

Fertigungseinfluss auf das Füge- und Übertragungsverhalten von Rändelpressverbindungen

Mörz, F.; Schäfer, G.

Rändelpressverbindungen sind eine spezielle Bauform der Welle-Nabe-Verbindung, die sich durch die Kombination von reib- und formschlüssigen Wirkmechanismen zur Lastübertragung auszeichnet. Das zentrale Element dieses Verbindungstyps ist die Rändelung. Aufgrund des Fügevorgangs eignen sich dafür vorwiegend Rändelungen mit achsparallelen Riefen auf Basis der DIN 82 /1/. Neben den konventionellen Fertigungsverfahren Rändelformen und Rändelfräsen gibt es eine Reihe weiterer Verfahren zur Herstellung von Rändelungen. In diesem Artikel wird der Einfluss dreier, ausgewählter Rändel-Herstellungsvorgänge auf die zum Fügen der Verbindungen erforderlichen Kräfte sowie die statische und dynamische Drehmomentübertragungsfähigkeit von Rändelpressverbindungen, am Stand aktueller Forschung betrachtet.



Knurled shaft-hub connections are a special design of shaft-hub connections, which is characterized by the combination of frictional and positive-locking mechanisms for load transmission. The key element of this connection type is the knurling. Due to the joining process, knurls with parallel grooves based on DIN 82 /1/ are mainly suitable therefor. Beside the conventional manufacturing processes knurl forming and knurl milling there are several other knurl manufacturing methods. In this article, the influence of three selected knurling manufacturing processes on the forces required for joining the connections and the static and dynamic torque transmission capacity of knurled shaft-hub connections is examined according to the current state of research.

Prinzip der Rändelpressverbindung

Eine Rändelpressverbindung (RPV) besteht grundlegend aus einem harten, gerändelten Verbindungspartner und einem, im Vergleich dazu weichen Gegenstück mit glatter Fügefläche. Dabei kann sowohl die Welle, als auch die Nabe gerändelt und ggf. gehärtet ausgeführt werden. Dieser Artikel basiert auf experimentellen Untersuchungen von RPV mit gerändelten Wellen. Zum Fügen einer solchen Verbindung wird der gerändelte Verbindungspartner axial in das glatte Gegenstück eingepresst, vgl. Abbildung 1. Dabei beeinflussen Geometriefaktoren die Art des Fügevorgangs von schneidend bis umformend mit kombinierten Zwischenstufen, wobei die Fügeart wiederum Einfluss auf das Übertragungsverhalten der Verbindung hat. Zu den Geometriefaktoren gehört der Fasenwinkel φ am Beginn der

Rändelung, das Übermaß U , die Flügelänge l_F und die Nabenwandstärke, hier als Durchmesser Verhältnis Q_A . Wichtige Untersuchungen zum Fügevorgang wurden von LÄTZER in /2/ durchgeführt. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Fügevorgang von RPV wurde in /3/ veröffentlicht.

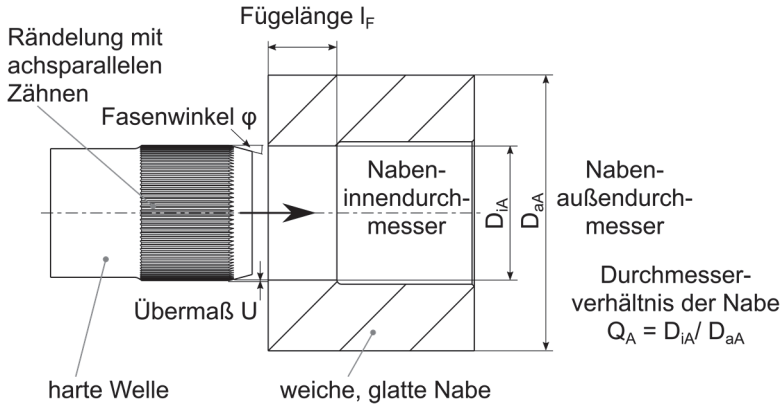


Abbildung 1: Prinzip der Rändelpressverbindung: Eine harte gerändelte Welle, hier mit abgetragenen Zahnköpfen (links) wird in eine weiche, glatte Nabe eingepresst (rechts)

Rändelherstellung

Auf herkömmlichen Drehmaschinen lassen sich mit den konventionellen Verfahren Rändelformen und Rändelfräsen, Rändelungen mit vergleichsweise geringem Aufwand herstellen. Daneben gibt es eine Reihe unkonventioneller Rändel-Herstellungsverfahren. Dazu zählen u.a. das Profilwalzen, das Wälzfräsen und das rekursive Axialumformen, welche spezielle Werkzeuge und Maschinen erfordern.

