

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: Zahnformoptimierung, Zahnformmodifikationen, insbesondere für Kunststoff-, Sinter-, drahterodierte und formgeschmiedete Zahnräder

1 Einleitung

1.1 Zusammenfassung der Auslegungsstrategie

In dieser Anleitung wird die Strategie zur optimalen Auslegung von Zahnrädern, welche in Formen (Spritzguss, Sintern, Form-Schmieden usw.) hergestellt werden, beschrieben. In der Berechnungssoftware KISSsoft sind diese speziellen Methoden für die Auslegung und Optimierung von Zahnrädern aus Formen integriert.

Der Ablauf einer Auslegung umfasst folgende Schritte:

- Festlegen der ungefähren Grösse (Modul, Zahnbreite,..) über Festigkeitsberechnung
- Abmasse festlegen
- Zahnhöhe optimieren (Ziel: Effektive Profilüberdeckung 2.0 erreichen mit Berücksichtigung von Kopfrundung, Einlaufkurve zur Geräuschreduktion)
- Kopfkanten verrunden
- Einlaufkurve/Profilkorrektur optimieren (Ziel: Geräuschreduktion, Verbesserung Verschleiss-Sicherheit)
- Fusskontur optimieren (Erhöhen der Fuss-Festigkeit)
- Form für die Herstellung ermitteln

1.2 Einleitung

Zahnräder werden vermehrt aus Kunststoffen hergestellt, da durch die Entwicklung von neuen Werkstoffen eine zunehmend höhere Tragfähigkeit erreichbar ist. Die Eigenschaften von Kunststoffen lassen sich in viel grösseren Bereichen als bei Stahl variieren; dies erlaubt es zielgerecht für den gewünschten Anwendungsfall den optimalen Kunststoff zu wählen. Dabei zählen zu den wichtigsten Eigenschaften bei der Auslegung eines Zahnradpaares die Tragfähigkeit, Verschleissbeständigkeit, Dämpfungsverhalten, Steifigkeit sowie die Geräuschentwicklung.

Normalerweise werden metallische Zahnräder im Abwälzverfahren hergestellt, solche aus Kunststoff hingegen in Spritzgussformen gespritzt. Wenn die Spritzgussform im Drahterodierverfahren hergestellt wird, kann die Zahnform ohne zusätzliche Kosten optimiert werden; beim Abwälzverfahren ist dies nur mit teuren Sonderwerkzeugen möglich. Andererseits lässt sich durch das Spritzgiessen des Kunststoffs keine gute Verzahnungsqualität erreichen; ein Problem, das wiederum durch spezifische Massnahmen entschärft werden kann. Entsprechend modifizierte Zahnräder werden in der Fachliteratur auch als Hybrid-Verzahnungen bezeichnet.

In der Berechnungssoftware KISSsoft sind viele spezielle Methoden für die Auslegung und Optimierung von Kunststoff-Zahnradern integriert. Die angebotenen Prozeduren sind voll in ein umfangreiches, modernes Softwarekonzept eingebunden; damit lassen sich Standard- wie auch Hybrid-Verzahnungen entwickeln und kontrollieren.

2 Auslegung der Zahngeometrie

2.1 Einleitung

Die Zahngeometrie kann durch unterschiedliche Massnahmen verändert werden, um optimale Verhältnisse im Zahneingriff zu erreichen. Je nach der Gewichtung der zu erreichenden Ziele wie Lärm- oder Schwingungsarmut, Festigkeit, Schlupf, Steifigkeit, Laufgleichmässigkeit ist die eine oder andere Massnahme mit Priorität zu wählen.

Vor dem Beginn einer nachfolgenden Optimierung wird empfohlen, die folgenden Voreinstellungen zu treffen:

2.2 Kopfverrundung

Bei Zahnformen für den Formenbau müssen die Zahnkopf-Kanten verrundet werden, da Ecken beim Spritzguss nie sauber ausgebildet werden. Diese Eingabe ist von Vorteil bereits in der Haupt-Maske bei Rad 1 und Rad 2 einzugeben. Damit werden dann alle wesentlichen Daten (wie Überdeckung,...) mit Berücksichtigung der Kopfrundung berechnet.

Dies wird nun an einem Beispiel illustriert: In KISSsoft steht eine Tutorialdatei für diese Berechnung zur Verfügung, „Tutorial - 011“. Diese Datei ist in der Stirnradpaarberechnung zu öffnen:

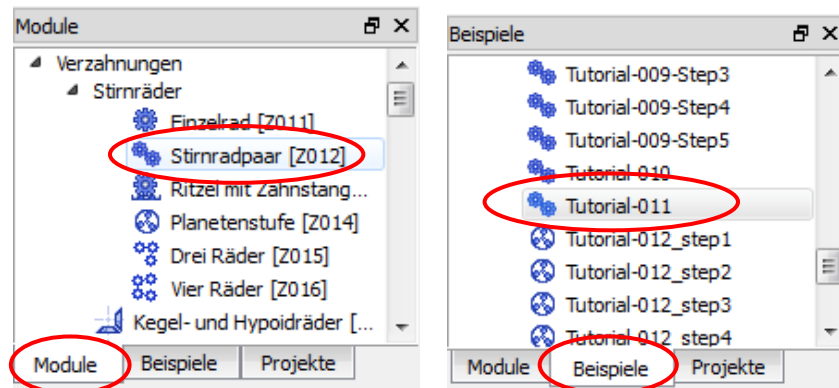


Abbildung 2.1 Öffnen der Stirnradpaarberechnung und öffnen der Tutorialdatei

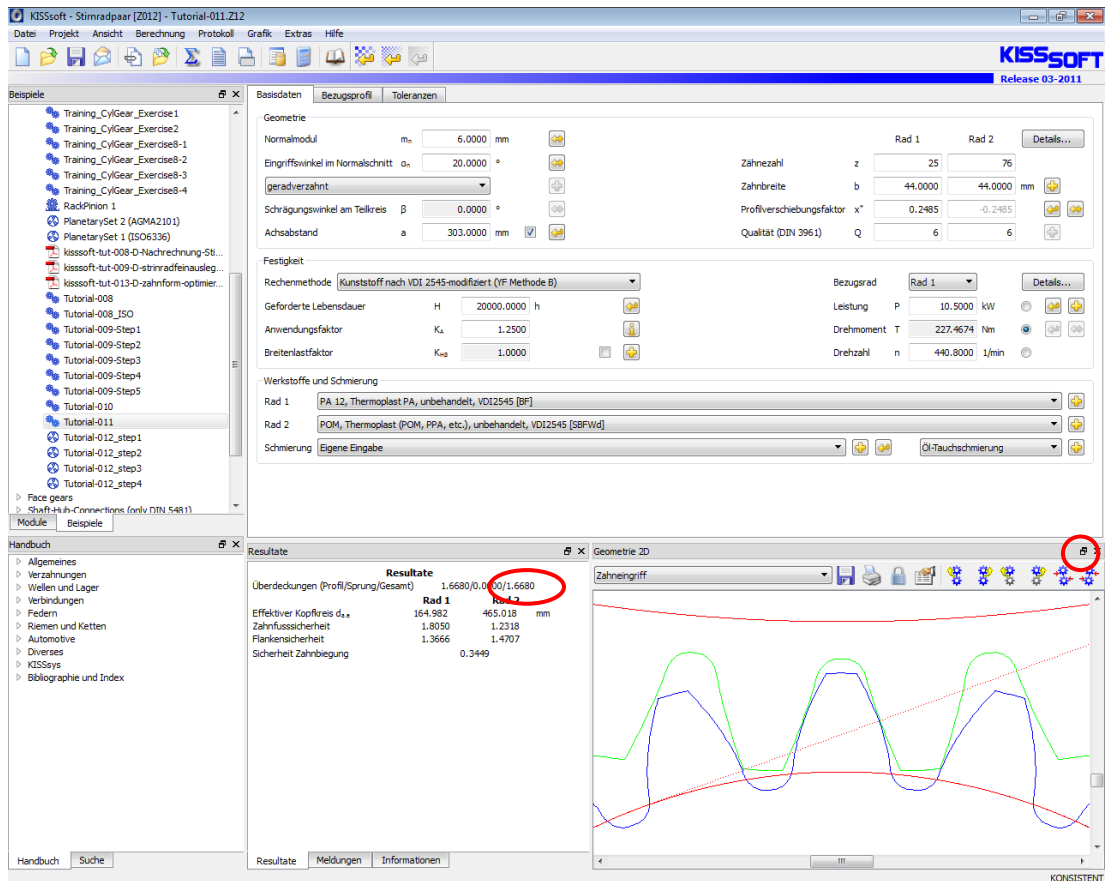



Abbildung 2.2 Beispieldatei für Kunststoffzahnäder, nach Ausführen von „Σ“

Wird in der Symbolleiste auf das Symbol  geklickt oder „F5“ gedrückt, wird die vorliegende Verzahnung gerechnet. Die Überdeckung beträgt ohne Kopfverrundung 1.6680. Die Zahnform wird unten rechts grafisch veranschaulicht. Die Anzeige kann auch herausgelöst und frei bewegt werden (Siehe Markierung rechts unten in Abbildung 2.2).

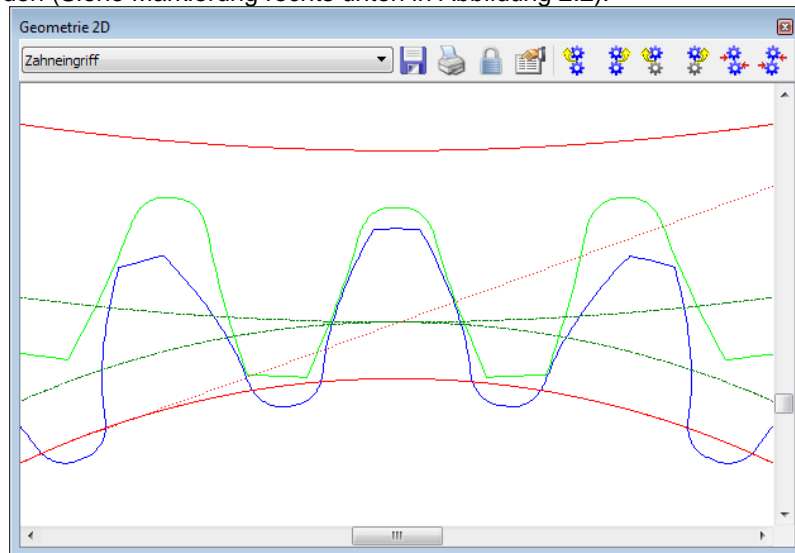


Abbildung 2.3 Zahnformdarstellung

Hier soll nun die Zahnform lokal gespeichert werden, dazu ist der „Property browser“ (1) zu öffnen. Die Zahnform von Rad 1 zu aktivieren (2) der Button „Speichern“ (3) zu drücken. Es öffnet sich ein Informationsfenster. Dort können optional Veränderungen (z. Bsp. zur Farbe) und Einträge vorgenommen werden (4). Mit Drücken von „OK“ (5) wird die Zahnform von Rad 1 gespeichert. Um die Zahnform von Rad 2 zu speichern ist das gleiche Vorgehen erforderlich.

Damit können die im Folgenden vorgenommenen Veränderungen der Zahnform sichtbar gemacht werden. Anschliessend kann der „**Property browser**“ geschlossen werden.

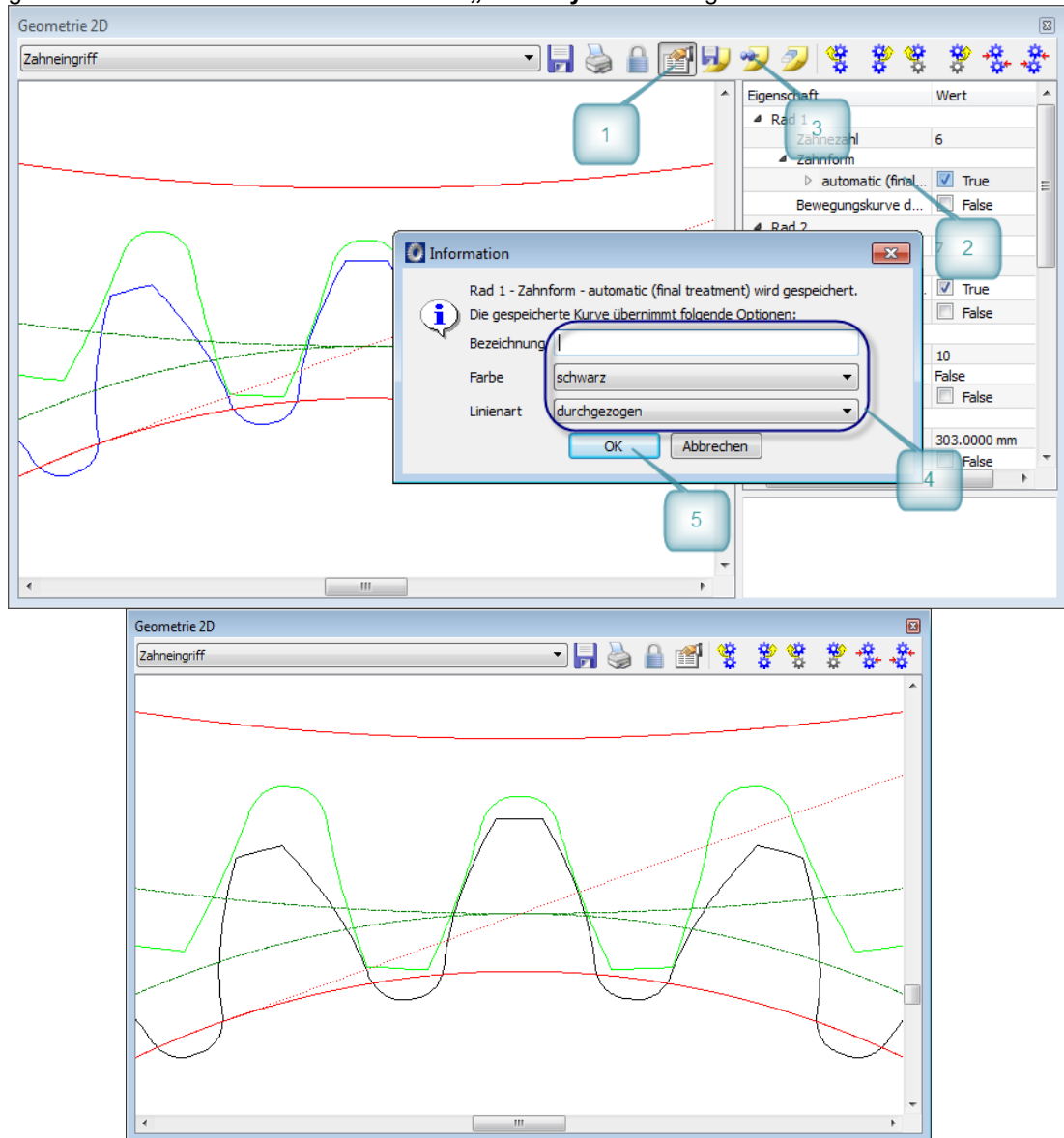


Abbildung 2.4 Zahnform speichern

Die Kopfverrundung wird unter dem Reiter „**Korrekturen**“ (siehe oberste Markierung in Abbildung 2.5) für Rad 1 und Rad 2 wie folgt definiert:

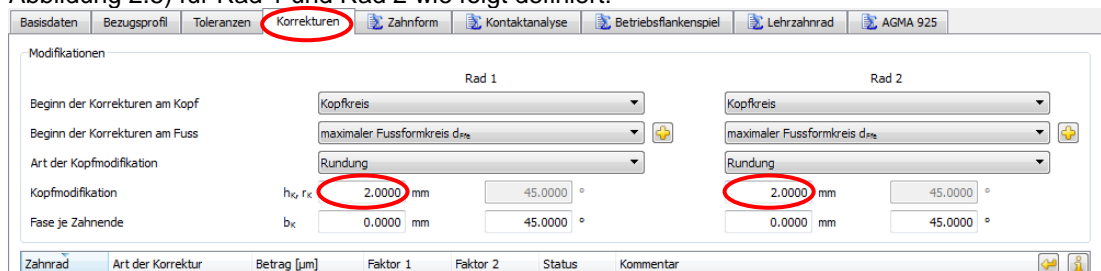



Abbildung 2.5 Definition der Kopfverrundung, hier 2mm Radius

Durch erneutes Berechnen (durch Klicken auf ) wird die Rundung übernommen. Wird nun die Grafik genau betrachtet ist die Verrundung an den Zähnen sichtbar. Ebenfalls gezeigt (in schwarzer/grüner bzw. blauer Farbe) wird die ursprüngliche Zahnform.

