

Untersuchung des Fügevorgangs von Rändelpressverbänden (RPV) unter Nutzung der Finite-Elemente-Methode

B. Awiszus, S. Kleditzsch*,

Professur Virtuelle Fertigungstechnik (ViF), Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP), TU Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz

* stefan.kleditzsch@mb.tu-chemnitz.de

Die klassische Form der Welle-Nabe-Verbindungen (WNV) sind die Pressverbände (PV). Neben diesen kommen jedoch, besonders bei Stahlwellen in Kombination mit weichen Nabenwerkstoffen, zunehmend gerändelte Wellen zum Einsatz. Zu diesen sogenannten Rändelpressverbänden (RPV) existieren nur wenige veröffentlichte Berechnungs- und Gestaltungsgrundlagen. Systematische Untersuchungen, die den Fügevorgang mit einbeziehen, existieren derzeit nicht. In den durchgeführten Arbeiten wurden die Einflüsse der kennzeichnenden geometrischen Prozessparameter Einlauffase und Übermaß auf den Fügevorgang bzw. die Verbindungsausbildung untersucht. Hierzu wurde die Finite-Elemente-Methode (FEM) genutzt, als ein besonders geeignetes Werkzeug für umfangreiche Parameteranalysen ohne erhöhten Versuchsaufwand.

Keywords: FEM, Welle-Nabe-Verbindung (WNV), Rändelpressverband (RPV), umformendes Fügen

1. Einleitung

Die Hauptaufgabe von Welle-Nabe-Verbindungen (WNV), das Übertragen von Umfangs- und Axialkräften, kann durch Kraftschluss, Formschluss oder Stoffschluss realisiert werden. Die stoffschlüssigen WNV liegen in ihrer Bedeutung jedoch weit hinter den beiden anderen. Bei den kraft- und formschlüssigen Verbindungen werden meist Standardverbindungen wie Press-, Passfeder-, Polygon- oder Zahnwellenverbindungen eingesetzt. Diese werden seit Jahrzehnten erforscht, so dass die notwendigen Berechnungs- und Gestaltungsregeln allgemein anerkannt und entsprechend genormt sind. Bei den Pressverbindungen (PV) werden zunehmend auch Verbindungen mit gerändelten Wellen, sogenannte Rändelpressverbände (RPV), hergestellt. Diese Form der PV vereint viele Vorteile der kraft- und formschlüssigen Verbindungen wie eine einfache Herstellbarkeit, geringe Anforderungen an die Maßhaltigkeit oder eine Spielfreiheit. Die unterschiedlichen Formen der Rändel sind in DIN 82 genormt. Für die Herstellung eines Längspressverbandes ist jedoch nur die Form „RAA“ mit achsparallelen Riefen (**Bild 1**) sinnvoll, da für die Verbindungsausbildung ein plastisches Fließen des verdrängten Nabenwerkstoffes in die Rändelfuge oder ein Verdrängen in axiale Richtung notwendig ist.

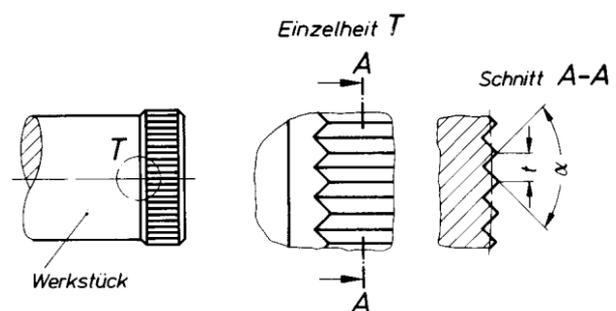


Bild 1: Rändelform RAA mit achsparallelen Riefen [DIN 82]

Diese Art der PV ist zwar wenig bekannt, da es hierzu keine allgemeingültigen oder genormten Grundlagen gibt, entspricht jedoch seit Jahrzehnten dem Stand der Forschung. So untersuchte THOMAS bereits 1969 [Tho-69] den Einfluss unterschiedlicher Stollenformen auf die Verbindungsausbildung von Pressverbindungen mit unterbrochener Fuge. Seine Arbeit blieb jedoch weitgehend unbekannt. Aktuelle Arbeiten auf diesem Gebiet führte BADER [Bad-09] durch, der sich mit der selbstschneidenden Rändelpressverbindung der Form RAA beschäftigte. Er führte eine Vielzahl an Versuchen mit unterschiedlichen Nabenwerkstoffen durch, auf deren Basis er unterschiedliche Berechnungs- und Gestaltungsgrundlagen, wie z.B. für das maximal übertragbare Moment, ableitet. Diese sind jedoch noch mit sehr vielen Korrekturfaktoren behaftet, wodurch deutlich wird, dass zu einer Allgemeingültigkeit noch die nötige Basis fehlt. Die Möglichkeit eines rein umformenden Fügevorgangs wird komplett vernachlässigt.

Allgemein ist es bei der Herstellung von PV durch Längseinpressen (**Bild 2**) wichtig, dass an der Welle eine Fase vorhanden ist, die die Neigung zur Spanbildung an der Nabe verringert [Rol-07]. Hierfür werden in der gültigen Norm für zylindrische PV ein Fasenwinkel $\varphi_F = 5^\circ$ und eine Fasenlänge von $l_e \approx \sqrt[3]{D_F}$ empfohlen [DIN 7190]. Dies gilt es für den RPV zu überprüfen, denn hier besteht generell noch die Frage, ob ein rein schneidender Fügevorgang, wie ihn BADER beschreibt, oder ein vorwiegend umformender zu bevorzugen ist. Ein erster Unterschied zwischen zylindrischem PV und RPV ergibt sich in der Definition des Übermaßes, welches sich aus der Differenz zwischen Außendurchmesser des Innenteils und dem Innendurchmesser des Außenteils ergibt. Beim RPV beschreibt diese Beziehung, nach THOMAS, das geometrische Übermaß U_{geo} , denn das tatsächlich wirksame Übermaß ergibt sich erst während des Fügeprozesses. Es wird dementsprechend in den folgenden Ausführungen zum RPV immer von U_{geo} ausgegangen.