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. wurden Rändelpressverbindungen untersucht (FVA 658 II „Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle“ AiF-Nr.: 20172 N/1). Der vorliegende Artikel bezieht sich auf diese Untersuchungen und die dort verwendeten Rändelproben, welche mittels konventionellem Rändelfräsen, Profilwalzen und Wälzfräsen hergestellt wurden /4/.

Die von LÄTZER in /2/ untersuchten RPV wurden zum Teil mittels rekursivem Axialumformen hergestellt. Dieses Verfahren erfordert jedoch neben einer speziellen Umformmaschine eine für die Geometrie angepasste Matrize. LÄTZER empfiehlt das Verfahren für die Serienfertigung von Rändelwellen für RPV.

Untersuchte Rändelgeometrie

Die Geometrie der betrachteten Rändelproben bzw. RPV ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass die Rändel-Zahnköpfe nach der Rändel-Herstellung und ggf. anschließendem Härten der Proben, abgetragen wurden (siehe hierzu auch /3/ und /5/). Der Abtrag entspricht hier 1/3 der theoretischen Zahnhöhe. Zudem wurde die Rändelung mit einer Ausrundung im Zahnfußbereich zwischen den einzelnen Rändel-Zähnen versehen. Diese Geometrie wurde für eine möglichst gute Vergleichbarkeit über alle untersuchten Rändel-Herstellungsverfahren konstant gehalten.

Die an Wellen-Zahnkopf und Naben-Innendurchmesser angetragenen Abmaße entsprechen den Toleranzfeldern einer H7/h6 Passung, die jeweils symmetrisch um die Nennmaße verteilt sind, vgl. Abbildung 2. Die so hergestellten gerändelten Wellen sind für die drei untersuchten Herstellungsverfahren in Abbildung 3 dargestellt.

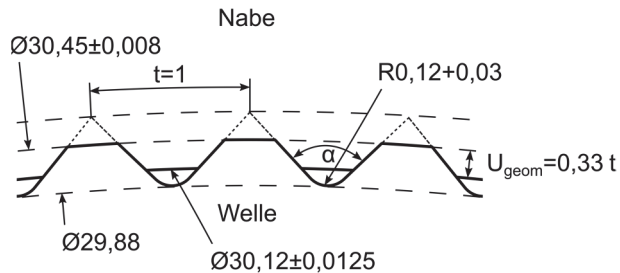


Abbildung 2: Bemessene Geometrie der untersuchten Rändelpressverbindung, schematische Darstellung im gefügten Zustand (Angaben in mm)

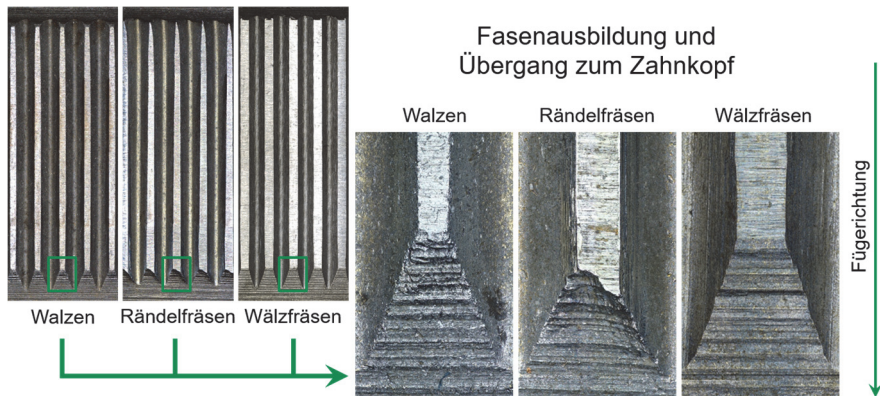


Abbildung 3: Rändelprofil auf Probenwellen mit $l_F = 6 \text{ mm}$: Rändelzähne (links) und Fasenausbildung (rechts) nach Rändel-Herstellungsverfahren

Experimentelle Untersuchungen

Fügeverhalten

Für die Untersuchungen zum Fügeverhalten der RPV wurden die Probenteile in einer speziellen Vorrichtung aufgenommen und während des Fügevorgangs geführt. Damit kann die genaue Positionierung der Funktionselemente von Welle zu Nabe sichergestellt werden. Die Rändelungen werden vor dem eigentlichen Fügen der Verbindung mit Öl benetzt, so kann ein Fressen der Verbindungspartner beim Einpressen verhindert werden. Während des Fügevorgangs werden die erforderliche Einpresskraft und der zugehörige Fügeweg aufgezeichnet, vgl. Abbildung 4.