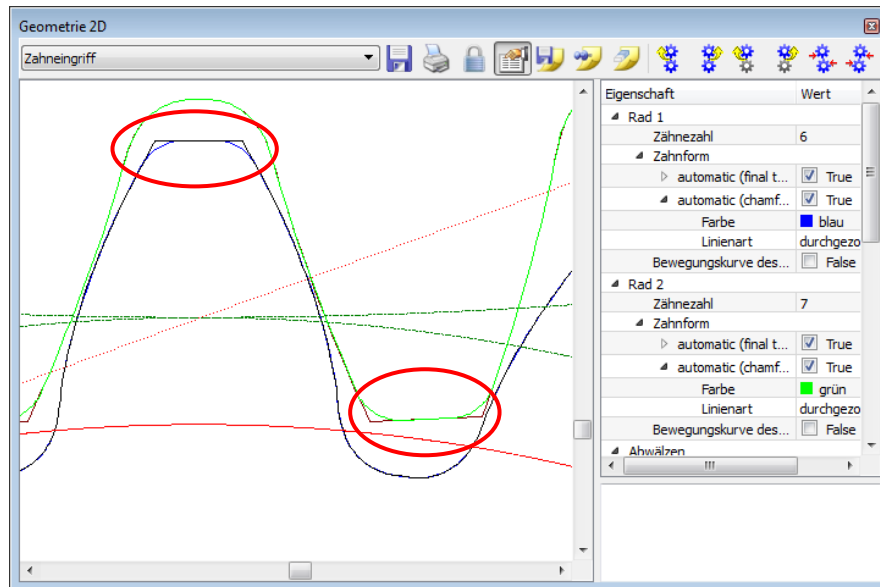


Abbildung 2.6 Verrundeter Zahnkopf

Wichtiger Hinweis:

Durch die Speicherung der Zahnform sind auch alle vorherigen Berechnungsoperationen aktiv. Gegebenenfalls kann es besser sein die gemachten Veränderungen durch Aktivieren und Deaktivieren der einzelnen Berechnungsschritte zu verfolgen.

Die Grafikeigenschaften kann man zurücksetzen. Das erfolgt automatisch, wenn im Geometriefenster die Darstellung gewechselt wird. Eine andere Möglichkeit ist über „Extras“ → „Konfigurationstool“ im Reiter „Einstellungen“ bei „Grafiken“ „Löschen“ drücken.

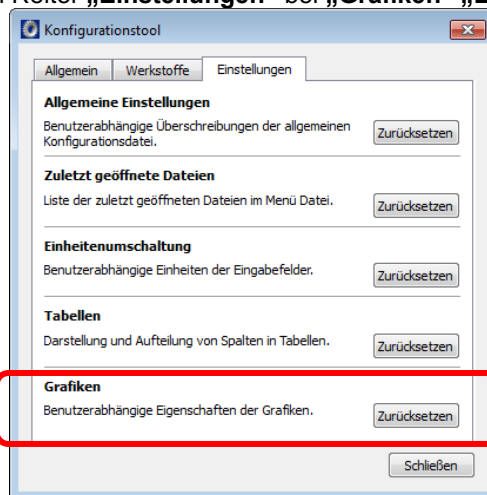


Abbildung 2.7 „Grafikeigenschaften“ zurücksetzen

Ein Warnhinweis wird ausgegeben. Die Zahnform wird in den nächsten Schritten noch weiter modifiziert, deshalb kann dieser Hinweis hier mit „OK“ zu quittiert werden.

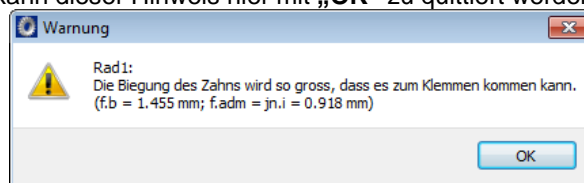


Abbildung 2.8 „Warnhinweis Zahnbiegung“

Anmerkung:

Abstellmassnahmen dafür sind beispielsweise eine Flankenspielvergrößerung, eine Profilmodifikationen oder geänderte Werkstoffe.

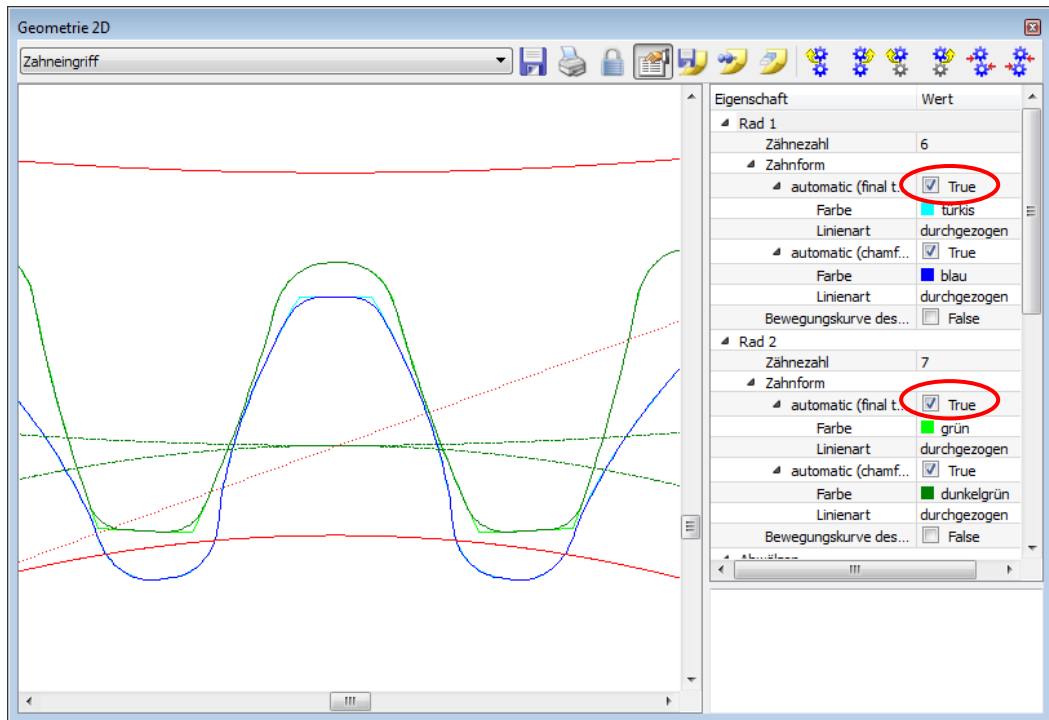


Abbildung 2.9 Alle Berechnungsoperationen aktivieren

In der Hauptmaske ist nun der berechnete Wert für die Überdeckung auf 1.3639 gesunken:

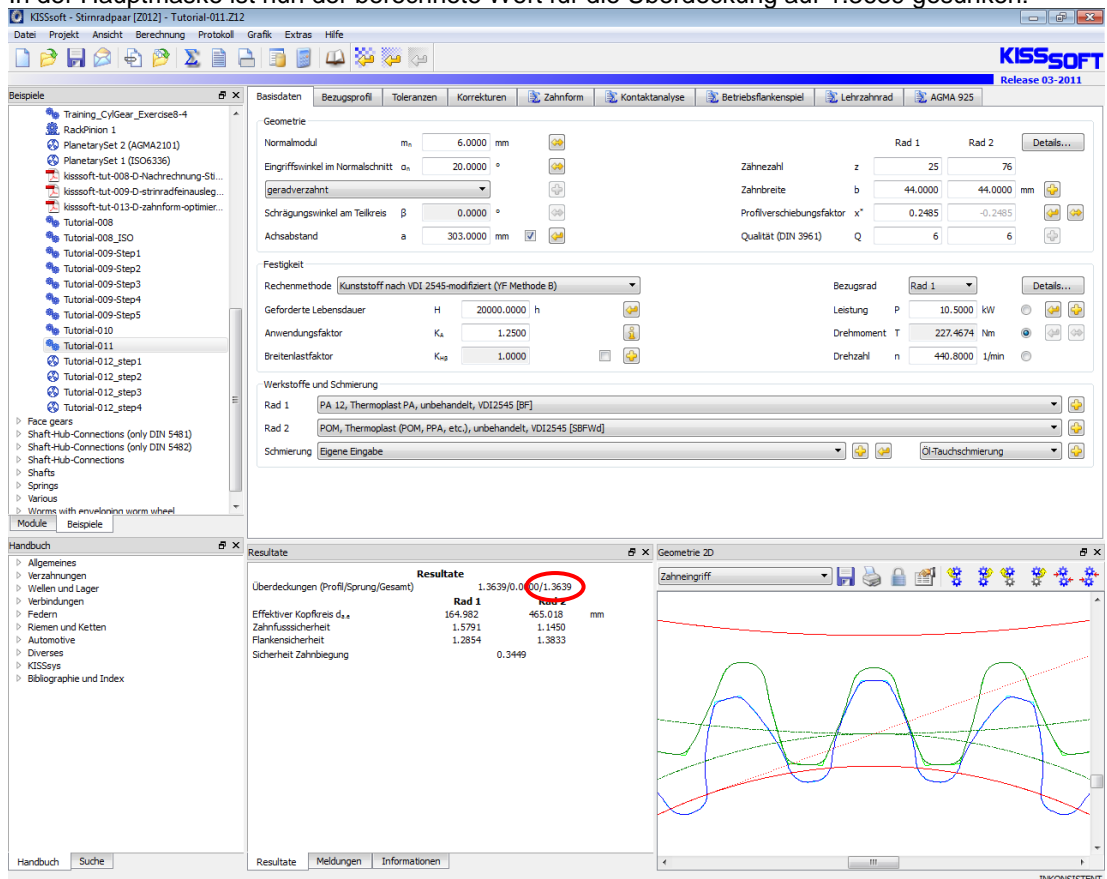


Abbildung 2.10 Abnahme der Überdeckung infolge der Kopfverrundung

2.3 Mindestzahndicke am Kopf

Die erforderliche Mindest-Zahndicke am Kopf ist standardmässig in KISSsoft auf $0.2 \cdot \text{Modul}$ eingestellt. Für Kunststoff-Zahnräder (mit Kopfanten-Verrundung) ist dieser Wert eher tief, vernünftiger ist $0.4 \cdot \text{Modul}$. Diese Vorgabe wird unter „Modulspezifische Einstellungen“ im Blatt „Allgemein“ eingestellt:

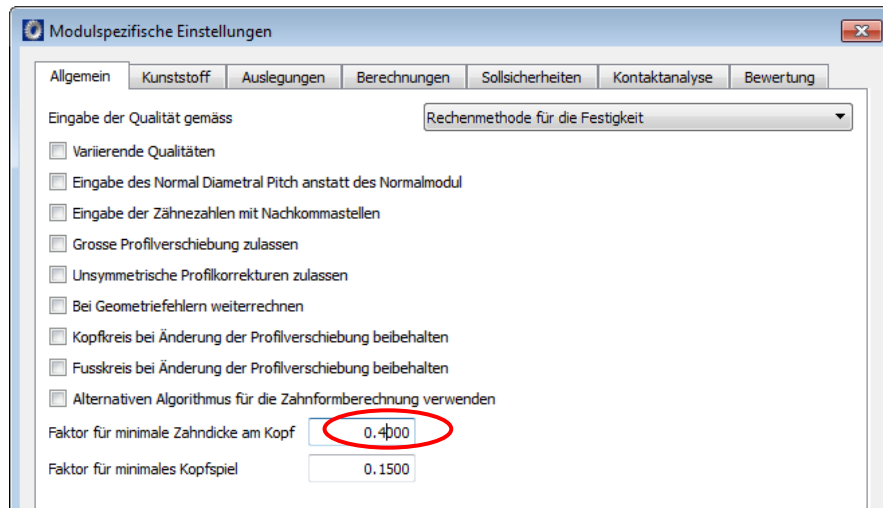


Abbildung 2.11 Vorgabe für die erforderliche Mindestzahndicke am Kopf in den modulspezifischen Einstellungen

Wesentliche und wirkungsvolle Massnahmen für die Geometrie-Optimierung sind:

2.4 Geometrie-Veränderung bei vorgegebenem Bezugsprofil

Die Geometrie des Zahneingriffs kann durch Variieren von Modul, Eingriffswinkel, Schrägungswinkel und Profilverziehung bei gegebenem Bezugsprofil sehr stark verändert werden. Insbesondere bei schrägverzahnten Stirnrädern kann damit in den meisten Fällen bereits eine optimale Lösung gefunden werden. Als leistungsfähiges Software-Werkzeug dient hierzu die Feinauslegung der KISSsoft-Programme, die für diese Problemstellung eine Zusammenstellung aller möglichen Lösungen erzeugt und nach den zu erreichenden Zielen klassifiziert.

Die Feinauslegung rufen Sie über „**Berechnung** → **Feinauslegung**“ auf. Genauer finden Sie dazu im KISSsoft Tutorial 009.

