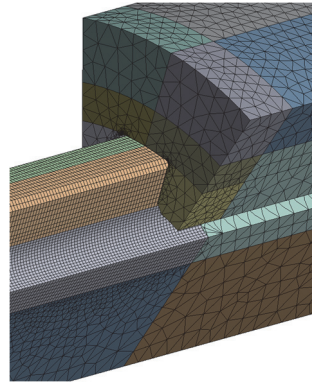


## Formzahlen für geradflankige Passverzahnungen

Erck, M.; Stromberg, H.; Schäfer, G.; Lohrengel, A.

*Um einen präzisen Festigkeitsnachweis von geradflankigen Passverzahnungen nach DIN 743 oder der FKM Richtlinie zu ermöglichen werden Formzahlen benötigt, die von den Geometrienormen nicht bereitgestellt werden. Es steht nur eine grobe Abschätzung aus DIN 743-2 zur Verfügung. Dieser Mangel motiviert die numerische Ermittlung von Torsionsformzahlen für Geometrie nach DIN 5464 und ISO SAE J499.*



*In order to enable a precise proof of durability according to DIN 743 or the FKM guideline for parallel side spline hub connections stress concentration factors are required which are not provided by the geometry standards. DIN 743-2 only provides a rough estimation. This shortage motivates a numerical identification of stress concentration factors for torsion loads for geometry according to DIN 5464 and ISO SAE J499.*

### Stand der Technik

Insbesondere bei der Verwendung dünner Naben ist der Einsatz evolventischer Passverzahnungen nach DIN 5480 oder ähnlichen Normen teils problematisch, da es unter Belastung zu einer Gleitbewegung über die Flanke kommt, bei der die Nabe durch Radialkräfte aufgeweitet wird /1/. Hierbei sinkt das übertragbare Drehmoment, da sich die Überdeckung verringert und der wirksame Hebelarm am Zahn steigt. Zudem führt die Mikrobewegung zu erhöhtem Verschleiß. Daher werden in derartigen Fällen geradflankige Passverzahnungen eingesetzt.

DIN 5464 stellt ausschließlich die Geometrie bereit und liefert keine Auslegungsgrundlage. DIN 743-2 beinhaltet nur eine Abschätzung der Kerbwirkungszahl in Abhängigkeit des Kopfkreisdurchmessers. Im Falle der ISO SAE J499 beinhaltet die Norm eine Formel zur Auslegung, die allerdings ohne Berücksichtigung von Fußrundungsradius und Werkstoff nur einen groben Anhaltspunkt liefern kann.

Für eine zweckmäßige Auslegung geradflankige Verzahnungen werden Formzahlen benötigt, um einen Festigkeitsnachweis nach DIN 743 oder der FKM Richtlinie führen zu können. Da diese im Stand der Technik nicht vorhanden sind, wurden im Rahmen einer Projektarbeit /2/ numerisch Formzahlen für geradflankige Verzahnungen nach DIN 5454 und ISO SAE J499 bestimmt.

## Modellaufbau

Im Rahmen der beschriebenen Untersuchung wurden reine Torsionslasten betrachtet. Somit kann die Rotationssymmetrie ausgenutzt und die FEM Simulation als Sektor-Modell aufgebaut werden.

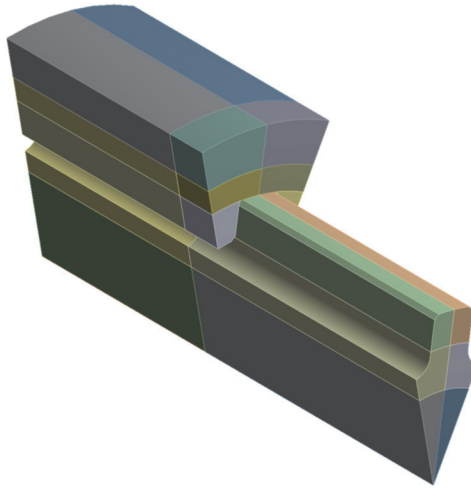


Abbildung 1: Sektormodell

Beide Geometrienormen geben eine Auswahl wählbarer Durchmesser und Zähnezahlen vor. Daher wird keine Interpolation zwischen einzelnen Geometrien benötigt und es können alle genormten Geometrien auch numerisch untersucht werden. Dies trifft allerdings nicht auf den Fußrundungsradius der Welle zu, der in beiden Normen frei wählbar ist. Da der Stand der Forschung zu evolventischen Zahnwellenverbindungen eine starke Abhängigkeit der Formzahl vom Fußrundungsradius zeigt, wird der Fußrundungsradius der Welle in dieser Untersuchung variiert.

Als Versagensort wird entsprechend dem Ergebnis von Voruntersuchungen die Oberfläche des Fußrundungsradius der Welle untersucht. In diesem Bereich wird ein verfeinertes Netz aus Hexaedern mit quadratischen Ansatzfunktionen verwendet.

