

KISSsoft AG - +41 55 254 20 50
 Uetzikon 4 - +41 55 254 20 51
 8634 Hombrechtikon - info@KISSsoft.AG
 Switzerland - www.KISSsoft.AG

KISSsoft Tutorial: Zahnfuss Optimierung

1 Übersicht

1.1 Zielsetzung

In diesem Tutorial wird gezeigt, wie die Zahnfussgeometrie die Zahnfuss-Spannung beeinflusst, wie die Zahnfussgeometrie optimiert werden kann, und dass „die grafische Methode“ benutzt werden sollte, wenn die Zahnfuss-Spannung für nicht standardisierte Zahnfussgeometrie analysiert werden soll.

Dabei werden die Festigkeitsberechnung und Zahngeometrieberechnung benutzt.

1.2 Resultate

Drei verschiedene Zahnfussgeometrien sollen untersucht werden:

1. resultierende Zahnfussgeometrie, mit einem Werkzeugfussradiusfaktor $\rho^*_{fP}=0.38$
2. Resultierende Zahnfussgeometrie, mit einem Werkzeugfussradiusfaktor $\rho^*_{fP}=0.45$
3. Optimierte Zahnfussgeometrie (elliptisches Ausrunden)

Es werden die folgenden Ergebnisse für die Sicherheitsfaktoren beim Benutzen der ISO 6336 und ISO 6336 mit „grafischer Methode“ kombiniert berechnet:

	SF basierend auf der Auslegung nach ISO6336	SF basierend auf der Auslegung nach ISO6336 mit „grafischer Methode“
Geometrie 1 ($\rho^*_{fP}=0.38$)	2.5940	2.4966
Geometrie 2 ($\rho^*_{fP}=0.45$)	2.7584	2.6756
Geometrie 3 (elliptisch)	2.7584*	2.8868
Verbesserung von Geometrie 1 zu Geometrie 3	6%*	16%

Tabelle 1.1 Vergleich der berechneten Sicherheitsfaktoren für Zahnfussbiegung je nach Methode.

Es ist deutlich sichtbar dass durch Optimieren der Zahnfussgeometrie, der Sicherheitsfaktor Ausfall gegen Biegen um 16% erhöht wurde. Jedoch, die optimierte Zahnfussausrundung erfordert ein besonderes Werkzeug (modifizierten Fräser). Es wird daher für Massenproduktion empfohlen (z.B. durch Formschleifen) oder bei formenden Herstellverfahren wie Sintern die Zahnform durch Drahtschneiden zu erzeugen.

*Anmerkung: Wird die unveränderte ISO 6336 Methode benutzt (oder andere Methoden wie DIN 3990 oder AGMA 2001) erlauben diese Methoden nicht die Einschätzung einer modifizierten Zahnfussgeometrie. Es sind keine Veränderung in den Ergebnissen von Geometrie 2 zu Geometrie 3 ersichtlich.

1.3 Theorie

Der Wert ρ_{fP} ist der Radius am Fuss vom Profil des Zahnrades wie unten gezeigt:

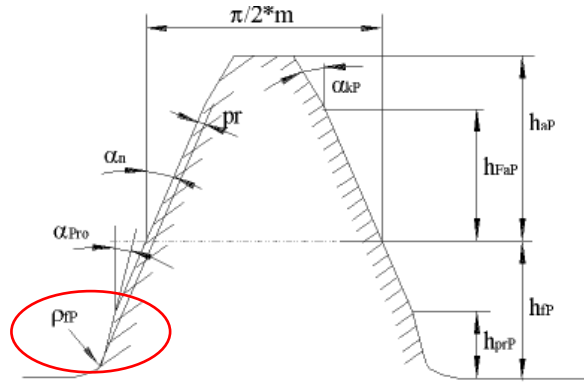
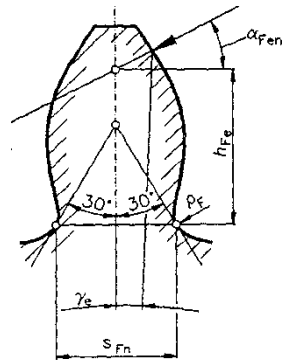


Abbildung 1.1 Bezugsprofil vom Zahnrad, ρ_P .

Die Festigkeitsberechnung gemäß ISO 6336 lässt nur einen einzigen Punkt im Zahnfuss zu, an dem die Faktoren Y_F und Y_S kalkuliert werden. Dieser Punkt ist der Kontakt zwischen einer Tangente zum Zahnfuss, die durch das Anlegen der 30°-Tangente an die Fusskontur gefunden wird. Y_F und Y_S sind dann kalkuliert, wie in den Formeln (2) und (3) jeweils gezeigt. Die entstehende Zahnfuss-Spannung wird dann gemäß Formel (1) kalkuliert.



$$Y_F = \frac{6 \cdot h_{Fe} \cdot \cos \alpha_{Fen}}{m_n \left(\frac{s_{Fn}}{m_n} \right)^2 \cdot \cos \alpha_n} \quad (2)$$

Method B:

$$\sigma_{FO-B} = \frac{F_t}{b m_n} \cdot Y_F \cdot Y_S \cdot Y_\beta$$

Method C:

$$\sigma_{FO-C} = \frac{F_t}{b m_n} \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\epsilon \cdot Y_\beta$$

$$\sigma_F = \sigma_{FO} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha} \leq \sigma_{FP} \quad (1)$$

$$Y_S = (1.2 + 0.13 \cdot L) \cdot q_s \left[\frac{1}{1.21 + \frac{2.3}{L}} \right]$$

$$L = \frac{s_{Fn}}{h_{Fe}}, q_s = \frac{s_{Fn}}{2 \rho_F} \quad (3)$$

Abbildung 1.2 Berechnung der Zahnfuss-Spannung nach ISO 6336.

Je nach der tatsächlichen Gestalt der Fussrundung wird damit ein kleinerer oder grösserer Fehler impliziert.

