

## Experimentelle Ermittlung der Nabenaufweitung an torsionsbelasteten Rändelpressverbindungen

Mörz, F.; Schäfer, G.

*Im folgenden Artikel wird eine Möglichkeit zur experimentellen Erfassung der radialen Aufweitung an den Naben torsionsbelasteter Welle-Nabe-Verbindungen am Beispiel von Rändelpressverbindungen vorgestellt.*

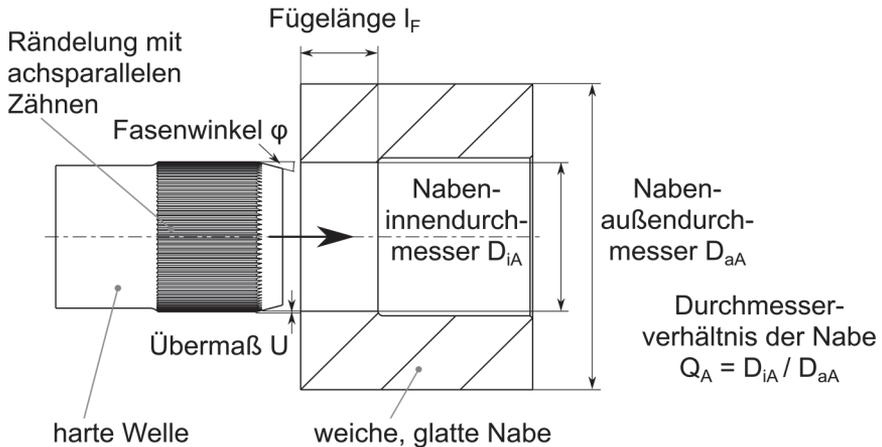


*In the following article, a possibility for the experimental investigation of radial hub expansion of torsional loaded shaft-hub connections is presented, using the example of knurled shaft-hub-connections.*

### Prinzip der Rändelpressverbindung

Rändelpressverbindungen (RPV) sind eine spezielle Form von Welle-Nabe-Verbindungen. Sie vereinen die Prinzipien von form- und reibschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen. Dazu wird einer der beiden Verbindungspartner mit einer achsparallelen Rändelung, z.B. Form RAA nach DIN 82 /1/ im Bereich der Passfuge versehen. Der andere Verbindungspartner wird mit einer glatten Fügefläche ausgeführt, vgl. Abbildung 1. Zwischen den beiden Fügeflächen ist außerdem ein Übermaß  $U$  vorhanden. Je nach Gestaltung des Fasenwinkels  $\varphi$ , entsteht die Verbindung beim axialen Einpressen des gerändelten Verbindungspartners durch Schneiden und/oder Umformen des Materials des nicht gerändelten Verbindungspartners. Dazu ist eine ausreichende Härtedifferenz zwischen dem harten, gerändelten Partner und dem weichen, nicht gerändelten Partner erforderlich, siehe hierzu auch /2/. Das Prinzip der Rändelpressverbindung ist in Abbildung 1 dargestellt.

Für die Einstellung definierter Durchmesser toleranzen am Zahnkopf können die Rändel-Zahnköpfe nach der Fertigung der Rändelung abgetragen werden. Dies lässt außerdem ein besseres Zentrierverhalten dieser Verbindungen im Vergleich zu nicht nachträglich bearbeiteten Rändelungen erwarten, siehe hierzu auch /3/.

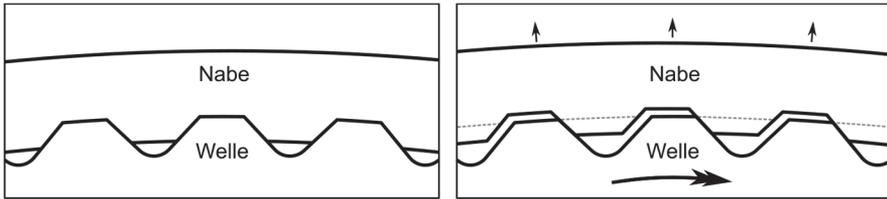


**Abbildung 1:** Prinzip der Rändelpressverbindung: Einpressen und/oder Einschneiden einer harten gerändelten Welle mit abgetragenen Zahnköpfen (links) in eine weiche, glatte Nabe, hier dickwandig ausgeführt (rechts)

