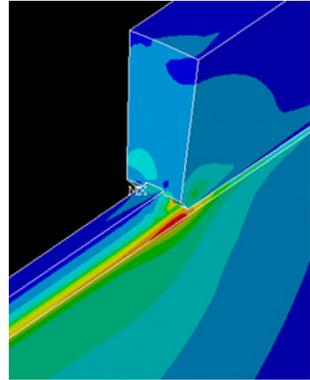


Optimierung der Zahnwellenprofilform

Schäfer, G.; Wild, J.

Häufiges Ziel in der Praxis ist die Steigerung des zu übertragenden Torsionsmomentes bei gleichzeitig unverändert zu belassende Bauraum. Hier werden bei den gegenwärtig oft verwendeten Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] zur Verbindungen von Wellen und Naben immer häufiger kerbwirkungsbedingt die Tragfähigkeitsgrenzen erreicht. Es ist bekannt, dass durch eine Veränderung der Profilform die Tragfähigkeit gesteigert werden kann. Inhalt dieses Artikels ist die Vorstellung eines Forschungsvorhabens, dass die Entwicklung einer neuen Zahnwellenprofilform auf Basis sogenannter komplexer Trochoiden zum Ziel hat.



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. It is known that the capability of the connection to carry load can be increased by a change of the profile shape. Content of this essay is the introduction of a new research project, which has the goal to develop a new toothed shaft profile based on the so-called complex trochoids.

1 Einleitung

In der Praxis werden Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] häufig angewendet. Begründen lässt sich dies dadurch, dass diese Art der Welle-Nabe-Verbindung dazu in der Lage ist, hohe stoßartig auftretende, dynamische Torsionsmomente zu übertragen. Zudem ist sie unter dem Aspekt des ökonomischen Prinzips wirtschaftlich herstellbar. Dies ergibt sich daraus, dass die zur Herstellung von Laufverzahnungen verfügbaren Werkzeug sowie optimierten Prozesse direkt anwendbar sind.

Häufiges praktisches Ziel ist die Steigerung des zu übertragenden Torsionsmomentes bei gleichzeitig zumindest unverändert zu belassendem Bauraum. Hier werden bei Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] immer öfter kerbwirkungsbedingt die Tragfähigkeitsgrenzen erreicht. Durch eine Optimierung der Zahnwellenprofilform kann Abhilfe geschaffen werden. Diesbezüglich ist es

Gegenstand des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] zu überprüfen, ob die sogenannten komplexen Trochoiden in Gegenüberstellung zur Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] nennenswert tragfähiger sind. Bei dieser Betrachtung gilt es neben dem Tragfähigkeitspotential zudem alle an eine Welle-Nabe-Verbindung gestellten Anforderungen insbesondere der wirtschaftlichen Herstellung zu berücksichtigen. Im Rahmen dieses Artikels wird der Inhalt des Forschungsvorhabens beschrieben.

2 Inhalt des Forschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben [FVA 742 I] wird vom Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal in Kooperation mit der westsächsischen Hochschule Zwickau bearbeitet. Abbildung 1 zeigt den arbeitspaketübergreifenden Inhalt sowie die Arbeitsaufteilung.