KISSsoft ermöglicht auf Grund der tatsächlichen Zahnform die Berechnung für jeden Punkt im Zahnfussbereich für den Zahnform- (Y_F) und den Spannungskorrektur-Faktor (Y_S). Es wird diejenige Stelle bestimmt, an der das Produkt $Y_F \cdot Y_S$ das Maximum erreicht.

Nur mit dieser Methode ist eine Bewertung der Auswirkung von optimierten Zahnfussausrundungen möglich.

1.4 Weitere Inhalte des Tutorials

Im Abschnitt 2 wird der Zahnfuss-Sicherheitsfaktor gemäß der nicht modifizierten ISO 6336 Methode (Methode B) berechnet. Jedoch kann die Wirkung einer Zahnfussoptimierung bei Gebrauch diese Methode nicht berücksichtigt werden. Der Zahnfuss-Sicherheitsfaktor ist daher nur für Geometrie 1 und 2 berechenbar.

Im Abschnitt 3 wird dann für die Berechnung des Zahnfuß-Sicherheitsfaktors die grafische Methode (eine wahlfreie Änderung zu ISO 6336 durch KISSsoft) benutzt. Hier kann die Wirkung von optimierten Zahnfußausrundungen deutlich gezeigt werden.

Der Vergleich zwischen den berechneten Ergebnissen ist in Tabelle 1.1 dargestellt.

Im Abschnitt 4 werden einige Erklärungen und Bemerkungen gegeben.

Alle Berechnungen/Änderungen sind nur für Rad 1 gemacht.

2 Festigkeitsberechnung nach ISO6336

2.1 Für Geometrie 1 ($\rho^*_{Fr}=0.38$)

Das in diesem Tutorial durchgearbeitete Beispiel kann über „Datei/Öffnen“ und Auswahl von „CylGearPair 1 (spur gear)“ oder über den Tab „Beispiele“ geöffnet werden.

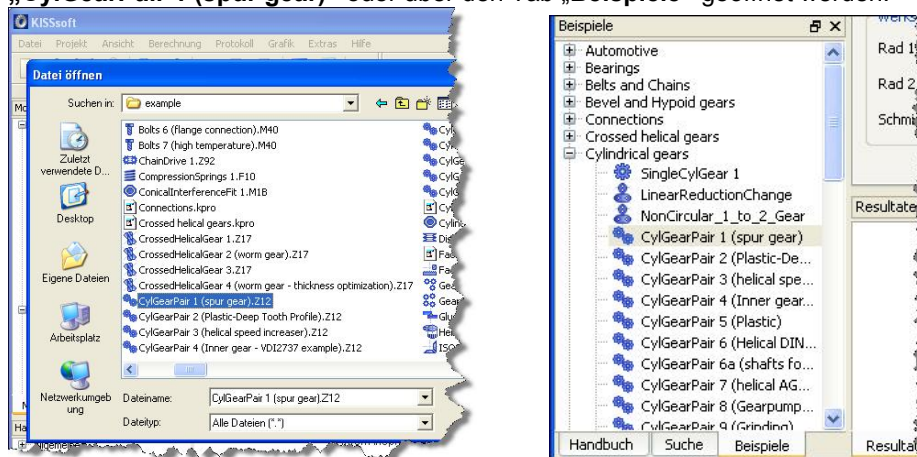


Abbildung 2.1 Berechnungsbeispiel „CylGearPair 1 (spur gear)“ öffnen.

Die ausgewählte Rechenmethode ist ISO 6336, Methode B. Zum Überprüfen welches Bezugsprofils benutzt wird, ist der Reiter „Bezugsprofil“ zu aktivieren. Hier wurde ein Standardbezugsprofil (1.25/0.38/1.00) nach ISO 53.2 Profil A benutzt.

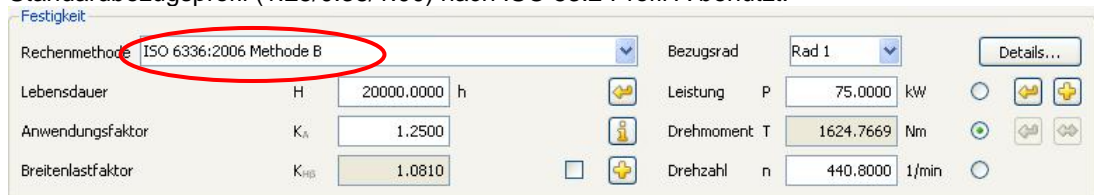


Abbildung 2.2 ausgewählte Rechenmethode.

