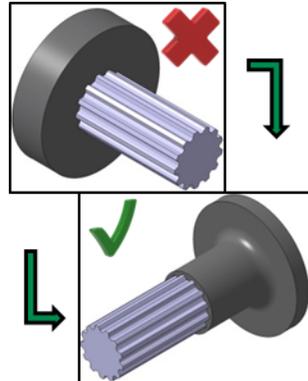


Einfluss der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480



Schäfer, G.; Wild, J.

Häufiges Ziel in der Praxis ist die Steigerung des zu übertragenden Torsionsmomentes bei gleichzeitig unverändert zu belassenden Bauraum. Hier werden bei den gegenwärtig oft verwendeten Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] zur Verbindung von Wellen und Naben immer häufiger kerbwirkungsbedingt die Tragfähigkeitsgrenzen erreicht. Durch eine konstruktiv günstige Ausgestaltung ist die Kerbwirkung signifikant reduzierbar. Im Rahmen dieses Artikels werden numerische Ergebnisse dargelegt, die mit dem Ziel der Einflussbestimmung von Nabenwandstärke, Lastart sowie Nabenlänge auf die Tragfähigkeit der Verbindung durchgeführt wurden.

Very often the goal to increase the torque to be transferred without changing the space has to be met in practice. As a result the commonly used splined tooth shaft connection according to the [DIN 5480] to connect shafts and hubs more and more frequently reach the limit of the load capacity in due to the stress concentration. With an advantageous design the notch effect can be decreased significant. In this essay numerical results are given, which were done to determine the influence of the wall thickness of the hub, the kind of load and the length of the hub on the capability of the connection to carry load.

1 Einleitung

Gegenstand des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] war die Analyse von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] unter typischen Einsatzbedingungen. Hier galt es die in den Berechnungsrichtlinien wie beispielsweise der [DIN 743] und der [DIN 5466] gegebenen Möglichkeiten zur Abschätzung von Form- und Kerbwirkungszahlen zu überprüfen, zu präzisieren und insbesondere um weitere Einflussgrößen zu ergänzen. Das Forschungsvorhaben wurde in Kooperation von dem IMM der TU Dresden und dem IMW der TU Clausthal bearbeitet. Während in Dresden eine Vielzahl von numerischen Analysen durchgeführt wurde, erfolgten in Clausthal umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Die Ergebnisse der Experimente dienten dabei nicht nur zur Validierung der numerischen Resultate, sondern ebenfalls zur eigenständigen Einflussbestimmung von Parametern wie

beispielsweise Lastart, Verbindungsgröße, Sicherungsringnut, Auslauform, Nabenlage, Werkstoffzustand etc.

Wesentlicher Bestandteil der experimentellen Untersuchungen waren Versuche bei statischer Torsion sowie dynamischer Biegung in Kombination als praxisnahes Szenario. Ausgehend von einer Standardkonfiguration wurden Parameter zur Einflussbestimmung variiert. Unter anderem wurde der Einfluss der Nabenwandstärke in Stichversuchen experimentell untersucht. Es zeigte sich, dass die Modifikation des Nabenaußendurchmessers d_{e2} bei unverändertem Bezugsdurchmesser d_b der Zahnwellenverbindung zu einem signifikanten Tragfähigkeitsanstieg führt, vgl. Abbildung 1.