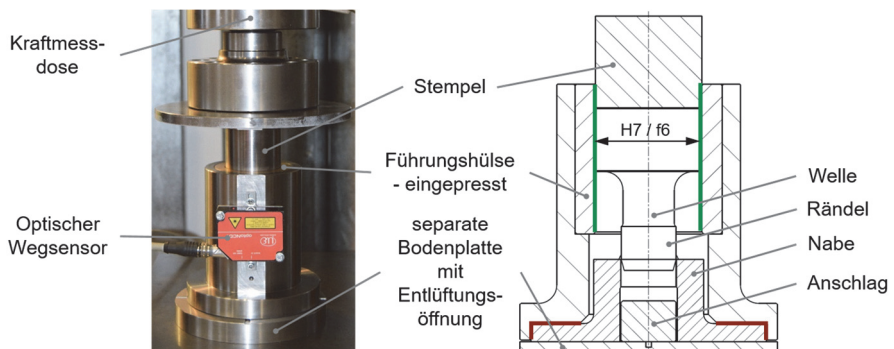


Abbildung 4: Vorrichtung zum Fügen von Rändelpressverbindungen mit Messwertaufzeichnung (links) und als schematische Schnittdarstellung (rechts)

In Abbildung 5 ist ein exemplarischer Fügekraftverlauf mit den charakteristischen Fügekraftphasen des Fügevorgangs dargestellt. In Phase ① findet das initiale Eindringen der Rändelzähne in den Nabenwerkstoff statt. In Phase ② findet ein kontinuierlicher Anstieg der Fügekraft durch das Umformen des Nabenmaterials über die komplette Fügelänge statt. Ist dies abgeschlossen, erfolgt ein leichter Abfall der Fügekraft in Phase ③. Die Nabengeometrie bestimmt hier die Verbindungslänge, da die Rändelung der Wellen länger ausgeführt ist als die geforderte Fügelänge. Deshalb kann die Welle mit Rändelung über die Fügelänge hinaus, bis zum Erreichen der Endlage in die Nabe geschoben werden, Phase ④. Die hier auftretende Kraft entspricht der Reibkraft zum Verschieben der Verbindung und wird neben der maximalen Fügekraft am Übergang von Phase ② zu Phase ③ ausgewertet. Beim Erreichen der Endlage werden die Proben in der Vorrichtung gegen einen Anschlag geschoben, die Fügekraft steigt dadurch sprunghaft an und charakterisiert den Abschluss des Fügevorgangs, Phase ⑤.

Die Ergebnisse der Fügeuntersuchungen sind den Ergebnissen zur statischen Übertragungsfähigkeit in Abbildung 7 gegenübergestellt. Die angegebenen Kräfte

sind Mittelwerte aller im Forschungsprojekt FVA 658 II „Einfluss von Fertigungsverfahren auf Pressverbindungen mit gerändelter Welle“ untersuchten Proben der jeweiligen Parameterkombination.

Über alle Versuchsreihen weisen die Proben mit gewalzter Rändelung die höchsten Füge- und Reibkräfte auf, während die beim Fügen der rändel- und wälzgefrästen Proben aufgebrachtten Kräfte niedriger sind. Die Fügekräfte der Proben mit rändelgefräster Rändelung unterliegen im Vergleich zu den beiden anderen Rändel-Herstellungsverfahren größeren Schwankungen.

Hier tritt der Einfluss der Rändelfertigung deutlich zu Tage: Aufgrund der leicht balligen Form der gewalzten Rändelzähne und der vergleichsweise stumpfen Fase treten beim Fügen dieser Proben die höchsten Kräfte auf, vgl. Abbildung 3. Die rändelgefrästen Proben weisen dagegen eine unsymmetrische Zahnform an der Fase auf. Während eine Zahnflanke der Rändelung in der Fase entsprechend der Vorgabe ausgebildet ist, ist die andere leicht aufgebogen und hat eine Kontur ähnlich einer schneidenden RPV bei einem Fasenwinkel größer 90° . Aufgrund dessen und zusätzlicher Abweichungen der Zahnbreite über der Länge der Rändelung können hier vergleichsweise geringe Fügekräfte bzw. starke Schwankungen der gemessenen Kräfte entstehen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Abweichungen der rändelgefrästen Rändelungen durch die verwendete Drehmaschine und die Steifigkeit der Einspannung der Proben während der Bearbeitung beeinflusst werden. Bei der Verwendung einer anderen Maschine, Aufnahme oder anderer Werkzeuge und abhängig von deren Verschleißzustand können hier andere Qualitäten der Rändel mit dem Rändelfräsen erzeugt werden.

Die Rändelung der wälzgefrästen Proben ist dagegen sehr gleichmäßig über der Fügelänge und mit einem vergleichsweise scharfen Übergang der Fase zum Zahnkopf ausgebildet. Dies sorgt für die, bei diesen Proben auftretenden, geringen Fügekräfte.

