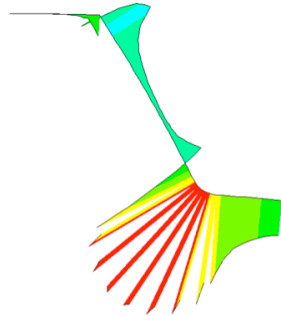


# Betrachtungen der Zahnfußausrundung von Passverzahnungen

Schäfer, G.

Die Norm für Passverzahnungen mit Evolventenflanken, DIN 5480 beschreibt in ihrem ersten Teil die Verzahnungsgeometrie. Dabei sind die Fußausrundungen, abhängig von den Herstellverfahren, mit unterschiedlichen Radien versehen. Für gefräste Wellen wird ein Radius von  $0,16 \times \text{Modul}$  genannt. Dies ist der kleinste Radius aller Herstellverfahren, was aber die höchste Kerbschärfe zur Folge hat. Der Artikel gibt Hinweise wie dieses kritische Geometriedetail modifiziert werden sollte.



The German standard for splines DIN 5480 describes the geometry of the spline including the foot root radius. The radius is given regarding the manufacturing technology. For milling, the radius is  $0,16 \times \text{module}$ , which is the smallest value of all manufacturing technologies which leads to the greatest notch factor. The following paper shows some ideas to improve this area of the spline and the numerical results.

## Einleitung

Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 /1/, die seit ca. 10 Jahren in der Normung „Passverzahnungen“ genannt werden, sind ein weitestgehend standardisiertes und an die Aufgabenstellung skalierbares Maschinenelement, in erster Linie für die Drehmomentübertragung. Die Standardisierung erlaubt in Verbindung mit kostengünstigen Herstellverfahren (Fräsen, Kaltumformen...) wirtschaftliche Lösungen sowohl in der Großserie, als auch im Sondermaschinenbau. Wie jedes Element, hat auch die Passverzahnung Ihre Grenzen, eine häufig durch Wellenbruch offenkundig werdende Stelle ist die Zahnfußausrundung und die darin auftretenden Beanspruchungen, siehe auch das Titelbild oben rechts. Das Bild stellt die genormte Zahnfußausrundung für eine spanend hergestellte Wellenverzahnung nach DIN 5480 dar.

Fußrundungsradius des Bezugsprofils	$\rho_{FP}$
$0,16 \cdot m$ Zerspanen	$0,54 \cdot m$ Kaltwalzen

Abbildung 1: Ausschnitt aus DIN 5480-1 /1/ mit der Definition des Fußrundungsradius in Abhängigkeit vom Herstellverfahren

Auffällig in der Normdefinition der Zahnfußausrundung, Abbildung 1, ist die Unterscheidung nach dem genutzten Herstellverfahren. Vergleichbare Normen, wie z.B. die ISO 4156, nennen ohne Bezug auf ein Herstellverfahren neben dem in DIN 5480 für spanende Herstellung definierten „flachen Fuß“ (flat root) auch die Variante der vollen Fußausrundung (fillet root), siehe Abbildung 2. Die in DIN 5480 für das Kaltwalzen angegebene Ausrundung mit  $0,54 \times \text{Modul}$  kommt der vollen Ausrundung der ISO 4156 schon sehr nah.



Abbildung 2: Die zwei Profile in ISO 4156 /2/, links: flat root, rechts: fillet root

Experimentelle Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten gefräster und kaltgewalzter Verzahnungen nach DIN 5480 weisen signifikante Festigkeitsvorteile der kaltgewalzten Verzahnungen aus. Bei solchen experimentellen Vergleichen muss aber beachtet werden, dass einerseits das Herstellverfahren gewechselt wird, mit dem Effekt der gezielten Erzeugung von Druckeigenspannungen im Zahnfuß beim Kaltwalzen, bei gleichzeitig nur minimal gestörtem Faserverlauf in der Bauteiloberfläche. Andererseits wird aber gemäß Abbildung 1 eine deutlich geänderte Fußgeometrie mit erheblich größerem Fußrundungsradius erzeugt, der grundsätzlich eine geringere Kerbwirkung und damit geringere Spannungsüberhöhung erwarten lässt. Die Frage, die sich an diesem Punkt stellt, ist: Welche Tragfähigkeitssteigerungen sind bei gefrästen Verzahnungen möglich, wenn man sich von der Definition nach DIN 5480 löst und den Fußrundungsradius vergrößert?

### Numerische Untersuchung des Fußausrundungsradius

Ausgehend von der Definition der spanend hergestellten Verzahnung mit  $\rho_{FP} = 0,16 \times \text{Modul}$  wurde der Rundungsradius in fünf Schritten bis zur vollen Fußausrundung mit  $0,6 \times \text{Modul}$  in numerischen Finite-Elemente-Analysen mit teilplastischem Werkstoffverhalten variiert. Der Kontakt zwischen den Wellen- und Naben Zahnflanken wurde dabei ebenfalls im Modell abgebildet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 in normierter Form dargestellt. Gut erkennbar ist der positive Einfluss des vergrößerten Kerbradius, der bis zum Minimum bei ca.  $0,48 \times \text{Modul}$  eine Spannungsreduzierung von 15% erlaubt. Zu beachten ist darüber hinaus aber, dass mit weiter steigendem Ausrundungsradius, hin zur vollen Verrundung,

die Beanspruchungen wieder leicht ansteigen. Dies lässt sich durch den immer tieferen Einstich der Fußausrundung in den Wellenquerschnitt erklären. Der tragende Nettoquerschnitt wird in diesen Fällen stärker reduziert, so dass die zunehmende Kerbentschärfung dies nicht mehr kompensieren kann.

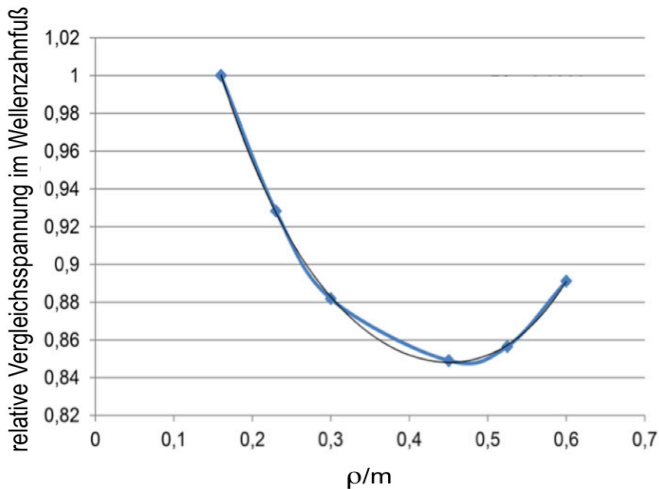


Abbildung 3: Spannungsverlauf im Wellenzahnfuß bei Variation des Rundungsradius  $\rho/P$  im Bereich von  $0,16 \times$  Modul bis zur vollen Fußausrundung mit  $0,6 \times$  Modul, normierte Darstellung mit dem Bezugswert  $\rho/P = 0,16 \times$  Modul

Als Ergebnis dieser ersten Zahnfußvariation, bezüglich des Rundungsradius, kann eine optimale Verrundung im Bereich zwischen  $0,45$  und  $0,5 \times$  Modul erkannt werden. Diese Untersuchungen wurden an Vollwellen durchgeführt. Die parallel dazu variierten Verrundungen im Nabenzahnfuß ergaben bei dickwandigen Naben kein ausgeprägtes Minimum, sondern die grundsätzliche Aussage, dass größere Zahnfußradien günstiger sind.

### Mögliche Variationen der Zahnfußausrundung

Aufbauend auf den ersten Ergebnissen zu den einfach verrundeten Zahnfußgeometrien in Anlehnung an ISO 4156 /2/ wurden von Herre /3/ unter der Anleitung des Autors numerische Untersuchungen mit elliptischen Zahnfußausrundungen durchgeführt. Die Idee dabei ist, die Nachteile der tief einschneidenden Vollausrundung durch den flacheren Verlauf in der Ausrundungsmitte zu reduzieren. Zu diesem Zweck wurden die beiden Halbachsen der Ellipsen gemäß Abbildung 4 definiert. Es wurden sowohl flach liegende als auch senkrecht stehende Ellipsen in der Parameterstudie betrachtet.

Die Geometrievariation wurde so durchgeführt, dass eine vollständige Austauschbarkeit und Paarbarkeit mit den nach DIN 5480 gefertigten Gegenständen gewährleistet ist. Die Variationen betreffen nur den Bereich unterhalb des Wellen-Fußformkreisdurchmessers  $d_{Ff1}$ .

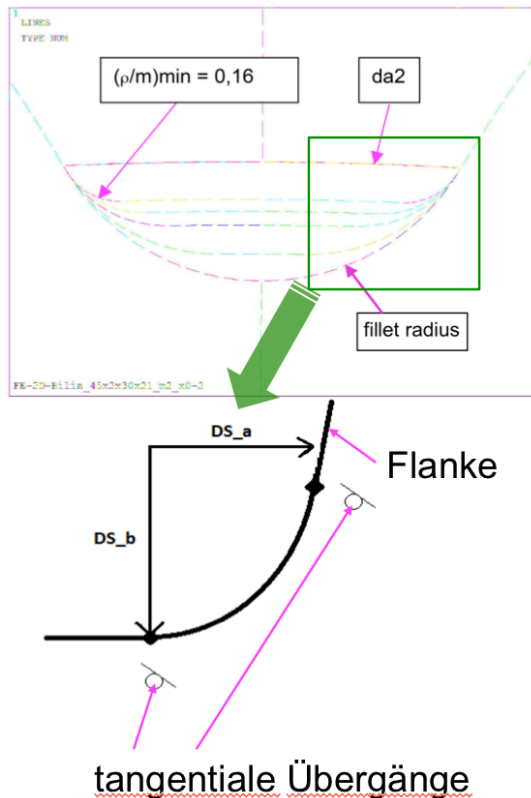


Abbildung 4: Oben: Fußrundungsvariationen mit einfachen Radien in Anlehnung an ISO 4156, unten: elliptische Verrundung des Zahnfuß mit dem tangentialen Übergang in die Flanke am Wellen-Fußformkreisdurchmesser  $d_{Ff1}$

### Ergebnis der elliptischen Variationen

Die Ergebnisse der elliptischen Variationen wurden mit linearelastischen Finite-Elemente-Analysen berechnet. Der Kontakt zwischen den Wellen- und Nabenflanken wurde im Modell abgebildet. In Abbildung 5 ist jeweils für eine konstante Halbachse  $a$  die Halbachse  $b$  in fünf Schritten variiert worden, bevor

dann die Halbachse  $a$  eine Stufe vergrößert wurde. Über die blau markierten Punkte sind Fälle einfacher Verrundungen mit  $a = b$  hervorgehoben. Der erste blaue Punkt  $a = b = 0,16$  stellt den Referenzfall der spanend hergestellten Verrundung nach DIN 5480 /1/ dar.

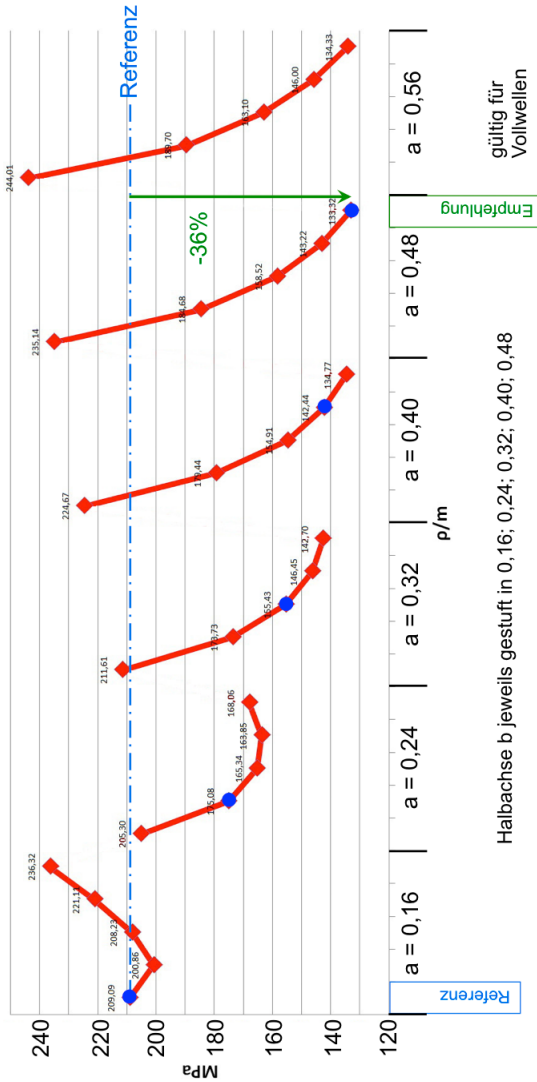


Abbildung 5: Maximal-Spannungen im Wellenzahnfuß bei elliptischer Verrundung

Abbildung 5 lässt oberhalb der Referenzlinie erkennen, dass durch ungeschickte Wahl der Halbachsen auch eine Verschlechterung der Beanspruchungssituation im Zahnfuß möglich ist. Darunter sind aber auch deutliche Beanspruchungsreduzierungen erkennbar, die mit der grün markierten Empfehlung bei  $a = b = 0,48 = \rho/m$  ein Minimum erreicht. Die weitere Vergrößerung liefert eine nahezu konstante Beanspruchungssituation (genau abgelesen steigen die Werte sogar um 1 bis 2 MPa, was aber im Rahmen der numerischen Genauigkeit liegt). Im Vergleich zu Abbildung 3 (15%) liefert das Optimum hier eine Reduzierung von 36%, was auf die unterschiedlichen Werkstoffdefinitionen (teilplastisch/linearelastisch) zurückzuführen ist. Als Ergebnis konnte in diesen ersten Untersuchungen zu elliptischen Ausrundungen noch kein echter Vorteil zur einfachen Verrundung herausgearbeitet werden. Dies liegt womöglich an den verwendeten Vollwellen. Aktuell laufende Untersuchungen behandeln daher das Verhalten von Hohlwellen mit den vorgenannten Verrundungs-Parametern.

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen zu möglichen Zahnfußverrundungen, bei vollständiger Kompatibilität zu Gegenstücken nach DIN 5480, haben ein sehr sinnvoll erscheinendes Ergebnis hervorgebracht. Die in der DIN 5480 herstellverfahren spezifische Definition der Fußrundung sollte unbedingt positiv kritisch betrachtet werden. Mit einer Vergrößerung der Fußausrundung, z.B.  $\rho_{fp} = 0,48 \times \text{Modul}$ , kann eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung erreicht werden. In diesem Sinne kann nur an die Werkzeughersteller appelliert werden solche Fräser in das Standardsortiment aufzunehmen, um auch mit gefrästen Wellen eine optimierte Tragfähigkeit zu erreichen.

## Literatur

- /1/ DIN 5480-1: Passverzahnungen mit Evolventenflanken und Bezugsdurchmesser, Teil 1: Grundlagen, Hrsg. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, März 2006
- /2/ ISO 4156: Straight cylindrical involute splines – Metric modul, side fit – Generalities, dimensions and inspection. International Standards Organization (ISO), 1989
- /3/ Herre, M.: Welle-Nabe-Verbindung mit optimierter Zahnfußgeometrie, Projektarbeit, IMW, TU Clausthal 2015, unveröffentlicht
- /4/ Herre, M.; Schäfer, G.; Wild, J.: Splined Shaft-Hub Connection with optimized Foot Geometry, Proceedings IN-TECH; Page 260 - 263, Dubrovnik 2015, ISSN 1849-0662