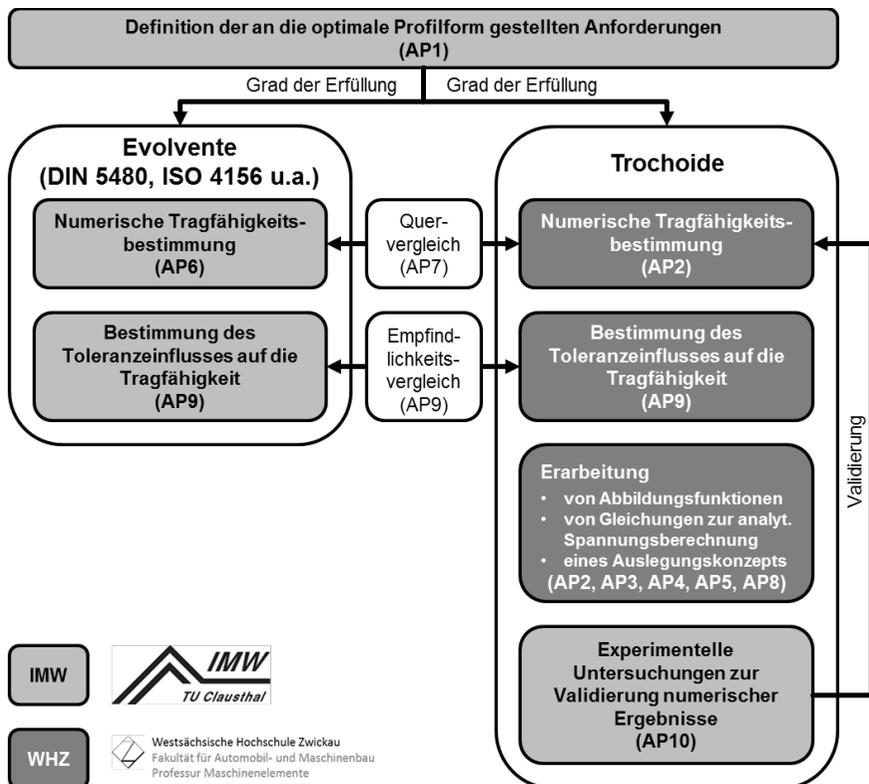


Abbildung 1: Inhalt sowie Arbeitsaufteilung des Forschungsvorhabens [FVA 742 I]

Im Wesentlichen werden die Untersuchungen bezüglich der Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] vom Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, jene hinsichtlich der komplexen Trochoiden von der westsächsischen Hochschule Zwickau durchgeführt. Ausnahme bilden die experimentellen Untersuchungen. Diese beschränken sich auf die Analyse der komplexen Trochoiden und werden am Institut für Maschinenwesen durchgeführt.

Die Durchführung des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] erfolgt in Anlehnung an die Vorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II]. Dieses Vorgehen ermöglicht die Validierung numerischer Untersuchungsergebnisse von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] anhand der in den zuvor genannten Forschungsvorhaben erarbeiteten experimentellen Erkenntnisse. Weiter kann das in den Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] zusammengetragene Wissen unmittelbar um die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse erweitert werden. Zudem ist ein direkter experimenteller Vergleich zwischen Evolvente und Trochoide möglich.

In den nachfolgenden Kapiteln wird lediglich auf die vom Institut für Maschinenwesen zu bearbeitenden Bereiche eingegangen.

2.1 Definition der an die optimale Profilform gestellten Anforderungen (API)

Wie in der Einleitung dargestellt, ist die Steigerung der Tragfähigkeit der gegenwärtig häufig eingesetzten Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] angestrebt. Dies kann durch eine Optimierung der Profilform erfolgen. Bei einer Bewertung, ob eine bessere Profilform gefunden wurde, gilt es aber nicht nur den Aspekt der Tragfähigkeit, sondern alle an eine Welle-Nabe-Verbindung gestellten Anforderungen (Funktions- und Fertigungsmerkmale) im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung zu berücksichtigen. Hieraus folgend sollen beispielhaft die

- Belastungsbedingungen (Dreh-, Biegemoment, Querkraft),
- geometrischen Bedingungen (Nabenaußen-/Fügedurchmesser),
- Nutzungsart (Schiebe-, Festsitz),
- Fertigungsbedingungen (Prozessart,-zeiten, Werkzeugstandzeiten),
- Werkstoffe (Streckgrenze, Streckgrenzenverhältnis, Oberflächenschicht)
- sowie relevante Schadensursachen

als Bewertungskriterien benannt werden.

Eine mögliche neue Profilform ist jene der komplexen Trochoiden. Die Überprüfung ist Gegenstand des Forschungsvorhabens [FVA 742 I].