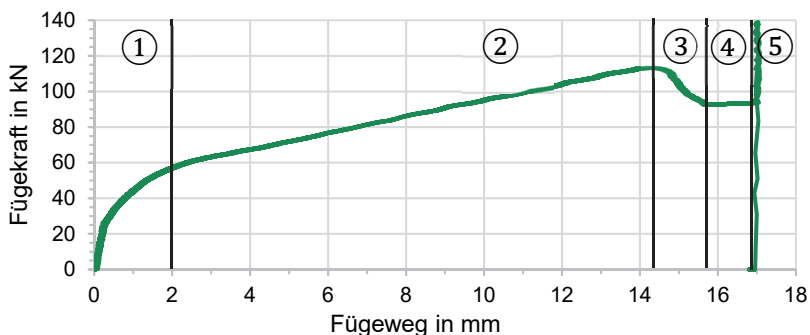


Abbildung 5: Exemplarischer Fügekraftverlauf zum Fügen einer RPV, Parameterkombination: 16MnCr5_{gehärtet} / C45; $I_F = 15 \text{ mm}$; $Q_A = 0,5$

Übertragungsverhalten unter statischer Torsionsbelastung

Die experimentellen Untersuchungen zum Übertragungsverhalten der unterschiedlichen Parameterkombinationen unter statischer Torsionsbelastung erfolgen auf einem speziell dafür angepassten Prüfstand, vgl. Abbildung 6. Für die Untersuchungen werden die Proben in einer geeigneten Probenaufnahme zwischen zwei Membrankupplungen eingespannt, um evtl. Biegemomenteinflüsse auszuschließen. Anschließend werden die Proben mit einem Getriebemotor mit großer Übersetzung bis zum Versagen tordiert. Dabei wird neben dem aufgebracht Torsionsmoment der Torsionswinkel aufgezeichnet. Siehe hierzu auch /6/.

Für die Untersuchungen wurden jeweils mehrere Proben (in der Regel drei Stück) mit der gleichen Parameterkombination untersucht und ausgewertet. Die Ergebnisse sind zusammen mit den Ergebnissen der Fügekraftuntersuchungen in Abbildung 7 dargestellt. Für die Auswertung der statischen Torsionsversuche wurde neben dem maximal übertragbaren Torsionsmoment bei Versagen der jeweiligen Verbindung, das Torsionsmoment ausgewertet, bei dem eine plastische Deformation der Verbindung eintritt. Hierzu wurde in Anlehnung an die Auswertung von Zugversuchen, bei denen die Streckgrenze $R_{p0,2}$ bei 0,2% plastischer Verformung ausgewertet wird, das Torsionsmoment bei 0,2% plastischer Verdrehung der Proben bestimmt. Dieser Wert wird im Folgenden als elastisches Grenzmoment bezeichnet.

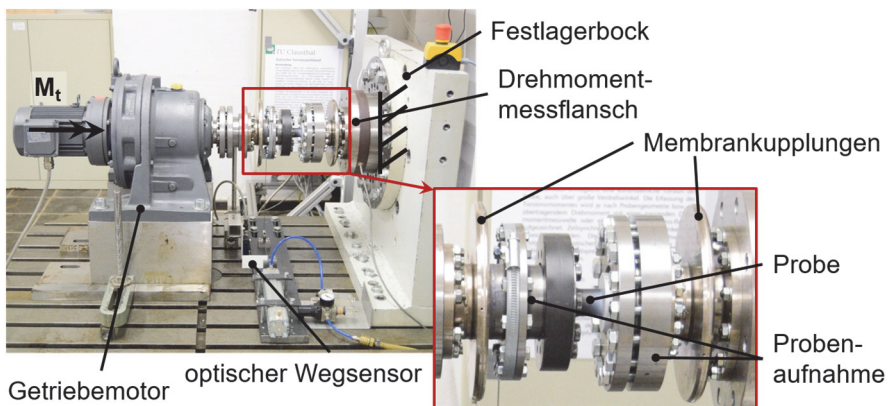


Abbildung 6: Prüfstand für die Untersuchungen unter statischer Torsionsbelastung

Die untersuchten Proben versagen im Versuch fast ausschließlich durch abscheren der, durch das Fügen, in den Naben ausgebildeten Rändelzähnen. Eine Ausnahme stellt die Parameterkombination 16MnCr5_{gehärtet} / C45; $l_F=15$ mm; $Q_A=0,5$ dar (siehe hierzu auch Übertragungsverhalten unter dynamischer Torsionsbelastung). Hier versagen die gehärteten Wellen außerhalb der Rändelpressverbindung.

Werden die unterschiedlichen Versuchsreihen hinsichtlich des Fertigungsverfahrens zur Rändelherstellung beurteilt fällt auf, dass die Unterschiede der übertragbaren

Torsionsmomente zwischen den einzelnen Fertigungsverfahren eher gering sind. Tendenziell sind die unter statischer Belastung übertragbaren Torsionsmomente bei den rändelgefrästen Proben etwas niedriger, als bei den gewalzten und wälzgefrästen Proben. Die gewalzten Proben weisen gegenüber den beiden anderen untersuchten Fertigungsverfahren leicht größere übertragbare Torsionsmomente auf. Insgesamt sind die Unterschiede hinsichtlich des Rändel-Herstellungsvorgangs aber gering.