### Nabenaufweitung

Aufgrund des Übermaßes zwischen den Verbindungspartner kommt es beim Fügen der Verbindung zu einer radialen Aufweitung der Nabe. Je nachdem welcher Verbindungspartner mit der Rändelung versehen ist und welche Nabenwandstärke vorhanden ist (beschrieben durch das Nabenwandstärkenverhältnis  $Q_A$ ), kann es hier bereits zu einem vollständigen Plastifizieren des Nabenmaterials kommen. Aufgrund dessen können zusätzliche Maßnahmen zur radialen Abstützung der Nabe während des Fügevorgangs erforderlich sein, siehe hierzu /2/.

Wird die gefügte Verbindung mit einem Torsionsmoment beaufschlagt, kann es zu einer beanspruchungsbedingten Nabenaufweitung kommen. Aufgrund der Geometrie der kombiniert reib-/formschlüssigen Kontaktfläche bzw. den Zahnflanken der Rändelung, ist hier eine Bewegung und damit verbunden eine radiale Aufweitung der Nabe möglich, bevor es zum Versagen der Verbindung durch Abscheren der Zähne in der Nabe kommt (vgl. Abbildung 2). Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen /4/ zeigen, dass nach dem Abscheren der Verzahnung in der Nabe die Stümpfe der abgesicherten Zähne in unterschiedlicher Ausprägung erhalten bleiben (vgl. Abbildung 2 ,rechts).



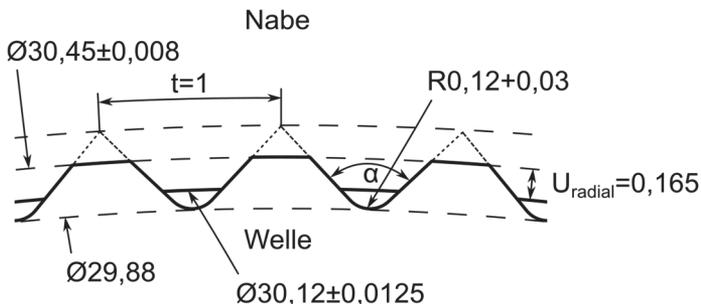
**Abbildung 2:** Schematische Darstellung einer RPV im gefügten Zustand (links) und radiale Aufweitung der Nabe unter Torsionsbelastung, sowie Abscher-Ebene der Rändelzähne in der Nabe bei Versagen der Verbindung (rechts)

### Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen des FVA Forschungsvorhaben 658 II „Fertigungseinfluss Rändelpressverbindungen“ AiF-Nr. 20172 N/1 wurden statische Torsionsuntersuchungen durchgeführt /4/. Einige ausgewählte Proben für die stat. Torsionsversuche wurden zusätzlich mit Dehnmessstreifen zur Messung der radialen Aufweitung während der Torsionsbelastung bestückt.

### Rändelgeometrie

In Abbildung 3 ist die Rändelgeometrie der verwendeten RPV-Proben mit Maßangaben dargestellt. Die Rändelung verfügt über eine Teilung  $t = 1$  mm, sowie eine Zahnfußausrundung zwischen den einzelnen Rändelzähnen. Die Zahnköpfe wurden nach der Herstellung der Rändelung überschleift. Zwischen Welle und Nabe ist ein radiales Übermaß von  $U_{\text{radial}} = 0,165$  mm vorgesehen.



**Abbildung 3:** Schematische Darstellung der untersuchten Geometrie der Rändelpressverbindung im gefügten Zustand

### Untersuchte Parameterkombinationen

Im Rahmen der experimentellen Ermittlung der Nabenaufweitung wurden gerändelte Wellen aus 16MnCr5 und C45E (Rändel nach DIN 82, Form RAA,  $t = 1 \text{ mm}$ , mit abgetragenen Zahnköpfen, wälzgefräst,  $l_F = 15 \text{ mm}$ , 16MnCr5-Wellen gehärtet auf 700+50HV) mit verschiedenen Nabenmaterialien und -wandstärken zu Rändelpressverbindungen gefügt und untersucht. In Tabelle 1 sind die untersuchten Parameterkombinationen aufgeführt. Je Kombination wurden drei Torsionsversuche durchgeführt, dabei wurden jeweils auf einer repräsentativen Probe Dehnmessstreifen (DMS) appliziert und die Nabenaufweitung gemessen.