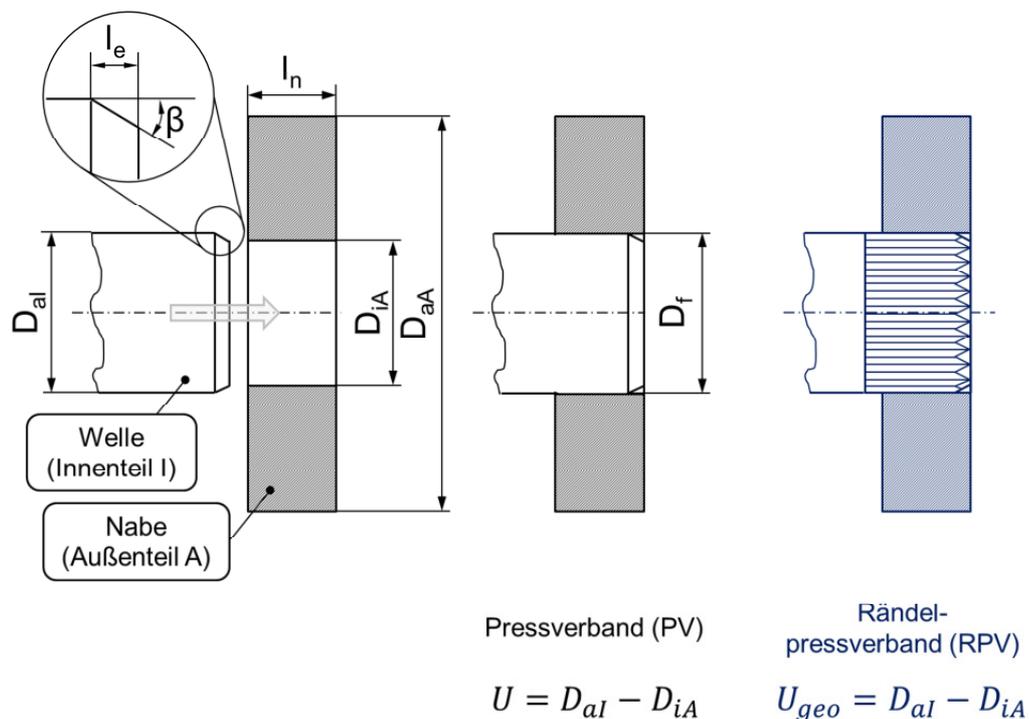


Bild 2: Aufbau und geometrische Kenngrößen von Pressverbindungen (PV)

2. Simulationsmodell

Für die simulative Untersuchung des Fügevorgangs wurde das Finite-Elemente-Simulationsprogramm FORGE der Firma Transvalor eingesetzt. Dieses ist ein Tool zur zwei- und dreidimensionalen Simulation von Umformprozessen, das mit einem impliziten Solver arbeitet. Die Vernetzung der Geometrien erfolgt ausschließlich über Dreiecks- bzw. Tetraeder-Elemente.

Um die Effektivität der durchgeführten Analysen zu verbessern, wurde nur ein symmetrisches „Kuchenstück“, von $\psi = 11,58^\circ$, der Verbindung modelliert (**Bild 3a**), so dass genau zwei Zähne der Verbindung abgebildet werden. Dies ermöglicht im Vergleich zu einer vollständigen Abbildung eine deutlich verkürzte Rechenzeit bzw. bei gleicher oder verringerter Rechenzeit eine feinere Bauteilvernetzung. Die Prozesskinematik ist so aufgebaut, dass die Welle (Stahl) mit einem definierten Vorschub längs in die Nabe (Aluminium) eingepresst wird, die durch einen Anschlag in axiale Richtung fixiert ist (**Bild 3b**). BADER gibt an, dass bei einem Härteverhältnis von Schneidteil (Welle) zu geschnittenem Teil (Nabe) $> 1,8$ kein wesentlicher Verlust der Schneidenhaltigkeit eintritt. Da bei den untersuchten Wellen- und Nabenwerkstoffen ein Härteverhältnis von > 2 auftritt, wird davon ausgegangen, dass die auftretenden Formänderungen an der Welle vernachlässigbar klein sind. Daher wurde diese in den durchgeführten Simulationen als starres Werkzeug definiert.