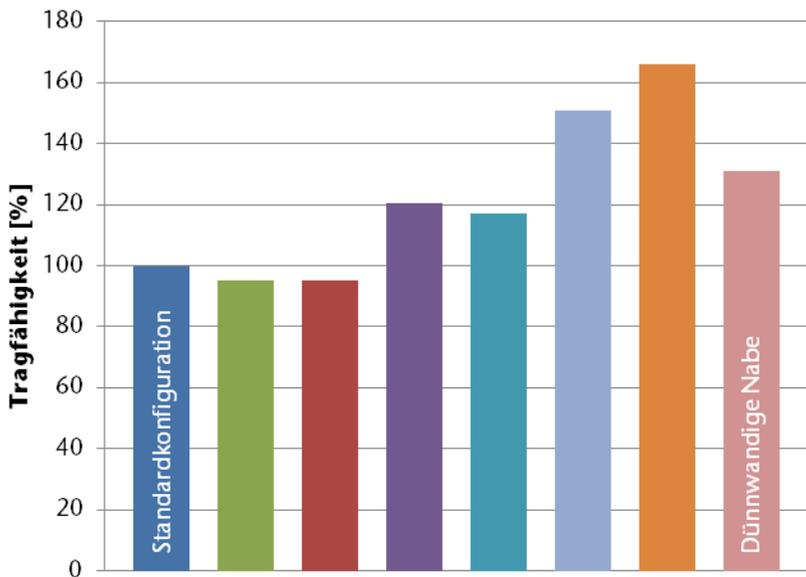


Abbildung 1: Experimentelle Einflussabschätzung (Dynamische Biegung sowie statische Torsion in Kombination ($M_b / M_t = 0,2$), ZWV nach DIN 5480 - 25 x 1,75 x 13, $R_b = -1$)

Die Motivation zur Erarbeitung der im Rahmen dieses Artikels beschriebenen Arbeitsergebnisse lag darin, den experimentell bestimmten Einfluss der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen numerisch nachzuweisen sowie die Kenntnisse zu diesem Sachverhalt durch eine Parameterstudie zu erweitern. Die Untersuchungen wurden durch [MONT 15-1] am IMW der TU Clausthal im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführt.

2 Numerische Untersuchungen zur Einflussbestimmung der Nabengeometrie

2.1 Definition der untersuchten Geometrie

Die nachfolgend dargestellten numerischen Ergebnisse wurden in Anlehnung an die in den Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] untersuchte Standardgeometrie einer Zahnwellenverbindungen mit der Bezeichnung DIN 5480 - 25 x 1,75 x 13 erarbeitet. Die in der Zahnwellenverbindungsbezeichnung enthaltenen Informationen (Eingriffswinkel $\alpha = 30^\circ$, Bezugsdurchmesser $d_B = 25$ mm, Modul $m = 1,75$ mm bzw. Zähnezahl $z = 13$) blieben dabei unverändert. Die Art der Fertigung wurde ebenfalls beibehalten. Nach [DIN 5480] ist hierdurch die Zahnfußrundung des Bezugsprofils definiert, die in der Zahnfußrundung der Zahnwelle abgebildet wird. Als Fertigungsart wurde das Zerspanen zugrunde gelegt. Nach der [DIN 5480] berechnet sich die Zahnfußrundung folglich zu $\rho_{FP} = 0,16 \cdot m = 0,28$ mm.

Durch die Wahl der gleichen Randbedingungen, die auch bei den experimentellen Untersuchungen der Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] vorlagen, wurde erreicht, dass experimentelle Ergebnisse zur Validierung genutzt werden konnten. Des Weiteren war die Ergänzung der im Rahmen der zuvor genannten Forschungsprojekte gewonnenen Erkenntnisse, ohne weitere potentielle Einflüsse bei etwaigen Vergleichen beachten zu müssen, problemlos möglich.

Wesentlicher Inhalt der Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] war die Analyse des Einflusses der Auslauform auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480]. Dieser Einfluss wurde bei den numerischen Untersuchungen, deren Ergebnisse im Rahmen dieses Artikels dargelegt sind, nicht betrachtet. Es wurde lediglich der verzahnte Bereich der Welle im Zusammenspiel mit der Nabe analysiert.

Bei den von [Mont15-1] am Institut für Maschinenwesen durchgeführten numerischen Untersuchungen zur Einflussbestimmung der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach der [DIN 5480] wurde der Abstand zwischen dem Lastangriffspunkt und der Nabenkante konstant gehalten. Er betrug das Zweifache des Bezugsdurchmessers d_B . Variiert wurden die Parameter

- Nabenaußendurchmesser d_{e2} ,
- Lastart sowie
- Nabenlänge l

zur entsprechenden Einflussbestimmung, vgl. Abbildung 2.

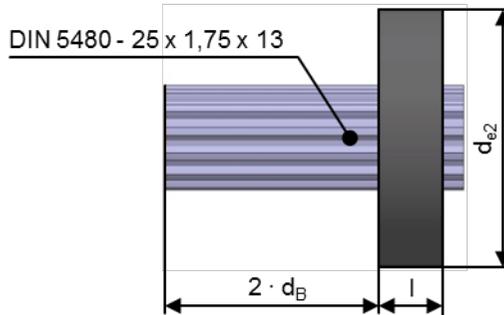


Abbildung 2: Geometriedefinition

2.2 Numerische Randbedingungen

Alle numerischen Untersuchungen wurden im linearelastischen Bereich, bei linearer Interpolation unter Anwendung eines APDL-Skripts mit AnsysClassic (Version 14.5) durchgeführt. Den Auswertungen wurde die nodale Lösung zugrunde gelegt. Die Kontaktsteifigkeit blieb von der Standardvorgabe unverändert. Vorversuche ergaben eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Experiment und Numerik.