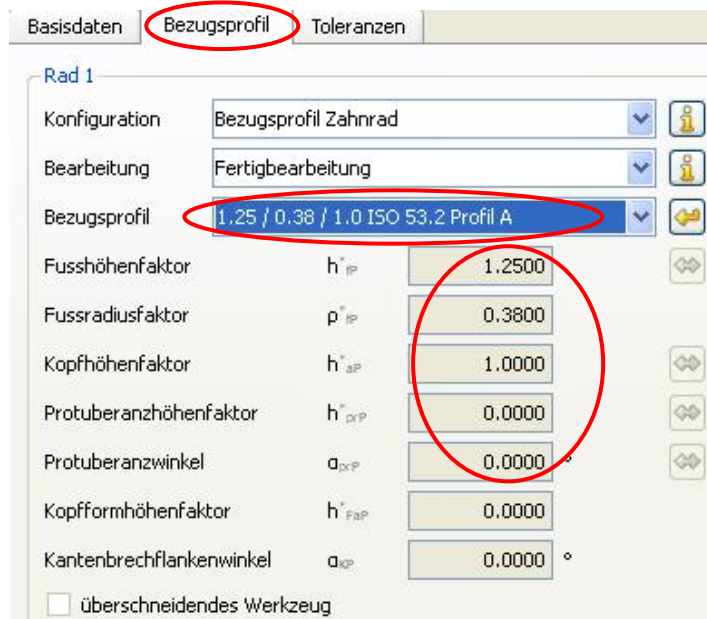


Abbildung 2.3 Standardbezugsprofil zur ersten Berechnung

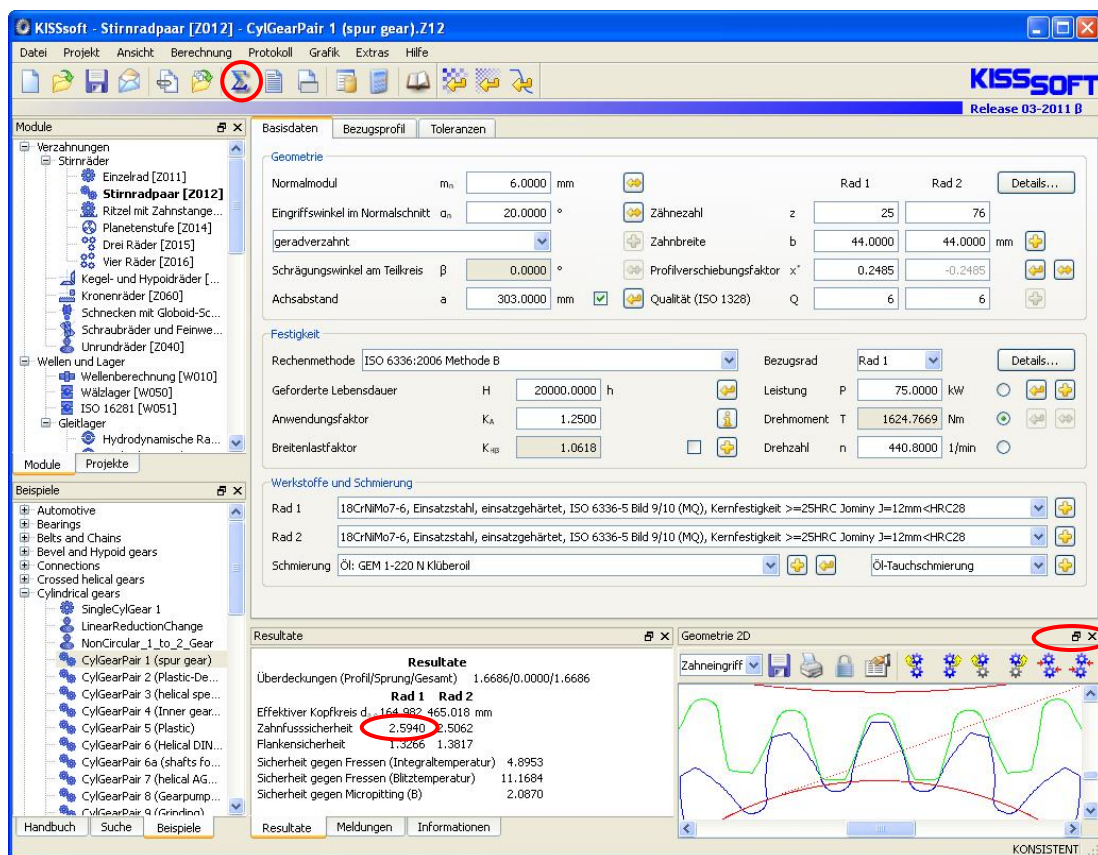


Abbildung 2.4 Ergebnis der Berechnung des Sicherheitsfaktor der Zahnfußsspannung im Rad 1

Die resultierende Zahnform wird im Grafikenster gezeigt und kann über den Knopf, (rechte obere Markierung) losgelöst und vergrößert werden. Für einen späteren Vergleich können die Zahnformen gespeichert werden. Dazu sind die in Abbildung 2.5 markierten Schritte durchführen.

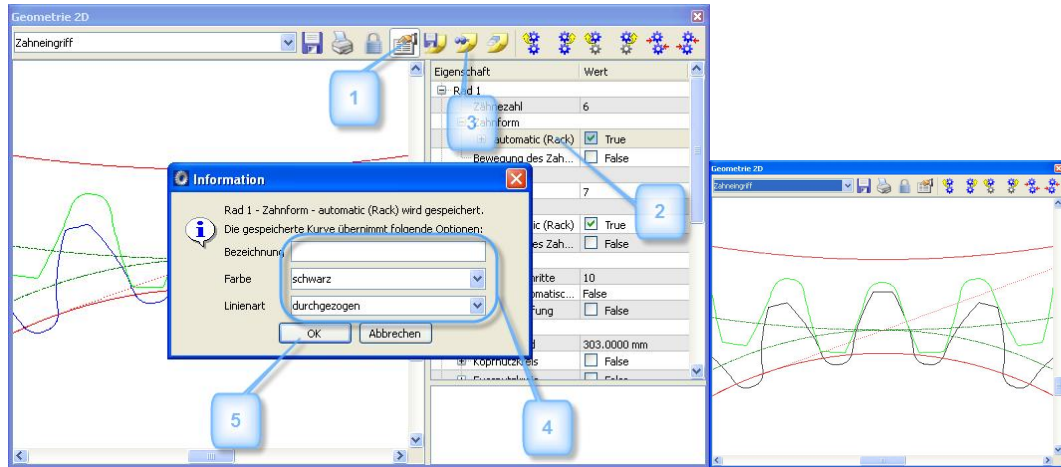


Abbildung 2.5 resultierende Zahnform mit $\rho^*_{fP} = 0.38$

2.2 Für Geometrie 2 ($\rho^*_{fP} = 0.45$)

In einem ersten Schritt muss der maximale mögliche Wert für ρ^*_{fP} bestimmt werden. Dafür wählt man in der „Dropdownliste“ für das Bezugsprofil „Eigene Eingabe“ aus. Benutzen Sie den Auslegungsbutton, es wird ein Wert von 0.4719 für ρ^*_{fP} ermittelt. Der maximal zulässige Wert ist für $\rho^*_{fP} = 0.4719$.