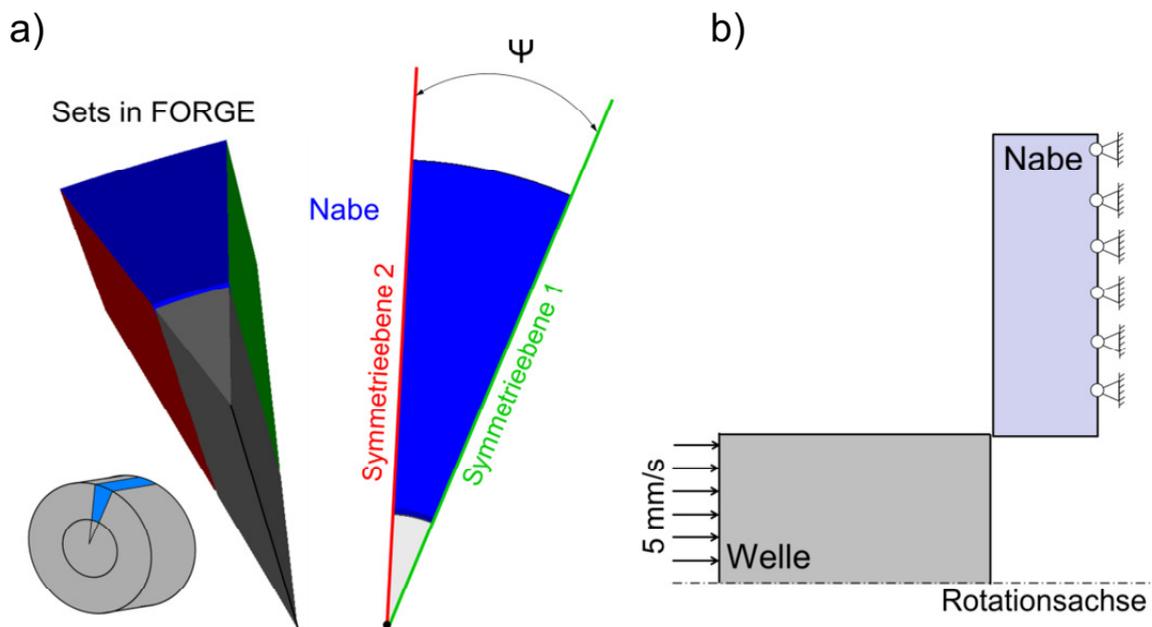


Bild 3: a) Symmetrischer Aufbau Simulationsmodell b) Prozesskinematik schematisch

Die Kalibrierung des Modells erfolgte anhand experimentell ermittelter Füge- und Lösekräfte, von Verbindungen einer Stahlwelle und einer Aluminiumnabe mit den in **Tabelle 1** gezeigten Parametern.

Tabelle 1: Parameter Referenzversuche [Wal-09]

Kenngröße	Wert
Werkstoff	Welle: 16MnCr5, Nabe: AlMgSi1
Außendurchmesser Innenteil D_{al} [mm]	20
Rändelform	RAA
Teilung t [mm]	1,0
Einlauffase	0,8 x 15
Nabenlänge l_N [mm]	11
bezogenes (geometrisches) Übermaß ξ [‰]	7; 15

Der Vergleich zwischen simulativ ermittelten Kraftverläufen und den experimentellen Kraftwerten ist in **Bild 4** dargestellt. Die jeweiligen Maximalkräfte stimmen sehr gut überein. Da die Kräfte innerhalb des Solverablaufes auf Basis der berechneten Verschiebungen und Spannungen ermittelt werden, kann aufgrund der übereinstimmenden Kräfte von einem ausreichend kalibriertem Modell ausgegangen werden.

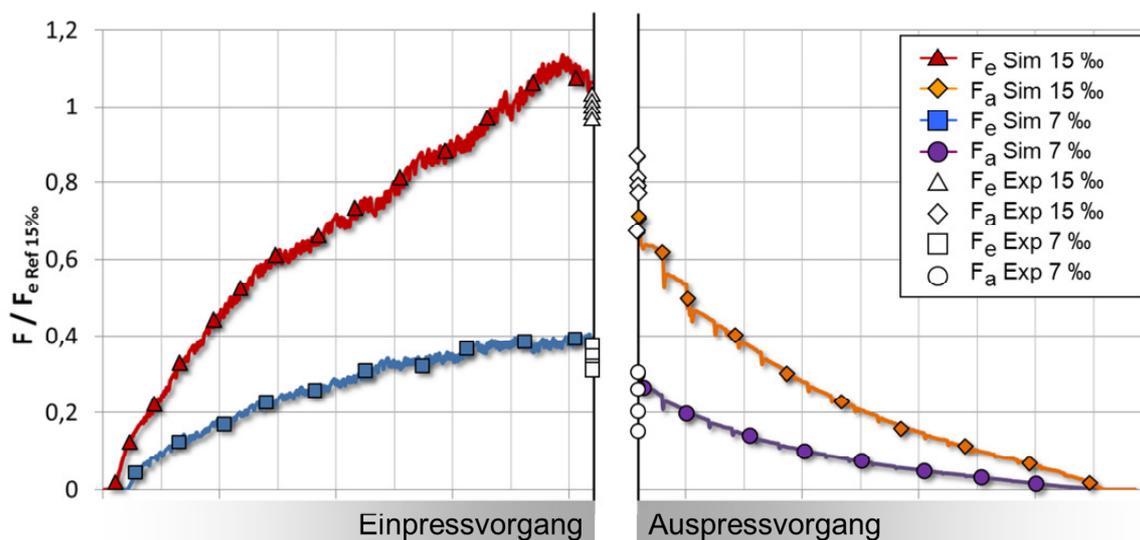


Bild 4: Kraftverlauf Simulation und experimentell ermittelte Maximalkräfte

Bei den angegebenen experimentell untersuchten RPV kam es zu keiner Spanbildung während des Fügevorgangs. Da es bei den angestrebten Variationen des Übermaßes und des Fasenwinkels jedoch nicht auszuschließen ist, dass es zu einer Spanbildung bei ungünstigen Paarungen kommen kann, muss eine mögliche Schädigung der Nabe im Simulationsmodell berücksichtigt werden. Das Simulationsprogramm FORGE bietet hierfür unter anderem das makromechanische Schädigungskriterium nach COCKROFT & LATHAM in normalisierter Form (Gl. 1) [For-09].

$$D_{krit} = \int_0^{\varphi_{krit}} \frac{\sigma_{max}}{\sigma_V} d\varphi \quad (\text{Gl. 1})$$

