bei der Montage der Stützringe zu keiner Verformung der Nabe im Fügebereich kommt. Eine größere Vorspannung des Stützrings vor dem Fügen ist aber ebenso denkbar und könnte ggf. zur Realisierung größerer Übermäße mit dünnwandigen Naben beitragen.



Abbildung 3: Montage eines Stützrings an einer dünnwandigen Aluminium-Nabe mit $l_F=15mm$

Fügevorrichtung

Für das Erreichen einer guten Rundlaufgenauigkeit gefügter Rändelpressverbindungen spielt neben der Rändelgeometrie (hier Rändelung mit abgeschliffenen Zahnköpfen) auch die Fügevorrichtung eine wichtige Rolle.

In der für die Untersuchungen verwendeten Fügevorrichtung erfolgt die Ausrichtung der Verbindungspartner zueinander über die Aufnahme- und Zentrierdurchmesser an den Wellen- und Naben-Proben. Diese Durchmesser sind mit Spielpassungen mit einer guten Genauigkeit ($H6/f6$ und $H7/f7$, vgl. Abbildung 4) gefertigt. In Abbildung 5 ist ein typischer Fügekraftverlauf beim Fügen einer solchen Rändelpressverbindung dargestellt.

Werden hier jedoch die maximal möglichen geometrischen Abweichungen betrachtet, wird deutlich, dass sich allein aufgrund der Passungen zur Führung der Bauteile eine maximale Rundlaufabweichung von 0,066mm einstellen kann. Hinzu kommen Abweichungen die innerhalb der einzelnen Bauteile (Welle, Nabe und Vorrichtung) zwischen den verschiedenen Geometrieelementen vorhanden sind.

Dementsprechend können geringere Rundlaufabweichungen mit dieser Art der Fügevorrichtung nur mit sehr großem Aufwand realisiert werden. Ein anderer Aufbau zur Führung der Bauteile zueinander während des Fügevorgangs kann hier Verbesserungen bringen.

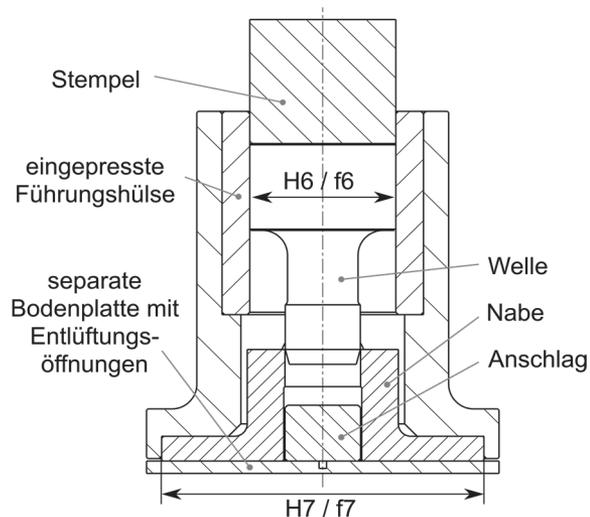


Abbildung 4: Verwendete Fügevorrichtung

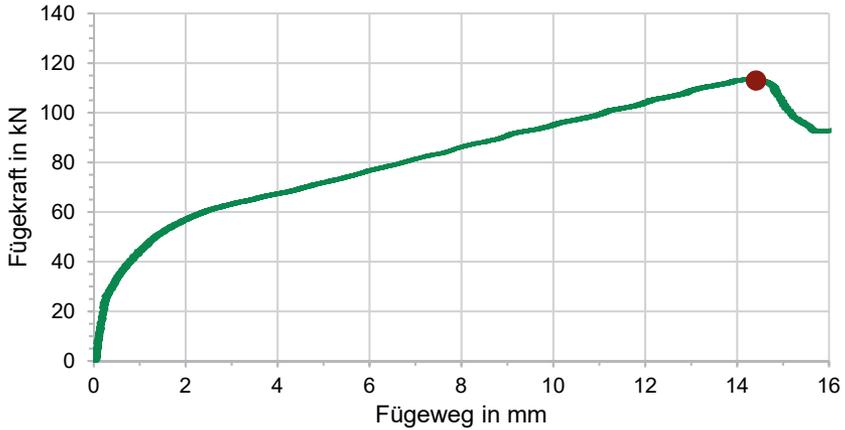


Abbildung 5: *Typischer Fügekraftverlauf einer dickwandigen 16MnCr5_{gehärte}/C45-Probe mit $l_F=15\text{mm}$; die Markierung kennzeichnet die maximale Fügekraft*

Einflussgrößen auf die Fügekraft

Der Einfluss der Fügelänge l_F , der Nabenwandstärke Q_A , sowie des Nabenmaterials auf die maximale Fügekraft beim Fügen (siehe vorhergehender Abschnitt) von Rändelpressverbindungen sind in den folgenden Diagrammen aufgetragen.

Mit zunehmender Fügelänge l_F ist ein Anstieg der maximalen Fügekräfte zu erwarten. Diese Steigerung kann bei allen untersuchten Nabenmaterialien (C45 und ENAW-5083) und Nabenwandstärken Q_A beobachtet werden (vgl. Abbildung 6).

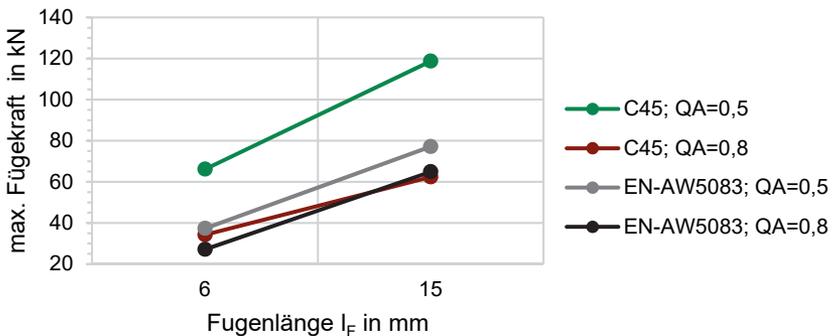


Abbildung 6: Einfluss der Fügelänge auf die max. Fügekraft /10/

Die Nabenwandstärke Q_A hat ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die max. zu erwartenden Fügekräfte. Mit zunehmender Nabenwandstärke kann eine Steigerung der max. Fügekraft beobachtet werden. Dieser Effekt ist bei Stahl-Naben (C45) deutlich ausgeprägter als bei den untersuchten Aluminium-Naben (EN-AW5083) (vgl. Abbildung 7).

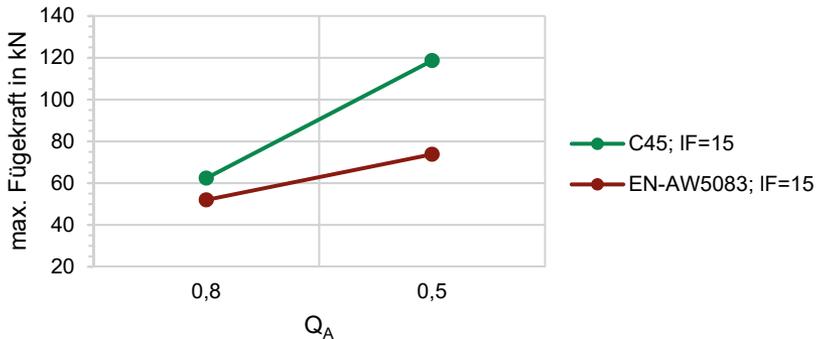


Abbildung 7. Einfluss der Nabenwandstärke Q_A auf die max. Fügekraft /10/

Der Einfluss des Nabenwerkstoffes auf die max. Fügekräfte ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier wird deutlich, dass unabhängig von der Nabenwandstärke Q_A und der Fügelänge l_F , die zu erwartenden max. Fügekräfte bei Stahl-Naben (C45) größer sind, als bei Aluminium-Naben (ENAW-5083) mit sonst gleicher Geometrie.

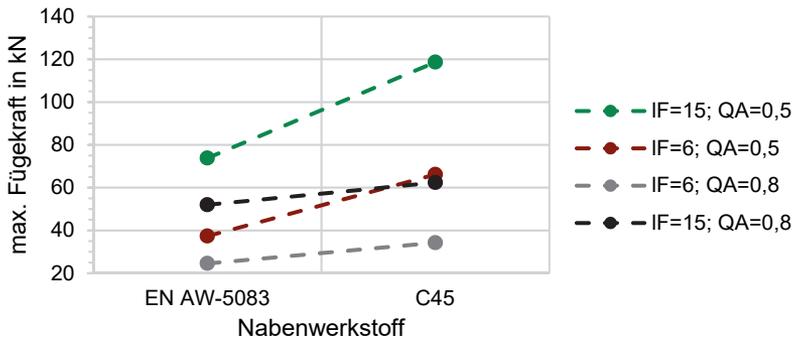


Abbildung 8: Einfluss des Nabenwerkstoffes auf die max. Fügekraft /10/

Die Rändelungen der hier gefügten Proben wurden mittels Rändel-Walzen hergestellt und die Zahnsitzen der Rändelungen anschließend abgeschliffen. Die Fase an der Welle ($\varphi=15^\circ$) und das Übermaß ($U_{geom}=0,33\text{mm}$) zwischen Welle und Nabe sind bei den untersuchten Proben konstant. Für die Auswertung der Fügekräfte wurden die Ergebnisse mehrerer Fügeversuche mit gleicher Geometrie gemittelt /10/.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurde eine Reihe wichtiger Einflussfaktoren auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen erläutert und diskutiert. Dabei wurden die Einflussgrößen Fügelänge, Nabenwandstärke und Materialkombination separat betrachtet. An diese Stelle sei darauf hingewiesen, dass auch die Wechselwirkungen der Einflussfaktoren untereinander eine wichtige Rolle spielen können.

Bereits bei der konstruktiven Gestaltung von Rändelpressverbindungen sollte deshalb der Fügevorgang z.B. durch spezielle Führungselemente an den Verbindungspartnern berücksichtigt werden. Besonders das Abtragen der Rändelspitzen nach dem Fertigen der Rändelung verspricht Vorteile hinsichtlich der einzustellenden Bauteiltoleranzen, der Einfluss auf die Rundlaufgenauigkeit der Verbindungen wird aktuell noch untersucht.

Auch die Gestaltung der Vorrichtung zur Führung der Verbindungspartner während des eigentlichen Fügevorgangs spielt eine wichtige Rolle, damit hinreichend kleine Rundlaufabweichungen erreicht werden können.

Der Einsatz dünnwandigen Naben ermöglicht darüber hinaus die Anwendung von Rändelpressverbindungen auf kleinstem Bauraum. Für die Herstellung solcher Verbindungen sollte beim Fügevorgang eine mögliche Pastifizierung der Naben berücksichtigt werden. Dem kann z.B. durch Vorkehrungen zur radialen Abstützung der Naben Rechnung getragen werden. So wird sichergestellt, dass die Rändelpressverbindungen hier prozesssicher ausgebildet werden können.

Literatur

- /1/ Norm DIN 82: Rändel, Januar 1973
- /2/ Hommel+Keller Präzisionswerkzeuge GmbH: zeus Rändeltechnik: Rändelräder, Rändelwerkzeuge, Sonderwerkzeuge, Rollierrollen. 3. Auflage. Produktkatalog, Jan. 2018
- /3/ Mörz, F.: Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle Forschungsvorhaben Nr. 658 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., (AiF 20172 N/1), unveröffentlichter Sachstandsbericht, Mai 2019
- /4/ Mörz, F.; Lohrengel, A.: Beitrag zur Verbesserung der praktischen Realisierung der geometrischen Gestalt von Pressverbindungen mit gerändelter Welle. In: Tagungsband zum 16. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik, 2018, Nr. 16, S. 260–271
- /5/ Mörz, F.: Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle Forschungsvorhaben Nr. 658 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., (AiF 20172 N/1), unveröffentlichter Sachstandsbericht, Oktober 2019
- /6/ Bader, M.: Untersuchungen von Rändel-Welle-Nabe-Verbindungen mit am Praxiseinsatz orientierten Randbedingungen. In: VDI-Berichte (2012), Nr. 2176, S. 105–116
- /7/ Lätzer, M.: Füge- und Übertragungsverhalten torsionsbelasteter Stahl-Aluminium-Rändelpressverbindungen, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2016
- /8/ Suchý, L.; Gerstmann, T.; Leidich, E.; Awiszus, B.: Influence of Hub Parameters on Joining Forces and Torque Transmission Output of Plastically-Joined Shaft-Hub-Connections with a Knurled Contact Surface. In: machines (2018). <https://www.mdpi.com/2075-1702/6/2/16>
- /9/ Mänz, T.: Auslegung von Pressverbindungen mit gerändelter Welle, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2017
- /10/ Stök, M.: Experimentelle Torsionsuntersuchungen an rändelgewalzten Rändelpressverbindungen, Technische Universität Clausthal, interne Studienarbeit, 2019, unveröffentlicht