Die Maske der Feinauslegung:

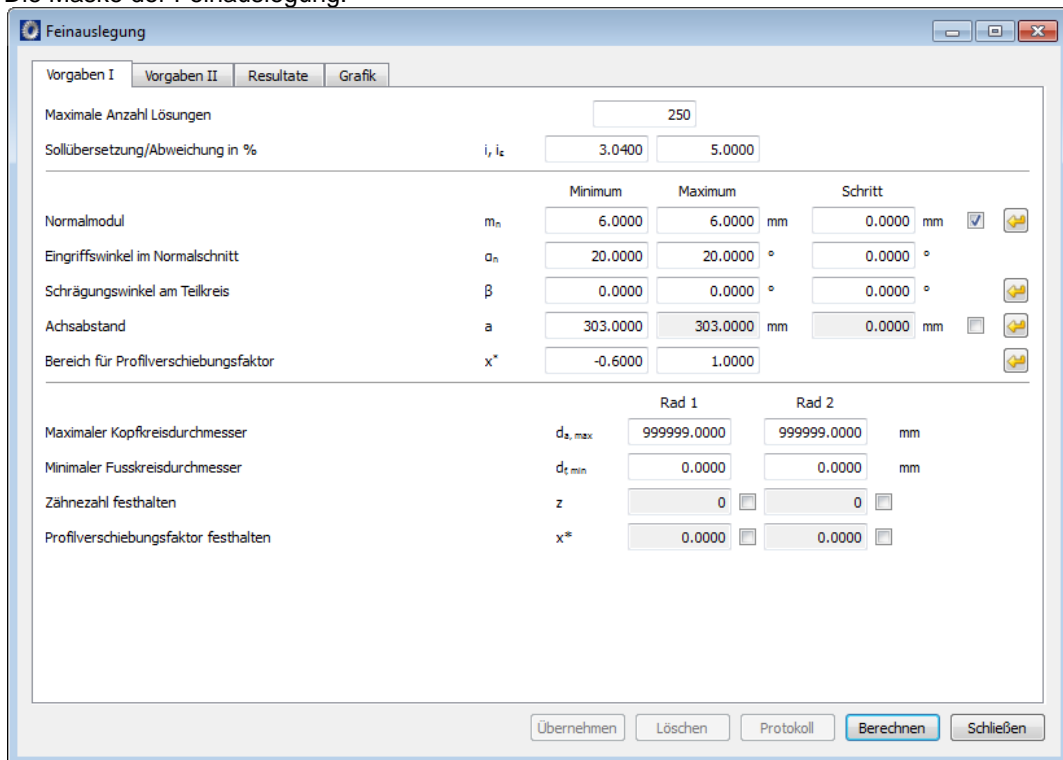


Abbildung 2.12 Stirrad-Feinauslegung

2.5 Geometrie- Veränderung durch Variation des Bezugsprofils

Eine Bezugsprofilveränderung (normalerweise eine Vergrößerung der Zahnhöhe) ergibt eine Veränderung der Profilüberdeckung. Für lärmarme und gleichmässig laufende Verzahnungen ist eine Profilüberdeckung von 2,0 (oder etwas höher) anzustreben. Damit kann der Steifigkeitssprung beim Wechsel von Einzel- auf Doppelingriff minimiert werden. Durch ein entsprechendes Bezugsprofil kann die gewünschte Überdeckung erreicht werden, allerdings treten dann meistens Eingriffsstörungen beim Abwälzen der Zahnräder auf. Die möglichen Lösungen sind deshalb begrenzt. Um dieses Problem effizient bearbeiten zu können, bietet die zuvor erwähnte KISSsoft-Feinauslegung als Zusatzoption die Möglichkeit, selbständig alle möglichen Lösungen mit einer vorgeschriebenen Soll-Profilüberdeckung auszuwählen und anzuzeigen.

Diese Methode aktivieren Sie, indem Sie in der Maske „**Stirrad Feinauslegung**“ den Reiter „**Vorgaben II**“ anwählen und so in die entsprechende Maske gelangen:

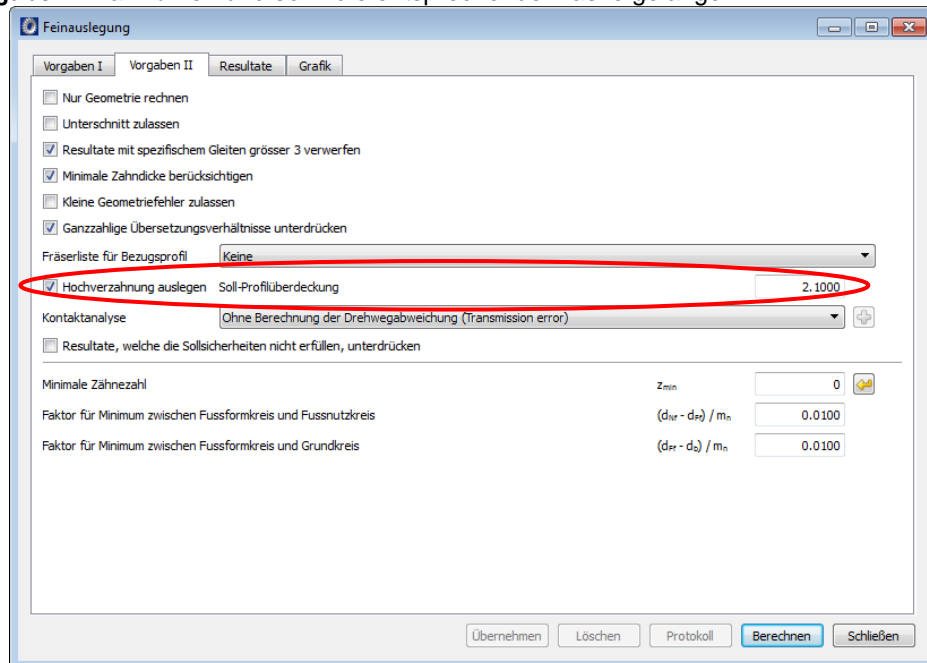


Abbildung 2.13 Hochverzahnung auslegen

Hier müssen Sie „**Hochverzahnung auslegen**“ aktivieren.

Die gewünschte Profilüberdeckung kann direkt vorgegeben werden oder es wird ein vordefinierter Wert übernommen. Dieser wird im Hauptmenu unter „**Berechnung**→**Einstellungen**“ im Reiter „**Auslegungen**“ eingestellt.

2.6 Eliminieren des Eintrittstosses durch Korrektur der Zahnform

Beim Abwälzen eines Zahnradpaares tritt beim Kontakt von zwei neu in den Eingriff kommenden Zähnen der so genannte Eintrittstoss auf. Dieser Stoss erzeugt Lärm und ist umso grösser, je ungenauer die Eingriffsteilung und je grösser die Deformation der Zähne unter Last ist. Bei Kunststoff-Zahnrädern wird deshalb die Evolvente im Kopfbereich durch eine Eingleitkurve (Profilkorrektur) modifiziert. Bei Rädern aus metallischen Werkstoffen wird diese Massnahme Profilkorrektur am Kopf genannt, da sie dort wegen der viel höheren Steifigkeit im Betrag wesentlich kleiner ist. Normalerweise wird die Eingleitkurve bei beiden Rädern am Kopf ausgeführt; als Variante (z.B. bei Zahnstangen-Trieben) kann die Korrektur nur an einem Rad, dann aber im Kopf- und im Fussbereich, ausgeführt werden. Die Eingleitkurve besteht vorteilhaft aus drei enger werdenden Kreisbögen, die von KISSsoft auf Anwahl hin selbständig berechnet und in die Zahnform integriert werden.

Es gibt zwei Möglichkeiten in KISSsoft, um Profilkorrekturen einzugeben

A) Über den Reiter „Korrekturen“

Diese Option ist neu ab Version 03-2008.

Im Reiter „Korrekturen“ können lineare und kreisbogenförmige Korrekturen am Kopf und/oder am Fuss eingegeben werden.

Der Vorteil ist, dass die so eingegebenen Korrekturen im Hauptprotokoll dokumentiert sind und auch übersichtlicher und schneller eingegeben werden können.

Wir empfehlen, ab Version 03-2008 diese Variante zu verwenden. Das Vorgehen wird in einem anderen Tutorial beschrieben werden. Hier wird anschliessend das Vorgehen nach B) beschrieben.

B) Im Reiter „Zahnform“ (wie bisher)

Die Eingabe und Berechnung von Kopfrücknahmen und Eingleitkurven erfolgt innerhalb der Zahnformberechnung. Dazu den Reiter „Zahnform“ aufrufen:

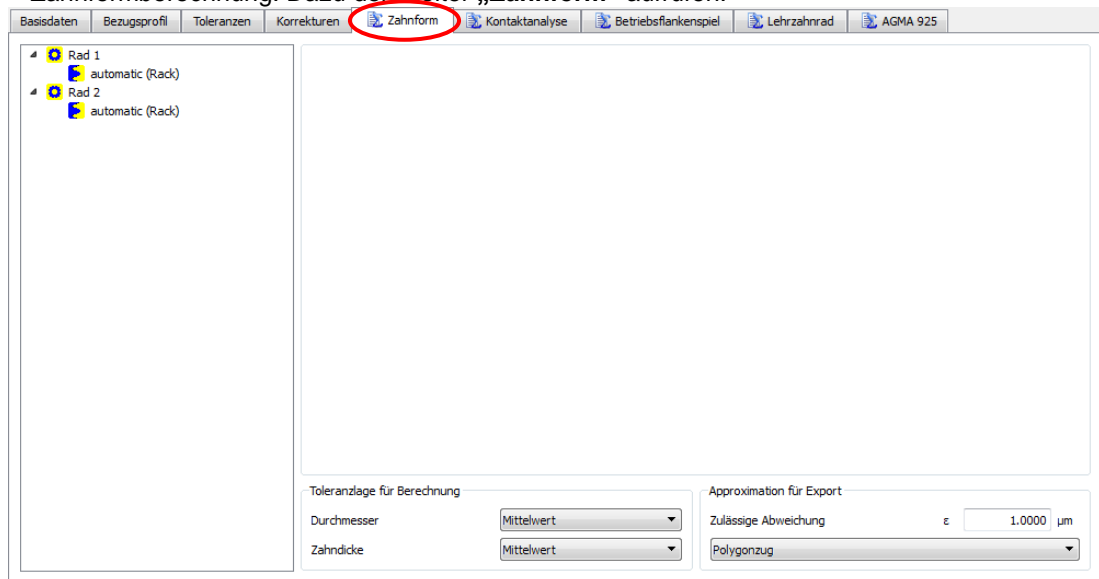


Abbildung 2.14 Zahnformberechnung

Mit der voreingestellten Berechnungsoperation ‚automatic‘ werden die Werkzeugdaten zur Generierung der Zahnform automatisch aus dem in der Hauptmaske definierten Bezugsprofil erzeugt.

Durch rechten Mausklick auf ‚automatic‘ wird ein Auswahlménü von möglichen Berechnungsoperationen angezeigt, mit linkem Mausklick kann dann die entsprechende Operation zugefügt werden.

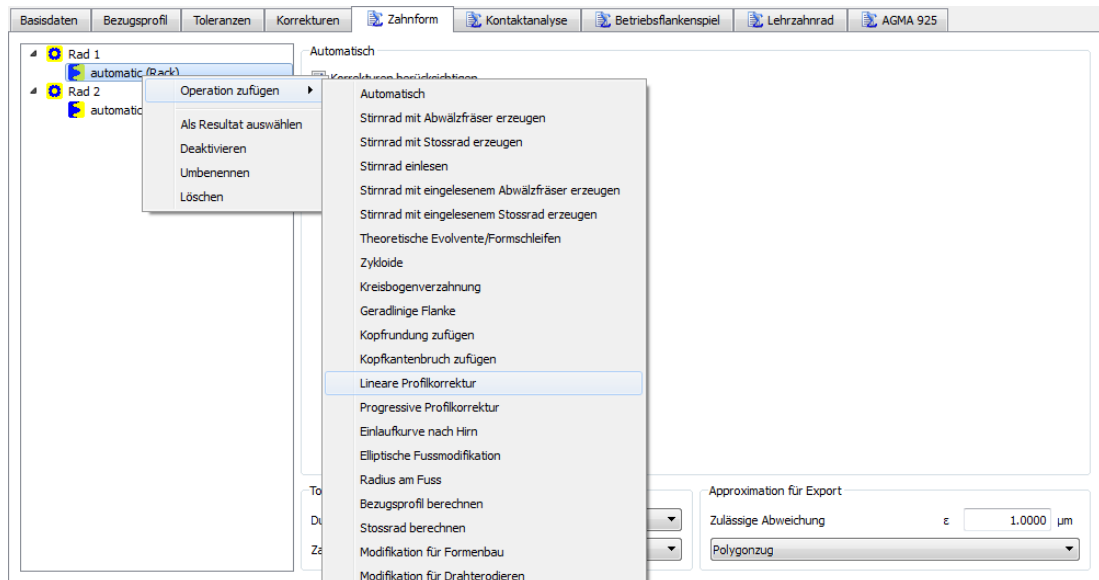


Abbildung 2.15 Mögliche Operationen der Zahnform Rad1

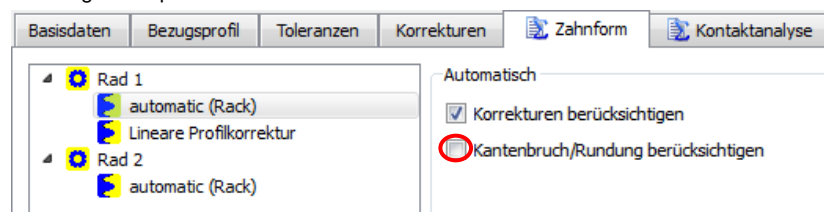


Abbildung 2.16 Berücksichtigung der Kopfrundung deaktivieren am Rad1

Die Kopfrundung darf nicht automatisch erzeugt werden. Wie in diesem Fall, wenn weitere Zahnformmodifikationen vorgesehen sind (z.B. Profilkorrektur) darf die Kopfrundung erst als letzte Operation ausgeführt werden. Der Flag ist deshalb hier zu löschen.

Nach der geometrischen Auslegung der Zahnrad-Grunddaten wird die Modifikation der Evolvente im Kopfbereich durchgeführt. Hierfür sind verschiedene Methoden in der Software integriert. Zur Auswahl stehen: Lineare oder progressive Profilkorrektur, Einlaufkurve aus drei Kreisbogen nach H. Hirn [1]; jeweils kombinierbar mit Kopfkantenbruch oder Kopfrundung. Die Vorgaben dazu sind die Korrekturhöhe (Durchmesser, bei welchem die Korrektur beginnt) und die Kopfrücknahme. Für beide Werte besteht eine Auslegungsfunktion, welche auf Grund der Profilüberdeckung, der Verzahnungsqualität, des Werkstofftyps (Kunststoff oder Metall), der Steifigkeit und der Belastung optimale Werte vorschlägt. Durch Veränderung des „**Faktors für Kopfrundung**“ kann sogar die Form der Kurve (bei Option ‚Progressive Profilkorrektur‘) vom Benutzer eingestellt werden!