Es wird der durch die maximale Hauptspannung σ_{max} hervorgerufene Teil der Umformarbeit berücksichtigt, wodurch sich die Schädigung aus der Integration von σ_{max} bezogen auf die Vergleichsspannung über den Umformgrad ergibt. Für eine effektive Schädigungsanalyse muss der Wert D_{krit} ermittelt werden, bei dem es zu einer Rissbildung am Bauteil kommt. Wie vorhergehend schon erwähnt, trat bei den RPV jedoch keine Spanbildung während des Fügevorgangs auf. Da aber D_{krit} für einen Werkstoff und ein definiertes Umformverfahren gleich ist, wurde ein zylindrischer PV mit einem bezogenen Übermaß von $\xi = 15\%$ genutzt, um den kritischen Schädigungswert zu ermitteln. Die beste Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment konnte dabei mit $D_{krit} = 1,0$ erzielt werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Vergleich Simulation und Experiment PV mit $D_{krit} = 1,0$

Ausführung	ξ [%o]	l_N [mm]	F_e	F_a	Spangröße [mm]
			F_e Ref 15%o	F_e Ref 15%o	
Experiment	15	11	1,26	0,33 – 0,5	1,1 – 1,6
Simulation	15	11	1,31	0,35	1,2

3. Fasenausführung an der gerändelten Welle

Als erster Gestaltungsparameter, der den Fügevorgang entscheidend beeinflusst, ist die Fasenausführung an der Welle zu betrachten. Diese wird für die zylindrischen PV anhand der in Normung bzw. Literatur genannten Richtwerte oder durch den Konstrukteur über ihre Länge l_e und den Fasenwinkel β definiert. Die Höhe h_f ergibt sich somit automatisch. Je nach dem können sich folglich verschiedene Fasenausführungen ergeben, die in **Bild 5** verdeutlicht werden. Die Variante a) beschreibt dabei eine Fase, welche über die komplette Rändelhöhe oder darüber hinaus ausgeführt ist. Variante b) und c) ergeben sich in Abhängigkeit des gewählten geometrischen Übermaßes. Ist die aus der Fasenlänge und dem -winkel resultierende Höhe größer als die Hälfte von U_{geo} , so ergibt sich b). Ist die Fasenhöhe geringer, ergibt sich c).

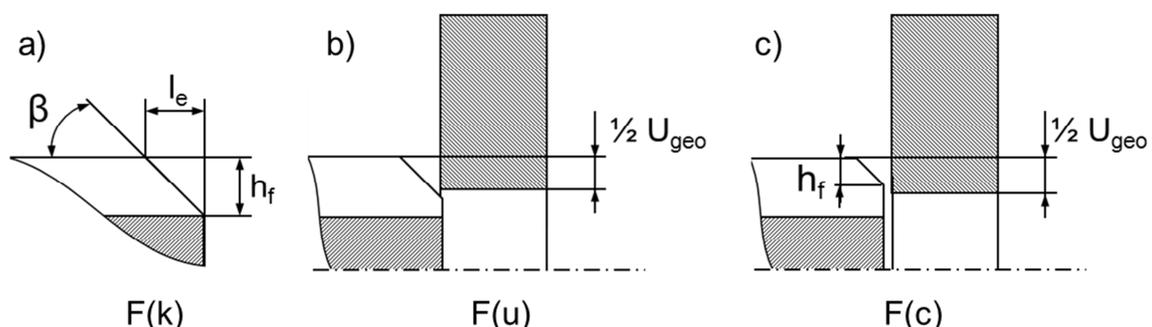


Bild 5: Mögliche Fasenausführung und Untergliederung

Um die Variante b) gezielt zu erreichen, wurde die Fasenhöhe direkt in Abhängigkeit des gewählten geometrischen Übermaßes iterativ angepasst. Hierbei stellte sich im untersuchten Bereich der folgende Zusammenhang (Gl. 2) als günstig heraus.

$$h_F \approx 0,8 \text{ bis } 1,0 \cdot U_{geo} \quad (\text{Gl. 2})$$

Anhand der genannten Zusammenhänge wurde für die weiteren Arbeiten eine Gliederung der Varianten in F(k) für eine über die komplette Rändelhöhe ausgeführte Fase, F(u) für eine dem Übermaß angepasste und F(c) für eine spanende Fase unternommen (**Bild 5**). Bei der Ausführung F(c) ist das Fügen nur mit Stofftrennung (Spanbildung) möglich, da die Welle im Durchmesserbereich $\leq D_{iA}$ keine Fasenschräge aufweist und somit wie ein Schneidwerkzeug wirkt. Aufgrund des entstehenden Spans wird der Nabenwerkstoff in axiale und nicht, wie bei den beiden anderen Varianten, in radiale Richtung verdrängt (**Bild 6**). Es wirken geringere Kräfte in radiale Richtung und es wird kein so großer Fugendruck (100 - 200 N/mm²) bei F(c) im Vergleich zu 150 - 300 N/mm² bei F(k) und F(u) aufgebaut. Der höhere Druck hat aber auch einen deutlich größeren Reibkraftanteil zur Folge, der in Verbindung mit der notwendigen Kraft für die Umformung der Nabe zu höheren Fügekräften führt. Der Anteil der Reibkraft an der Gesamtfügekraft bei einem Fügevorgang mit Span ist eher gering. Hier sind die Schnittkraft und die Kraft für die Verdrängung des Spans in axiale Richtung von größerer Bedeutung. Einen noch größeren Einfluss hat der Fugendruck auf die axialen Lösekräfte der Verbindungen, da diese ausschließlich auf den Reibkräften basieren. Während bei geschnittenen Verbindungen nur eine sehr geringe axiale Lösekraft notwendig ist, kann diese durch einen umformenden Fügevorgang deutlich gesteigert werden. Es ergibt sich somit bei einer umformend gefügten Verbindung ein deutlich besseres Kraftverhältnis F_e / F_a .