**Tabelle 1:** Parametervariation für die experimentelle Ermittlung der Nabenaufweitung

Wellenwerkstoff	Nabenwerkstoff	Nabenwandstärkeverh. $Q_A$
16MnCr5	C45	0,5
		0,8
	EN-AW5083	0,5
		0,8
C45E	EN-AW5083	0,5
		0,8

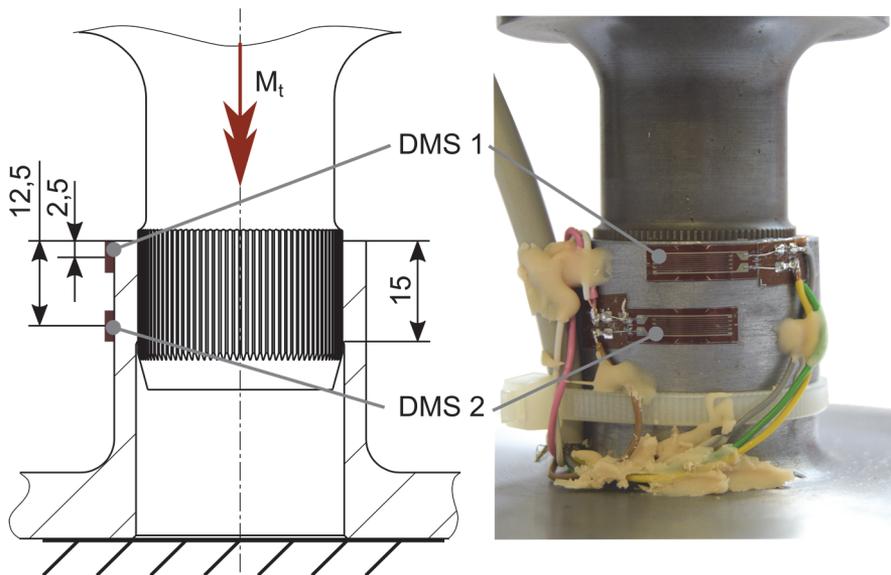
### Applikation der Dehnmessstreifen

Für die Untersuchungen werden aufgrund der erforderlichen Platzverhältnis für die Applikation der Dehnmessstreifen Rändelproben mit einer Fügelänge von  $l_F = 15 \text{ mm}$  gewählt. Die experimentelle Ermittlung der Naben-Umfangsdehnung erfolgt in zwei Ebenen an den Naben, jeweils 2,5 mm von Verbindungs-Beginn und -Ende entfernt. Daraus kann anschließend die radiale Aufweitung berechnet werden. Die Widerstandsänderung welche an den Dehnmessstreifen aufgrund der Nabendehnung entsteht, wird mit Hilfe einer Wheatstoneschen Brückenschaltung erfasst, hier jeweils als 1/4-Brücke ausgeführt. Diese Verschaltung bietet nicht die Möglichkeit einer Temperaturkompensation während der Messung. Aufgrund der sehr kurzen Versuchsdauer eines Torsionsversuchs (wenige Sekunden) kann im konkreten Fall jedoch darauf verzichtet werden. Während der Versuchsdurchführung ist keine Erwärmung der Bauteile zu erwarten. Vor der Versuchsdurchführung wurde eine ausreichende Zeit zur Angleichung der Bauteiltemperatur an die Raum- bzw. Prüfstandstemperatur, sowie zur Eigenerwärmung der Dehnmessstreifen beachtet.

Weiterhin sollten im Versuch ausreichend große Dehnungen gemessen werden, damit evtl. Störgrößen das Messsignal nicht übermäßig beeinflussen können. Der Richtwert für eine ausreichend große Dehnung liegt nach /5/ bei etwa  $1000 \mu\text{m/m}$ .