2.2 Evolvente ([DIN 5480], [ISO 4156]) – Numerische Tragfähigkeitsbestimmung (AP6)

Für den reinen Tragfähigkeitsvergleich wird das praxisnahe Szenario eines vorgegebenen und zwingend einzuhaltenden Bauraums zugrunde gelegt. Konkret handelt es sich bei dieser Restriktion um einen maximal zulässigen Wellendurchmesser von 25 mm. Folglich gilt es bezüglich der Zahnwellenverbindung einen Bezugsdurchmesser d_b von 25 mm nicht zu überschreiten. Dieser Wert ergibt sich aus dem in Kapitel 2 erläuterten Sachverhalt der Vergleichbarkeit bzw. Ergänzung von Ergebnissen der Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II]. Da ein kleiner gewählter Bezugsdurchmesser als dem maximal möglichen zu einer geringeren Tragfähigkeit führt, verbleiben als variable Parameter der Zahnwelle nach [DIN 5480] der Modul m beziehungsweise die Zähnezahl z sowie die Zahnfußrundung ρ_{fp} . Der Eingriffswinkel von 30° wird nicht verändert. Weitere von der Profilform unabhängige Parameter sind Nabenlage, Auslauform, Oberflächenzustand, Werkstoff, Nabenwandstärke, Nabenlänge etc. Diesbezüglich wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens lediglich die Nabenwandstärke modifiziert. Weitere Einflüsse auf die Tragfähigkeit neben der Verzahnung und der Nabe werden eliminiert.

Nach [DIN 5480] richtet sich die Zahnfußrundung des Bezugsprofils ρ_{fp} nach dem zur Verzahnungsherstellung genutzten Fertigungsverfahren. In zuvor genannter Norm wird bei der Berechnung zwischen durch Zerspanen sowie durch Kaltwalzen hergestellten Verzahnungen unterschieden, vgl. Abbildung 2.

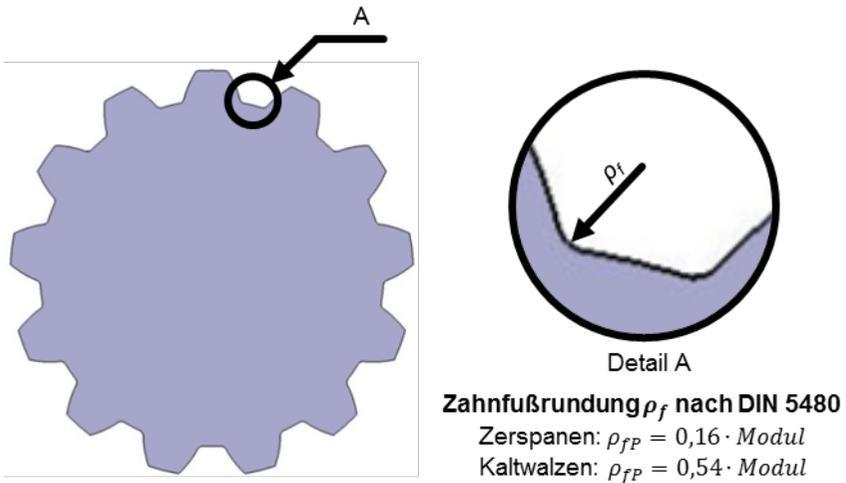


Abbildung 2: Teilausrundung einer evolventischen Zahnwelle nach [DIN 5480] für spanend und kaltgewalzt hergestellte Verzahnungen [FVA 742 I]

Die Zahnfußrundung des Bezugsprofils ρ_{fp} bildet sich in der Zahnfußrundung der Zahnwelle ρ_f ab.

Unter anderem im Forschungsvorhaben [FVA 591 I] zeigte sich, dass es spannungstechnisch ein geometrisches Optimum bezüglich der Zahnfußrundung ρ_{fp} gibt. Dieses liegt zwischen den durch die in Abbildung 2 gegebenen Gleichungen definierten Werten. Als Folge soll bezüglich dieses Parameters im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] von der durch die [DIN 5480] gegebenen Definition abgewichen und das Optimum beim Tragfähigkeitsvergleich zwischen der Evolvente und der Trochoide zugrunde gelegt werden. Vom Radius als Form der Zahnfußrundung wird hingegen nicht abgewichen.

Grundsätzlich entspricht die Geometrie der Standardnabe des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] jener der Vorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II], vgl. Abbildung 3.