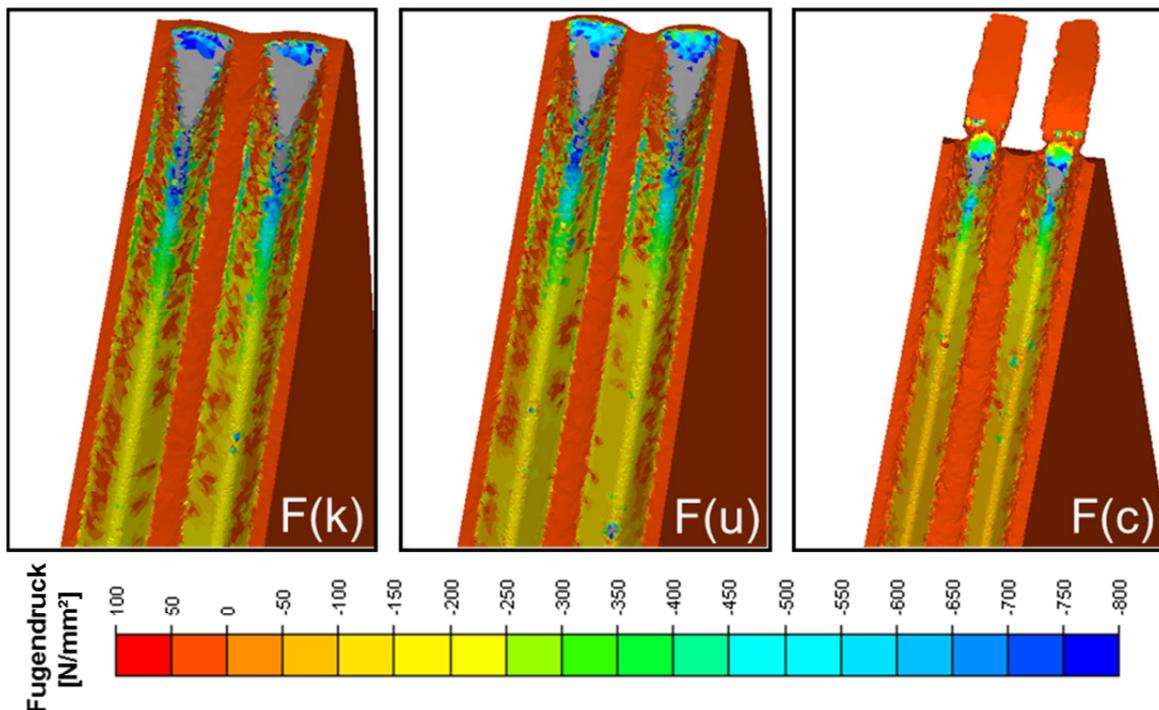


Bild 6: Fugendruck Nabe bei unterschiedlichen Fasenausführungen ($U_{geo} = 0,45 \text{ mm}$)

Tritt keine Schädigung der Nabe, d.h. keine Spanbildung auf, ist mehr Material gezwungen in die Rändelfuge zu fließen. So kann der Ausfüllungsgrad λ_h der Fuge deutlich erhöht werden. λ_h wird hier, in Anlehnung an die tragende Rändelhöhe nach BADER [Bad-09], in Bezug auf die ursprüngliche Fugenhöhe definiert (**Bild 7**) und ergibt sich somit nach (Gl. 2).

$$\lambda_h = \left(1 - \frac{h_1}{h_0}\right) \cdot 100 \quad (\text{Gl. 2})$$

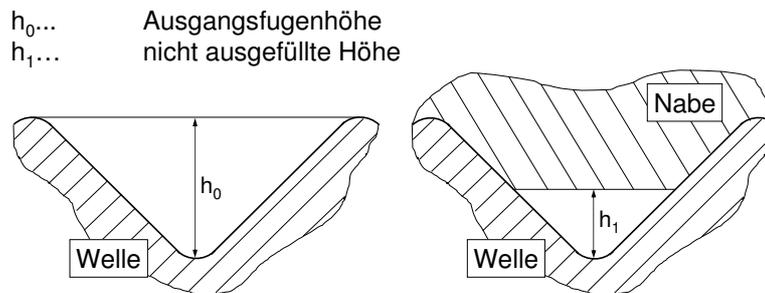


Bild 7: Ausfüllungsgrad auf Fugenhöhe bezogen

Es bleibt festzuhalten, dass die Ausführungen F(k) und F(u) für einen vorwiegend umformenden Fügevorgang zu bevorzugen sind. Ebenfalls kann, durch den größeren erzielbaren Fugendruck, die axiale Sicherheit (Lösekraft) des RPV deutlich erhöht werden. Jedoch muss gewährleistet sein, dass die höheren Fügekräfte bereitgestellt werden können.

4. Einfluss von Übermaß und Fasenwinkel auf Prozesskräfte und Verbindungsausbildung

Wie bereits erwähnt, ist die Ausführung der Fase an der Welle neben dem gewählten Übermaß einer der bedeutendsten Einflussfaktoren auf den Fügevorgang und damit die Verbindungsausbildung. Es erfolgte daher eine erste Analyse des Übermaßeinflusses bei der Fasenausführung F(k) mit unterschiedlichen Fasenwinkeln von 5°, 10° und 15° auf die notwendigen Füge- und Lösekräfte. Hierbei wurde die gerändelte Welle soweit in die Nabe eingepresst, dass beide wie in **Bild 2** gezeigt stirnseitig bündig abschließen.