Die gemessenen Dehnungen lagen bei den Proben mit dünnwandigen Naben im Bereich bis ca. 3500  $\mu\text{m}/\text{m}$ , bei den dickwandigen Naben bis ca. 600  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Damit konnte sichergestellt werden, dass bei einem Großteil der Versuche ausreichend große Dehnungen gemessen werden konnten.

Für die Versuche wurden Dehnmessstreifen mit einem Nennwiderstand von 120  $\Omega$  und einer Gitterabmessung von 10 mm x 3 mm verwendet.

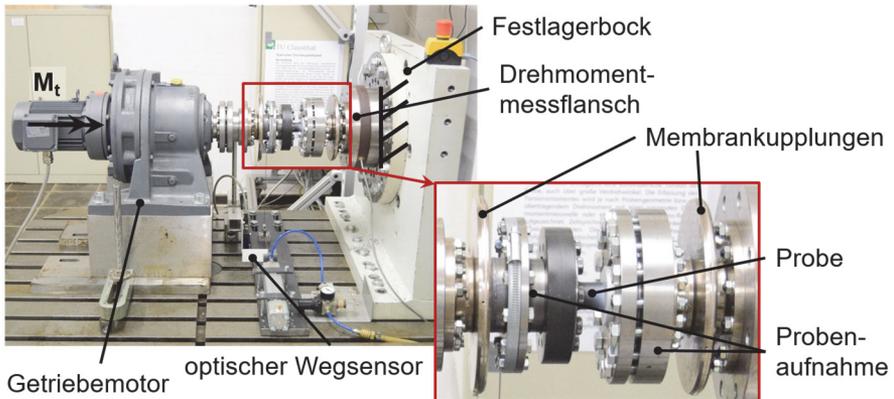


**Abbildung 4:** Dehnmessstreifen- bzw. Schnittebenen für die Ermittlung der Nabenaufweitung an einer dünnwandigen Nabe ( $Q_A = 0,8$ ) schematisch (links) und auf der Probe appliziert (rechts)

### Torsionsbelastung

Die Torsionsbelastung der Welle-Nabe-Verbindung erfolgt im statischen Torsionsversuch. Dazu werden die Bauteile in eine dafür angepasste Aufnahme in einem statischen Torsionsprüfstand adaptiert, vgl. Abbildung 5. Die Probenaufnahme ist im Wellenstrang zwischen zwei Membrankupplungen platziert, um evtl. Einflüsse aufgrund von Querkräften auszuschließen. Die Erfassung des Drehmomentes erfolgt mit Hilfe eines Drehmomentmessflansches, der im Wellenstrang zwischen Festlagerbock und Membrankupplung angeordnet ist. Der Verdrehweg wird mit Hilfe eines über einen Pneumatik-Zylinder vorgespannten Drahtseils und eines optischen Wegsensors erfasst, siehe hierzu auch /6/.

Die Proben werden mit einem Getriebemotor bis zum Versagen belastet. Während der Torsion wird die Nabendehnung mit Hilfe der Dehnmessstreifen aufgezeichnet.



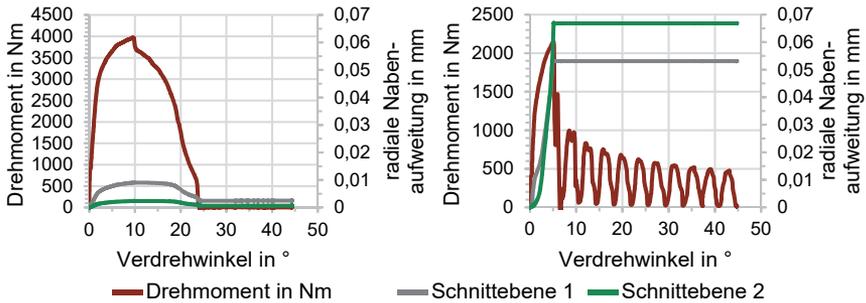
**Abbildung 5:** Prüfstand für die statischen Torsionsuntersuchungen mit eingebauter Probe