2.3 Ort der Auswertung

Den Einfluss des Auslaufs nicht berücksichtigend erfolgt der Anriss bei Torsion wie auch bei Torsion in Kombination mit Biegung mit entsprechender Dominanz des Torsionsmomentes ($M_b / M_t \leq 0,3$) erfahrungsgemäß im Zahnfußbereich der Welle an der Nabenkante. Die hier vorherrschenden Kerbeinflüsse Zahnfußrundung sowie Steifigkeitssprung am Übergang von der Zahnwelle zur Nabe überlagern sich zu einem Gesamtkerbeinfluss. Es kommt also zur sogenannten Kerbüberlagerung. Die Höhe des nabenkantenbedingten Anteils der Kerbwirkung ist hierbei eine Funktion der Nabensteifigkeit. Diese ist abhängig von der Nabenwandstärke sowie der Nabenlänge.

Resultierend aus oben beschriebenem Sachverhalt erfolgte die Auswertung der numerischen Untersuchungen in der Zahnfußrundung an der Nabenkante an der Stelle der höchsten Beanspruchung.

2.4 Praxisrelevanz kombinierter Lasten

Primärer Verwendungszweck einer Zahnwellenverbindung nach der [DIN 5480] ist die Übertragung eines Torsionsmomentes. In der praktischen Anwendung kommt es jedoch häufig vor, dass der Torsion eine Querkraft oder ein Biegemoment überlagert ist. Diese zusätzlichen Lasten können beispielsweise aus Achs- bzw. Winkelversatz ohne Ausgleichselement (statische Unbestimmtheit), bei einer fliegenden Lagerung durch Radialkräfte oder aber bei Kreuzgelenkwellen aus dem leistungslosen Biegemoment herrühren.

2.5 Einfluss der Lastart

2.5.1 Torsion

Die Ursache für den im Forschungsvorhaben [FVA 467 II] bestimmten Effekt der Abnahme der Formzahl bei Verwendung einer dünnwandigen Nabe wird auf die geringere Gesamtsteifigkeit der Zahnwellenverbindung zurückgeführt. Aus Gründen der Einfachheit sollte dieser Effekt zunächst bei reiner Torsion numerisch untersucht werden. Die Randbedingungen wurden diesbezüglich gemäß Abbildung 3 definiert.

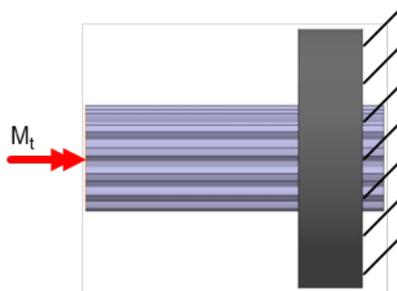


Abbildung 3: Definition der Randbedingungen

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen.

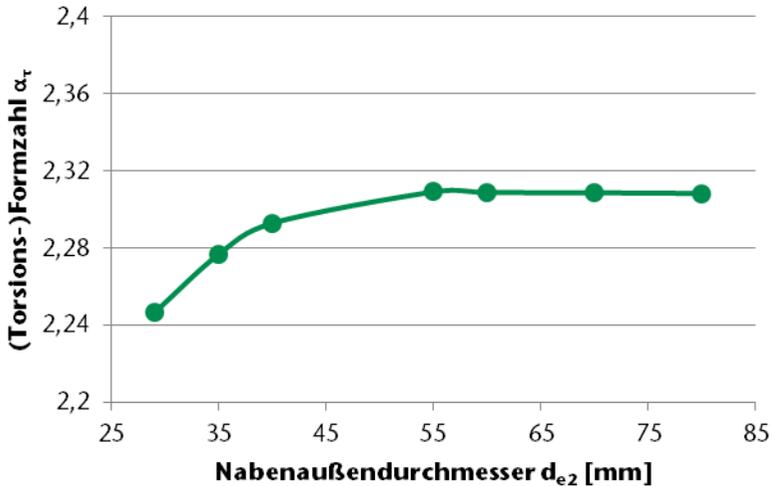


Abbildung 4: Torsionsformzahl α_τ als Funktion des Nabenaußendurchmessers d_{e2} (DIN 5480 – 25 x 1,75 x 13, Nabenlänge $l = 15$ mm)¹