Mit der progressiven Profilkorrektur können die Länge der Überdeckung und die lokalen Schmiereigenschaften gegenüber einer Verzahnung mit linearer Profilkorrektur verbessert werden. Die Formeln für diese Profilkorrekturen ergeben sich wie folgt:

Lineare Korrektur: $\delta s(r) = Ca * \delta r / \delta rK$

Progressive Korrektur: $\delta s(r) = Ca * (\delta r / \delta rK)^{Exp}$

- δs Profiltrücknahme (Zahndickenveränderung)
- r Radius eines beliebigen Punktes der Zahnform
- Ca Profiltrücknahme am Kopfkreis
- δr $ra - r$
- δrK $ra - raK$
- ra Kopfkreis-Radius
- raK Radius, bei welchem die Korrektur beginnt
- Exp = Verstärkungsfaktor/5

Verstärkungsfaktor: Bereich 1-20, normalerweise im Bereich 5..10
(kann eingegeben werden)

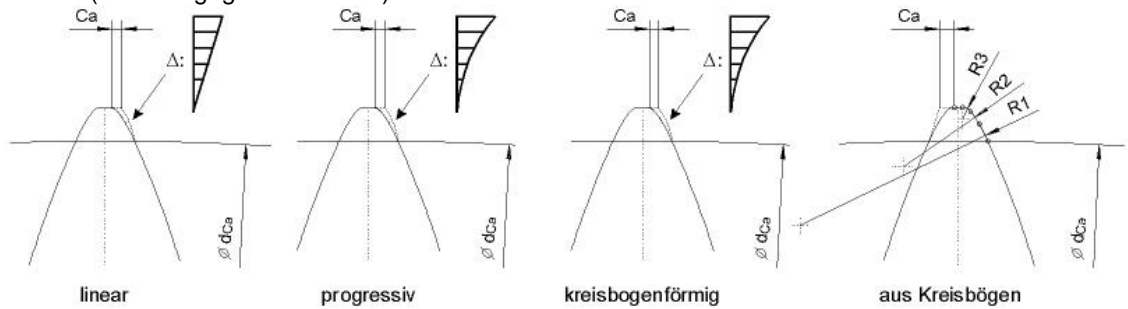



Abbildung 2.17 Arten von Profilkorrekturen

Der Auslegen Button  rechts vom Eingabefeld „**Modifikation ab Durchmesser**“ erlaubt es Ihnen vom Programm einen vernünftigen Vorschlag für Beginn und Größe der Kopfrücknahme zu erhalten.

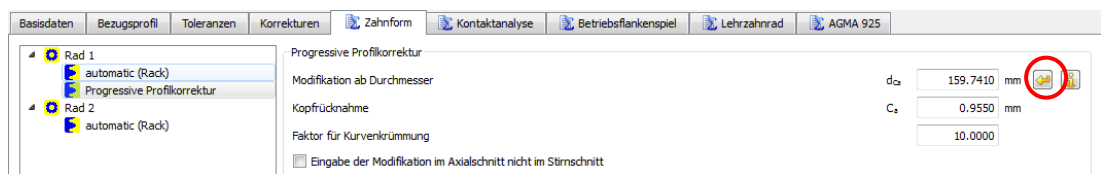


Abbildung 2.18 Vorschlag Kopfrücknahme

Bei der Herstellung von Zahnrädern in Formen (Spritzguss oder Sintern) ist es wichtig, allfällige Ecken zu runden. Der Rundungsradius am Kopf kann unabhängig von der gewählten Profilkorrektur eingegeben werden. Für den Rundungsradius am Kopf kann die zusätzliche Option „**Kopfrundung zufügen**“ eingefügt werden.

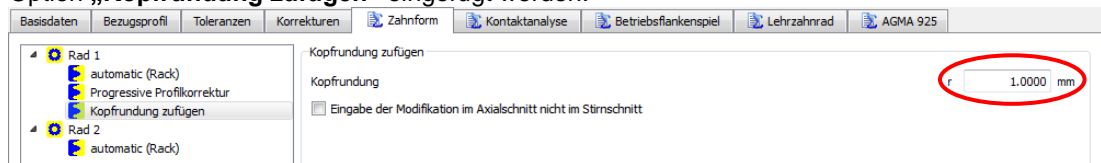


Abbildung 2.19 Kopfrundung zufügen

Den besten Verstärkungsfaktor müssen Sie ausprobieren. Sie können das Fenster des Zahneingriffs aus der Maske herauslösen (Markierung unten rechts) um Zahneingriff und die Zahnform genauer anzusehen.

Um unterschiedliche Einstellung bei der Modifikation der Zahnform zu vergleichen ist die zuletzt berechnete Zahnform wie in Abbildung 2.4 gezeigt zu speichern.

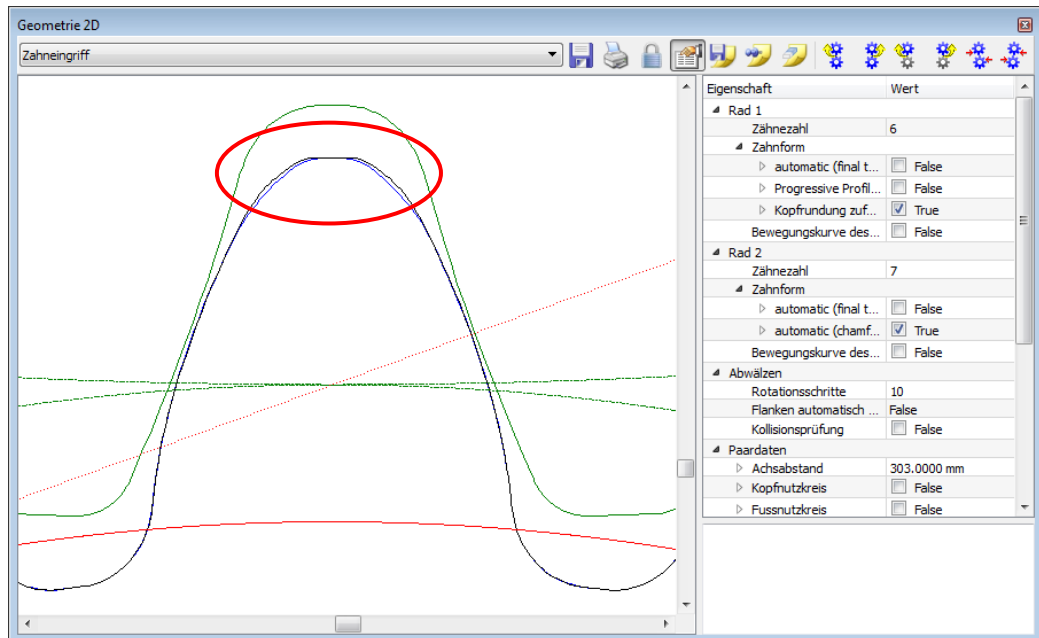


Abbildung 2.20 Vergleich der Zahnkopfmodifikation

Zuerst ist in der Hauptmaske der Reiter „Zahnform“ zu aktivieren. Die gespeicherte, aktive Berechnung hatte im Berechnungsschritt für die „Progressive Profilmodifikation“ den „Faktor für Kopfrundung“ 18 und im Berechnungsschritt „Kopfrundung zufügen“ eine „Kopfrundung“ von $r=1\text{mm}$. Die Berechnung wird nochmals durchgeführt, dabei ist jetzt der „Faktor für Kopfrundung“ 10 und die „Kopfrundung“ beträgt $r=2\text{mm}$.

2.7 Optimierung des Zahnfusses

Die Dauerbruch-Sicherheit wird durch einen grossen Radius im Übergang von der Evolvente in den Fusskreis wesentlich erhöht. Durch die Zahnradherstellung im Abwälzverfahren entsteht auch bei gut gerundetem Kopf des Werkzeuges nicht immer eine optimale Rundung. Durch eine entsprechende Modifikation, die natürlich nur unterhalb des genutzten Evolventenbereichs ausgeführt werden darf, kann die Sicherheit wesentlich gesteigert werden.

Die Modifikation kann SEHR nützlich sein, wenn ein Unterschnitt im Zahnfuss eliminiert werden soll (siehe die untenstehende Abbildung).

Auch diese Modifikation kann von KISSsoft automatisch ausgeführt werden.

Die Eingabe und Berechnung von optimierten Zahnfussrundungen erfolgt innerhalb der Zahnformberechnung über ‚Elliptische Fussmodifikation‘ exakt analog zu den Kopfrücknahmen wie in 2.6. beschrieben.

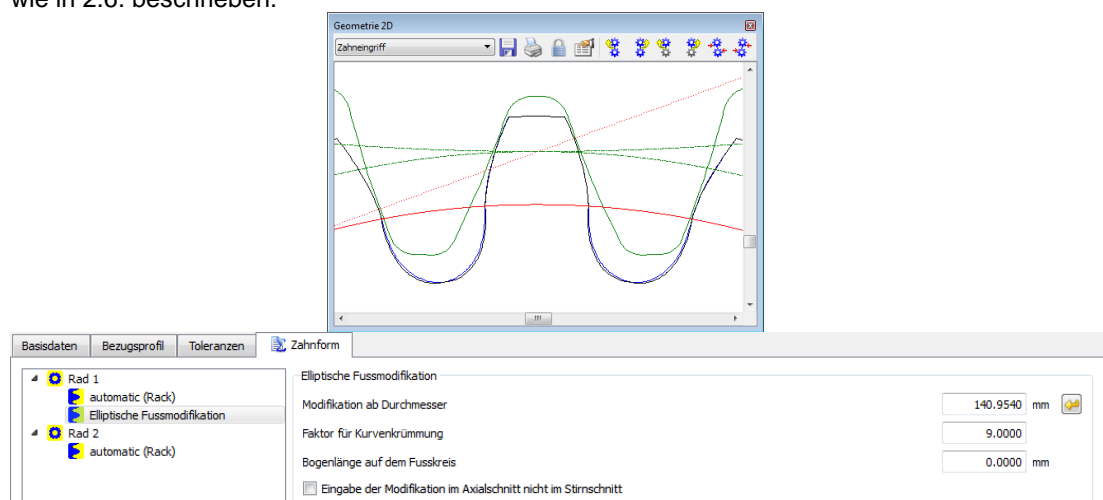



Abbildung 2.21 Fussform ohne (schwarz, mit Unterschnitt) und mit (blau) Optimierung

Wichtig: In Kombination mit einer Einlaufkurve oder Kopfrundung am Gegenrad kann der Beginn der Fussrundung auch oberhalb des rechnerischen Fussformkreises angesetzt werden. In diesem Fall ist unbedingt das Abwälzen zu kontrollieren (siehe nächster Abschnitt).

2.8 Kontrolle des Abwälzens

Nach Durchführung der Zahnformoptimierung ist es sehr empfehlenswert, genau das korrekte Abwälzen der Zahnräder zu überprüfen. Der Kontakt zwischen den Zahnrädern sollte immer im Bereich der eigentlichen Evolvente stattfinden. Insbesondere ein Eindringen des Zahnkopfes im Fussbereich des Gegenrades ist sehr schädlich. Die Kontrolle sollte mit dem minimalen Achsabstand durchgeführt werden (und sicherheitshalber auch mit dem maximalen). Der Achsabstand wird direkt im Fenster eingegeben.

Eine gute Hilfe zur Kontrolle des korrekten Abwälzens ist die Funktion ‚Kollisionsprüfung‘. Durch setzen des Hakens wird die Kollisionsprüfung aktiviert. Anschliessen wird die Flanke rechts oder links mit Hilfe des entsprechend Symbols  ‚Flanke links bzw. rechts‘ angelegt. Berühren sich die Flanken, so wird dort ein schwarzes Viereck angezeigt. Bei einer Kollision ist das Viereck rot.

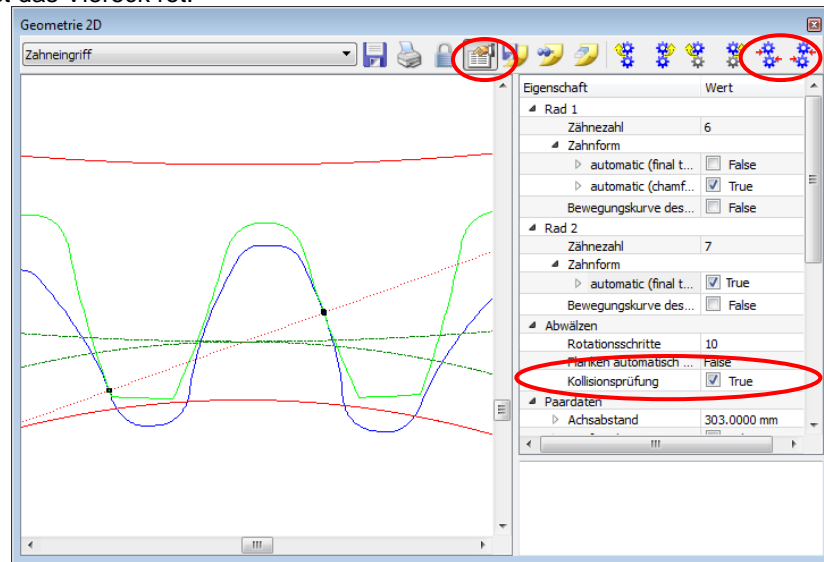



Abbildung 2.22 Kollisionsprüfung aktivieren

Durch Drücken des Symbols  ‚Eigenschaften‘ werden rechts die Grafik Einstellungen eingblendet und man kann die Kollisionsprüfung aktivieren.

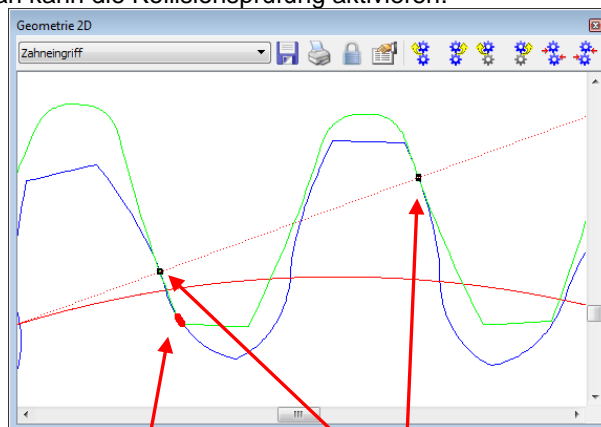


Abbildung 2.23 Kollisionsprüfung

‚Crash‘

Korrekttes berühren

2.9 Kontrolle des Klemmens der Zahnräder

Ein Klemmen der Zahnräder wird durch entsprechende Zahndickenabmasse (wie in Abschnitt 4 beschrieben) vermieden. Wenn das Zahndickenabmass nicht so gross gemacht werden kann, wie theoretisch notwendig (weil z.B. die Rest-Zahndicke viel zu klein würde) oder wenn aus andern Gründen ein Klemmen durch Zusammenfahren der Zahnräder vorkommen kann, so ist eine wichtige Kontrolle zu machen:

Beim Zusammenfahren der Zahnräder sollen diese zwischen den Zahn-Flanken klemmen bevor der Kopf im Fusskreis anstösst (Bei Flankenspiel 0.0 muss noch ein Mindest-Kopfspiel bestehen bleiben.) Dies ist ein wichtiger Hinweis aus der Praxis, da Anstossen im Fuss gravierender ist als Klemmen zwischen den Flanken.

In KISSsoft wird das direkt im Fenster „**Zahneingriff**“ durchgeführt, indem der Achsabstand so lange verkleinert wird bis das Flankenspiel aufgehoben ist. In diesem Zustand muss noch Spiel zwischen Kopf des einen und Fusskreis des andern Zahnrades vorhanden sein!