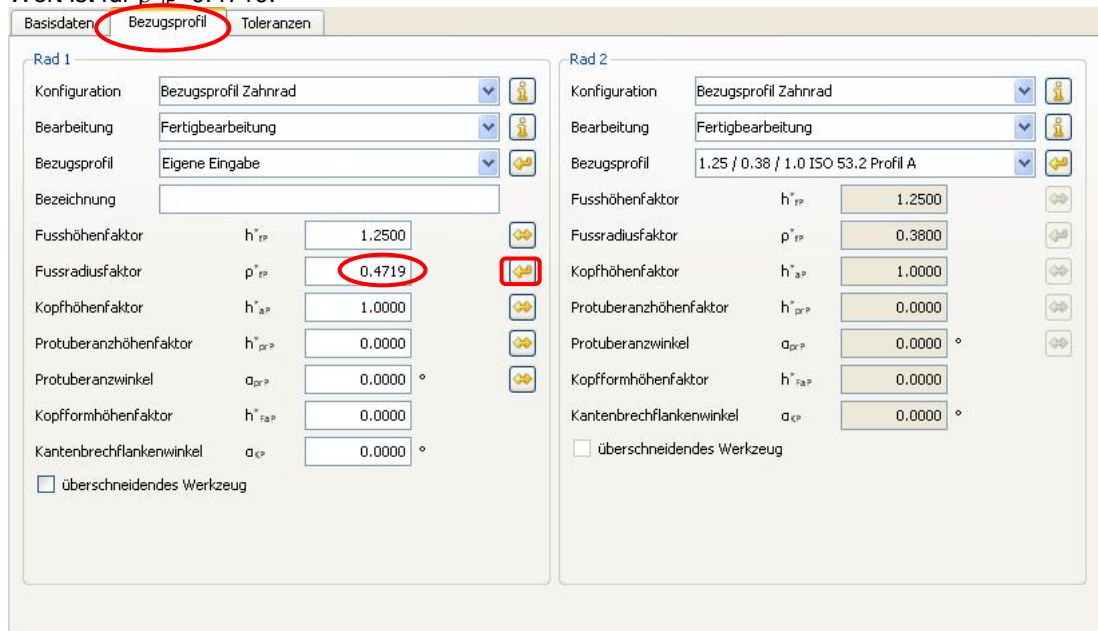


Abbildung 2.6 Modifikation von ρ^*_{fP} .

Der Eingabewert für ρ^*_{fP} wird geändert. Es erfolgt die Eingabe für $\rho^*_{fP} = 0.45$. Die Berechnung wird mit Drücken von Σ oder „F5“ ausgeführt. Warnhinweise gibt es keine mehr.

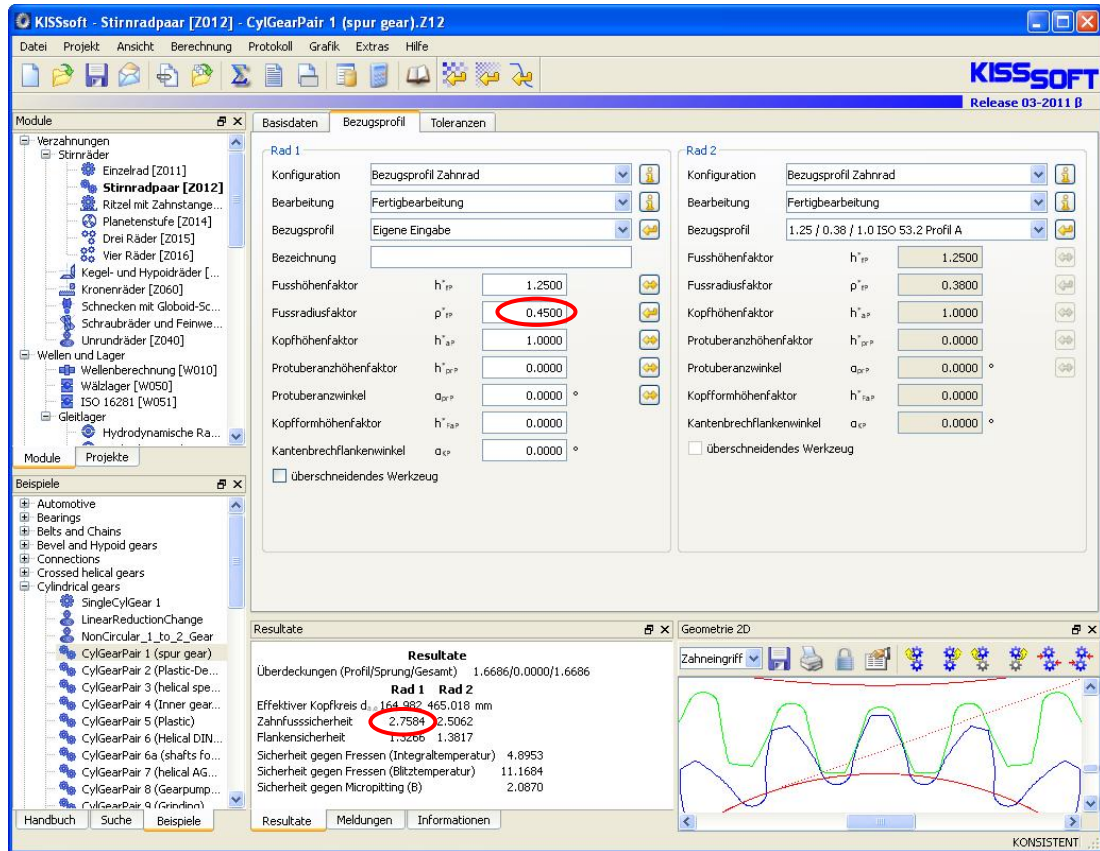


Abbildung 2.7 Ergebnis der Zahnfussicherheit mit geändertem $\rho^*_{fp} = 0.45$ für Rad 1.

Die Sicherheit für den Zahnfuss hat sich erhöht:

In der 2D - Grafik ist die alte und neue Zahnform zu sehen (mit „+/-“ kann die Größe verändert werden). Die blaue Kurve zeigt die Zahnform, welchem mit $\rho^*_{fp} = 0.45$ erzeugt wurde. Die schwarze Kurve ist die alte Zahnform mit $\rho^*_{fp} = 0.38$, welche zuvor gespeichert wurde.