Betrachtet man den Verlauf der Formzahl über dem Nabenaußendurchmesser d_{e2} wird ersichtlich, dass erwartungsgemäß mit kleiner werdendem Durchmesser die (Torsions-)Formzahl α_τ abnimmt. Allerdings ist die Verringerung der Formzahl von circa 2,3 auf ungefähr 2,25 sehr klein. Folglich ist der experimentell bestimmte Effekt der signifikanten Tragfähigkeitssteigerung bei dünnwandiger Ausgestaltung der Nabe nicht beziehungsweise nur bedingt nachweisbar.

2.5.2 Biegung

Da der Effekt der signifikanten Tragfähigkeitssteigerung unter Verwendung einer dünnwandigen Nabe bei reiner Torsion nur zu einem geringen Teil nachweisbar war, vgl. Kapitel 2.5.1, soll nun die aus einem Biegemoment resultierende numerisch bestimmte Zahnfußspannung bzw. die (Biege-)Formzahl α_σ in Abhängigkeit der Nabenwandstärke betrachtet werden.

Abbildung 5 zeigt die bei den numerischen Analysen definierten Randbedingungen. Diese entsprechen jenen der experimentellen Untersuchungen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II].

¹ Mit Änderungen entnommen aus: Montero, M. (2015), S. 54

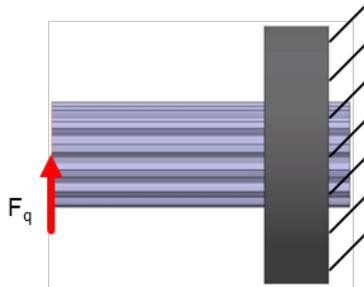


Abbildung 5: Definition der Randbedingungen

Die numerischen Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

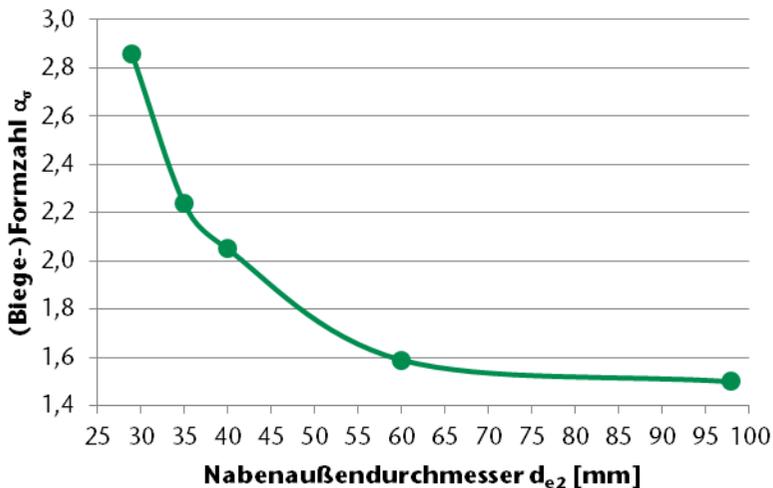


Abbildung 6: Biegeformzahl α_σ als Funktion des Nabenaußendurchmessers d_{e2} (DIN 5480 – 25 x 1,75 x 13, Nabenlänge $l = 15$ mm)²

Bei Betrachtung der (Biege-)Formzahl α_σ in Abhängigkeit des Nabenaußendurchmessers d_{e2} zeigt sich, dass, in Gegenüberstellung zu dem experimentell bestimmten Effekt, eine inverse Abhängigkeit des Tragverhaltens vorliegt. Je dünner die Nabe ist, desto höher ist die biegemomentbedingte maximale Zahnfußspannung. Aus den numerischen Ergebnissen geht zudem hervor, dass sich die Spannungsverteilung von der Dick- hin zur Dünnwandigkeit signifikant verändert, vgl. Abbildung 7.