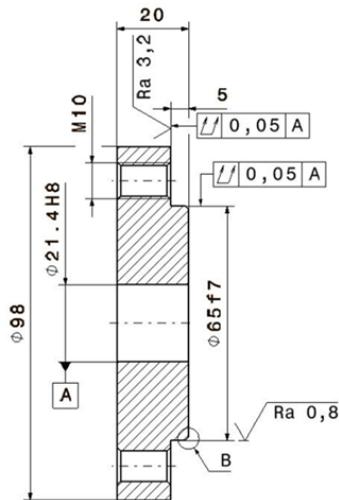


Abbildung 3: Geometrie der standardmäßig in den Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] genutzten Naben zur experimentell Analyse von Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480]

In Rahmen einer Arbeitsgruppensitzung zu Beginn des Forschungsvorhabens wurden die Untersuchungen um den Aspekt der Analyse des Einflusses der Nabenwandstärke erweitert. Bei entsprechender Praxisnähe wurde festgelegt die Durchmesserhältnisse $Q_A = \text{Bezugsdurchmesser } d_B / \text{Nabenaußendurchmesser } d_{e2}$ von 0,88; 0,77 sowie 0,66 zu untersuchen.

2.3 Evolvente ([DIN 5480], [ISO 4156]) – Bestimmung des Toleranzeinflusses auf die Tragfähigkeit (AP9)

Die Fertigung von Bauteilen unterliegt systematischen sowie stochastischen Fehlern. Diese Abweichungen führen zu einem zahnspezifischen Tragverhalten. Bei den in Kapitel 2.2 beschriebenen numerischen Untersuchungen findet dies keine Berücksichtigung. Hier wird von vollständiger Symmetrie ausgegangen. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird der Einfluss einer vorgegebenen Passung auf die Tragfähigkeit bestimmt. Arbeitsergebnis ist also die Toleranzempfindlichkeit. Durch einen entsprechenden Empfindlichkeitsabgleich zwischen beiden Profilformen (Evolvente, Trochoide) sind jene Passungen bestimmbar, die zur Realisierung der gleichen Empfindlichkeiten führen. Diese ermöglichen Aussagen zum finanziellen Aufwand zur Fertigung der jeweiligen Profilform.

Bei Zahnwellenverbindungen sind Abweichungen bei Kopf- und Fußkreis, der Profilkurve hinsichtlich Form und Lage, der Teilung sowie der Zahndicke möglich. Dies eröffnet ein enorm großes und modellbildungstechnisch komplex handhabbares Parameterfeld. Nach Rücksprache mit der Arbeitsgruppe wurde festgelegt, dass lediglich die Einflüsse Teilungs- sowie Zahndickenabweichung untersucht werden. Diese werden gleichmäßig über den Umfang verteilt.

Die in den Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] experimentell untersuchten Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] wurden mit der Passung 9H/6g hergestellt. Diese wird der Bestimmung des Toleranzeinflusses auf die Tragfähigkeit als Inhalt des Vorhabens [FVA 742 I] zugrunde gelegt.

2.4 Komplexe Trochoide – Experimentelle Untersuchungen zur Validierung numerischer Ergebnisse (AP10)

Bezüglich numerisch gewonnener Ergebnisse gilt es neben einer Plausibilitätskontrolle auch meist einen Abgleich unter zugrunde legen experimenteller Resultate durchzuführen. Hierdurch wird die Güte der theoretisch gewonnenen Erkenntnisse erhöht. Die richtige Gestaltung von Lagerung, Kraftangriffspunkt, Geometrie vorausgesetzt, kann ein Ergebnisabgleich durch die Anpassung der Steifigkeit im Kontakt zwischen Welle und Nabe erfolgen.

Die Validierung numerischer Ergebnisse hinsichtlich der Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] wird anhand bereits erarbeiteter Ergebnisse experimenteller Untersuchungen der Forschungsvorhaben [FVA 467 I] sowie [FVA 467 II] durchgeführt. Für die komplexen Trochoiden hingegen müssen diese Daten erst erhoben werden. Basierend auf den durch die westsächsische Hochschule Zwickau definierten Geometrien erfolgt diesbezüglich die Versuchsdurchführung durch das Institut für Maschinenwesen.