Soll hingegen eine Verbindung mit möglichst geringer erforderlicher Fügekraft und möglichst hohen übertragbaren statischen Torsionsmomenten eingesetzt werden, dann sollte das Wälzfräsen als Rändel-Herstellungsvorgang angewendet werden.

Weitere Erkenntnisse zur Rändelform liefern die Vergleichsuntersuchungen mit den nach DIN 82 hergestellten spitzen Rändeln ohne abgetragene Zahnköpfe und ohne Zahnfußausrundung. Zum einen stellt die Verwendung von 16MnCr5 als Wellenwerkstoff gegenüber dem, in den Untersuchungen in /7/ verwendeten 18CrNiMo7-6 in Verbindung mit dem Einsatzhärten keinen signifikanten Nachteil dar. Die maximalen übertragbaren Torsionslasten sind mit beiden Werkstoffen etwa gleich groß. Zum anderen zeigt sich, dass das elastische Grenzmoment, der Proben mit spitzer Rändelgeometrie im Vergleich zu den Proben mit abgetragenen Rändel-Zahnköpfen deutlich niedriger liegt.

Übertragungsverhalten unter dynamischer Torsionsbelastung

Für die Untersuchung des Übertragungsverhaltens der RPV unter dynamischer Torsionsbelastung werden zwei baugleiche Prüfstände verwendet. Die Proben werden, wie bei den statischen Torsionsuntersuchungen in einer Probenaufnahme zwischen zwei Membrankupplungen aufgenommen. Die statische Mittellast wird mit Hilfe eines Hebelarms, der den kompletten Wellenstrang tordiert, aufgebracht. Anschließend erfolgt die Aufbringung der Lastamplitude mit Hilfe von, an einem Auslegerarm befestigten und angetriebenen Unwuchtmassen, vgl. Abbildung 8.

Zur Bestimmung der Dauerfestigkeiten der Verbindungen wurden für jede Versuchsreihe zehn Proben (nach erfolgter Bestimmung der Einstiegslast) nach dem Treppenstufenverfahren /8/ geprüft und nach der erweiterten IABG-Methode /9/ ausgewertet. Dabei wurde ein Spannungsverhältnis von $R=0,2$ eingestellt.