² Mit Änderungen entnommen aus: Montero, M. (2015), S. 61

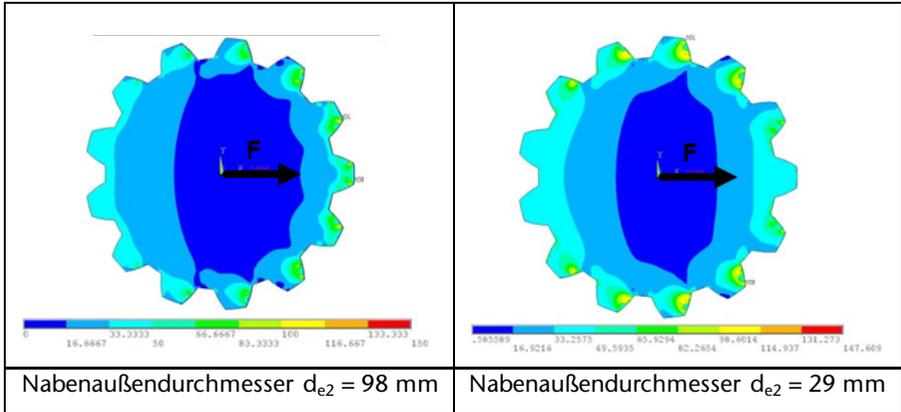


Abbildung 7: Änderung der Spannungsverteilung bei unterschiedlichem Nabenaußendurchmesser d_{e2} - Grenzwertbetrachtung³

Bei der dickwandigen Nabe (Abbildung 7, links) ist die maximale Spannung in dem Zahnfuß jenes Zahnes (druckseitig) zu erwarten, der den maximalen Abstand zur neutralen Faser aufweist. Reduziert man die Nabenwandstärke, so wandert das Zahnfußspannungsmaximum zu jenen Zähnen, die nahe bzw. in der neutralen Faser liegen. Dieses Verhalten lässt sich über die gestiegene Nabennachgiebigkeit begründen. Mit steigender Verformung steigt der Traganteil jener Zähne, die sich nicht in Richtung der Querkraft befinden. Die sich ergebenden auf den zahnflanken stehenden Reaktionskräfte biegen die Zähne. Der Zahnfuß als für die Zahnbiegung kritische Kerbe führt zur Spannungsspitze.

2.5.3 Torsion und Biegung in Kombination bei $M_b / M_t = 0,2$ (Nabellänge $l = 15$ mm)

Mit den in den Kapiteln 2.5.1 und 2.5.2 beschriebenen numerischen Untersuchungen konnte das im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] experimentell bestimmte Verhalten von Zahnwellenverbindungen nach der [DIN 5480] der signifikanten Tragfähigkeitssteigerung bei dünnwandiger Ausbildung der Nabe nicht nachgewiesen werden. Hieraus schlussfolgernd ist der Effekt nur gegeben, wenn analog zu den Experimenten die Lastarten Biegung und Torsion in Kombination vorherrschen. Für die numerischen Untersuchungen bei kombinierter Last wurde das gleiche M_b / M_t - Verhältnis von 0,2 zugrunde gelegt. Die Randbedingungen wurden dabei gemäß Abbildung 8 definiert.

³ Entnommen aus: Montero, M. (2015), Anhang

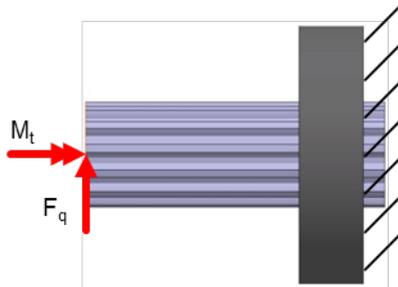


Abbildung 8: Definition der Randbedingungen

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen. Es gilt zu beachten, dass im Gegensatz zu den in den Kapiteln 2.5.1 sowie 2.5.2 dargestellten Ergebnissen, nicht die Formzahlen, sondern die Vergleichsspannungen $\sigma_{v,Mises}$ der maximal beanspruchten Zahnfußrundungen zu Vergleichszwecken herangezogen werden. Dies begründet sich dadurch, dass die Vergleichsspannung nicht auf die Lastarten Biegung und Torsion aufteilbar ist. Folglich können auch keine Formzahlen berechnet werden.