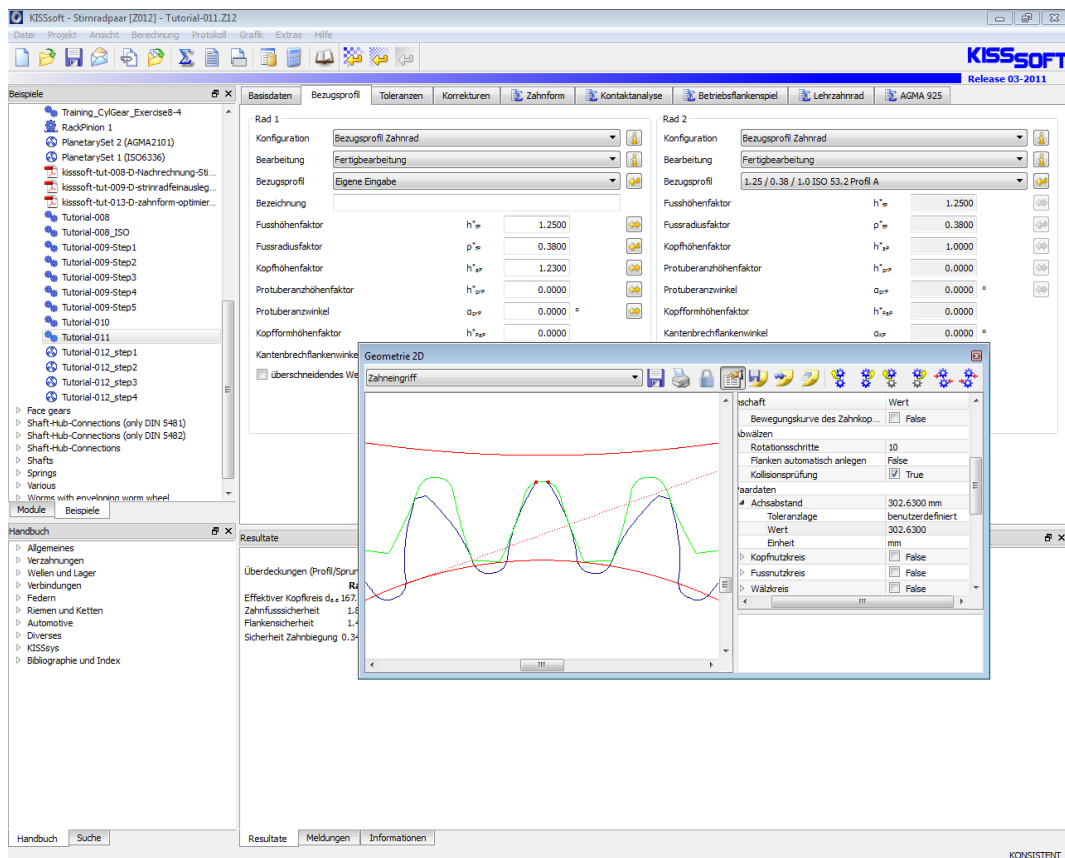


Abbildung 2.24 Hier ein SCHLECHTES Beispiel: Bei aufgehobenem Flankenspiel steht der Kopf von Rad 1 bereits tief im Fussbereich von Rad2!

3 Festigkeitsberechnung

3.1 Einleitung

Für die Auslegung und Optimierung von Zahnrädern ist die Berechnung der Zahnfuß-, Flanken- und Verschleiss-Sicherheit bei der projektierten Lebensdauer von grosser Bedeutung.

Ebenso wie bei Stahl sind bei Kunststoffen die Werkstoffkennwerte (Zahnfuß-Schwellfestigkeit und Flankenfestigkeit) von der Lastwechselzahl abhängig. Hinzu kommt jedoch eine sehr starke Abhängigkeit von der Temperatur und von der Schmierungsart (Öl, Fett oder Trockenlauf).

Während bei Stahl für die Zahnfuß-Festigkeitsberechnung ein einziger Wert (z.B. Zahnfuß-Schwellfestigkeit $[\sigma_{Flim}]$ von 17 CrNiMo6: 525 N/mm²) genügt, benötigt man für Kunststoff mehrere Diagramme. In KISSsoft werden diese Daten in Tabellen hinterlegt, je eine für Öl, Fett-Schmierung oder Trockenlauf. Diese Daten werden bei der Berechnung automatisch verarbeitet. Damit können die Werkstoffdaten sehr einfach vom Benutzer modifiziert werden. Hinweise entnehmen Sie unserem Handbuch u.a. in den Kapiteln „Werkstoffe für Zahnräder“, „Kunststoff nach VDI 2545 ...“, „Kunststoffe“.

3.2 Eingabe von eigenen Daten für Kunststoff

Es stehen in KISSsoft einige wenige Kunststoffe in der Materialdatenbank zur Verfügung. Sind eigene Kunststoffdaten bekannt, können diese wie folgt in der KISSsoft Datenbank abgelegt werden, hier am Beispiel des bereits vorhandenen Werkstoffes POM gezeigt:

Datenbanktool über „Extras“-> „Datenbanktool“ starten, Materialdatenbank öffnen, und Daten für Zahnradberechnung aktivieren:

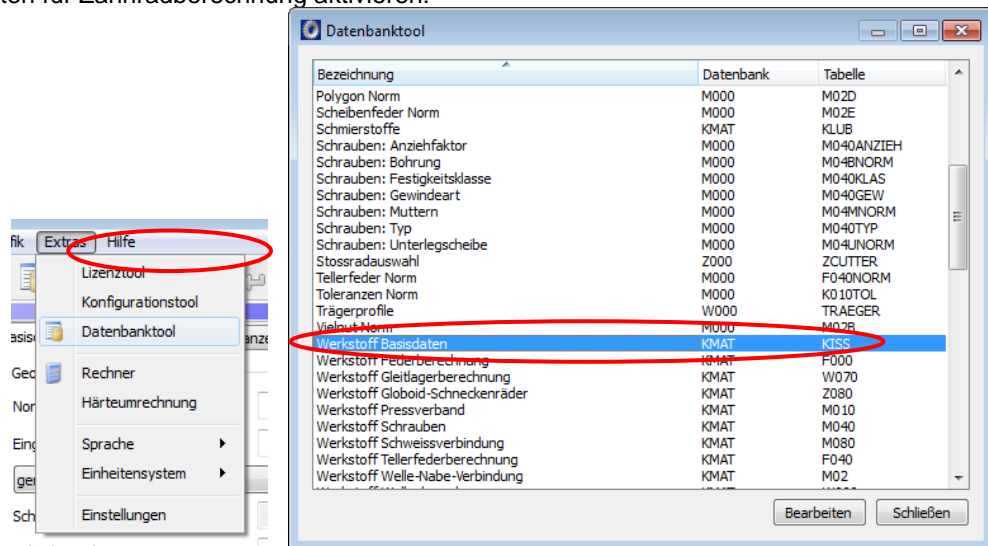


Abbildung 3.1 Öffnen der Zahnradbewerkstoffdatenbank

Soll ein neuer Werkstoff erzeugt werden, muss diese zuerst der Werkstoffdatenbank zu Verfügung gestellt werden. Über „Werkstoff Basisdaten“ werden diese Basisdaten definiert. Durch Drücken von „+“ wird ein neuer Datensatz zum Bearbeiten generiert. Hat man vorher ein Material markiert, werden diese Daten im neuen Datensatz mit übernommen und eine neue Werkstoffbezeichnung wird angelegt.

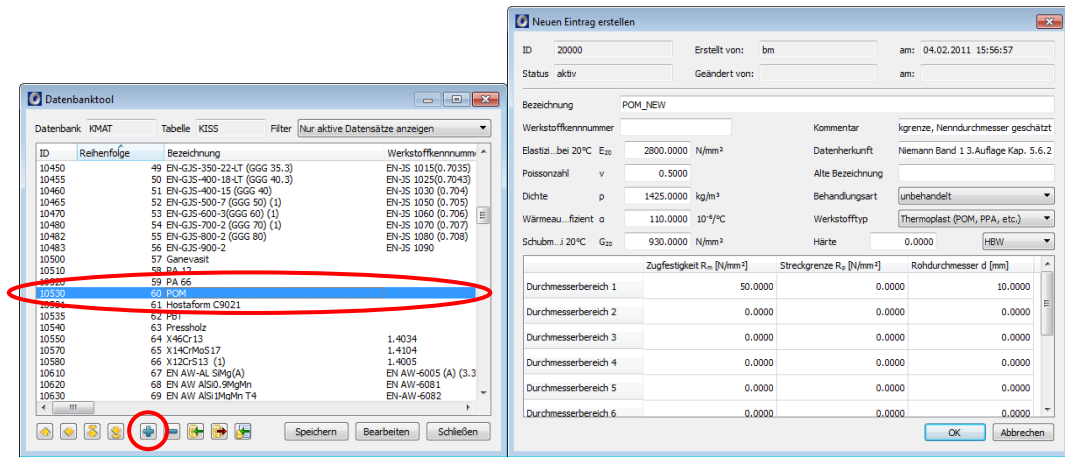


Abbildung 3.2 Generieren eines neuen Datensatzes

Im Folgenden wird am Beispiel des (bereits in KISSsoft vorhandenen) Werkstoffes POM gezeigt, welche Angaben getroffen werden müssen. Es sind dies einmal die „Werkstoff Basisdaten“ und die modulspezifischen Daten hier für „Werkstoff Zahnräder“

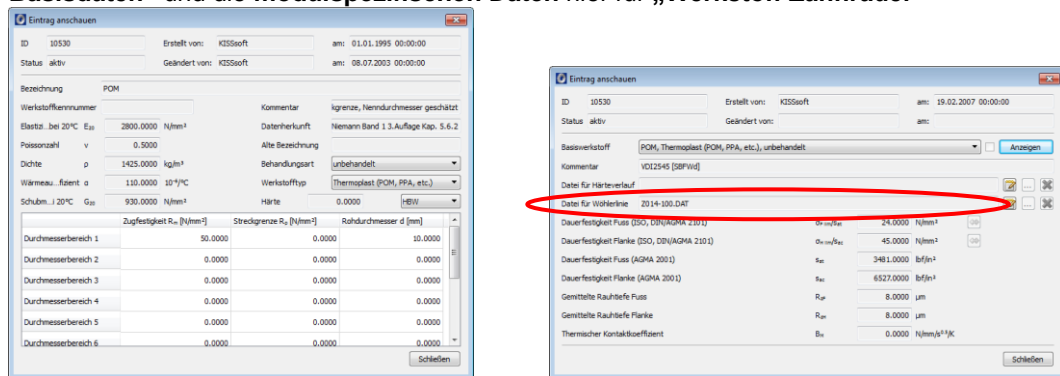


Abbildung 3.3 „Werkstoff Basisdaten“ modulspezifische Daten „Werkstoff Zahnräder“ zum Kunststoff

Die wichtigste Information ist der Eintrag unter „Datei für Wöhlerlinie“, siehe Markierung in Abbildung 3.3. Hier wird der Name der Datei eingetragen, in der temperatur- und schmierstoffabhängige Daten abgelegt sind. Diese Datei ist im Installationsverzeichnis (typischerweise C:\Programme\KISSsoft-03-2011\ext\dat) abzulegen:

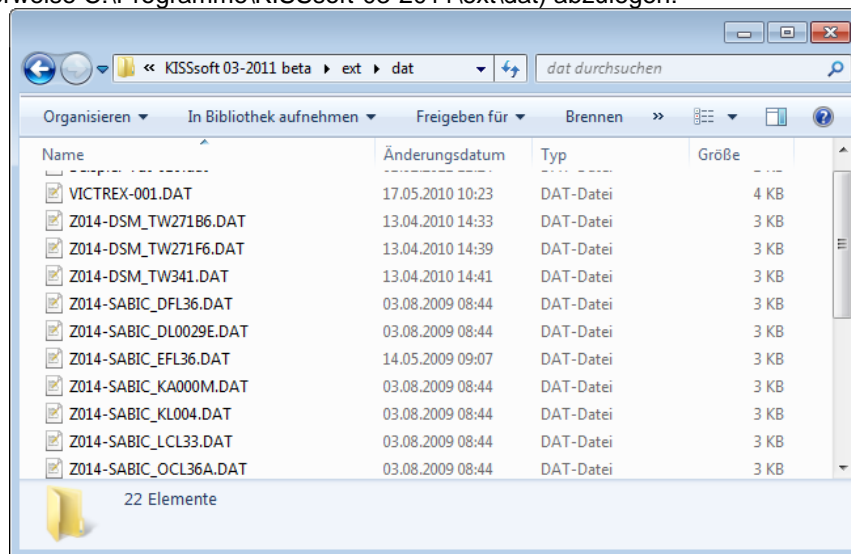


Abbildung 3.4 Speicherort für eigene Kunststoffdaten

Für den neu einzugebenden Werkstoff ist nun eine eigene Datei (Namen frei wählbar) anzulegen. Dazu wird am besten eine vorhandene Kunststoff Datei kopiert (z.B. die Datei Z014-100.DAT für POM), umbenannt und editiert.

Auszug aus Z014-100.DAT (für POM): Elastizitätsmodul
(Eindimensionale Tabelle mit E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur)

```
:TABLE FUNCTION ElastizitatsModul
      INPUT X ZahnTempFuss TREAT LINEAR
DATA
      -20      0      20      40      60      80      100      120
      4400     3950     3500     2950     2400     1800     1400     950
END
```

Auszug aus Z014-100.DAT (für POM): Flankenfestigkeit bei Ölschmierung
(Zweidimensionale Tabelle mit sig.Hlim in Abhängigkeit der Temperatur: Spalten und der Lastwechselzahl: Zeilen)

```
-- Daten für Flankenfestigkeit bei Ölschmierung
-- Aus Niemann, Bild 22.4/4, für PA66, ölgeschmiert
:TABLE FUNCTION FlankenSigHNOel
      INPUT X ZahnTempFlanke TREAT LINEAR
      INPUT Y Lastwechsel     TREAT LOG
DATA
      20      40      60      80      100      120
0      120     115     108     99      91      76
1E5    120     115     108     99      91      76
1E6    95      90      85      78      68      57
1E7    70      67      63      58      50      40
1E8    52      50      47      44      37      28
1E9    45      42      40      38      32      25
1E10   43      41      38      36      30      24
1E11   43      41      38      36      30      23
1E99   43      41      38      36      30      23
END
```

3.3 Festigkeitsberechnung mit Berücksichtigung der effektiven Zahnform

Die Berechnung der Zahnfußfestigkeit nach der Standard-Methode von VDI 2545, DIN 3990, ISO 6336 oder AGMA 2001 verwenden ein vereinfachtes Modell zur Berechnung der Zahnfuß-Spannung, indem in einem vorbestimmten Querschnitt (beim Punkt mit den 30 Grad-Tangente am Zahnfuß bei DIN oder ISO) die Spannung berechnet wird. Dieser Querschnitt kann jedoch bei Zahnrädern mit stark von 20 Grad abweichendem Eingriffswinkel oder bei nachoptimierten Fussrundungen (siehe unten) weit von dem am höchsten beanspruchten Querschnitt wegliegen. Die 'Graphische Methode' in KISSsoft (nach dem von Obsieger in 'Die Konstruktion' beschriebenen Verfahren) führt deshalb die Berechnung, exakt nach den entsprechenden Formeln der gewählten Rechenmethode (YF und YS nach DIN, ISO, AGMA), in ungefähr 50 Querschnitten im ganzen Fussbereich von Mitte Zahnhöhe bis zum Fuss durch und ermittelt so denjenigen Querschnitt mit der grössten Biegespannung. Diese Daten werden dann in die weitere Berechnung übertragen. Damit ergibt sich ein wesentlich genaueres Rechenverfahren, mit welchem problemlos auch nichtevolventische Zahnformen berechnet werden können. Siehe dazu auch die betreffenden Kapitel in unserem Handbuch.