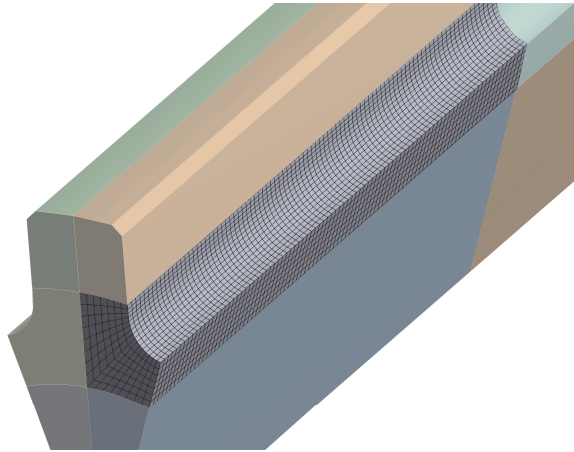


Abbildung 2: Netz im Auswertungsbereich

Die freie Stirnseite der Welle wird dreiwertig gelagert, während das Drehmoment in die Knoten der Nabenoberfläche eingeleitet wird. Die Kontaktfläche zwischen Welle und Nabe wird als reibungsbehafteter Kontakt mit  $\mu=0,2$  behandelt.

Zur Absicherung des Netzes wird eine Konvergenzstudie an einer Verbindung nach DIN 5464 – 10 x 46 x 56 durchgeführt.

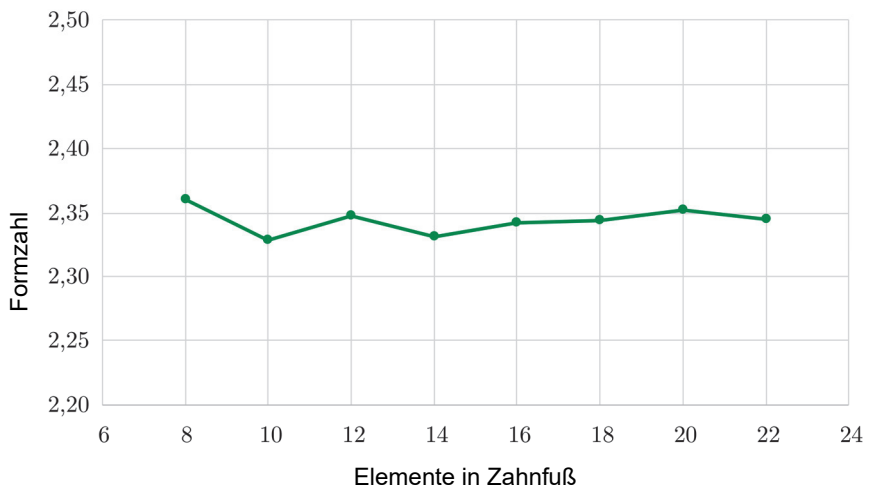


Abbildung 3: Netzkonvergenz

Somit kann gezeigt werden, dass das verwendete Netz mit 16 Elementen im Zahnfuß eine hinreichende Rechengenauigkeit für die Formzahl erreicht.

## Ergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung werden die Formzahlen der verschiedenen Baugrößen sowie Fußrundungsradien und der Einfluss von Nabendicke und Passung bestimmt. Die Formzahl wird als Verhältnis der maximalen Vergleichsspannung nach von Mises in der Zahnfußrundung der Welle im Vergleich zur von Mises Vergleichsspannung des Nennquerschnitts bestimmt. Als Nenn Durchmesser wird der kleinste ungestörte Durchmesser der Welle – nach DIN 5464 ist dies  $d_3$  – gewählt. Die Spannungsverteilung stellt sich in allen Fällen ähnlich zu Abbildung 4 dar.

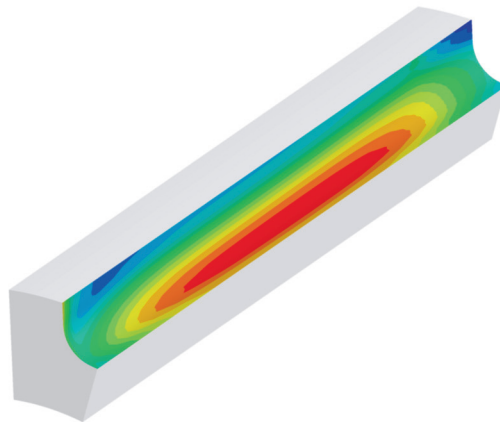


Abbildung 4: Qualitative Spannungsverteilung

Eine Variation der Nabenwandstärke zeigte keinen Einfluss auf die Formzahl. Somit wurde die Erwartung bestätigt, dass geradflankige Verzahnungen hier unproblematischer als evolventische Verzahnungen sind. Da DIN 5464 auch eine Variation der Flankenpassung ermöglicht, wurde am Beispiel der Verbindung DIN 5464 10 x 16 x 20 ein Vergleich der Formzahl bei Verwendung der größten und der kleinsten Passung durchgeführt. Dies bedeutet ein Übermaß von -0,221 mm bei einer F10/d9 Passung bzw. ein Übermaß von 0,008 mm für eine F10/n6 Passung. Hierbei wurde ein Unterschied von 6% festgestellt. Daher wird die gewählte Passung zunächst als untergeordneter Faktor betrachtet.