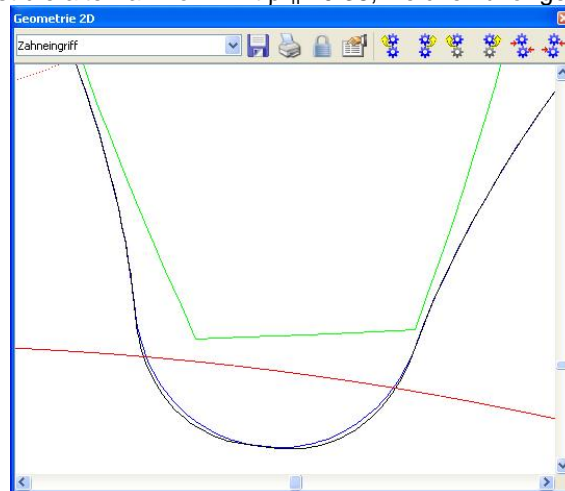


Abbildung 2.8 Vergleich der Zahnfussausrundungen (alte/schwarz mit $\rho^*_{fp} = 0.38$, neue/blau mit $\rho^*_{fp} = 0.45$).

2.3 Für Geometrie 3 (elliptische Fussausrundung)

Mit der Spannungsberechnung nach ISO6336, welche nur auf dem Standardbezugsprofil basiert, kann diese Berechnung nicht durchgeführt werden. Daher ist die Auswirkung von einer modifizierten Zahnfussausrundung, welche nicht auf einem normalen Zahnstangenprofil basiert, mit ISO6336 nicht berechenbar. Deshalb sollte die „grafische Methode“ benutzt werden, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

3 Festigkeitsberechnung mit „grafischer Methode“

3.1 Für Geometrie 1 ($\rho^*_{fP} = 0.38$)

Im Reiter **„Bezugsprofil“** ist der Wert für ρ^*_{fP} wieder auf $\rho^*_{fP}=0.38$ zu setzen. Danach in den Reiter **„Basisdaten“** wechseln.

Basisdaten		Bezugsprofil		Toleranzen	
Rad 1					
Konfiguration		Bezugsprofil Zahnrad			
Bearbeitung		Fertigbearbeitung			
Bezugsprofil		Eigene Eingabe			
Bezeichnung					
Fusshöhenfaktor	h^*_{fP}		1.2500		
Fussradiusfaktor	ρ^*_{fP}		0.3800		


Abbildung 3.1 Zurücksetzen ρ^*_{fP} auf $\rho^*_{fP}=0.38$

Jetzt muss die Option nach **„grafischer Methode berechnen“**, aktiviert werden. Gehen Sie in den Reiter **„Basis Daten“** in den Bereich ‚Festigkeit‘ und drücken Sie **„Details“**. Ein neues Fenster wird geöffnet **„Details der Festigkeit definieren“**. Wählen Sie dort **„nach grafischer Methode“** in der **„Dropdownliste“** neben Zahnformfaktor $Y_F; Y_S$ aus. Bestätigen Sie die Eingabe mit **„OK“** und das Fenster wird geschlossen.

Festigkeit		Rechenmethode		Bezugsrad			
		ISO 6336:2006 Methode B		Rad 1			
Lebensdauer	H	20000.0000	h	Leistung	P	75.0000	kW
Anwendungsfaktor	K_A	1.2500		Drehmoment	T	1624.7669	Nm
Breitenlastfaktor	$K_{H\beta}$	1.0810		Drehzahl	n	440.8000	1/min

Systemdaten	
Profilkorrektur	keine (nur Einlaufbetrag)
Treibendes Rad	Rad 1
Zeitfestigkeitsfaktoren Z_N, Y_N nach ISO 6336	normal (Reduktion auf 0.85 bei 10^{10} Zyklen)
Zahnformfaktoren Y_F, Y_S	nach grafischer Methode
Zahneingriffssteifigkeit	nach Formeln der Norm (normal)
<input type="checkbox"/> Kleine Anzahl Grübchen zulässig	
Lastverteilungsfaktor	K_H 1.0000
Massentemperatur (Fressen, Micropitting)	θ_H 70.0000 °C
<input checked="" type="checkbox"/> Verzahnung gut eingelaufen (Fressen)	

Abbildung 3.2 Berechnungsmethode nach "grafischer Methode" aktivieren.

Durch Drücken von  oder „F5“, wird die Festigkeitsberechnung wiederholt. Beachten Sie, dass der Sicherheitsfaktor etwas kleiner wird.

Resultate		
Überdeckungen (Profil/Sprung/Gesamt)	1.6686/0.0000/1.6686	
	Rad 1	Rad 2
Effektiver Kopfkreis $d_{a,e}$	164.982	465.018 mm
Zahnfussicherheit	2.4966	2.3732
Flankensicherheit	1.3266	1.3817
Sicherheit gegen Fressen (Integraltemperatur)	4.8953	
Sicherheit gegen Fressen (Blitztemperatur)	11.1684	
Sicherheit gegen Micropitting (B)	2.0870	

Abbildung 3.3 Zahnfuss-Sicherheit für Rad 1 mit $\rho^*_{FP} = 0.38$ und "grafischer Methode" berechnet.

3.2 Für Geometrie 2 ($\rho^*_{FP} = 0.45$)

Im Reiter "Bezugsprofil" ist der Wert für ρ^*_{FP} nun auf $\rho^*_{FP} = 0.45$ zu setzen. Mit "Σ" oder F5 wird die Festigkeitsberechnung durchgeführt.

Resultate		
Überdeckungen (Profil/Sprung/Gesamt)	1.6686/0.0000/1.6686	
	Rad 1	Rad 2
Effektiver Kopfkreis $d_{a,e}$	164.982	465.018 mm
Zahnfussicherheit	2.6756	2.3732
Flankensicherheit	1.3222	1.3771
Sicherheit gegen Fressen (Integraltemperatur)	3.8785	
Sicherheit gegen Fressen (Blitztemperatur)	8.2834	

Abbildung 3.4 Zahnfuss-Sicherheit für Rad 1 mit $\rho^*_{FP} = 0.45$ und mit "grafischer Methode" berechnet.