Diese 'Graphische Methode' wird in KISSsoft wie folgt aktiviert: Bei der Eingabe der Festigkeit wird rechts auf Details geklickt um unter "**Berechnung Zahnformfaktor YF und YS**" in der Drop down Liste „nach grafischer Methode“ auszuwählen.

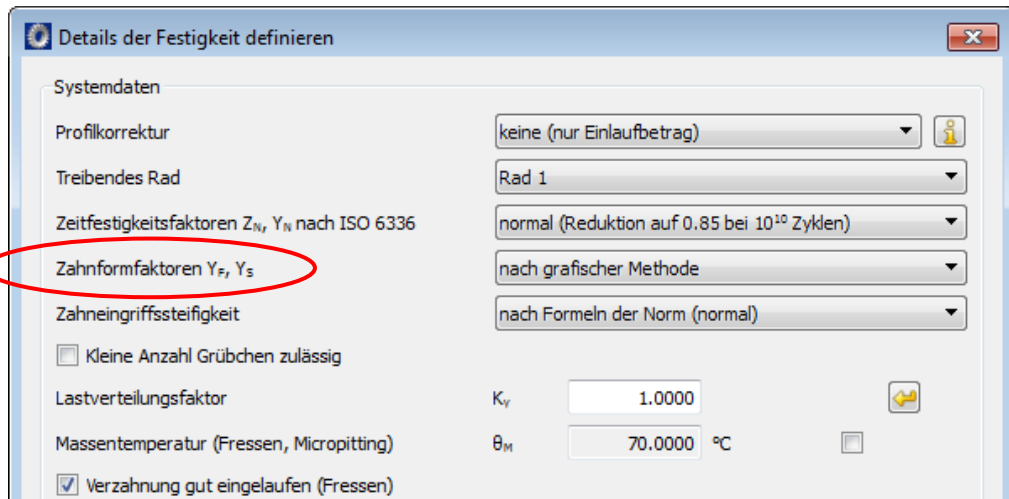


Abbildung 3.5 Aktivieren der Festigkeitsberechnung nach grafischer Methode.

Nun wird bei jeder Berechnung automatisch zuerst die Zahnform berechnet und daraus Y_S und Y_F abgeleitet.

KISSsoft erlaubt auch die graphische Darstellung der Zahnfußspannung im Zahnfuß. Dazu unter dem Reiter „**Kontaktanalyse**“ die gewünschten Einstellungen eingeben und anschliessend berechnen.

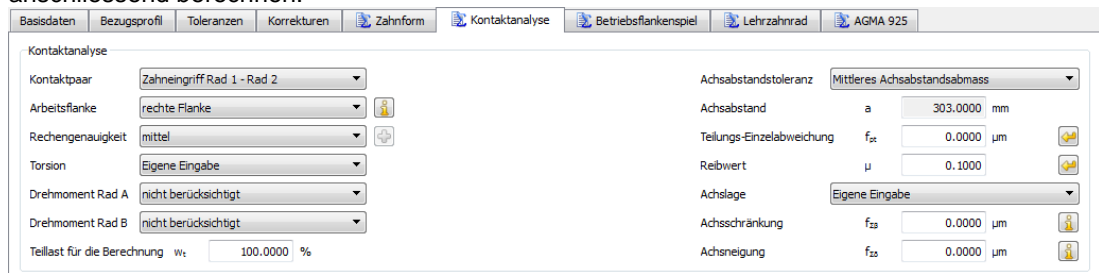


Abbildung 3.6 Berechnung der Kontaktanalyse

Anschliessend kann unter „**Grafik**“ → „**Kontaktanalyse**“ die gewünschte Grafik gewählt werden, wie in unserem Beispiel der Spannungsverlauf 2D.

Hier sehen Sie in dunkelblau und grün die effektive Zahnfußspannung σ_F in Rad 1 und Rad 2 während des Eingriffs. Hellblau wird der Verlauf der Hertzschen Pressung während des Eingriffs dargestellt.

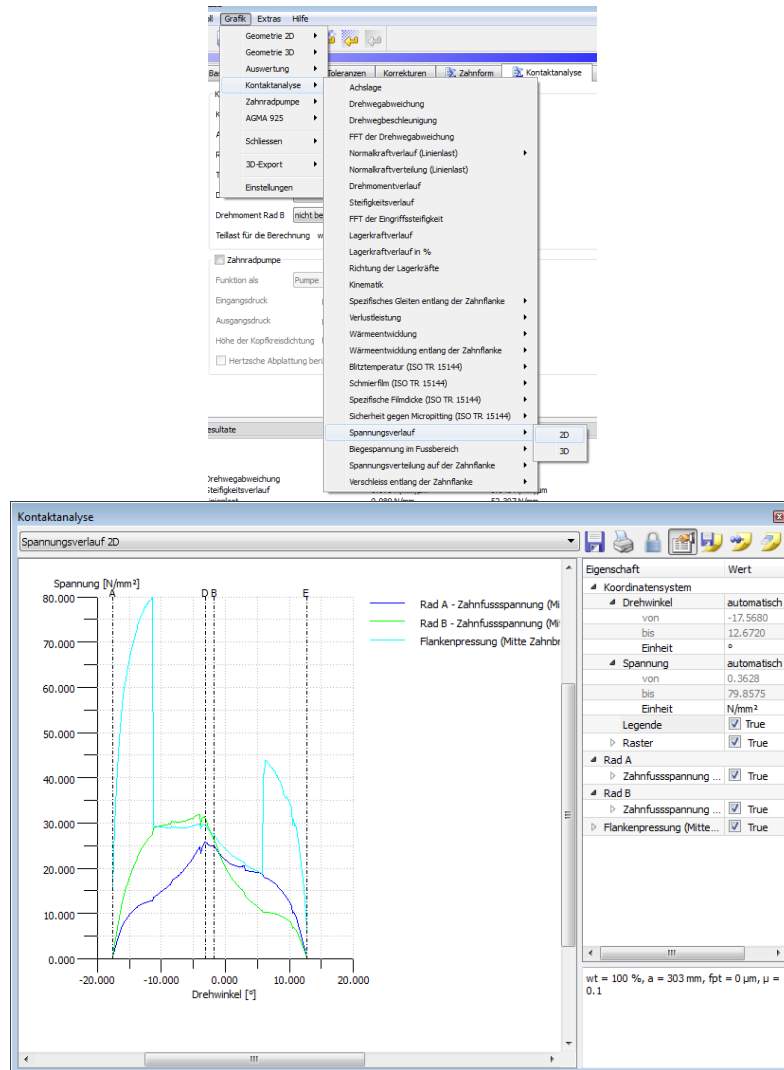


Abbildung 3.7 Zahnfussspannungen und Hertzische Pressung, Verläufe über einen Zahneingriff am Beispiel der Datei „Tutorial-011.Z12“ mit Modifikationen (Progressiver Profilverrundung „Faktor für Kopfrundung“ 10 und die „Kopfrundung“ $r=2\text{mm}$)

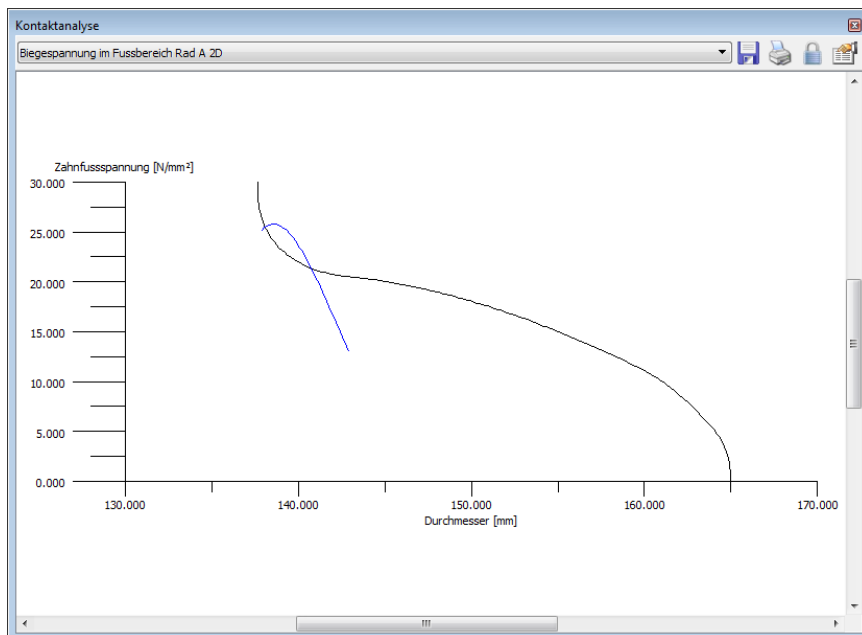


Abbildung 3.8 Zahnfussspannungen, Verlauf im Zahnfussbereich

4 Festlegen der Zahndickenabmasse

4.1 Einleitung

In der Feinwerktechnik sind die relativen Abmasse (Abmass/Zahndicke) üblicherweise sehr viel grösser als bei Zahnräder mit Modul 1.0 und grösser. Da die relative Achsabstandstoleranz gross und die erreichbare Verzahnungsqualität tief ist, müssen die Abmasse gross genug gewählt werden, um Klemmen im Betrieb zu vermeiden. Dazu kommt noch die Tendenz vieler Kunststoffe im Laufe der Zeit Wasser aufzunehmen und zu Quellen.

Es ist deshalb erfahrungsgemäss sehr zweckmässig, als ersten Schritt bei einer Auslegung die notwendigen Abmasse zu bestimmen. Es nützt ja nichts eine Zahnform detailliert zu optimieren (wie anschliessend beschrieben) und dann hinterher festzustellen, dass durch das grosse Abmass die sorgfältig optimierte Zahndicke am Kopf ‚aufgefressen‘ wird!

Die Bestimmung der Abmasse erfolgt nach der Methodik der DIN3967. Dazu müssen die Betriebstemperaturen und die Wärmedehnungskoeffizienten von Zahnrädern und Gehäuse bekannt sein. Ausserdem sollte das Quellen mitberücksichtigt werden, hier ist vor allem Polyamid kritisch (bis zu 2% Wasseraufnahme).

4.2 Berechnung des Betriebsflankenspiels

In KISSsoft steht eine Beispieldatei für eine Kunststoffzahnradberechnung zur Verfügung, „CylGearPair 2 (Plastic-Deep Tooth Profile)“. Diese Datei ist in der Stirnradpaarberechnung zu öffnen:

Zu beachten sind die gewählten Toleranzen für Rad 1, Rad 2 und der Achsabstand:

The screenshot shows the 'Toleranzen' (Tolerances) tab in the KISSsoft software. It is divided into three main sections: 'Abmasse' (Addendum), 'Achsabstand' (Shaft Distance), and 'Einstellungen' (Settings).

	Rad 1		Rad 2	
Zahndickentoleranz	DIN3967 cd25		DIN3967 cd25	
Zahndickenabmass (oberes/unteres) A_{sn}	-0.0540	-0.0840 mm	-0.0700	-0.1100 mm
Zahnweitenabmass (oberes/unteres) A_{wn}	-0.0515	-0.0801 mm	-0.0668	-0.1049 mm
Normalflankenspiel (min/max) j_n	0.0515	0.0801 mm	0.0668	0.1049 mm
Verdrehflankenspiel (min/max) j_t	0.0540	0.0840 mm	0.0700	0.1100 mm
Kopfkreisabmass (oberes/unteres) A_{sa}	0.0000	-0.0100 mm	0.0000	-0.0100 mm
Fusskreisabmass (oberes/unteres) A_{sf}	-0.1713	-0.2664 mm	-0.2220	-0.3489 mm

Achsabstand

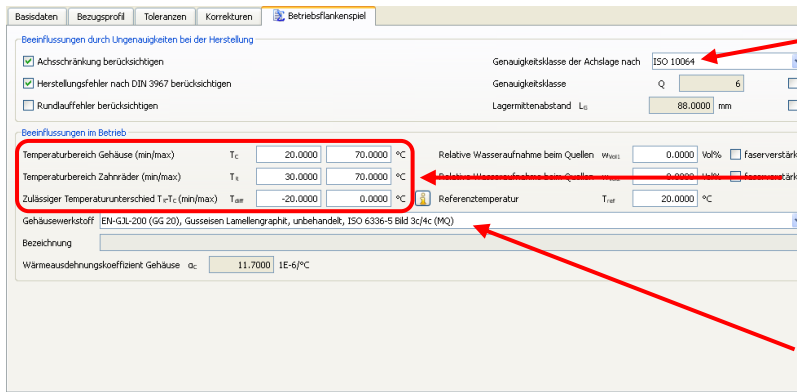
Achsabstandstoleranz	ISO 286 Abmass js6	
Achsabstandsabmass (oberes/unteres) A_s	0.0095	-0.0095 mm

Einstellungen

Messzähnezahl Rad 1 k_1	3	Messzähnezahl Rad 2 k_2	8
Messkörperdurchmesser Rad 1 D_{M1}	2.5000 mm	Messkörperdurchmesser Rad 2 D_{M2}	2.1000 mm

Abbildung 4.1 Vorgewählte Toleranzen für Rad 1, Rad 2 und Achsabstand

Bevor nun die Betriebsflankenspielberechnung ausgeführt werden kann, ist mit „ Σ “ (Berechnen) die Verzahnung zu rechnen. Danach kann über den Reiter „**Betriebsflankenspiel**“ die Berechnung des Betriebsflankenspiels aufgerufen werden:



Einfluss der Herstellungsgenauigkeit (Achslage)

Einfluss der Temperatur auf Ausdehnung des Gehäuses und der Radkörper

Gehäusewerkstoff auswählen

Abbildung 4.2 Einstellungen zur Betriebsflankenspielberechnung.