In den ersten simulativen Untersuchungen wurde die Nabenlänge l_N konstant gehalten, so dass je nach Fasenwinkel die Kontaktlänge l_K zwischen Welle und Nabe variiert. Hier ist zu erkennen, dass sowohl die Einpress- als auch die Lösekraft mit zunehmendem Übermaß exponentiell zunehmen (**Bild 8**). Die Kräfte der Winkel $\beta = 10^\circ$ und $\beta = 15^\circ$ liegen auf einem ähnlichen Niveau. Erst bei Übermaßen von $U_{geo} > 0,3$ mm sinken die Fügekräfte des Winkels $\beta = 10^\circ$ im Vergleich zu $\beta = 15^\circ$. Dies lässt sich relativ simpel anhand des kleineren Anstieges der Fase erklären, wodurch der Materialfluss begünstigt und der Umformkraftanteil gesenkt werden kann. Bei einem Winkel von $\beta = 5^\circ$ liegen die Kräfte erwartungsgemäß noch deutlich niedriger, da hier die Kontaktlänge in dieser Konfiguration viel geringer ist. Beträgt die Kontaktlänge bei $\beta = 15^\circ$ noch 9,4 mm so reduziert

sich diese durch die kleineren Fasenwinkel auf 8,6 mm bei $\beta = 10^\circ$ und sehr stark auf 6,1 mm bei $\beta = 5^\circ$. Generell kann festgehalten werden, dass bei einer konstanten Nabenlänge und einer bündig eingepressten Welle mit kleiner werdendem Fasenwinkel die effektive Kontaktlänge abnimmt. Als Kontaktlänge wird die Rändellänge bezeichnet, die unabhängig vom Übermaß zu hundert Prozent mit der Nabe in Kontakt ist.

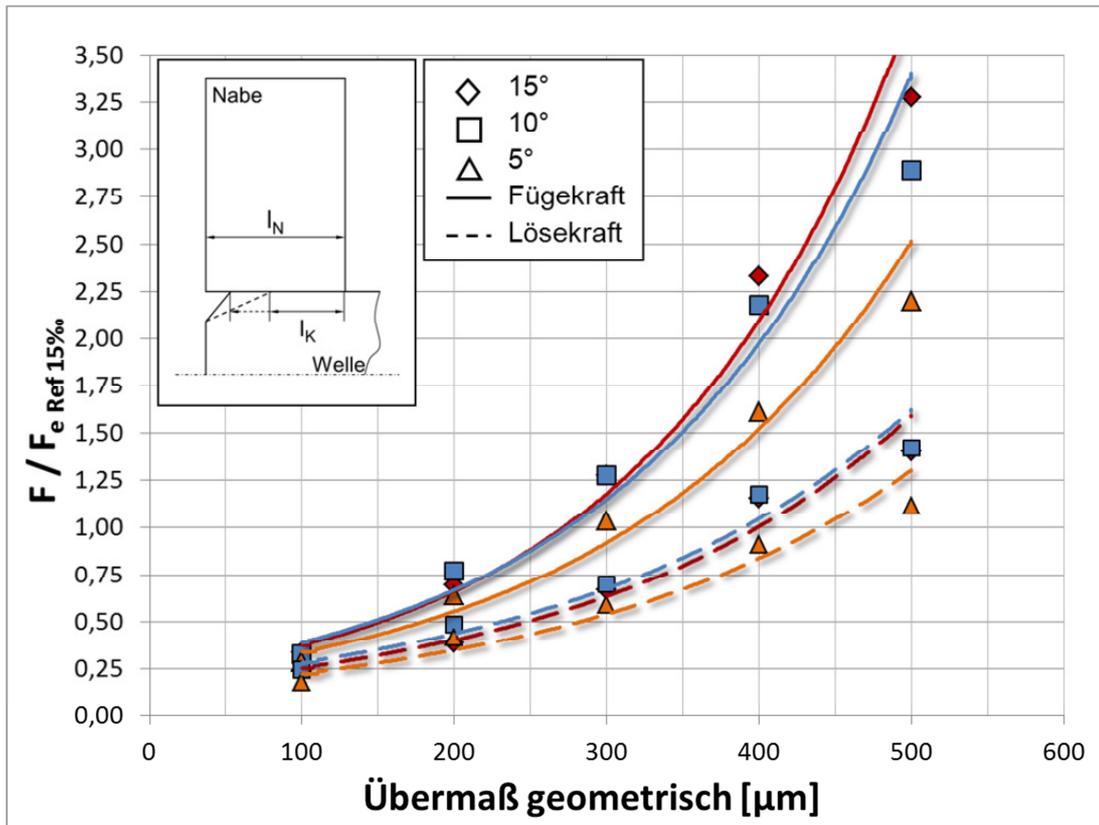


Bild 8: Füge- und Lösekräfte in Abhängigkeit von Fasenwinkel und Übermaß, $F(k)$, konstante Nabenlänge