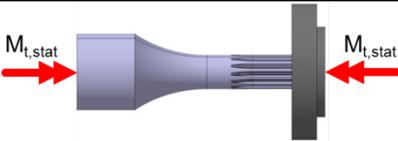
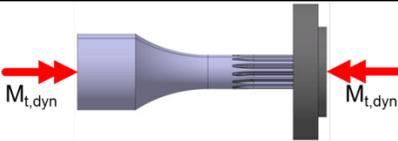
Hauptanwendungsfall einer Welle-Nabe-Verbindung ist die Übertragung eines Torsionsmomentes. Hieraus resultierend werden experimentelle Untersuchungen

bei statischer sowie dynamischer Torsion durchgeführt. In der Praxis kommt es jedoch häufig zu einer Überlagerung der zu übertragenden Torsion mit einer (Umlauf-)Biegung. Dies kann beispielsweise aus der Radialkomponente einer Stirnverzahnung oder aber aus Achs- bzw. Winkelversatz in Zusammenspiel mit einer statisch unbestimmten Lagerung resultieren. Auf diesem Sachverhalt basierend werden ebenfalls experimentelle Untersuchungen bei statischer Torsion sowie dynamischer Biegung in Kombination durchgeführt.

Für einen Tragfähigkeitsnachweis beispielsweise nach [DIN 743] oder aber der FKM-Richtlinie sind bei kombinierter Belastung (Biegung, Torsion) beide Form- bzw. Kerbwirkungszahlen erforderlich. Folglich gilt es diese Faktoren für den Lastfall der reinen Biegung zu bestimmen, obwohl dieser nicht der übliche Anwendungsfall von Profilverbindungen ist. Hierzu sind dynamische Biegeuntersuchungen vorgesehen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FVA 742 I werden eine für den Anwendungsfall Schiebesitz und eine für den Fall Festsitz optimierte Geometrie untersucht. Die schiebesitzoptimierte Variante wird bei den Lastfällen statische sowie dynamische Torsion, statische Torsion in Kombination mit dynamischer Biegung und dynamische Biegung untersucht (Horizontalvergleich). Die für den Fall des Festsitzes optimierte Geometrie wird lediglich bei dynamischer Torsion analysiert (Vertikalvergleich). Folglich ergibt sich das in Tabelle 1 gezeigte Versuchsprogramm.

Tabelle 1: Versuchsprogramm des Forschungsvorhabens [FVA 742 I]

	
<p align="center">Statische Torsion (Schiebesitz, 8 Prüflinge)</p>	<p align="center">Dynamische Torsion (Schiebe- sowie Festsitz, je 8 Prüflinge)</p>
	
<p align="center">Dynamische Biegung (Schiebesitz, 8 Prüflinge)</p>	<p align="center">Dynamische Biegung in Kombination mit statischer Torsion (Schiebesitz, 8 Prüflinge)</p>

3 Zusammenfassung

Zur Verbindung von Wellen und Naben finden in der Praxis häufig Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] Anwendung. Hier ist die Entwicklung zu beobachten, dass immer höhere Torsionsmomente bei unverändert zu belassendem oder gar zu verkleinerndem Bauraum übertragen werden sollen. Kerbwirkungsbedingt gelangen Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] immer häufiger an ihre Tragfähigkeitsgrenzen. Schwachstelle ist hierbei die kerbwirkungskritische Stelle der Zahnfußrundung an der Nabenkante. Als Lösung für dieses Problem kann, neben diverser anderer Möglichkeiten zur Tragfähigkeitsoptimierung, eine neue Profilform dienen.

Eine Möglichkeit zur Erarbeitung einer neuen Profilform ist die Anwendung der Berechnungsmethodik der komplexen Trochoiden. Diesbezüglich ist es Gegenstand des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] eine Abschätzung des Potentials einer neuen aus dieser Berechnungsmethodik hervorgehenden Profilform vorzunehmen. Hierfür werden Evolvente und Trochoide einander Gegenübergestellt. Der Vergleich beider Profilformen wird ganzheitlich durchgeführt. Er beschränkt sich folglich nicht nur auf die Gegenüberstellung der Tragfähigkeiten, sondern auf alle an eine Profilhelle gestellten Anforderungen. Zu diesem Zweck wird als Bewertungsgrundlage eine Anforderungsliste ausgearbeitet. Hinsichtlich des ökonomischen Prinzips gilt es hierbei insbesondere die Wirtschaftlichkeit zu benennen.