Dieses Beispiel ist so definiert, dass im Betrieb Klemmen vorkommen kann. Bei der Berechnung des Betriebsflankenspiels erscheint die folgende Warnung:

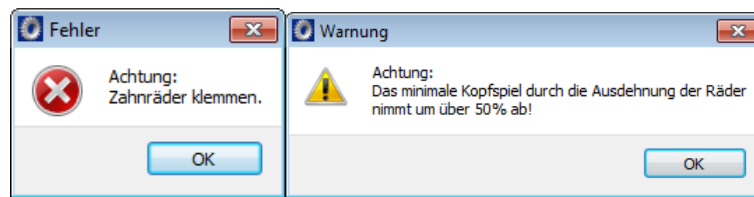


Abbildung 4.3 Fehlermeldungen: „Zahnräder klemmen“ Warnhinweis: Anstossen der Zahnköpfe

Über den Knopf rechts von  (Protokoll erstellen ) wird das folgende Protokoll angezeigt:

Resultate:				
Achsabstandsänderung durch:				
Erwärmung	(mm)	[DaC]	0.037 Gehäuse	
	(mm)	[DaW]	-0.211 Zahnräder	
Spieländerung durch:				
Achsabstandstoleranz	(mm)	[Dja.e/i]	0.006/-0.006	
Quellen durch Wasseraufnahme	(mm)	[DjQ]	0.000	
Erwärmung	(mm)	[Djtheta]	-0.114	
Unparallelität der Achsen	(mm)	[DjSigmabeta]	-0.006	
Verzahnungs-Einzelabweichungen	(mm)	[DjF]	-0.014	
<u>Theoretisches Flankenspiel</u>				
- Verdrehflankenspiel				
	(min.)	(mm)	[jt.i]	0.118
	(max.)	(mm)	[jt.e]	0.201
<u>Abnahme-Flankenspiel</u>				
- Verdrehflankenspiel				
	(min.)	(mm)	[jta.i]	0.102
	(max.)	(mm)	[jta.e]	0.186
<u>Kleinstes Betriebsflankenspiel</u>				
- Temperaturkombination				
Radkörpertemperatur	(°C)	[TR]	70.00	
Gehäusetemperatur	(°C)	[TC]	70.00	
- Verdrehflankenspiel				
	(min.)	(mm)	[jtw.i]	-0.105
	(max.)	(mm)	[jtw.e]	-0.021
- Normalflankenspiel				
	(min.)	(mm)	[jnw.i]	-0.100
	(max.)	(mm)	[jnw.e]	-0.020
- Radialspiel				
	(min.)	(mm)	[jrw.i]	-0.154
	(max.)	(mm)	[jrw.e]	-0.031
- Verdrehwinkel bei festgehaltenem Rad 1				
	(min.)	(°)	[Dphit.i]	0.0000
	(max.)	(°)	[Dphit.e]	0.0000

Abbildung 4.4 Ausschnitt aus dem Protokoll der Betriebsflankenspielberechnung


Die negativen Werte für das Verdrehflankenspiel zeigen, dass das Zahnradpaar klemmen kann.

4.3 Vergrössern des Betriebsflankenspiels

Das Verdrehflankenspiel beträgt im schlimmsten Fall -0.105mm (siehe gelbe Markierung oben). Damit kein Klemmen auftritt, muss dieser Wert grösser als Null werden. Dazu werden nun die Zahndickenabmasse verändert (Zähne werden dünner gemacht). Es werden beide Zähne um 0.06mm dünner gemacht (damit erhöht sich das Verdrehflankenspiel um 0.12mm und sollte damit in jedem Fall positiv bleiben). Dazu wird unter dem Reiter „Toleranzen“ die Zahndickentoleranz auf „Eigene Eingabe“ gesetzt und das Verdrehflankenspiel um je 0.06mm (für das untere und auch das obere Abmass beider Räder) erhöht:

Abbildung 4.5 Ursprünglicher Zustand (Toleranz cd25 nach DIN3967)

Abbildung 4.6 Erhöhung des Verdrehflankenspiels für beide Räder um je 0.1mm

Nach dieser Eingabe muss die Verzahnung wiederum mit  (Berechnen) durchgerechnet werden und die Betriebsflankenspielberechnung kann erneut – wie oben beschrieben – ausgeführt werden. Es erscheint diesmal keine Warnung, dass die Zahnräder klemmen und es wird im Protokoll ein positives Betriebsflankenspiel ausgewiesen:

```

...
Kleinste Betriebsflankenspiel
- Temperaturkombination
  Radkörpertemperatur (°C) [TR] 70.00
  Gehäusetemperatur (°C) [TC] 70.00
- Verdrehflankenspiel
  (min.) (mm) [jtw.i] 0.015
  (max.) (mm) [jtw.e] 0.099
- Normalflankenspiel
  (min.) (mm) [jnw.i] 0.014
  (max.) (mm) [jnw.e] 0.095
- Radialspiel
  (min.) (mm) [jrw.i] 0.022
  (max.) (mm) [jrw.e] 0.145
...
  
```

Abbildung 4.7 Ausschnitt aus dem Betriebsflankenspielberechnungsprotokoll, das Betriebsflankenspiel ist nun positiv

5 Berechnung der Spritzgussform

5.1 Einleitung

Die Sollzahnform, die auf Grund der oben beschriebenen Optimierung entstanden ist, wird unter Berücksichtigung des mittleren Zahndickenabmasses von KISSsoft berechnet. Damit ergibt sich die gewünschte Zahnform, die über die DXF oder IGES-Schnittstelle an ein CAD übergeben werden kann. Diese Kontur kann beispielsweise für die Kontrolle der fertigen Zahnräder im Projektionsverfahren verwendet werden.

Zusätzlich kann rechnerisch die Spritzgussform bestimmt werden. Beim Herstellen von Kunststoffzahnradern in Spritzgussformen entsteht beim Erstarren des Kunststoffs ein gewisser Schwund. Um diesen Schwund zu kompensieren wird deshalb die Spritzgussform etwas grösser gemacht. Dies geschieht durch ein radiales und tangentiales Dehnen der Zahnform. Radiale Dehnung ergibt eine Streckung der Zahnform in radialer Richtung, d.h. eine Verschiebung eines jeden Punktes der Zahnkontur nach aussen auf einer Gerade durch den Radmittelpunkt. Tangentiale Dehnung ergibt eine Verdickung des Zahns und eine entsprechende Verkleinerung der Zahnücke. Für die Berechnung der Spritzgussform in KISSsoft kann die gewünschte radiale Dehnung am Zahnkopf und am Fuss sowie die tangentiale Dehnung in Prozent vorgegeben werden.

5.2 Modifikationen der Spritzgussform um Schwund

Diese Modifikationen werden aktiviert, indem die Zahnformberechnung über den Reiter „Zahnform“ aufgerufen wird und dort zu der bereits vorhandenen Operation ‚automatic (Rack)‘ die weiteren Operationen zugefügt werden.

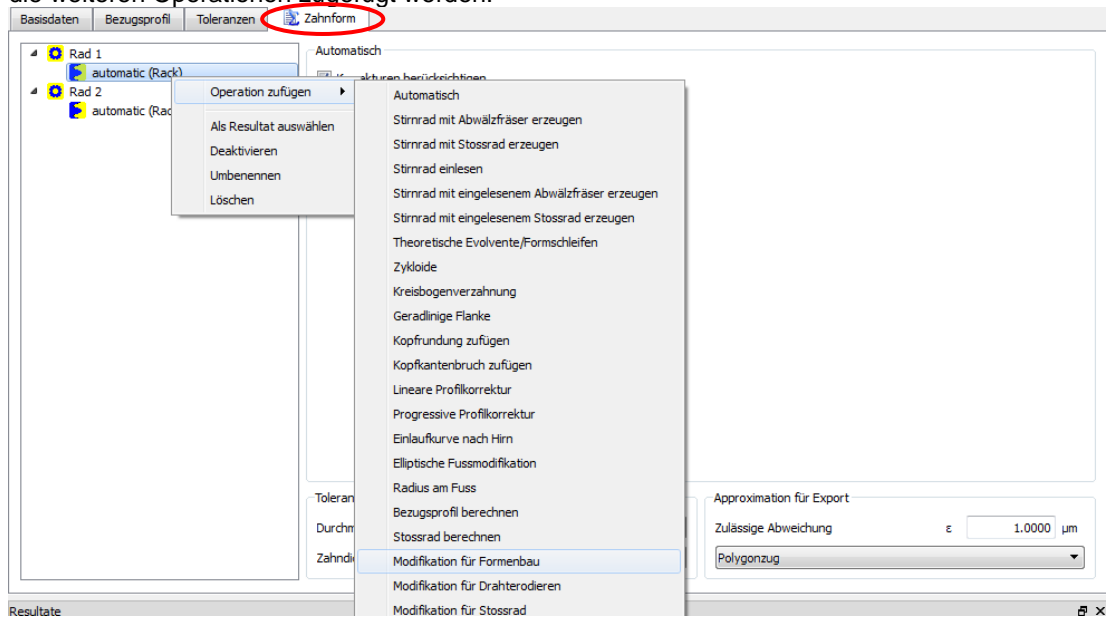



Abbildung 5.1 Zahnformberechnung mit Modifikationen für den Formenbau

Die radialen und tangentiale Dehnungen können nun angegeben werden. Die resultierende Zahnform wird nun mit  berechnet und kann mit „2D“ angezeigt werden:

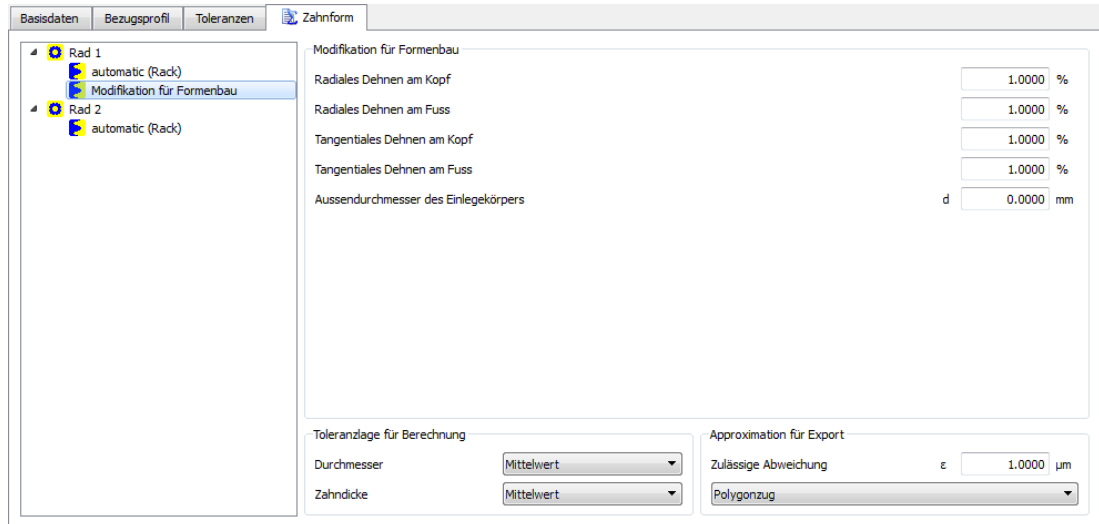
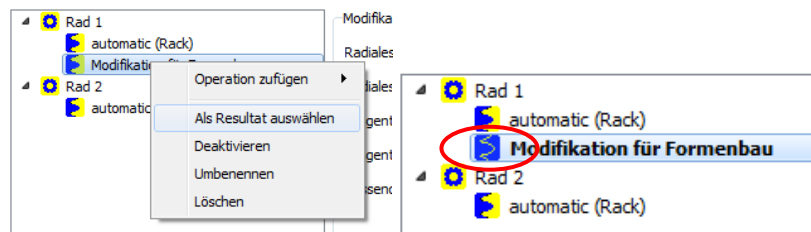


Abbildung 5.2 Aufruf der Darstellung des Zahnradpaares

Hinweis: Um die modifizierte Zahnform anzuzeigen, muss die ‚Modifikation für Formenbau‘ noch aktiviert werden (‚Als Resultat auswählen‘).



Symbol mit Blau/Blau zeigt an, dass diese Operation für die Darstellung verwendet wird!

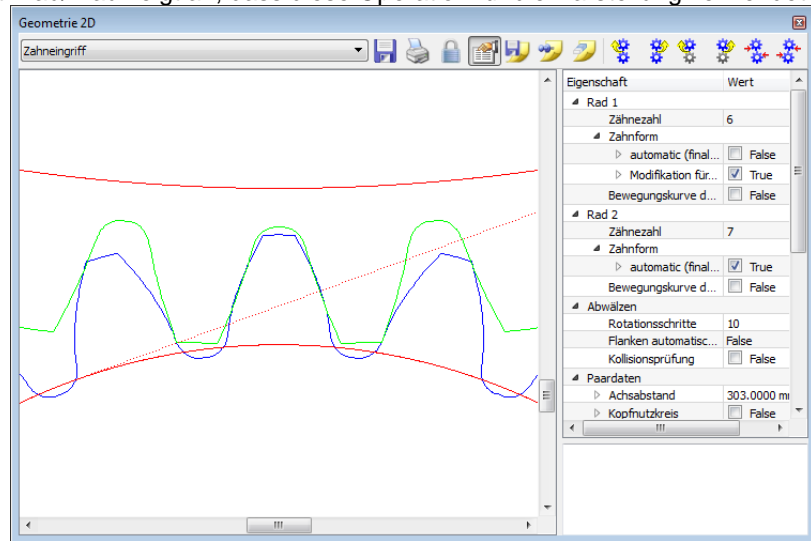


Abbildung 5.3 Darstellung der Zahnräder um den vorgegebenen Schwund vergrößert

Um die Zahnformen für die Herstellung von Formen zu verwenden, ist es sinnvoller, die beiden Zahnräder einzeln zu exportieren. Unter „zulässige Abweichung“ kann ein Wert in μm eingegeben werden, wie gross die Abweichung der Zahnform höchstens sein darf. Darunter kann gleich das Grafikenster herausgelöst werden um die Zahnform von Rad 1 und 2 darstellen.

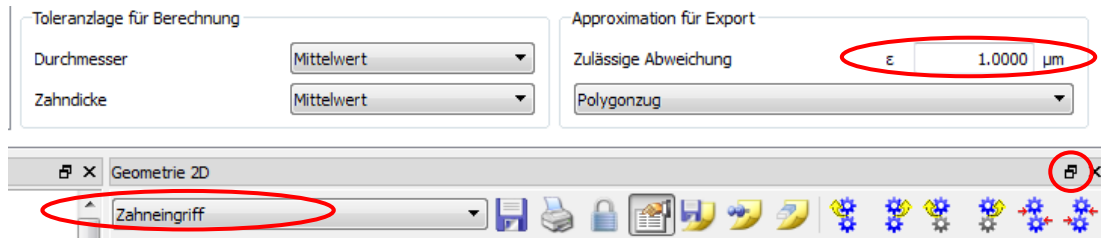


Abbildung 5.4 zulässige Abweichung; Grafikenfenster herauslösen

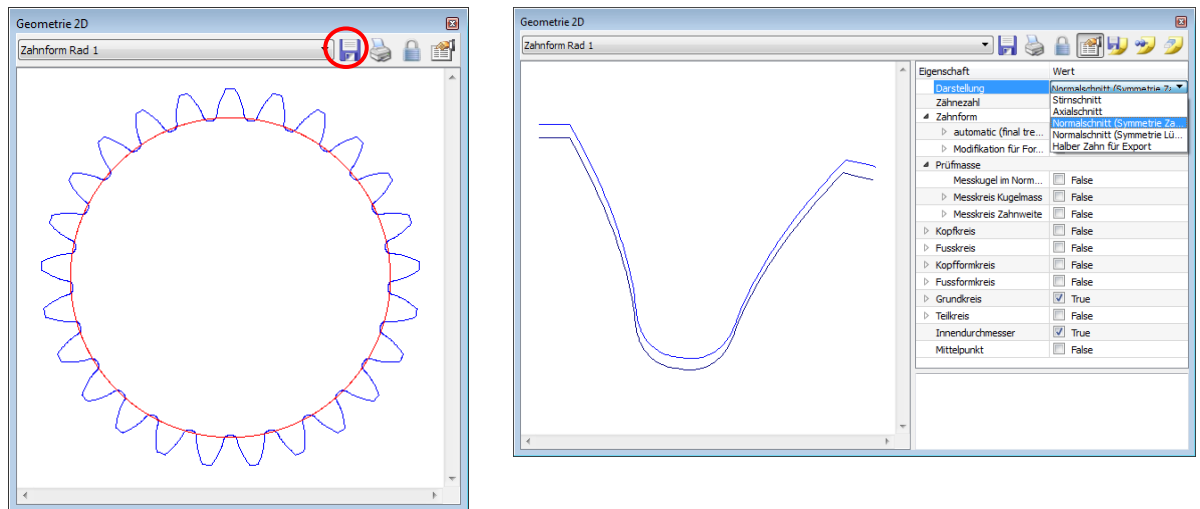


Abbildung 5.5 Aufruf der Zahnformdarstellung für ein einzelnes Rad und Export der Zahnform in DXF oder IGES

Unbedingt den Titel der Abbildung zur Kontrolle beachten: Im linken Bild wird die gedehnte Zahnform (Darstellung mit Modifikation Formenbau) gezeigt, im rechten Bild ist die NICHT modifizierte Zahnform „schwarz“ mit angezeigt.

Mit diesem Vorgehen wird die um den, wie in Abbildung 5.5 angegebenen Schwund, gedehnte (kompensierte) Zahnform dargestellt.

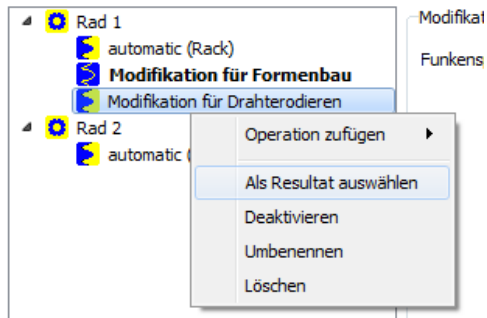
5.3 Darstellung der Elektrode / Funkenspalt

Zusätzlich kann bei der Berechnung der Spritzgussform auch noch der Funkenspalt berücksichtigt werden, wenn die Elektrode bestimmt werden soll. Der Funkenspalt ist der beim Erodieren entstehende Zwischenraum zwischen Elektrode und Werkstück. Die Elektrode muss also um den Funkenspalt dünner ausgeführt werden, im Falle einer zahnradförmigen Elektrode wird der Zahn entsprechend dünner. Falls die Spritzgussform durch Draht-Erodieren hergestellt wird, kann mit dem gleichen Verfahren (Funkenspalt plus Drahradius) auch der Verfahrenweg des Drahtes bestimmt werden.

Damit der Funkenspalt berücksichtigt werden kann, muss die Option ‚Modifikation für Drahterodieren‘ zugefügt werden.



Hinweis: Um die modifizierte Zahnform anzuzeigen, muss die ‚Modifikation für Drahterosion‘ noch aktiviert werden (‚Als Resultat auswählen‘)



Ursprüngliche Zahnform:

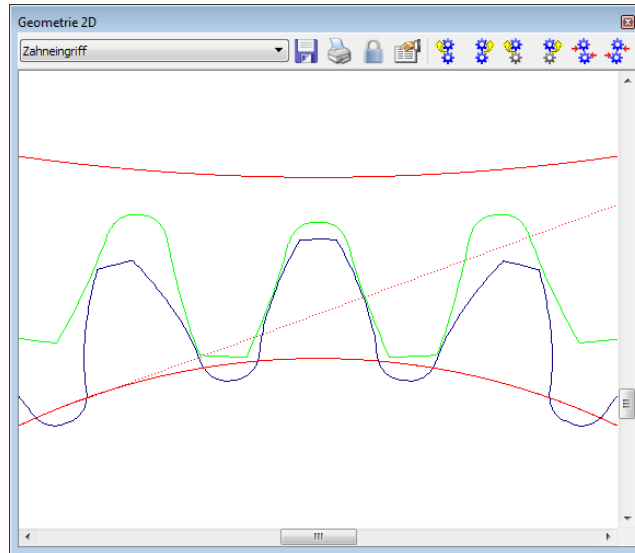
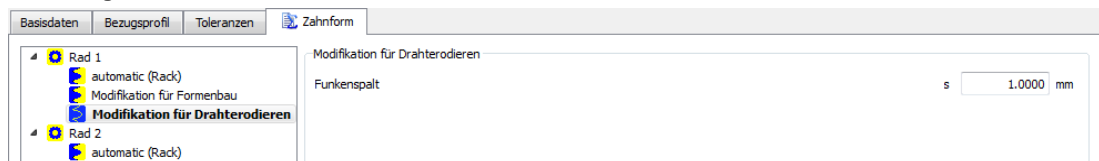


Abbildung 5.6 Zahnform ohne Modifikationen



Wird für den Funktenspalt ein positiver Wert vorgegeben, wird die Zahnform vergrößert (Kompensation des Funktenspalt).

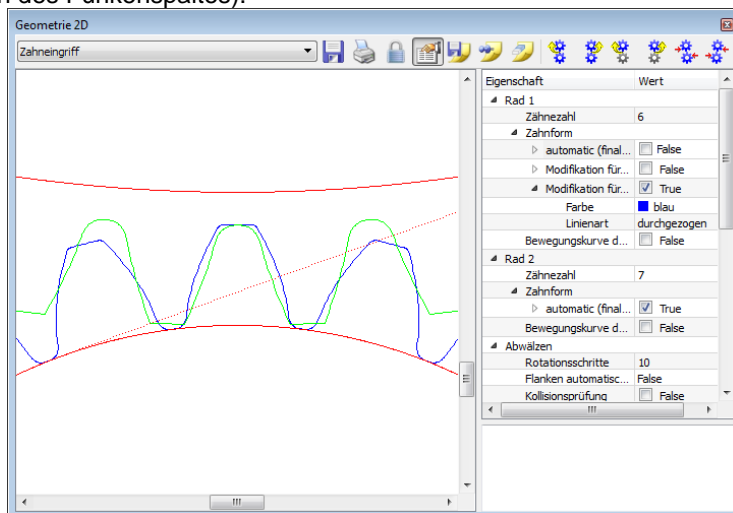
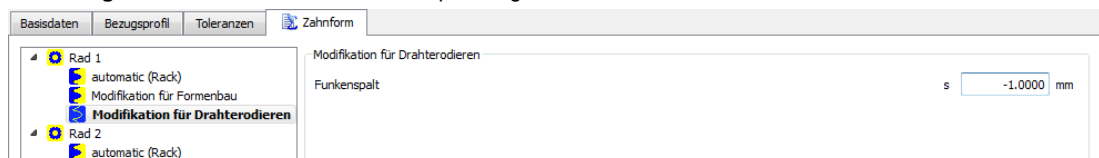


Abbildung 5.7 Zahnform mit 1mm Funktenspalt dargestellt



Wird für den Funkenspalt ein negativer Wert vorgegeben, wird die Zahnform so gezeigt wie wenn mit dem Erodierdraht die unten gezeigte Form gefahren würde.

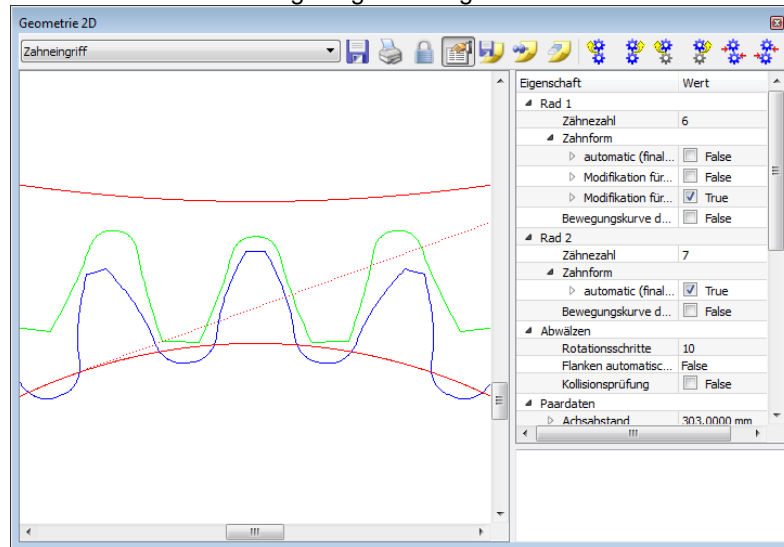


Abbildung 5.8 Zahnform mit -1mm Funkenspalt dargestellt

5.4 Kontrolle des Drahtdurchmessers beim Erodieren

Falls die Spritzgussform durch Drahterosion hergestellt wird, muss kontrolliert werden, ob der vorgesehene Erodier-Draht geeignet ist. Dies geschieht, indem im Reiter **„Zahnform“** nachfolgende Schritte durchgeführt werden. Die Beispieldatei „Tutorial-011.Z12“ ist erneut zu laden. Die nachfolgenden Berechnungsschritte sind im Reiter **„Zahnform“** durchzuführen: Hinzufügen **„Modifikation für Drahterodieren“** mit Funkenspalt negativ, das entspricht dem halben Drahtdurchmesser. Danach nochmals Hinzufügen **„Modifikation für Drahterodieren“** diesmal ist der halbe Drahtdurchmesser positiv. Nun ist noch zu aktivieren **„Als Resultat auswählen“**. In den Grafikeigenschaften sind die Einstellungen für alle Berechnungsschritte auf **„True“** zu stellen.

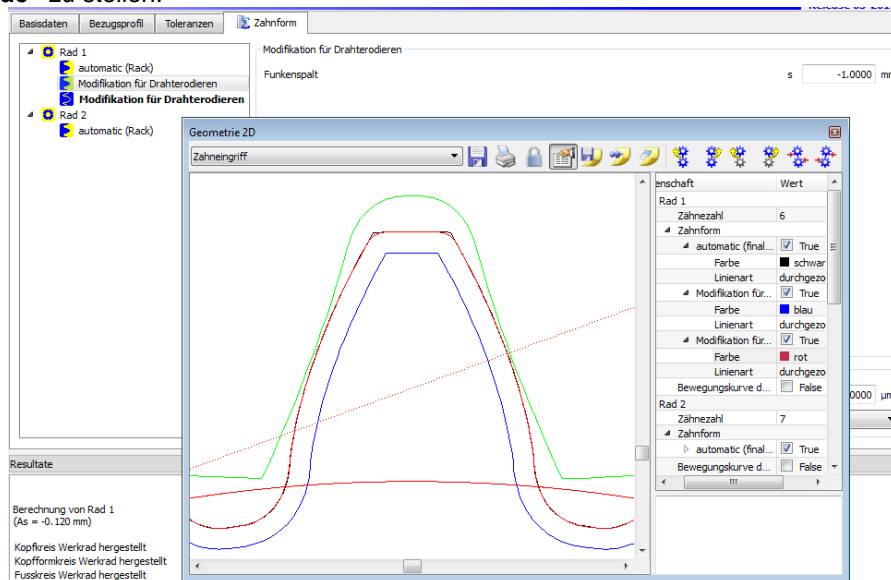


Abbildung 5.9 Eingabe des halben Durchmesser des Erodierdrahtes als „Funkenspalt“

In der Zahnformgeometrie werden jetzt alle Berechnungsschritte dargestellt. Die blaue Kurve zeigt den mit dem Mittelpunkt des Erodierdrahtes gefahrenen Weg. Die rote Kontur zeigt die erzeugte Kontur, die schwarze ist die Sollkontur.

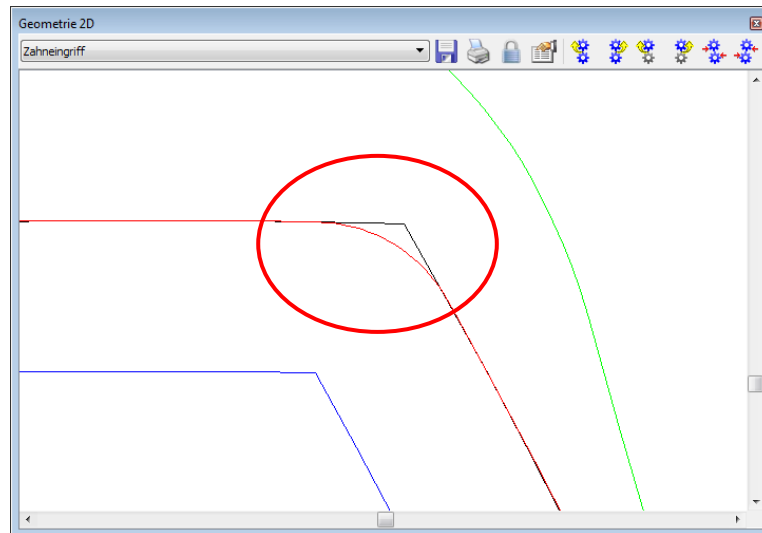


Abbildung 5.10 Kontrolle

5.5 Berechnen der 3D Spritzgussform

3D-Daten können in gewohnter Weise, wie auch beim 2D-Export direkt über das Diskettensymbol aus der 3D-Grafik erzeugt und abgespeichert werden. Dazu stehen die Formate Parasolid oder STEP zur Verfügung.

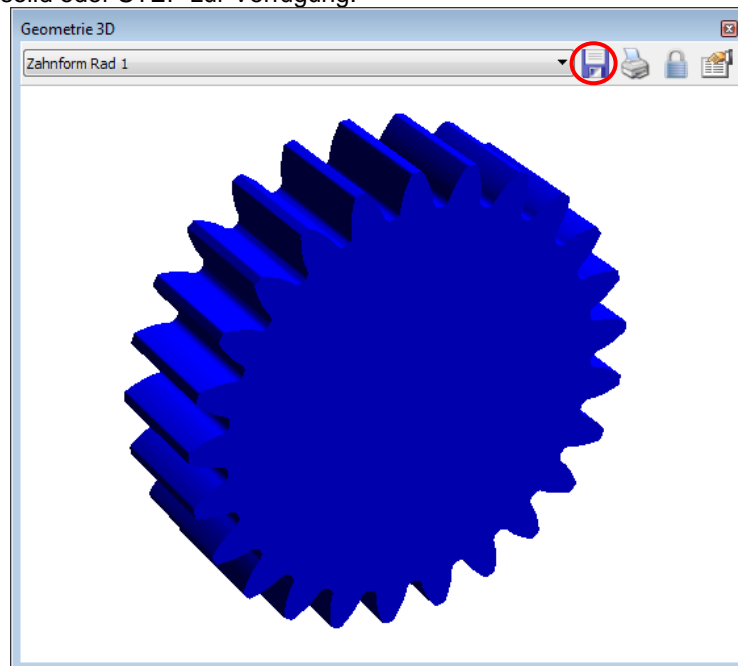


Abbildung 5.11 Geometrieexport