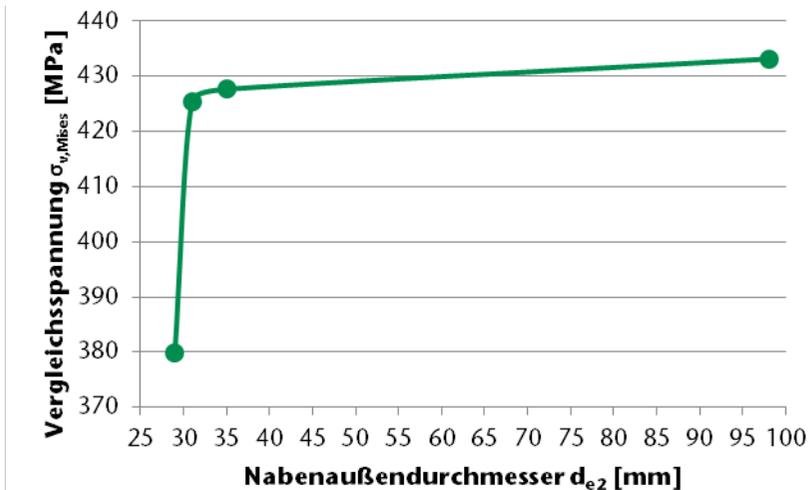


Abbildung 9: Vergleichsspannung $\sigma_{v,Mises}$ als Funktion des Nabenaußendurchmessers d_{e2} (DIN 5480 – 25 x 1,75 x 13, Nabenlänge $l = 15$ mm, $M_b / M_t = 0,2$)⁴

Bei Betrachtung der Vergleichsspannung $\sigma_{v,Mises}$ der maximal beanspruchten Zahnfußrundung in Abhängigkeit des Nabenaußendurchmessers d_{e2} wird

⁴ Mit Änderungen entnommen aus: Montero, M. (2015), S. 69

ersichtlich, dass die Spannung ab dem Erreichen eines bestimmten Durchmessers signifikant abnimmt. Die beiden im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] experimentell bestimmten Tragfähigkeiten, einmal bei dick- und einmal bei dünnwandiger Nabe, deuten sehr gut auf einen derartigen Wandstärkeneinfluss hin. Die eingangs dieses Artikels definierte Fragestellung, ob der experimentell bestimmte Einfluss der Nabenwandstärke auf die Tragfähigkeit einer Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] numerisch nachweisbar ist, kann folglich bestätigt werden.

2.6 Variation der Nabelnange bei $M_b / M_t = 0,2$

Wie in Kapitel 2.3 erläutert, ist die Höhle der Kerbwirkung unter anderem eine Funktion des Steifigkeitssprunges im Übergang von der Welle zur Nabe. Diese ist erfahrungsgemäß nicht nur von der Nabenwandstärke, sondern ebenfalls von der Nabelnange l abhängig. Zum Nachweis sowie zur Ermittlung des exakten Einflusses wurden die in Kapitel 2.5.3 angeführten numerischen Ergebnisse um Erkenntnisse bei den Nabelnangen 10 mm sowie 30 mm ergänzt, vgl. Abbildung 10.

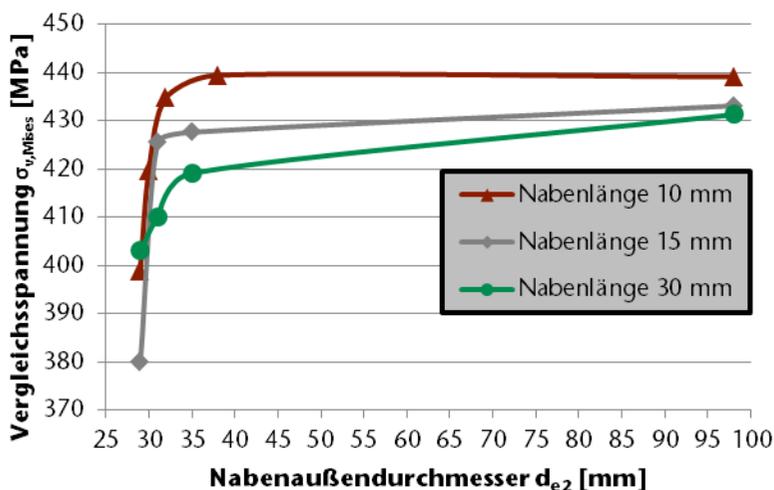


Abbildung 10: Vergleichsspannung $\sigma_{v,Mises}$ als Funktion des Nabenaußendurchmessers d_{e2} sowie der Nabelnange l (DIN 5480 - 25 x 1,75 x 13, $M_b / M_t = 0,2$)⁵

Ausnahmslos alle in Abbildung 10 gezeigten Spannungsverläufe zeigen den anfänglich beschriebenen experimentell erarbeiteten Effekt, dass es bei

⁵ Mit Änderungen entnommen aus: Montero, M. (2015), S. 79

dünnwandiger Gestaltung der Nabe zu einer Steigerung der Tragfähigkeit bedingt durch die verringerte Kerbschärfe kommen kann.