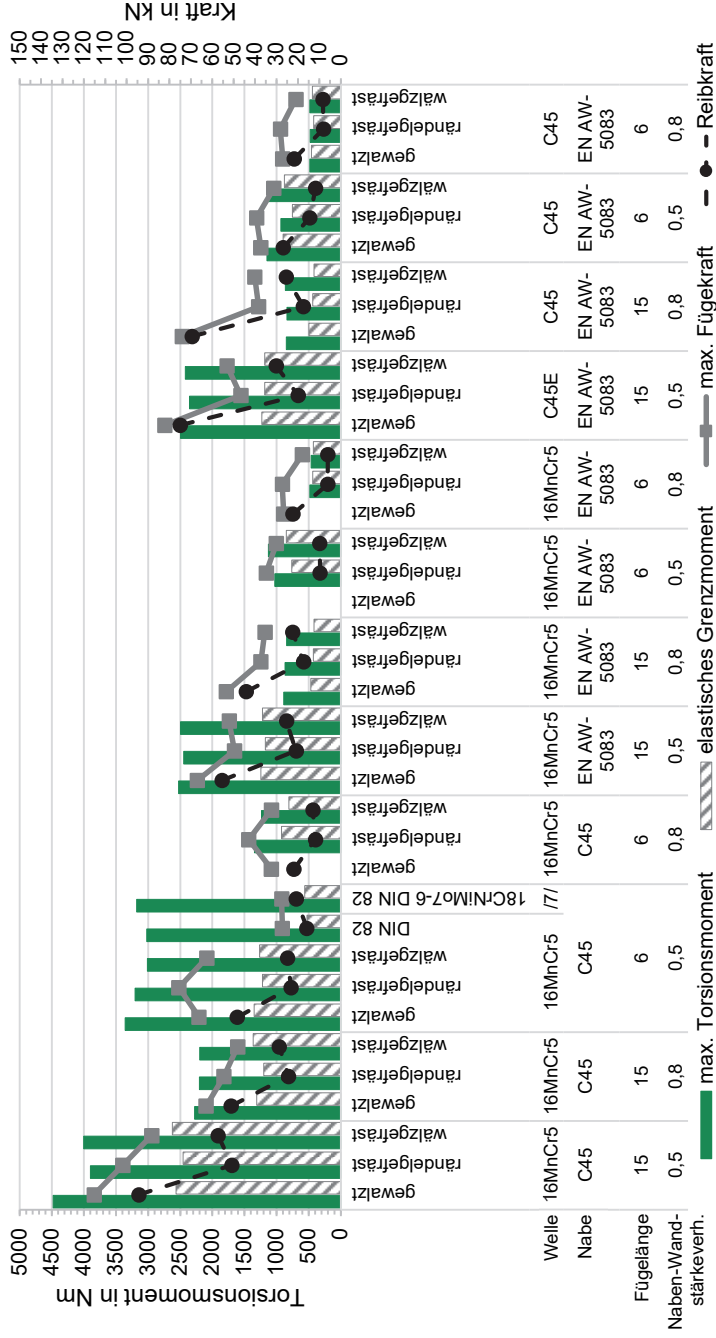


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Fügeverhalten und unter statischer Torsionsbelastung für unterschiedliche Parameterkombinationen nach Rändel-Herstellungsvorfahren, die Geometrie der als DIN 82 gekennzeichneten Versuchsreihen wurde zum direkten Vergleich mit den Untersuchungen von MÄNZ 17/ durchgeführt und verfügte nicht über abgetragene Rändel-Zahnköpfe und Zahnfußausrundungen

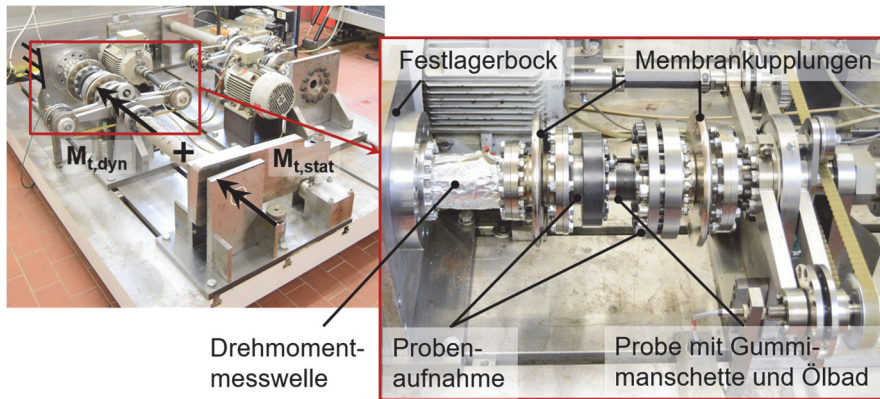


Abbildung 8: Prüfstände für die Dauerfestigkeitsuntersuchungen

In Anlehnung an eine Verwendung der Verbindung innerhalb eines Getriebes und für eine Reduzierung von Schwingungsverschleiß wurden die Proben während der Versuchsdurchführung in einem Ölbad geschmiert, vgl. Abbildung 8. Entsprechend DIN 50100 /10/ wurden für die Proben mit Stahl-Naben 5×10^6 und für die Proben mit Aluminium-Naben 1×10^7 Lastwechsel geprüft.

Wie bereits in den Untersuchungen zur statischen Torsionsmoment-Übertragungsfähigkeit versagen die Verbindungen mit der Parameterkombination $16\text{MnCr}5_{\text{gehärtet}} / \text{C}45$; $l_F=15 \text{ mm}$; $Q_A=0,5$ außerhalb der RPV im freien Wellenbereich. In Abbildung 9 sind für diese Versuchsreihe deshalb jeweils die niedrigsten Lasthorizonte dargestellt, auf denen Wellenbrüche aufgetreten sind. Die unterschiedlichen Lastniveaus beim Versagen dieser Proben, mit den verschiedenen hergestellten Rändelungen, sind dabei vor allem auf das Härten der Proben in unterschiedlichen Chargen und kleine Oberflächenschäden im freien Wellenbereich als Rissursache zurückzuführen. Bemerkenswert ist der Vergleich mit einer ähnlichen Versuchsreihe ($18\text{CrNiMo}7-6_{\text{gehärtet}} / \text{C}45$; $l_F=15 \text{ mm}$; $Q_A=0,5$) aus den Untersuchungen von MÄNZ /7/. Die Rändelgeometrie dieser Proben ist nach DIN 82 ausgeführt. Die Proben versagen aufgrund von Anrissen in der Verzahnung der Wellen auf einem deutlich niedrigeren Lastniveau, als die hier untersuchten Proben mit abgetragenen Rändel-Zahnköpfen und Zahnfußausrundungen. Bei allen anderen untersuchten Parameterkombinationen versagen die Naben. Auch die zum direkten Vergleich der Rändelung mit und ohne abgetragene Rändel-Zahnköpfe untersuchte Parameterkombination $16\text{MnCr}5_{\text{gehärtet}} / \text{EN AW-5083}$; $l_F=15 \text{ mm}$; $Q_A=0,5$ weist mit abgetragenen Rändel-Zahnköpfen eine leicht verbesserte Übertragungsfähigkeit unter dynamischer Torsionsbelastung gegenüber den Proben mit Rändelung nach DIN 82 auf, vgl. Abbildung 9.