### Versuchsergebnisse

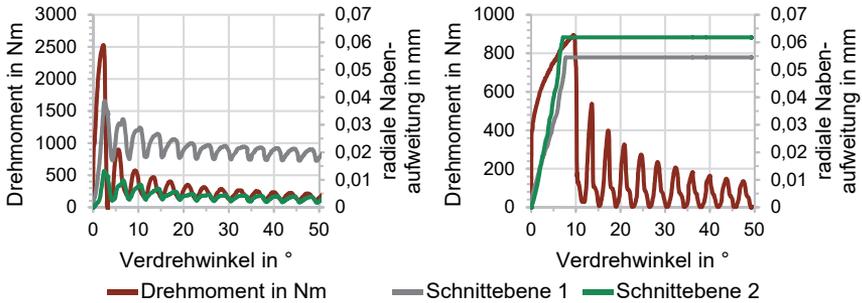
In den nachfolgenden Abbildungen 6 bis 8 sind die Ergebnisse der statischen Torsionsversuche dargestellt. Neben dem Drehmomentverlauf ist die radiale Naben- aufweitung in beiden Schnittebenen über dem Verdrehwinkel für die jeweilige Parameterkombination aufgetragen.

Zunächst werden die Drehmomentverläufe ausgewertet: Mit Ausnahme der Kombination 16MnCr5–C45,  $Q_A = 0,5$  rutschen die RPV bei Erreichen des maximalen, übertragbaren Drehmoments durch. Die in die Naben eingeformte Verzahnung wird abgesichert. Bei der Kombination 16MnCr5–C45,  $Q_A = 0,5$  versagt die Probe außerhalb der Verbindungen im freien Wellenbereich aufgrund einer Überschreitung der Wellenfestigkeit (vgl. Abbildung 6, links).

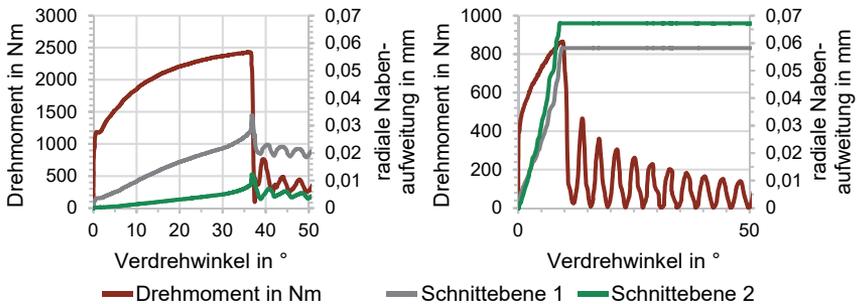
Bei den Proben mit dickwandigen Aluminium-Naben ( $Q_A = 0,5$ ) versagt jeweils die RPV. Auffällig ist bei der C45E–EN-AW5083 Probe der im Vergleich zur Materialkombination 16MnCr5–EN-AW5083 sehr große Verdrehwinkel bis zum Versagen der Verbindung (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8). Die Ursache dafür ist der verwendete Wellenwerkstoff C45E. Während der Torsion der Probe kommt es zu einer plastischen Verformung der C45E Welle vor der RPV, sowohl im freien Wellenbereich, als auch im Bereich der Rändelung. Für die Kombination mit dickwandigen Aluminium-Naben ist hier dementsprechend eine höhere Wellenfestigkeit erforderlich.



**Abbildung 6:** Materialkombination 16MnCr5–C45: Drehmoment und Naben-aufweitung für dickwandige Nabe ( $Q_A = 0,5$ ), links und dünnwandige Nabe ( $Q_A = 0,8$ ), rechts



**Abbildung 7:** Materialkombination 16MnCr5–EN-AW5083: Drehmoment und Naben-aufweitung für dickwandige Nabe ( $Q_A = 0,5$ ), links und dünnwandige Nabe ( $Q_A = 0,8$ ), rechts



**Abbildung 8:** Materialkombination C45E–EN-AW5083: Drehmoment und Naben-aufweitung für dickwandige Nabe ( $Q_A = 0,5$ ), links und dünnwandige Nabe ( $Q_A = 0,8$ ), rechts

Bei der Auswertung der Drehmomentverläufe für die Kombinationen mit dünnwandigen Naben ( $Q_A = 0,8$ ) fällt auf, dass alle Proben ähnliche Drehmomentverläufe aufweisen. Bei der 16MnCr5–C45 Verbindung ist das maximale übertragbare Drehmoment aufgrund der Materialpaarung entsprechend größer, als bei den Stahl/Aluminium-Paarungen.