3.3 Für Geometrie 3 (elliptische Fussausrundung)

Um die elliptische Fussmodifikation hinzuzufügen, öffnen Sie die Zahnformberechnung durch Auswahl vom Reiter „Zahnform“.



Abbildung 3.5 Zahnformberechnung öffnen.

Im folgenden Fenster ist zu sehen, wie die Operation „elliptische Fussmodifikation“ durch Drücken der rechten Maustaste auf „automatisch“ hinzuzufügen ist.

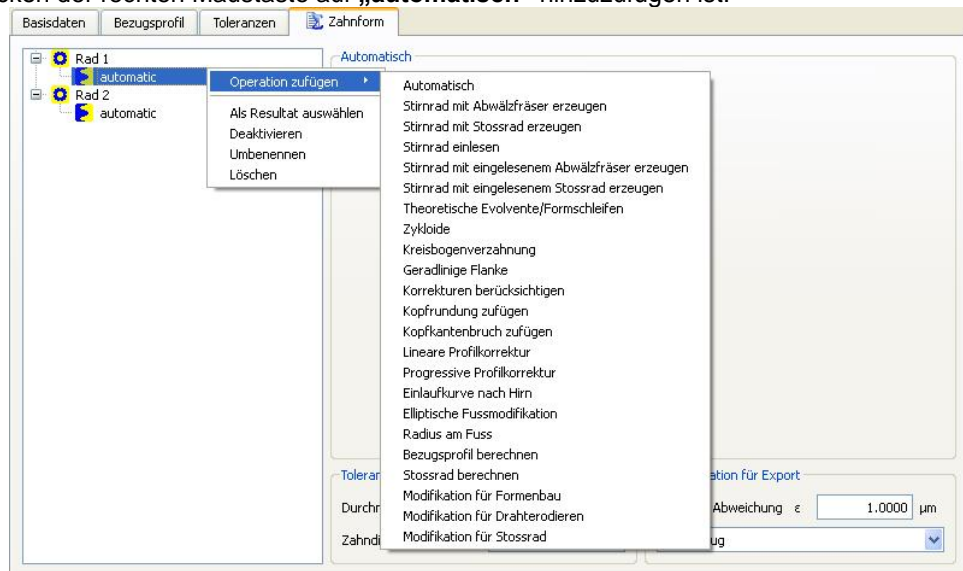



Abbildung 3.6 elliptische Fussmodifikation hinzufügen.

Drücken Sie dann  rechts neben dem Feld anordnet, „**Modifikation ab Durchmesser**“, welcher definiert, wo die elliptische Fussmodifikation anfangen sollte. Mit einem rechten Mausklick auf das Symbol für „**elliptische Fussmodifikation**“ und der Anwahl „**Als Resultat auswählen**“ stellen sie sicher, dass dieser Zahn modifiziert ist.

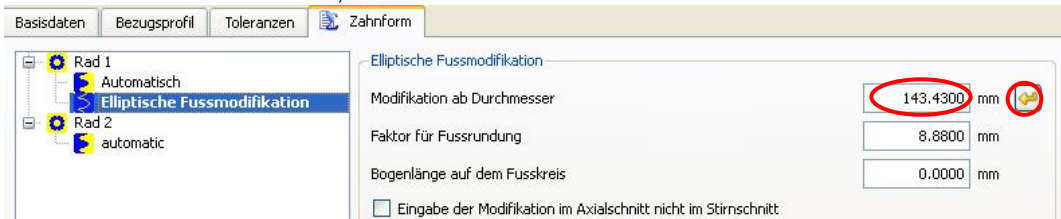



Abbildung 3.7 Beginn der Modifikation, aktivieren des Berechnungsschrittes.

Zurück im Reiter „**Basisdaten**“ wird die Festigkeitsberechnung (nachdem die Zahngeometrie berechnet wurde) durch Drücken  oder „F5“ durchgeführt. Der Sicherheitsfaktor für Rad 1 hat sich verändert:

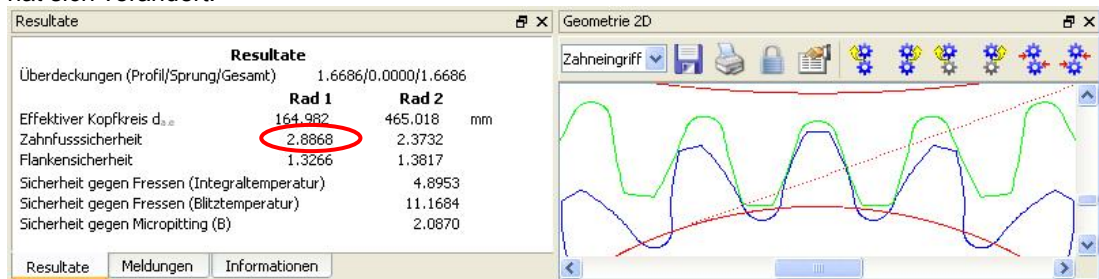


Abbildung 3.8: Ergebnis der Berechnung mit optimierter Zahnfussausrundung.

4 Bemerkung und Erläuterung

4.1 Berechnungsschritt ‚Automatisch‘

Beim Öffnen der Zahnformberechnung, ist der erste Herstellungsschritt als Standardschritt sichtbar schon auf „Automatisch“ („automatic“).

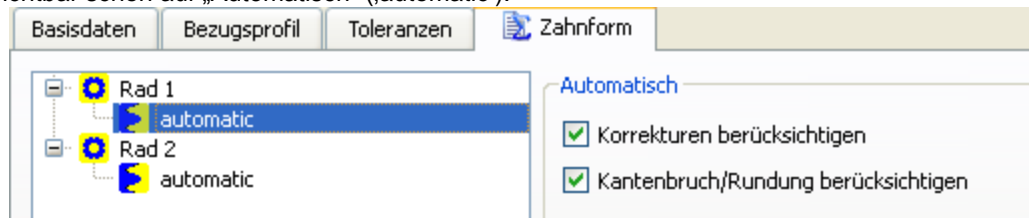


Abbildung 4.1 Standardeinstellung in der Zahnformberechnung.

Der Schritt ‚automatic‘ basiert auf dem Bezugsprofil, welches im Reiter „**Bezugsprofil**“ definiert wurde.

Beim Hinzufügen der elliptischen Fussmodifikation ist kein (oder ein kleiner) Unterschied vorhanden, da $\rho^*_{fp} = 0.38$ oder $\rho^*_{fp} = 0.45$ im Reiter „**Bezugsprofil**“ schon definiert worden sind. Die elliptische Änderung ist nur der nachfolgende Schritt zur Herstellung (der erste Erzeugungsschritt erfolgt mit ‚Automatisch‘, welcher auf dem Bezugsprofil, das im Reiter ‚Bezugsprofil‘ definiert ist basiert). Deshalb entstehen für die neu berechnete Zahnform kaum Unterschiede.

Durch Modifikation des Wertes „**Faktor für Fussrundung**“, kann die Gestalt der elliptischen Kurve etwas modifiziert werden. Der Wert „**Bogenlänge am Fusskreisdurchmesser**“ definiert die Länge eines kreisförmigen Bogens zwischen zwei elliptischen Abschnitten.

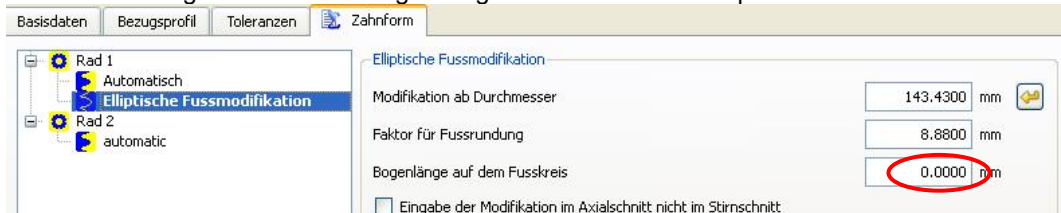


Abbildung 4.2 Faktor für die Fussausrundung.

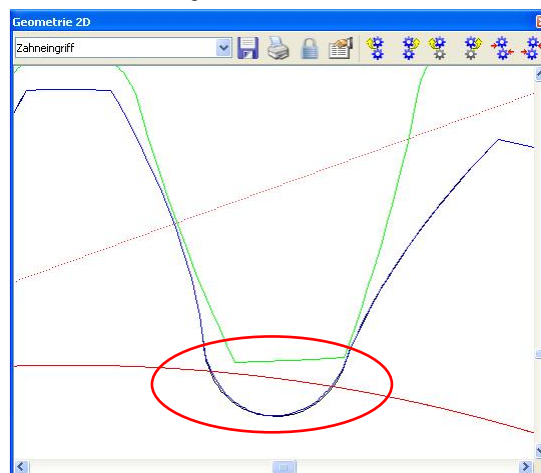


Abbildung 4.3 Definition des Faktors für die Fussausrundung und Bogenlänge auf dem Fusskreis.

4.2 Berechnung von Innenverzahnungen

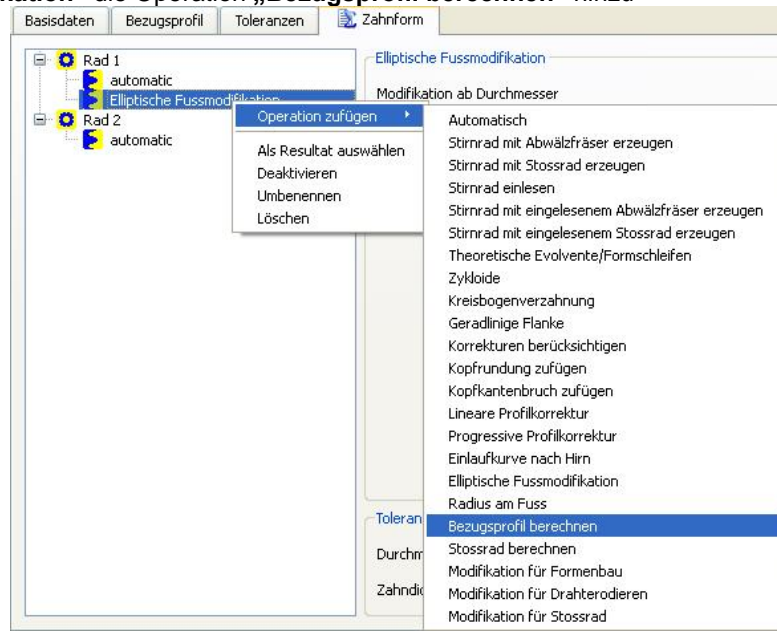
Für Innenverzahnungen ist die Berechnung gemäß DIN 3990, ISO 6336 und AGMA 2001 ziemlich ungenau (aber in der vorgeschlagenen Version nach VDI 2737, wird die Situation verbessert werden). Wir empfehlen daher, die „**grafische Methode**“ zu benutzen, wenn Sie

eine Innenverzahnung berechnen. Um die „grafische Methode“ benutzen zu können, ist Modul ZA15 erforderlich.

4.3 Berechnung des Werkzeugprofils zur Herstellung einer elliptischen Fussmodifikation

Wenn jetzt eine Werkzeuggeometrie berechnet werden sollte, die der Reihe nach alle Berechnungsschritte inklusive der elliptischen Änderung erzeugen soll, ist folgendermaßen vorzugehen:

Fügen Sie durch Drücken der rechten Maustaste nach der der Operation „**Elliptischen Fussmodifikation**“ die Operation „**Bezugsprofil berechnen**“ hinzu



und wählen diese als Resultat aus.

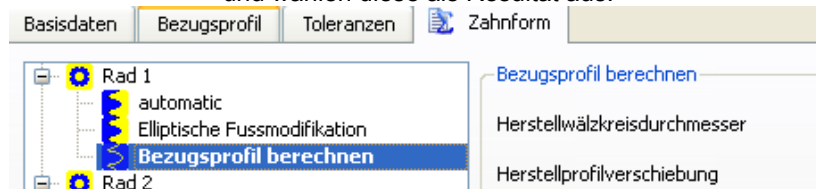


Abbildung 4.4 Operation „Bezugsprofil berechnen“ hinzu.