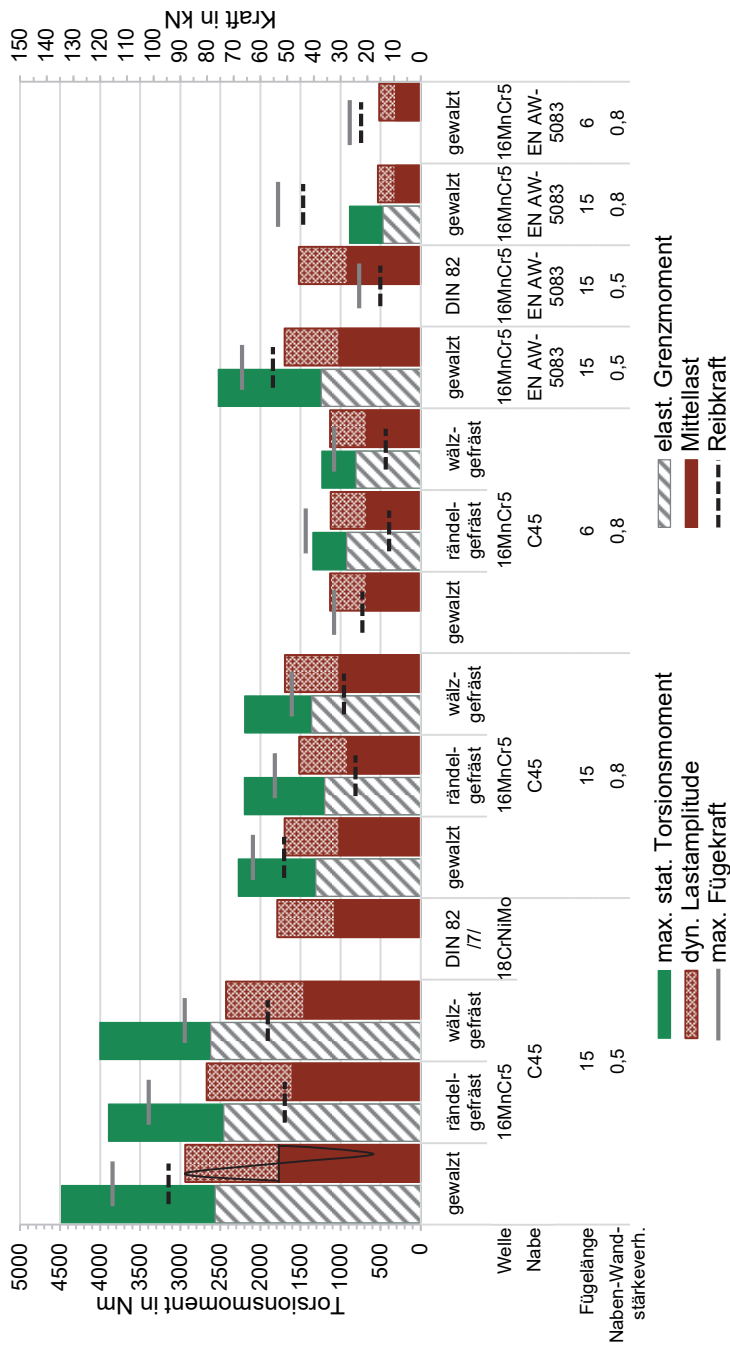


Abbildung 9: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Untersuchungen unter statischer und dynamischer Torsionsbelastung für unterschiedliche Parameterkombinationen nach Rändel-Herstellungsvorfahren und zugehörige Fügekräfte, die Geometrie der als DIN 82 gekennzeichneten Versuchsreihen wurde zum direkten Vergleich mit den Untersuchungen von MANZ durchgeführt bzw. sind // entnommen und verfügten nicht über abgetragene Rändel-Zahnköpfe und Zahnfußausrundungen

Bei der Betrachtung der einzelnen Versuchsreihen hinsichtlich der unterschiedlichen Rändel-Herstellungsverfahren ergibt sich ein ähnliches Bild, wie bei den Untersuchungen unter statischer Torsionsbelastung: Die Proben mit gewalzten und wälzgefrästen Rändelungen weisen leichte Vorteile gegenüber den Proben mit rändelgefräster Rändelung auf (vgl. Abschnitt Übertragungsverhalten unter statischer Torsionsbelastung). Die Unterschiede sind insgesamt aber gering.