Wesentlicher Bestandteil der zu betrachtenden Aspekte beider Profilformen (Evolvente, Trochoide) ist die jeweilige Tragfähigkeit. Diesbezüglich gilt es für beide Verbindungen bei vorgegebenem Bauraum das Maximum für den Lastfall der reinen Torsion zu ermitteln. Bezüglich der Zahnwellen nach [DIN 5480] sind hierbei hinsichtlich der Zahnfußrundung ρ_{ff} Abweichungen von der Norm vorgesehen. Unter anderem im Verlauf der Bearbeitung des Forschungsvorhabens [FVA 591 I] haben numerische Untersuchungen gezeigt, dass die in der Norm definierten Radien nicht zum optimalen Tragverhalten einer Zahnwellenverbindung nach [DIN 5480] führen.

Alle Fertigungsprozesse unterliegen Abweichungen. Im Fall von Profilhellenverbindungen führen diese zu einem ungleichen Tragverhalten der Zähne über dem Umfang. Dies resultiert in zahnspezifischen Beanspruchungen. Die kritische Stelle beschränkt dabei den Einsatz der jeweiligen Verbindung. In Abhängigkeit der spezifischen Profilform wird erwartet, dass die gleiche Toleranz sich unterschiedlich stark auf die Spannung der höchstbelasteten Stelle auswirkt. Die Empfindlichkeit beider Verbindungen wird also unterschiedlich sein. Im Gegensatz zum bloßen Spannungsvergleich ist unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung folgendes Vorgehen geplant: Bei gegebener Passung wird die Empfindlichkeit einer Profilform bestimmt. Bezüglich der zweiten Profilform wird durch Anpassung der Toleranz die gleiche Empfindlichkeit realisiert. Die hierfür

erforderlichen bzw. fertigungstechnisch einzuhaltenden Toleranzen liefern Aufschluss über den monetär bewertbaren Fertigungsaufwand.

Bezüglich der komplexen Trochoiden gibt es bislang keine experimentellen Untersuchungen. Somit ist keine Validierung etwaig entstandener numerischer Analysen möglich. Hier wird im Rahmen des Forschungsvorhabens [FVA 742 I] Abhilfe geleistet. Im Einzelnen werden experimentelle Untersuchungen bei statischer und dynamischer Torsion, bei statischer Torsion in Kombination mit dynamischer Biegung sowie bei dynamischer (Wechsel-)Biegung durchgeführt.

4 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 des Forschungsvorhabens unter der Nummer AiF 18406 BG.

5 Formelzeichen

d_B	Bezugsdurchmesser
d_{e2}	Nabenaußendurchmesser
m	Modul
Q_A	Durchmesserverhältnis
z	Zähnezahl
ρ_f	Zahnfußrundung der Zahnwelle
ρ_{fp}	Zahnfußrundung des Bezugsprofils

6 Literatur

- [DIN 743] Norm DIN 743, 2012-12-00. Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- [DIN 5480] Norm DIN 5480, 2006-03-00. Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser
- [ISO 4156] Norm ISO 4156, 2005-10-00. Passverzahnungen mit Evolventenflanken
- [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
- [FVA 591 I] Biansompa, E.; Schäfer, G.: Zahnwellenberechnung: FVA-Berechnungsrichtlinie für Zahnwellen-Verbindungen. Forschungsvorhaben Nr. 591 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., Frankfurt/Main, 2015 (FVA-Heft 1139)
- [FVA 742 I] Selzer, M.; Wild, J.: Forschungsreport 2015 zum Forschungsvorhaben Nr. 742 I der Forschungsvereinigung Antriebstechnik .e.V., (AiF 18406 BG). In: FVA (Hrsg.): Forschungsreport 2015 (2015)