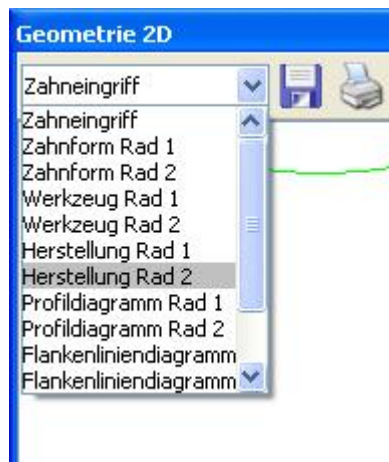


Abbildung 4.5 Auswahl Herstellung für Rad 1.

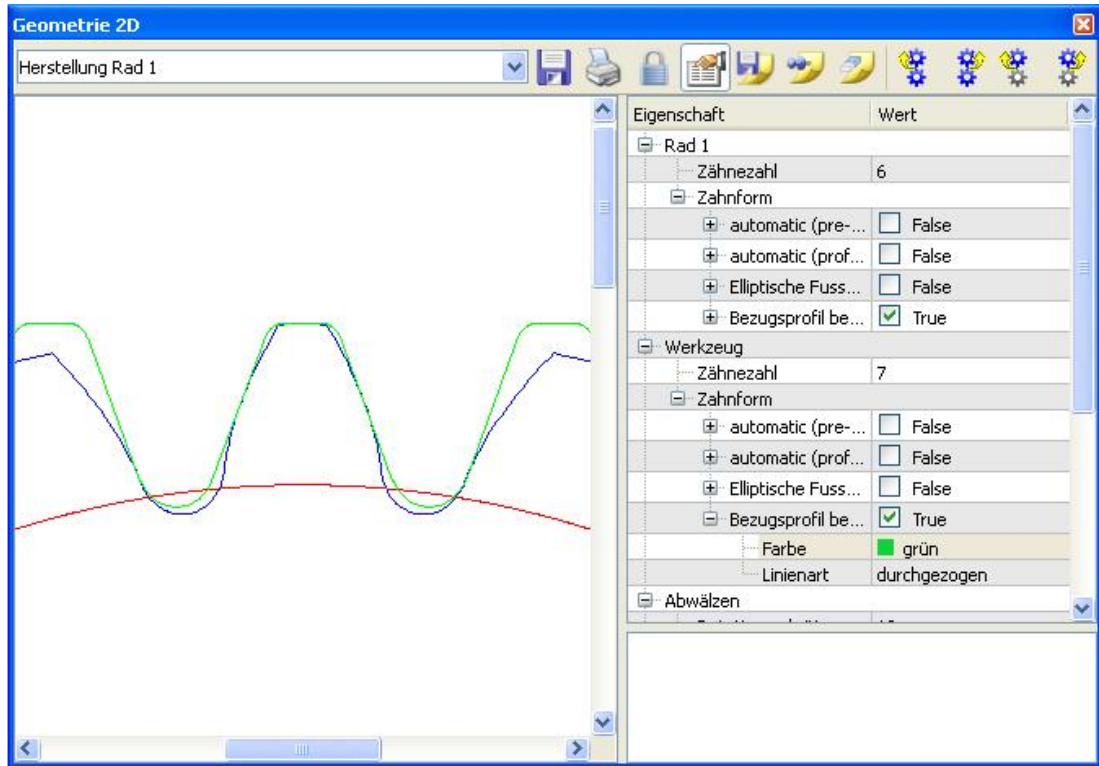


Abbildung 4.6 Herstellung Rad 1 darstellen.

In einem letzten Schritt kann das Werkzeug dargestellt werden. Wählen Sie im Grafikfenster „**Werkzeug Rad 1**“ von Liste aus und die Werkzeuggeometrie wird dargestellt. Die Werkzeuggeometrie kann jetzt zum Herstellen des Werkzeugs exportiert werden.

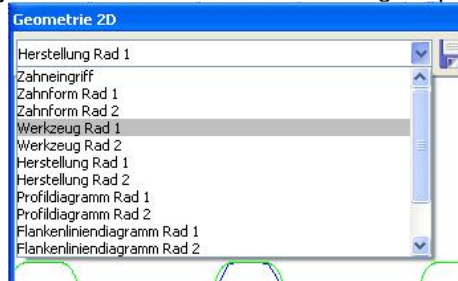


Abbildung 4.7 Auswahl Werkzeug Rad 1 darstellen.

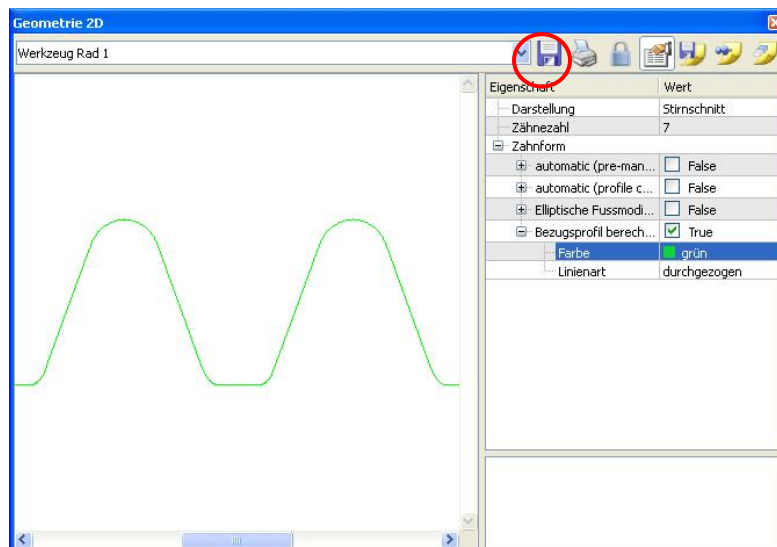


Abbildung 4.8 Werkzeugdarstellung.

Das Werkzeug kann jetzt in dxf oder iges exportiert werden.