Bei allen Verbindungen kann nach dem initialen Überschreiten des maximalen übertragbaren Drehmomentes und dem ersten Durchrutschen der Verbindung noch ein Drehmoment von etwa einem Drittel bis zur Hälfte, des maximalen Momentes bis zum erneuten Durchrutschen der Verbindung übertragen werden. Dies entspricht dem Überdrehen der Verbindung um jeweils einen Rändelzahn bzw. eines Zahnstumpfes nach Abscheren der in der Nabe eingeformten Verzahnung (vgl. Abbildung 2). Mit jedem weiteren Überdrehen fällt das verbleibende übertragbare Drehmoment kontinuierlich ab.

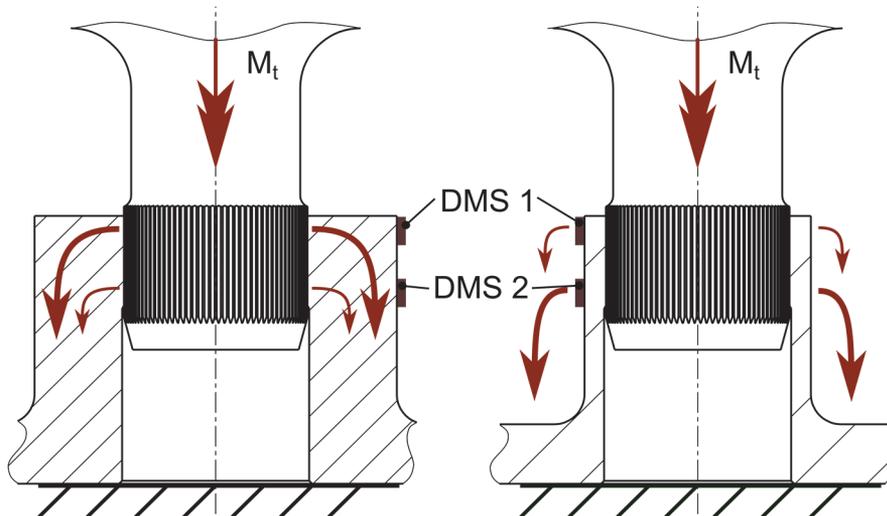
Bei der Betrachtung der Nabenaufweitungen fällt auf, dass bei allen Proben mit dickwandigen Naben ( $Q_A = 0,5$ ) die Aufweitung in Schnittebene 1 (Verbindungs-Beginn) größer ist, als in Schnittebene 2 (Verbindungs-Ende). Der Großteil des auf der Welle aufgebrachten Drehmoments wird folglich bereits am Verbindungs-Beginn in die Nabe eingeleitet (vgl. Abbildung 9, links). Bei der Stahl/Stahl-Kombination findet aufgrund des Abscherens der Welle außerhalb der RPV nur eine geringe Nabenaufweitung statt, welche nach dem Lastabfall fast vollständig zurück geht.

Für die beiden Stahl/Aluminium-Verbindungen mit dickwandiger Nabe ( $Q_A = 0,5$ ) liegt die maximale radiale Aufweitung bei ca. 0,033 bzw. 0,04 mm. Das entspricht ca. 20-25% des Übermaßes. Beim Überdrehen der Verbindung bzw. Lastabfall reduziert sich die gemessene Nabenaufweitung. Dementsprechend ist auch nach dem initialen Überdrehen der Verbindung eine elastische Vorspannung der Nabe vorhanden.