Um eine konstante Kontaktlänge zwischen Welle und Nabe zu gewährleisten, muss entweder die Welle komplett bis zum Ende der Fase eingepresst werden oder, bei einem bündigen Verbund, die Nabenlänge in Abhängigkeit von l_e entsprechend angepasst werden. Da in den ersten Untersuchungen von einer bündigen Verbindung ausgegangen wurde, ist dies auch beibehalten worden. So wurde die Länge der Nabe in Abhängigkeit der sich ergebenden Fasenlängen, für die untersuchten Fasenwinkel 5° , 10° und 15° , angepasst. Auch hier ergibt sich ein exponentieller Kraftanstieg mit zunehmendem Übermaß (**Bild 9**). Es ist festzustellen, dass bei einem Übermaß von $U_{geo} = 0,1 \text{ mm}$ bis $0,3 \text{ mm}$ die Fügekräfte, unabhängig vom Fasenwinkel, auf dem gleichen Niveau liegen. Die sich ergebenden Kraftunterschiede resultieren ausschließlich aus den unterschiedlichen Fasenwinkeln und nicht wie in den vorhergehenden Untersuchungen aus einer verringerten Kontaktlänge. Besonders gut zeigt sich der Einfluss des Winkels bei den erzielbaren Lösekräften, die bei $\beta = 5^\circ$ deutlich höher liegen. Ebenso kann daraus festgehalten werden, dass sich bei kleineren Fasenwinkeln ein deutlich besseres Kräfteverhältnis F_e/F_a ergibt. Der Aufwand der hohen Fügekräfte bringt demzufolge bei kleineren Winkeln den

größten Nutzen im Hinblick auf die axiale Sicherheit der Verbindung. Die Kräfteverhältnisse der untersuchten Verbindungen, mit konstanter Kontaktlänge, sind in **Bild 10** dargestellt.

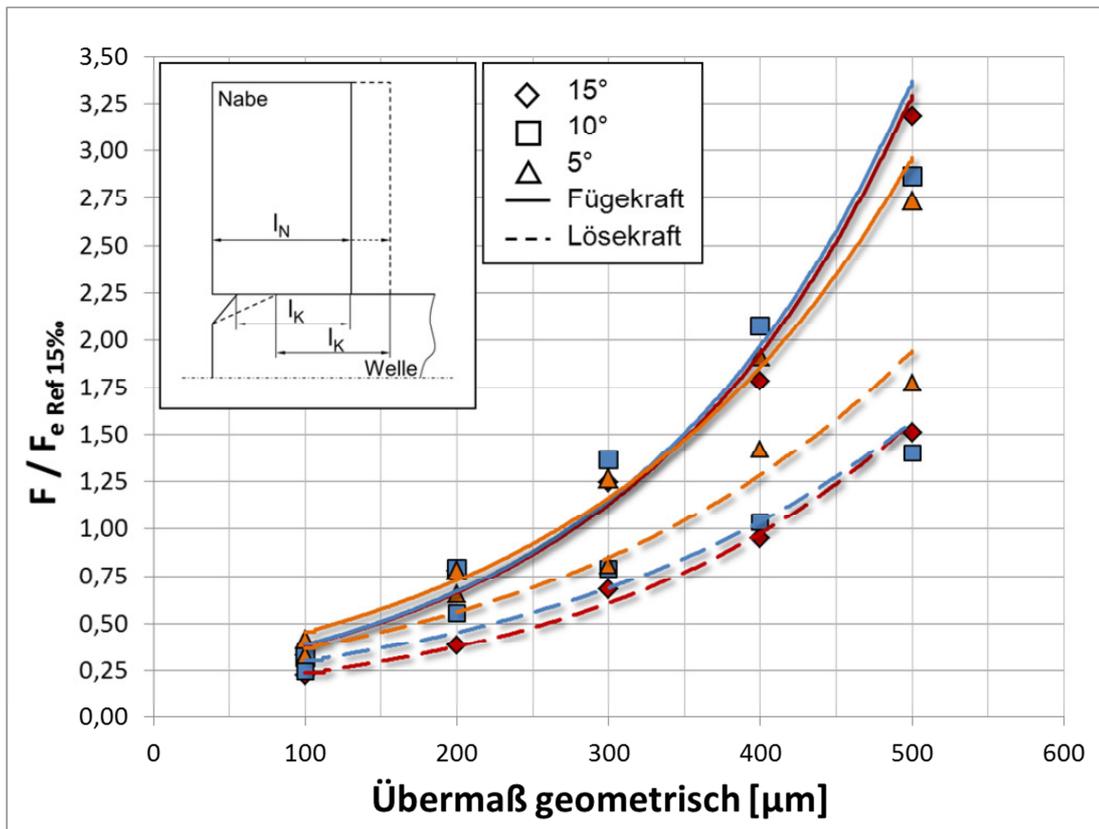


Bild 9: Füge- und Lösekräfte in Abhängigkeit von Fasenwinkel und Übermaß, $F(k)$, angepasste Nabenlänge (konstante Kontaktlänge)