Bei Betrachtung der in Abbildung 10 gezeigten Graphen lassen sich diese anhand der Gradienten grob in zwei Bereiche unterteilen. Im linken Bereich herrscht ein sehr großer Spannungsgradient vor. Hier bewirkt eine kleine geometrische Variation eine große Tragfähigkeitsänderung. Ein mögliches Minimum gilt es in Abhängigkeit der Last unter Berücksichtigung der Plastizitätsgrenze der Nabe zu bestimmen. Dem Kurvenverlauf nach rechts folgend, scheinen sich die Vergleichsspannungen einem Maximalwert asymptotisch anzunähern. Diese Annäherung erfolgt bei höherer Steifigkeit deutlich schneller als bei einer konstruktiv weicher gestalteten Verbindung.

3 Übertragbarkeit

Wie in Kapitel 2.4 erläutert ist ein in der Praxis häufig vorkommender Lastfall jener der statischen Torsion in Kombination mit dynamischer Biegung. Im Rahmen dieses Artikels wurde der positive Einfluss auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] dargelegt, der sich bei konstruktiv weicher Ausgestaltung bei diesem Lastfall ergibt.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] wurden neben numerischen Analysen experimentelle Untersuchungen an Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] durchgeführt. Diese dienten sowohl zur Validierung der numerischen Ergebnisse als auch zur eigenständigen Erarbeitung von Tragfähigkeitseinflüssen. Neben dem Einfluss der Lastart, des Fertigungsverfahrens, der Nabenlage, des Auslaufs etc. wurde auch der Einfluss der Nabenwandstärke betrachtet. Diesbezüglich wurden dick- und dünnwandige Naben hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit bei statischer Torsion sowie dynamischer Biegung in Kombination experimentell untersucht. Es zeigte sich, dass die dünnwandige Ausgestaltung der Nabe einen signifikant positiven Einfluss auf die Tragfähigkeit der Welle-Nabe-Verbindung hat. Dies als Anlass nehmend wurden weiterführend numerische Untersuchungen im Rahmen einer durch [Mont 15-1] am IMW der TU Clausthal erstellten Masterarbeit durchgeführt. Die Analysen beschränkten sich auf den Einfluss der Nabenwandstärke bei den Lastarten Torsion, Biegung sowie Torsion in Kombination mit Biegung. Neben der Lastart und des Nabenaußendurchmessers d_{e2} wurde zudem die Länge der Nabe variiert.

Die numerischen Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Nabenwandstärke bei Torsion zeigten, dass bei abnehmender Wandstärke auch die (Torsions-)Formzahl sinkt. Der Einfluss tritt allerdings erst bei sehr kleinen

Nabenwandstärken auf und ist nur in sehr geringem Maße ausgeprägt. Praktisch ist dies mit hoher Wahrscheinlichkeit von untergeordneter Bedeutung.

Resultierend daraus, dass der experimentell bestimmte signifikant positive Einfluss einer dünnwandigen Nabe auf die Tragfähigkeit einer Zahnwellenverbindung durch numerische Analysen unter reiner Torsionsbelastung kaum nachweisbar war, wurden weitere Untersuchungen bei Biegung durchgeführt. Das dort bestimmte Arbeitsergebnis ist, dass die biegemomentbedingte Formzahl im Zahnfußbereich bei dünner werdender Nabe deutlich ansteigt. Das so numerisch ermittelte Tragfähigkeitsverhalten der Welle-Nabe-Verbindung ist also genau entgegengesetzt zu jenem, welches sich experimentell bei statischer Torsion und dynamischer Biegung in Kombination zeigte.

Weiterer Untersuchungsgegenstand war die numerische Analyse des Einflusses der Lastart statische Torsion sowie dynamische Biegung in Kombination in vollständiger Analogie zu den im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 467 II] durchgeführten Experimenten. Hier zeigten die numerischen Ergebnisse, dass der Effekt der Tragfähigkeitssteigerung bei dünner werdender Nabe abbildbar ist. Bei Betrachtung des Spannungsgradienten ist der Verlauf der Vergleichsspannung als Funktion des Nabenaußendurchmessers grob in zwei Bereiche unterteilbar. Bei sehr kleinen Nabewandstärken hat eine kleine Veränderung des Nabenaußendurchmessers d_{e2} einen sehr großen Einfluss auf die maximal auftretende Zahnfußspannung. Bei größeren Nabewandstärken nimmt dieser Gradient stark ab. Die maximal vorhandene Zahnfußspannung nähert sich asymptotisch voraussichtlich einem gemeinsamen Maximalwert.