Die Proben mit dünnwandigen Naben ( $Q_A = 0,8$ ) erfahren im Gegensatz dazu in Schnittebene 2 (Verbindungs-Ende) eine größere radiale Aufweitung, als in Schnittebene 1 (Verbindungs-Beginn). Nach dem initialen Anstieg der radialen Aufweitung auf den maximalen Wert, fällt die Aufweitung auch bei einer Lastrücknahme bzw. erneutem Überdrehen nicht wieder ab. Die dünnwandigen Naben, sowohl aus Stahl, als auch Aluminium müssen bereits beim Fügen mittels Stützringen radial abgestützt werden, da es hier zur Plastifizierung des Nabenwerkstoffes kommt (siehe hierzu auch /2/). Unter Torsionsbeanspruchung und der damit verbundenen radialen Aufweitung, wird der Nabenwerkstoff weiter plastifiziert, sodass keine oder nur noch eine sehr geringe elastische Rückfederung des Nabenwerkstoffes vorhanden ist. Dementsprechend kann dies als Ursache für die Aufweitungsverläufe der Proben mit dünnwandigen Naben angesehen werden. Auffällig ist dabei, dass ein Großteil des Drehmoments aus der Welle am Verbindungs-Ende in die Nabe eingeleitet wird. Im Gegensatz zu den dickwandigen Naben, bei denen die Lasteinleitung am Verbindungs-Anfang erfolgt (vgl. Abbildung 9). Die maximalen radialen Aufweitungen liegen bei 0,06 bzw. 0,067 mm. Das entspricht ca. 35-40% des Übermaßes.

Aufgrund der dünnwandigen Nabengeometrie ( $Q_A = 0,8$ ) und dem damit verbundenen Verlauf der Radialsteifigkeit resultiert eine erhöhte Aufweitungsaffinität am Verbindungs-Beginn. Die höchste Pressung innerhalb der Verbindung ist hier am

Verbindungs-Ende zu erwarten. Infolge dessen sind besonders bei dünnwandigen Naben mit zunehmender Verbindungslänge nur moderate Steigerungen der übertragbaren Torsionslast realisierbar.



**Abbildung 9:** Drehmomentübertragungspfad innerhalb einer Rändelpressverbindung für eine dickwandige Nabe ( $Q_A=0,5$ ), links und für eine dünnwandige Nabe ( $Q_A=0,8$ ), rechts

Insgesamt sind die gemessenen radialen Aufweitungen der Naben unter Torsionsbelastung der RPV sehr deutlich. Bei den dünnwandigen Naben ergibt sich eine Aufweitung des Nabenaußendurchmessers von maximal ca. 0,134 mm, bei den dickwandigen Naben von maximal ca. 0,08 mm. Nach dem Versagen der Verbindungen durch Abscheren, der in den Naben ausgeprägten Rändelung, bleiben die Zahnstümpfe der abgescherten Zähne in den Naben erhalten. Bei den dünnwandigen Naben sind diese verbleibenden Zahnstümpfe stärker ausgeprägt (höher), als bei den dickwandigen Naben, dies belegen auch Messungen an den im statischen Torsionsversuch geprüften Proben ohne Nabenaufweitungsmessung.

### Zusammenfassung

Mit dem hier aufgezeigten Vorgehen kann die Nabenaufweitung von Welle-Nabe-Verbindungen unter Torsionsbelastung ermittelt werden. Die experimentell an Rändelpressverbindungen ermittelten Drehmoment- und Aufweitungsverläufe erlauben eine Beurteilung der Drehmomentleitung innerhalb der Verbindungen in Abhängigkeit von der Nabenwandstärke. Zudem ermöglichen die gemessenen Aufweitungen eine Beurteilung der Eignung der Verbindung in Bezug auf mögliche Nabenaufweitungen im Betrieb.

## Literatur

- /1/ Norm DIN 82: Rändel, Januar 1973
- /2/ Mörz, F.; Schäfer, G.: Einflüsse auf den Fügevorgang von Rändelpressverbindungen, Institutsmittteilung Nr. 44, S.19–28, Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 2019
- /3/ 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
- /4/ FVA658II: „Fertigungseinfluss Rändelpressverbindung“ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. AiF-Nr.: 20172 N/1, unveröffentlichter Sachstandsbericht, Oktober 2019
- /5/ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: Der Weg zum Messgrößenaufnehmer – Ein Leitfaden zur Anwendung der HMB K-Dehnungsmessstreifen und Zubehör, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2008
- /6/ Mörz, F.; Schäfer, G.: Neuer Prüfstand für zügige Torsionsbeanspruchung, Institutsmittteilung Nr. 41, S.99–102, Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 2016