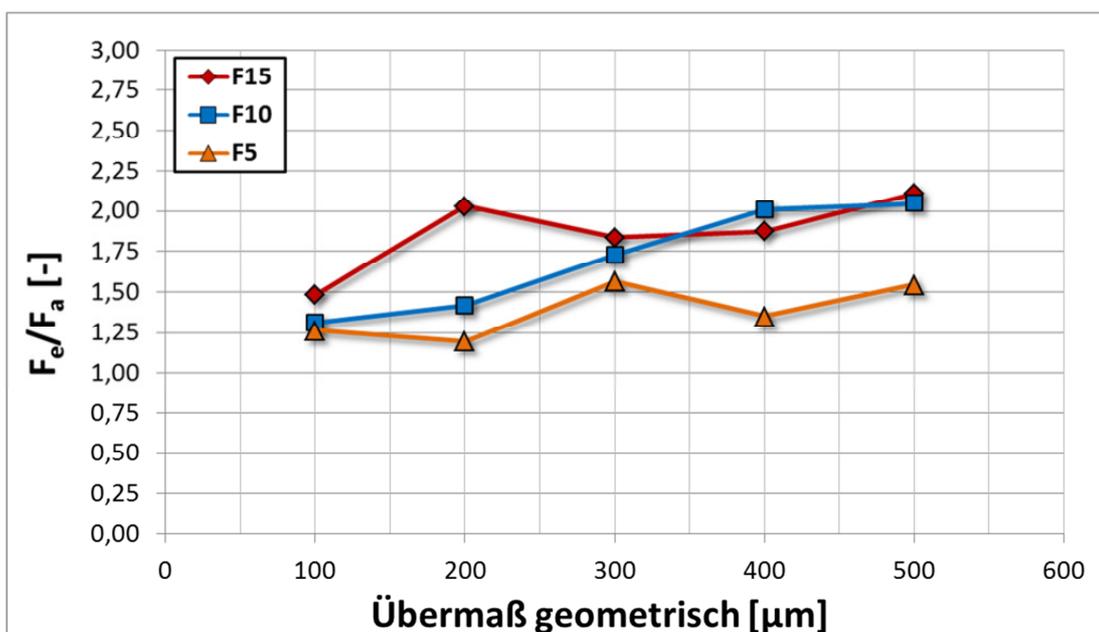


Bild 10: Kräfteverhältnis F_e/F_a in Abhängigkeit von Fasenwinkel und Übermaß, $F(k)$, angepasste Nabenlänge (konstante Kontaktlänge)

5. Zusammenfassung und Ausblick

Für die Verbindungsausbildung von RPV der Form RAA spielt der Fügevorgang eine entscheidende Rolle. So kann dieser rein umformend oder bewusst spanbildend (selbstschneidend) durchgeführt werden. Dies beeinflusst die Ausfüllung der Fuge und somit das spätere Betriebsverhalten. Das in den durchgeführten Arbeiten aufgebaute FE - Modell berücksichtigt, durch die Verwendung eines entsprechenden Schädigungskriteriums, eine eventuelle Spanbildung. Ziel war es jedoch möglichst einen rein umformenden Fügevorgang zu realisieren.

Anhand dieses Simulationsmodells erfolgten unterschiedliche Untersuchungen zum Einfluss der Fase an der Welle auf die Ausbildung des Formschlusses und die notwendigen Füge- und Lösekräfte. Für einen vorwiegend umformenden Fügevorgang sollte die Fase so gestaltet sein, dass h_F größer als das halbe geometrische Übermaß ist, da sonst eine Spanbildung von Beginn an unvermeidlich ist. Die Fase sollte deshalb über die komplette Rändelhöhe ausgeführt werden oder ihre Höhe in Abhängigkeit von U_{geo} entsprechend angepasst werden.

Die gezeigten Ergebnisse hinsichtlich der benötigten Füge- und Lösekräfte zeigten in allen Fällen einen exponentiellen Kraftanstieg mit zunehmendem Übermaß. Dies wird in laufenden Arbeiten durch entsprechende Experimente validiert. Weiterhin gilt es einen entsprechenden Ansatz für die Abschätzung der Fügekraft zu entwickeln, da hier die bekannten Ansätze für PV aus DIN 7190 nicht angewendet werden können. Denn diese berücksichtigen nur die auftretenden Reibkräfte, jedoch nicht die zusätzlich notwendige Umformkraft. Im Hinblick auf die Lösekräfte muss überprüft werden, inwieweit die Ansätze der PV übertragen werden können, da diese sowohl beim PV als auch beim RPV nur auf der Reibung zwischen Welle und Nabe basiert.

Wird beim RPV eine konstante Kontaktlänge vorausgesetzt, dann kann auch hier der in der Literatur gegebene Richtwert für den Fasenwinkel von $\beta = 5^\circ$ für ein bestmögliches Fügeergebnis (min. Spanbildung, bestes Kräfteverhältnis) bestätigt werden.

6. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, für die Bereitstellung der experimentellen Versuchsergebnisse zum Abgleich der FEM-Simulation.

7. Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
D_{al}	[mm]	Außendurchmesser Innenteil
D_{iA}	[mm]	Innendurchmesser Außenteil
D_{krit}	[-]	kritischer Schädigungswert
h_f	[mm]	Fasenhöhe
l_e	[mm]	Fasenslänge
l_k	[mm]	Kontaktlänge (tragende Rändellänge)
l_N	[mm]	Nabenlänge
ρ_F	[N/mm ²]	Fugendruck
t	[mm]	Rändelteilung
U	[μ m]	Übermaß
U_{geo}	[μ m]	geometrisches Übermaß
α	[$^\circ$]	Profilwinkel
β	[$^\circ$]	Fasenwinkel
λ_h	[%]	Ausfüllungsgrad
ξ	[%o]	bezogenes Übermaß
σ_{max}	[N/mm ²]	maximale Hauptspannung
σ_V	[N/mm ²]	Vergleichsspannung
φ	[-]	Umformgrad
ψ	[$^\circ$]	Winkel (Größe) des simulierten Segments

8. Literatur

- [Bad-09] Bader, M.: Das Übertragungsverhalten von Pressverbänden und die daraus abgeleitete Optimierung einer formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung. Dissertation, TU Graz 2009
- [DIN 82] DIN 82: Rändel. Deutsche Norm, 1973
- [DIN 7190] DIN 7190: Pressverbände Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln. Deutsche Norm, 2001
- [For-09] FORGE2009 Online Hilfe Version 3.2De, November 2009 für GLPre 3.2 & Forge 2009
- [Rol-07] Muhs, D.; Wittel, H.; Becker, M.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Vieweg Braunschweig Wiesbaden, 2007, ISBN: 978-3-8348-0262-0 und Tabellenbuch ISBN: 3-528-07025-5
- [Tho-69] Thomas, K.: Die Presspassung mit unterbrochener Fuge. Dissertation 1969, TU Hannover
- [Wal-09] Walther, V.: interne Versuchsergebnisse der Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, Herzogenaurach