Neben der Nabewandstärke nimmt die Nabenlänge Einfluss auf die Steifigkeit der Zahnwellenverbindung. Dies berücksichtigend wurden zudem numerische Untersuchungen bei Variation dieses Parameters durchgeführt. Es zeigte sich im Wesentlichen, dass bei zunehmender Nabenlänge der Bereich der größeren Vergleichsspannungsgradienten bei dünnwandigeren Naben weniger stark ausgeprägt ist und zudem der asymptotische Übergang bei größeren Nabenaußendurchmessern d_{e2} zu einem potentiell für alle Nabenlängen gemeinsamen Maximalwert allmählicher stattfindet.

5 Ausblick

Mittelfristig werden die durch [Mont 15-1] erarbeiteten numerischen Ergebnisse um weitere Berechnungen ergänzt. Ziel hierbei ist die Steigerung der Ergebnisgüte insbesondere im Bereich der hohen Vergleichsspannungsgradienten bei dünnwandigen Naben. Dieser ist für die Praxis von besonderem Interesse, da hier hohe Potentiale zur Tragfähigkeitsverbesserung existieren.

In Ergänzung werden zudem Naben mit Längen größer als 30 mm in Abhängigkeit des Nabenaußendurchmesser d_{e2} bei sonst unveränderten Parametern untersucht.

Von besonderem Interesse ist der Einfluss des M_b / M_t -Verhältnisses auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen bei dünnwandiger Ausgestaltung der Nabe. Hier werden ebenfalls weitere numerische Untersuchungen durchgeführt.

Langfristig sollen die gegenwärtig zur Abschätzung der Kerbwirkung von Zahnwellenverbindungen vorhandenen Normen wie z.B. [DIN 743] oder [DIN 5466] um den Aspekt der konstruktiv weichen Ausgestaltung (dünnwandige Nabe, Nabenlänge l) ergänzt werden.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und ihren Mitgliedern für die inhaltliche Betreuung sowie bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsvorhaben [FVA 467 I, AiF_Nr 14058 BG] sowie [FVA 467 II, AiF-Nr 16661 BG]. Die im Rahmen dieser Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse waren Ausgangspunkt für die numerischen Untersuchungen, deren Ergebnisse im Rahmen dieses Artikels dargelegt wurden.

Zudem bedanken sich die Autoren bei Herrn Marc Riera Montero für die freundliche und konstruktive Zusammenarbeit zur numerischen Erarbeitung des Einflusses der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480].

7 Formelzeichen

d_B	Bezugsdurchmesser
d_{e2}	Nabenaußendurchmesser
l	Nabellänge
m	Modul
M_b	Biegemoment
M_t	Torsionsmoment
z	Zähnezahl
α	Eingriffswinkel
ρ_{fp}	Zahnfußrundung des Bezugsprofils
$\sigma_{v,Mises}$	Vergleichsspannung nach Mises

8 Literatur

- [DIN 743] Norm DIN 743, 2012-12-00. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- [DIN 5466] Norm DIN 5466, 2000-10-00. Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen
- [DIN 5480] Norm DIN 5480, 2006-03-00. Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser
- [FVA 467 I] Daryusi, A. ; Lau, P.: Profilwellen-Kerbwirkung: Ermittlung der Kerbwirkung bei Profilwellen für die praktische Getriebeberechnung von Zahnwellen. Forschungsvorhaben Nr. 467 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., (AiF 14058 BG). Frankfurt/Main, 2009 (FVA-Heft 905)
- [FVA 467 II] Wendler, J.; Wild, J.: Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen: Tragfähigkeit von Profilwellen (Zahnwellenverbindungen) unter typischen Einsatzbedingungen. Forschungsvorhaben Nr. 467 II der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., (AiF 16661 BG) noch nicht veröffentlichter Abschlussbericht
- [MONT 15-1] Montero, M.: Finite Element Analysis of a splined Shaft Hub Connection regarding the Wall Thickness of the Hub. Nicht veröffentlichte Masterthesis, Clausthal-Zellerfeld, 2015