Wie von evolventischen Verzahnungen bekannt ist, hat der Fußrundungsradius großen Einfluss auf die Formzahl. Um im Verhältnis zur Geometrie sinnvolle Radien, für die Simulation zu wählen, wird der Radius über das Verhältnis aus Radius und Fußkreisdurchmesser der Welle gewählt. Die gefundenen optimalen

Fußrundungsradien sind in einigen nicht aber in allen Fällen die größten untersuchten Radien, also die Vollausrundung (vgl. Abbildung 5).

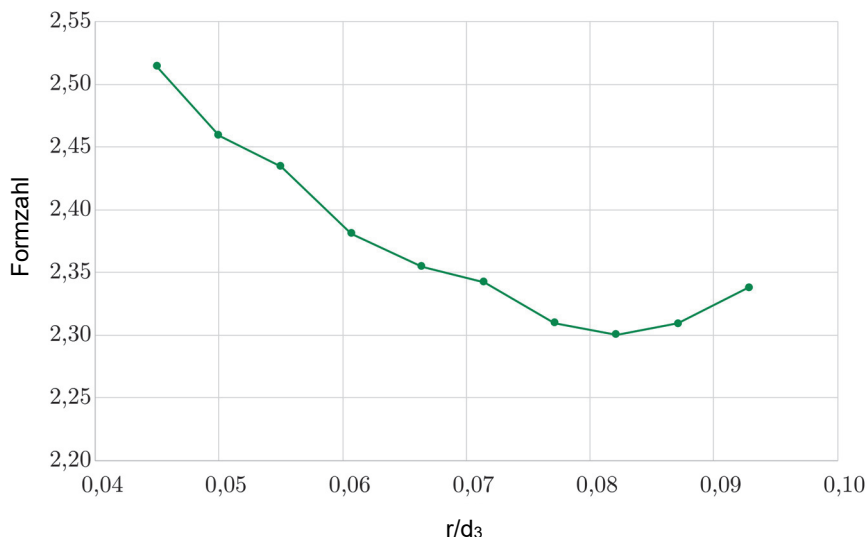


Abbildung 5: Abhängigkeit der Formzahl vom Fußrundungsradius

Aus diesen Ergebnissen kann ein idealer Fußrundungsradius sowie die Formzahl aller untersuchten Radien ermittelt werden. Für die manuelle Anwendung würde aus der Fülle der Daten ein nichtmehr anwendbares Tabellenwerk entstehen. Daher werden in Tabelle 1 nur die minimale und die maximale Formzahl einer Verbindung nach DIN 5464 angegeben. Alle Daten inklusive der Fußrundungsradien sind in der Passverzahnungssoftware der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., die im Vorhaben FVA 591 III entwickelt wurde, und dem Abschlussbericht für FVA Mitglieder verfügbar. Hier sind auch Interpolationsvorschriften implementiert.

Tabelle 1: Formzahlen für DIN 5464

Verbindung	$\alpha_k$ minimal	$\alpha_k$ maximal
10 x 16 x 20	2,3	2,51
10 x 18 x 23	2,33	2,48
10 x 21 x 26	2,27	2,52
10 x 23 x 29	2,36	2,52

<b>Verbindung</b>	<b><math>\alpha_k</math> minimal</b>	<b><math>\alpha_k</math> maximal</b>
10 x 26 x 32	2,3	2,53
10 x 28 x 35	2,27	2,53
10 x 32 x 40	2,3	2,52
10 x 36 x 45	2,25	2,52
10 x 42 x 52	2,27	2,53
10 x 46 x 56	2,3	2,53
16 x 52 x 60	2,64	2,82
16 x 56 x 65	2,69	2,91
16 x 62 x 72	2,63	2,8
16 x 72 x 82	2,65	2,74
20 x 82 x 92	3,13	3,74
20 x 92 x 102	2,84	3,49
20 x 102 x 115	2,79	3,26
20 x 112 x 125	2,86	3,28

## Zusammenfassung

Mit den durchgeführten Untersuchungen steht nun eine fundierte Grundlage für die Auslegung von geradflankigen Passverzahnungen zur Verfügung. Diese muss allerdings weiter validiert werden. Primär muss die Stützwirkung weiter untersucht werden.

## Literatur

- /1/ Schäfer, G.; Wild, J.: Einfluss der Nabengeometrie auf die Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480; Institutsmittteilung Nr. 40, IMW Clausthal 2015
- /2/ Erck, M.; Numerische Bestimmung von Torsionsformzahlen für Keilwellenverbindungen, Projektarbeit am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2019, unveröffentlicht