Einen deutlich größeren Einfluss auf die Übertragungsfähigkeit haben die Parameter Nabenwerkstoff und -wandstärkeverhältnis Q_A . Dementsprechend können mit einer dünnwandigen Stahl-Nabe ($Q_A=0,8$) in etwa die gleichen dynamischen Lasten übertragen werden, wie mit einer dickwandigen Aluminium-Nabe ($Q_A=0,5$), bei sonst gleichen Parametern. Im statischen Überlastfall hat dagegen die dickwandige Aluminium-Nabe leichte Vorteile.

Der Einfluss der Fügelänge, besonders bei dünnwandigen Aluminium-Naben ($Q_A=0,5$), ist dagegen eher gering. So ist mit einer Vergrößerung der Fügelänge l_f von 6 mm auf 15 mm nur ein minimaler Zugewinn (ca. 3%) an Übertragbarkeit erreichbar. Werden hingegen dünnwandige Stahl-Naben verwendet können mit einer Vergrößerung der Fügelänge (um Faktor 2,5) die dynamisch übertragbaren Lasten (im Mittel um Faktor 1,5) gesteigert werden.

Beim Vergleich der Ergebnisse aus den statischen und den dynamischen Torsionsuntersuchungen fällt auf, dass die ermittelten dauerfest übertragbaren Lasten aller Parameterkombinationen oberhalb der, in den statischen Untersuchungen bestimmten, elastischen Grenzmomente liegen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass bereits beim Fügen der Verbindungen lokal eine plastische Verformung des Nabenmaterials stattfindet. Werden die Verbindungen unter Torsion beansprucht, muss zunächst die Werkstofffestigkeit im bereits plastifizierten Nabenbereich überschritten werden, bevor eine Schädigung der Verbindung aufgrund der Belastung im Dauerversuch erfolgen kann. Dieser Effekt ist beim Versagen der Proben im Dauerversuch durch Abscheren der Rändelzähne in der Nabe besonders ausgeprägt, vgl. Abbildung 9.

Alle hier aufgeführten Ergebnisse stellen einen Zwischenstand der Untersuchungen zu /4/ dar, da zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht alle experimentellen Untersuchungen abgeschlossen sind.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Anpassung der Rändelgeometrie aus der DIN 82 durch ein Abtragen der Rändel-Zahnköpfe und eine zusätzliche Zahnfußausrundung Vorteile bei der Torsionsmoment-Übertragungsfähigkeit sowohl unter statischer, als auch unter dynamischer Belastung bringen kann.

Zum Fügen der so modifizierten Rändelproben sind aufgrund des Abtrags an den Rändel-Zahnköpfen allerdings deutlich größere Fügekräfte erforderlich. Die Betrachtung der drei ausgewählten Rändel-Herstellungsverfahren hat Unterschiede in der Feingeometrie der Rändelungen ergeben. Die rändelgefrästen Proben weisen

leichte Nachteile bei der statischen und dynamischen Torsionsmoment-Übertragungsfähigkeit gegenüber den gewalzten und wälzgefrästen Rändelungen auf, diese sind jedoch insgesamt gering.

Deshalb lässt sich schlussfolgern, dass die Vorteile der Verfahren Profilverwalzen und Wälzfräsen hinsichtlich der Prozessstabilität und Rändel-Qualität besonders bei Groß- und Serienfertigung zum Tragen kommen werden. Für Kleinserien kann dagegen ebenso das Rändelfräsen erfolgreich angewendet werden.

Literatur

- /1/ Norm DIN 82: Januar 1973, Rändel
- /2/ Lätzer, M.: Füge und Übertragungsverhalten torsionsbelasteter Stahl-Aluminium-Rändelpressverbindungen, Technische Universität Chemnitz, Diss., 2016
- /3/ Mörz, F.; Schäfer, G.: Einflüsse auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen, Institutsmitteilung Nr. 44, S.19–28, Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 2019
- /4/ FVA658II: „Fertigungseinfluss Rändelpressverbindung“ der Forschungsvereinigung Antriebs-technik e.V. AiF-Nr.: 20172 N/1, unveröffentlichter Sachstandsbericht, Oktober 2020
- /5/ 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
- /6/ Mörz, F.; Schäfer, G.: Neuer Prüfstand für zügige Torsionsbeanspruchung, Institutsmitteilung Nr. 41, S.99–102, Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 2016
- /7/ Mänz, T.: Auslegung von Pressverbindungen mit gerändelter Welle, Technische Universität Clausthal, Diss., 2017
- /8/ Hück, M.: Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. In: Zeitschrift für Werkstofftechnik 12 (1983), Nr. 14, S.406–417
- /9/ Müller, C.: Zur statistischen Auswertung experimenteller Wöhlerlinien, Technische Universität Clausthal, Diss., 2015
- /10/ Norm DIN 50100: Dezember 2016, Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile