

MESYS Tutorial: Zylindrisches Stirnradpaar 02

1 Einleitung

1.1 Anwendung

In diesem Tutorial wird eine schrägverzahnte Stirnradstufe analysiert. Insbesondere die Fussspannungsberechnung nach ISO 6336-3 und mit FEM wird betrachtet. Dabei werden verschiedene Fussrundungen, Geometrien und Faktoren berücksichtigt und verglichen. Weitere Einflüsse auf die Biegespannungen werden betrachtet. Es wird kein Festigkeitsnachweis geführt, d.h. die zulässigen Spannungen werden nicht betrachtet.

1.2 Zielsetzung

Tutorial	Eigenschaft
Geeignet für	Nutzer, die mit dem Tutorial <i>Stirnradpaar 01</i> vertraut sind.
Voraussetzungen	MESYS Lizenz (Testlizenz, kommerzielle Lizenz).
Lernziele	Erweiterte Eingaben speziell für die Fussfestigkeit kennenlernen. Integrierte FEM-Berechnung verstehen.
Datei	MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02-v25.mCGP.

1.3 Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Anwendung.....	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Inhalt.....	1
1.4	Aufgabenstellung	3
2	Umsetzung, Schritt 1	4
2.1	Start MESYS und Einstellungen	4
2.2	K - Faktoren.....	5
2.3	Konfiguration Resultateübersicht.....	6
2.4	Referenzwerte	7
3	Umsetzung, Schritt 2	8
3.1	Aktivierung der FEM-Berechnung	8
3.2	Resultierende Spannungswerte	9
3.3	Vergleich.....	10

4	Umsetzung, Schritt 3	11
4.1	Eingabe und Berechnung, Protuberanz.....	11
4.2	Fussrundung maximieren.....	13
4.3	Berücksichtigung Bearbeitungszugabe.....	14
5	Umsetzung Schritt 4	16
5.1	Erneute Referenzberechnung	16
5.2	Verwendung Stossrad	17
6	Umsetzung Schritt 5	19
6.1	Erneute Referenzberechnung	19
6.2	Schnitte am Stirnrad	19
7	Umsetzung Schritt 6	23
7.1	Erneute Referenzberechnung	23
7.2	Einfluss Mittelspannung.....	23

1.4 Aufgabenstellung

Schritt	Aufgabe
1	<p>MESYS starten, Datei <i>MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02-ww-v2500.mCGP</i> öffnen, Resultateübersicht anpassen.</p> <p>Berechnung durchführen, Grafiken anordnen, Referenzwerte festhalten.</p>
2	<p>FEM-Berechnungen aktivieren, Spannungswerte bestimmen.</p> <p>Mit Referenzwerten vergleichen.</p>
3	<p>Fussspannungen für verschiedene Einflüsse und Methoden der Herstellung berechnen</p> <ul style="list-style-type: none">• mit und ohne Protuberanz.• mit und ohne Fertigbearbeitungsaufmass.• mit und ohne Schlussbearbeitungskerbe.
4	<p>Fussform und resultierende Spannungen für Herstellung mit Wälzfräser und mit Stosssrad vergleichen.</p>
5	<p>Vergleichende FEM-Berechnung für Berechnung im Normalschnitt und Berechnung an der virtuellen Geradzahnung.</p>
6	<p>Einfluss der Wechselbiegung betrachten.</p>

Abbildung 1-1 Aufgabenbeschreibung.

2 Umsetzung, Schritt 1

2.1 Start MESYS und Einstellungen

MESYS per Doppelklick auf Datei *MesysCylGearPair64.exe* starten. Die Datei befindet sich im Installationsverzeichnis, typischerweise in *C:\Program Files\MESYS 12-2025*. Damit wird die Stirnradpaarberechnung gestartet.

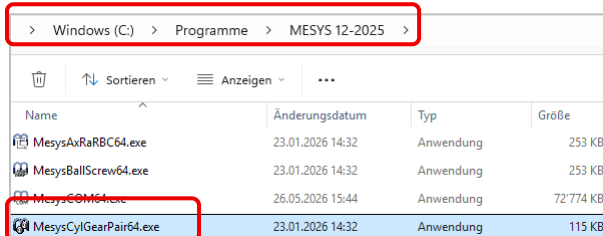


Abbildung 2-1 Start der Stirnradberechnung über die entsprechende *.exe im Installationsverzeichnis.

Über *Datei/Öffnen* die Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02-ww-v2500.mCGP* öffnen.

In *Extras/Settings* sind relevante Einstellungen vorgegeben und selbsterklärend. Die Auswahl *Alle Meldungen anzeigen* sollte gewählt sein, damit gerade zu Beginn der Verwendung von MESYS Fehler, Warnungen und Informationen beachtet werden.

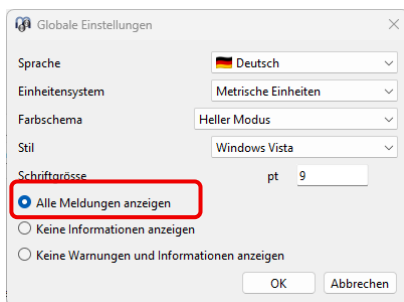


Abbildung 2-2 *Extras/Settings* mit Standardeinstellungen.

Im Tab *Allgemein*, Felder *Projektname* und *Beschreibung* wird die Berechnungsdatei frei kommentiert.

Kritisch ist die Auswahl *Geometrie für Festigkeitsberechnung = Nennmass mit minimaler Zahndicke für YF/YS*. Gemäss ISO 6336-3, Abschnitt 6.1, ist für die Berechnung die kleinste erzeugende Profilverschiebung, also die kleinste Zahndicke, zu verwenden.

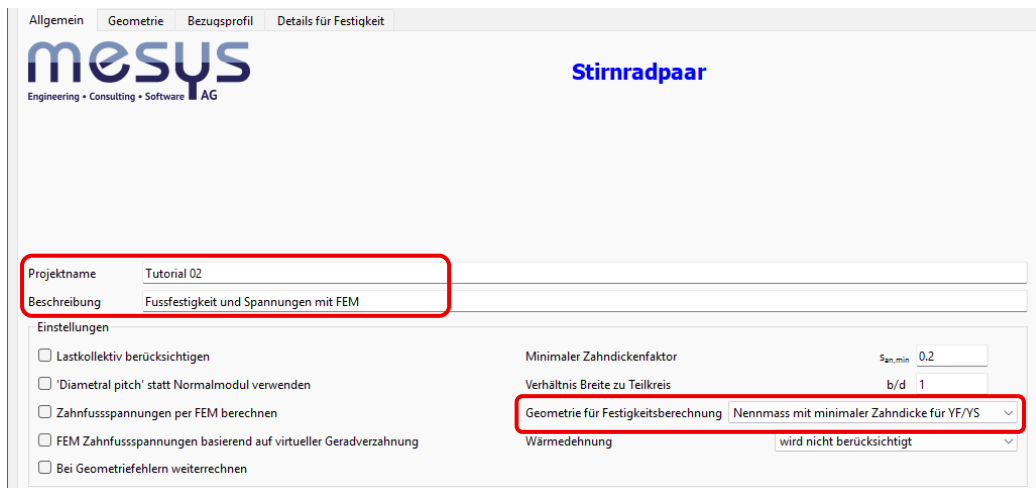


Abbildung 2-3 Tab *Allgemein*, Einstellungen und Projektbeschreibung.

2.2 K - Faktoren

Im Tab *Geometrie* ist ersichtlich, dass die Verzahnungsqualität als ideal angenommen wird, indem die *Toleranzklasse nach ISO 1328* zu 1 R30 gesetzt ist. Ziel ist es, $K_v = 1.00$ und $K_{H\alpha} = 1.00$ zu erreichen, um deren Einfluss auf die rechnerische Fussspannung zu minimieren, respektive auszuschalten. In dieselbe Richtung geht die Eingabe Drehzahl = 1 rpm sowie $K_A = 1.00$. Im Tab *Details für Festigkeit* ist entsprechend der *Lastverteilungsfaktor* $K_v = 1.00$ und der *Breitenlastfaktor* $K_{H\beta} = 1.00$ gesetzt. Dies ist nicht praxisgerecht, führt aber dazu, dass in der Berechnung der Fussspannung die K Faktoren keine Rolle spielen, also $K = 1.00$ sind.

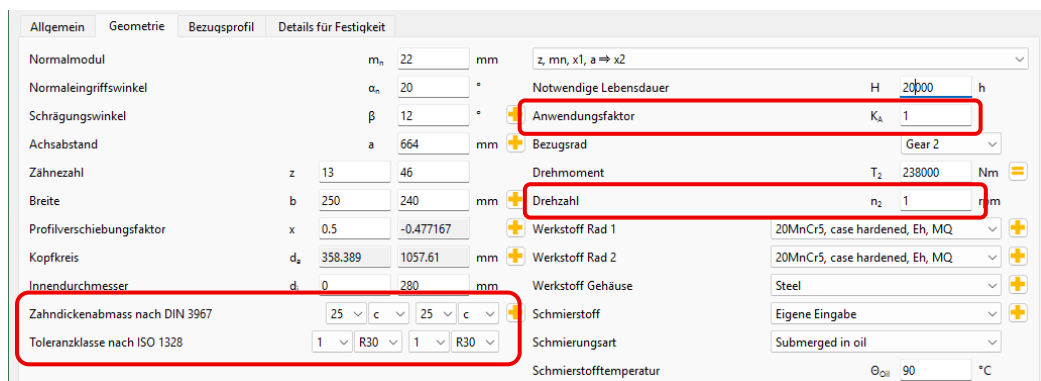


Abbildung 2-4 Tab *Geometrie*, beachte Verzahnungsqualität, Drehzahl und Anwendungsfaktor.

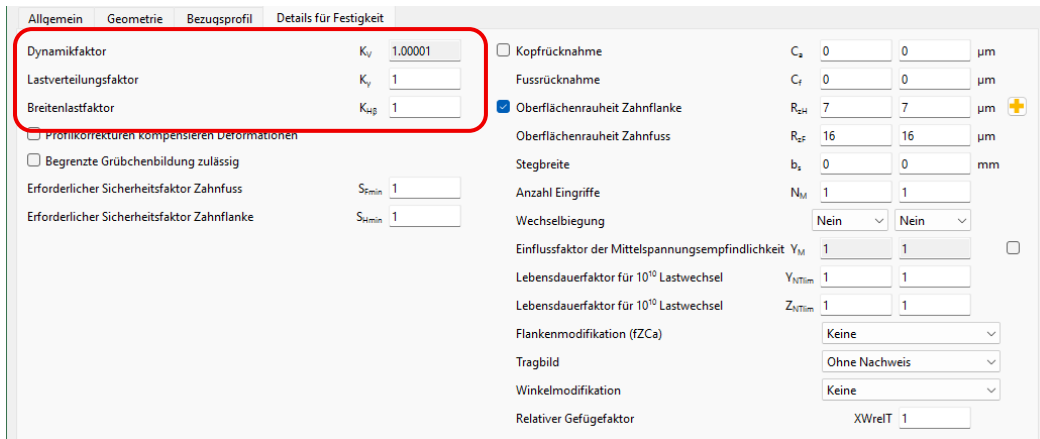


Abbildung 2-5 Tab Geometrie, beachte Dynamikfaktor, Lastverteilungsfaktor, Breitenlastfaktor.

2.3 Konfiguration Resultateübersicht

Für die Darstellung der Fussspannungen wird die Resultateübersicht angepasst. Sie wird im Menü *Extras/Resultateübersicht* geöffnet.

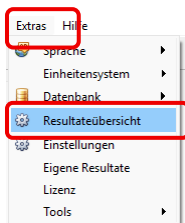


Abbildung 2-6 Menü *Extras/Resultateübersicht*.

Die Tabelle rechts wird über den «x» Knopf gelöscht, um sie für die neue Belegung vorzubereiten.

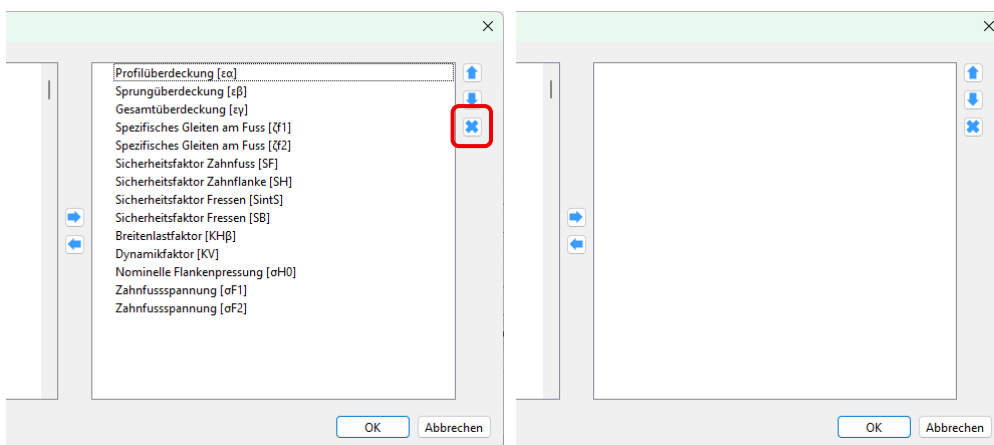


Abbildung 2-7 Löschen der Tabelle über den «x» Knopf.

Um die Zahnfussspannungen und weitere hier interessierenden Eigenschaften darzustellen, werden diese links angeklickt und über den «->» Pfeil in den rechten Teil übertragen.

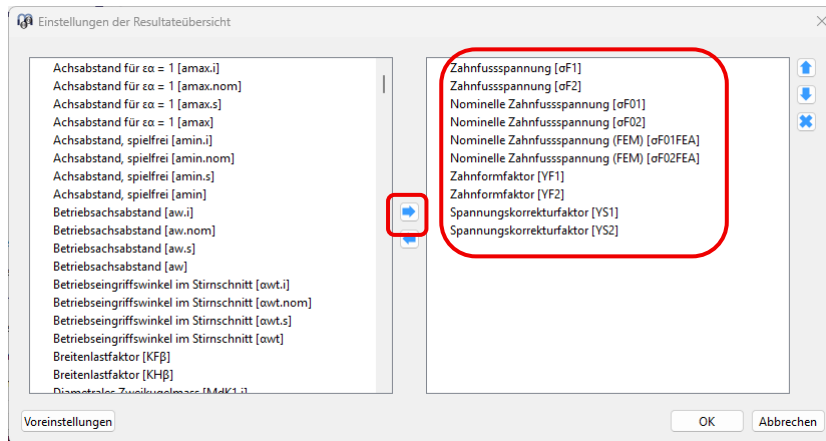


Abbildung 2-8 Auswahl und Übertragung der interessierenden Resultate.

Die ausgewählten Resultate sind dann in der *Resultateübersicht* sichtbar.

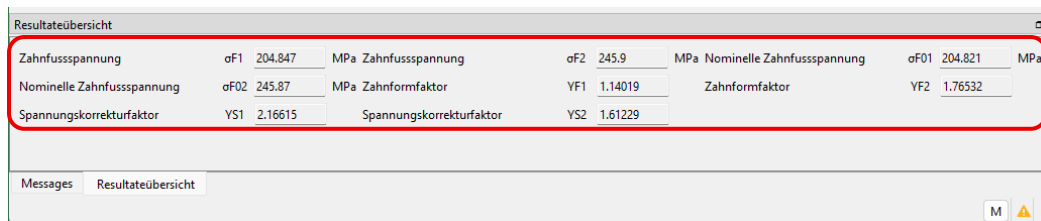


Abbildung 2-9 *Resultateübersicht* mit den ausgewählten Resultaten.

2.4 Referenzwerte

Gemäss ISO 6336-3 gilt, dass die Zahnfußsspannung σ_F gleich der nominellen Zahnfußsspannung σ_{F0} , multipliziert mit den K-Faktoren ist, also $\sigma_F = \sigma_{F0} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{V\beta} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha}$. In diesem Tutorial gilt $\sigma_F = \sigma_{F0}$, da alle K – Faktoren zu $K = 1.00$ gesetzt sind. Da noch keine FEM-Berechnung durchgeführt wurde und damit keine Spannungswerte aus der FEM-Berechnung bekannt sind, werden diese Resultate noch nicht angezeigt. Die folgenden Referenzwerte werden festgehalten.

Eigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Zahnfußsspannung Rad 1	σ_{F1}	204.85	MPa
Zahnfußsspannung Rad 2	σ_{F2}	245.90	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung Rad 1	σ_{F01}	204.82	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung Rad 2	σ_{F02}	245.87	MPa
Zahnformfaktor Rad 1	Y_{F1}	1.14	-
Zahnformfaktor Rad 2	Y_{F2}	1.77	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 1	Y_{S1}	2.17	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 2	Y_{S2}	1.61	-

Tabelle 2-1 Referenzwerte Zahnfuß, Berechnung nach ISO 6336-3. Die geringfügigen Abweichungen zwischen nomineller Zahnfußsspannung und Zahnfußsspannung folgt aus dem berechneten Dynamikfaktor.

3 Umsetzung, Schritt 2

3.1 Aktivierung der FEM-Berechnung

Im Tab Allgemein, den Flag *Zahnfussspannung per FEM berechnen* aktivieren und Berechnung erneut ausführen. Die Zahnfussspannungen für Ritzel und Rad werden dann in der *Resultateübersicht* angezeigt.

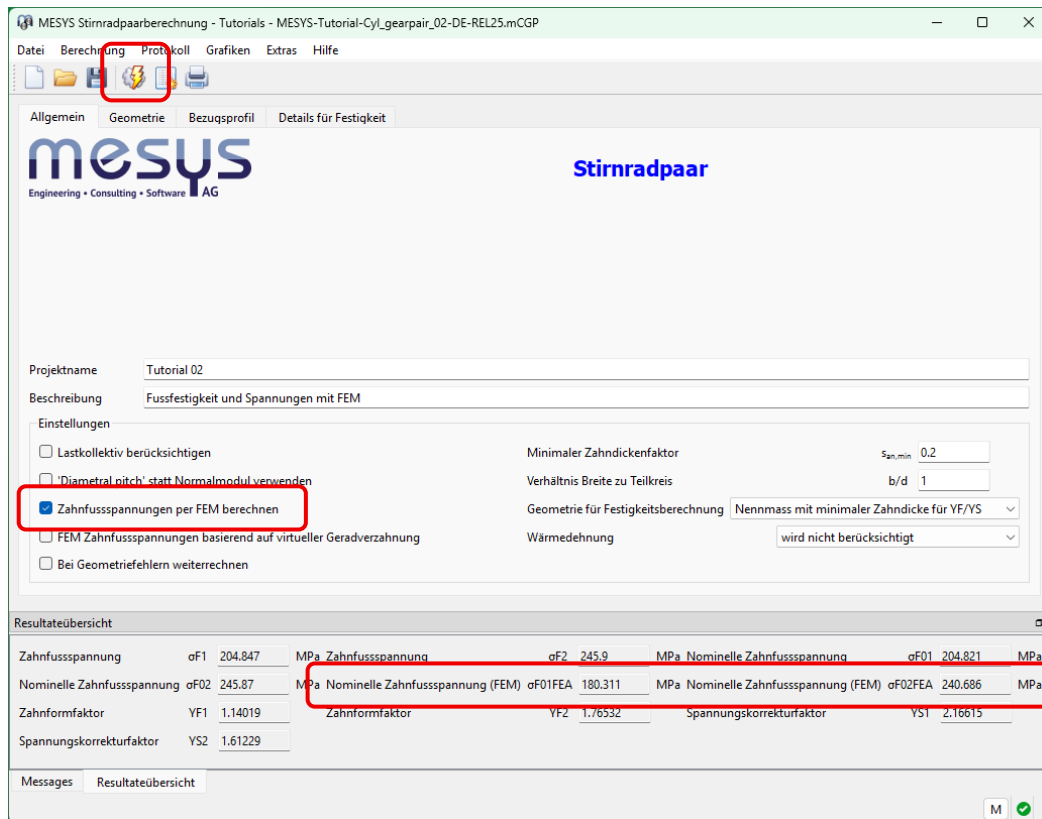


Abbildung 3-1 FEM-Berechnung im Tab *Allgemein* aktivieren, Berechnung durchführen, Zahnfussspannungen aus FEM-Berechnung.

Grafiken mit der Darstellung der ersten Hauptspannungen im Menü *Grafiken/Zahnfussspannungen 2D Zahnrad 1* und *Grafiken/Zahnfussspannungen 2D Zahnrad 1* öffnen. Per rechter Mausklick in der Grafik *Diagramm Optionen* öffnen, ebenso per rechter Mausklick in der Grafik *Grafik/Optionen* öffnen. Einstellungen wie unten gezeigt vornehmen. Mit der Option *Vernetzung anzeigen*, werden die Kanten der finiten Elemente sichtbar. Damit lässt sich das Netz darstellen. Für die Betrachtung der Spannungsverläufe ist es in der Regel sinnvoll, das Netz nicht zu darstellen.

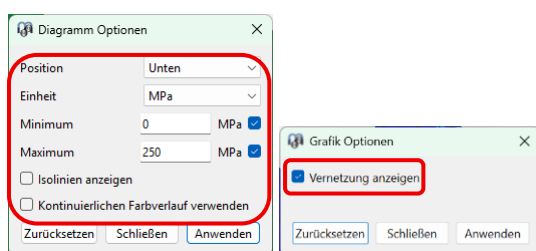


Abbildung 3-2 Optionen für die Darstellung der Spannungsverläufe.

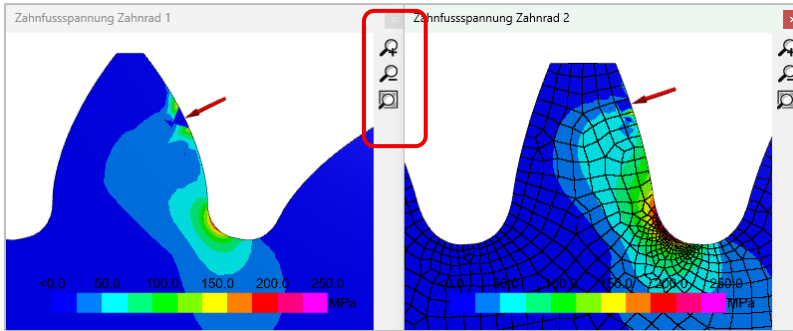


Abbildung 3-3 Erste Hauptspannung Rad 1 und Rad 2. Kräfteinleitung am oberen Einzeleingriffspunkt.

Zoomen erfolgt über das Mausrad oder die entsprechenden Knöpfe wie oben gezeigt. Die Darstellung des gesamten Zahnradsegmentes erfolgt über den Knopf *Grösse anpassen*.

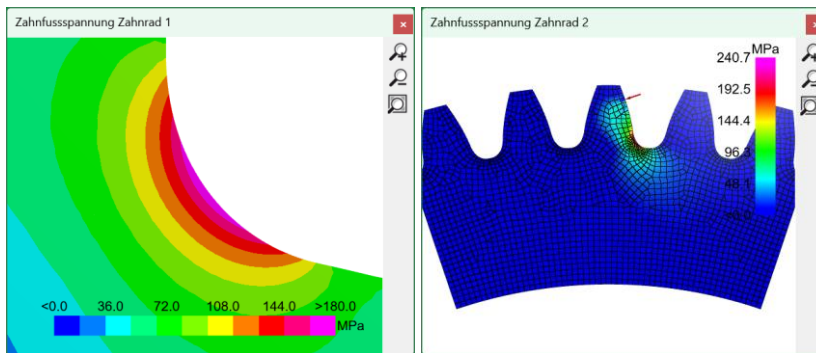


Abbildung 3-4 Links: Zahnfussspannung Zahnrad 1, eingezoomt, Netz nicht angezeigt, Farbbalken nicht kontinuierlich. Rechts: Zahnfussspannung Zahnrad 2, gesamtes Modell.

Über rechter Mausklick und Auswahl *Inhalt einfrieren*, können die Grafiken eingefroren werden. Der Zeitstempel wird im Titelbalken angezeigt.

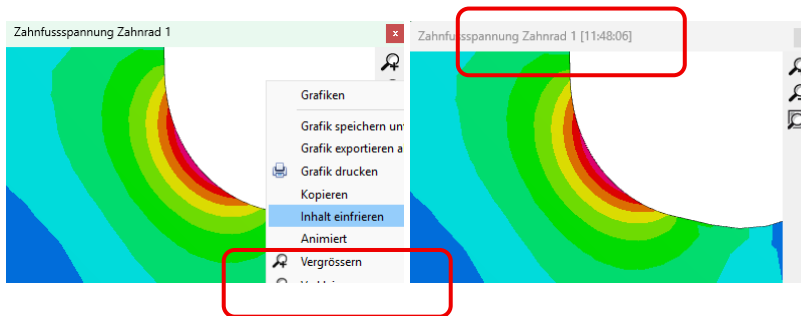


Abbildung 3-5 Links: Einfrieren der Grafik. Rechts: Darstellung der Zeit zu der die Grafik eingefroren wurde.

3.2 Resultierende Spannungswerte

Obige **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist dann wie folgt erweitert.

Eigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Zahnfussspannung Rad 1	σ_{F1}	204.85	MPa
Zahnfussspannung Rad 2	σ_{F2}	245.90	MPa
Nominelle Zahnfussspannung Rad 1	σ_{F01}	204.82	MPa
Nominelle Zahnfussspannung Rad 2	σ_{F02}	245.87	MPa

Zahnformfaktor Rad 1	Y_{F1}	1.14	-
Zahnformfaktor Rad 2	Y_{F2}	1.77	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 1	Y_{S1}	2.17	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 2	Y_{S2}	1.61	-
Nominelle Zahnfußspannung (FEM) Rad 1	σ_{F01FEA}	180.31	MPa
Nominelle Zahnfußspannung (FEM) Rad 2	σ_{F02FEA}	240.69	MPa

Tabelle 3-1 Referenzwerte Zahnfuß, Berechnung nach ISO 6336-3 und Zahnfußspannungen aus der FEM-Berechnung.

3.3 Vergleich

Für Rad 1 ist der Unterschied zwischen dem Resultat aus der Berechnung nach ISO, $\sigma_{F01} = 204.85$ MPa zum Resultat aus der FEM-Berechnung mit $\sigma_{F01FEA} = 180.31$ MPa deutlich. Für das Rad 2 ist der Unterschied mit $\sigma_{F02} = 245.87$ MPa zu $\sigma_{F02FEA} = 240.69$ MPa minimal.

4 Umsetzung, Schritt 3

4.1 Eingabe und Berechnung, Protuberanz

In der Grafik *Grafiken/Zahneingriff* ist der Eingriff sichtbar.

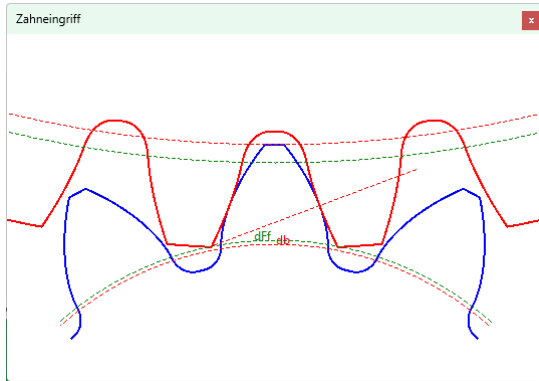


Abbildung 4-1 Zahneingriff.

Im Tab *Bezugsprofil* geben wir nun einen Protuberanzwinkel von $\alpha_{pRP} = 10^\circ$ und eine Protuberanzhöhe von $h_{pRP} = 0.4 \cdot m_n$ ein.

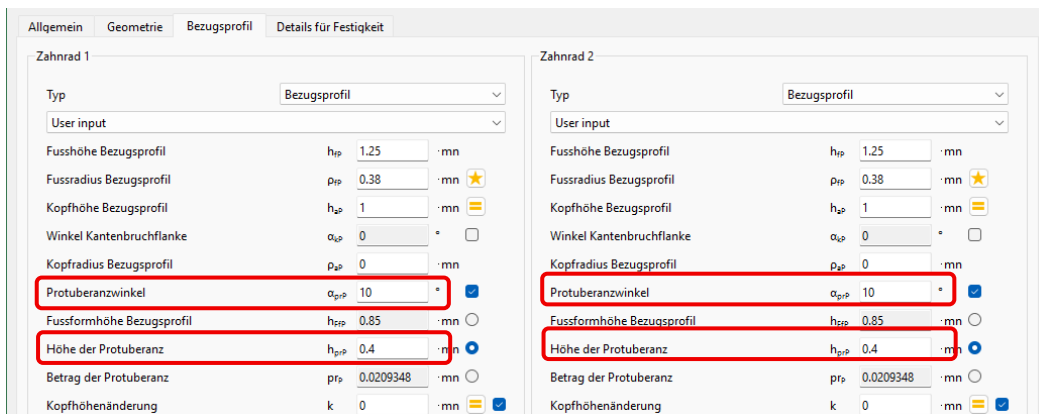


Abbildung 4-2 Eingabe *Protuberanzwinkel* und *Höhe der Protuberanz* im Tab *Bezugsprofil*.

Nach der Berechnung ist der Zahneingriff mit der Protuberanz versehen. In der Grafik *Grafiken/Herstellung Zahnrad 1* ist die Protuberanz am Bezugsprofil des Werkzeuges sichtbar.

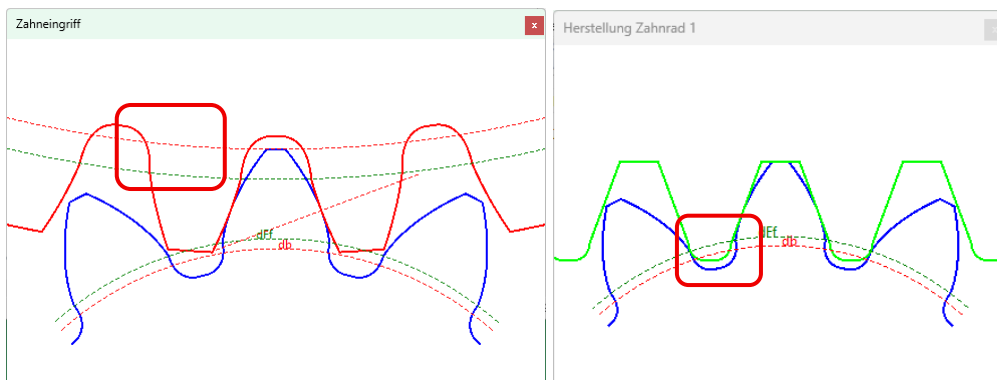


Abbildung 4-3 Links: Eingriff, Zahnräder mit Unterschnitt. Rechts: Eingriff Bezugsprofil Werkzeug zu Zahnrad, Werkzeug mit Protuberanz.

Es gelten die Definitionen gemäss ISO 21771-1 für das Werkzeug analog für das Zahnrad.

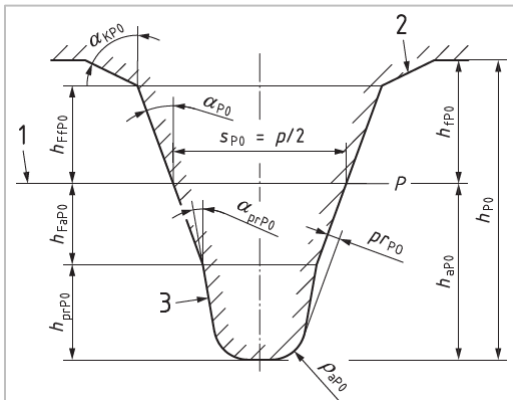


Abbildung 4-4 Bezugsprofil des Vorbearbeitungswerkzeuges mit Protuberanz, nach ISO 21771-1.

Die Berechnung wird durchgeführt. In den Grafiken im Menü Grafiken/Zahnfußsspannung (2D) Zahnrad 1 und 2 finden wir die folgenden Spannungsverteilungen.

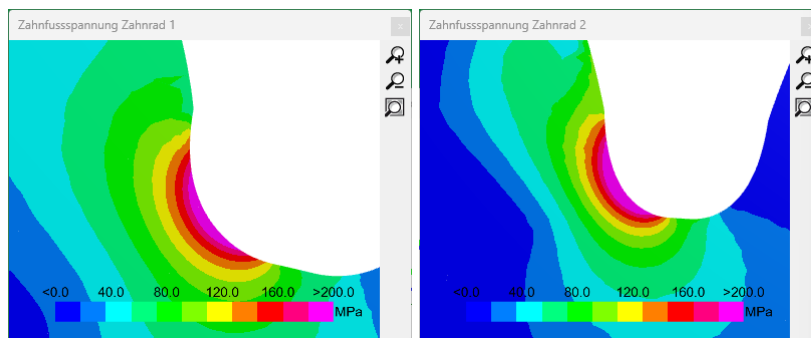


Abbildung 4-5 Zahnfußsspannungen Rad 1 und Rad 2, Farbbalken auf 200 MPa begrenzt.

Die tabellarischen Werte sind nun

Eigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Zahnfußsspannung Rad 1	σ_{F1}	259.533	MPa
Zahnfußsspannung Rad 2	σ_{F2}	266.693	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung Rad 1	σ_{F01}	259.486	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung Rad 2	σ_{F02}	266.646	MPa
Zahnformfaktor Rad 1	Y_{F1}	1.64	-
Zahnformfaktor Rad 2	Y_{F2}	1.98	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 1	Y_{S1}	1.91	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 2	Y_{S2}	1.59	-
Nominelle Zahnfußsspannung (FEM) Rad 1	σ_{F01FEA}	227.16	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung (FEM) Rad 2	σ_{F02FEA}	261.30	MPa

Tabelle 4-1 Berechnung mit Protuberanz, Berechnung nach ISO 6336-3 und Zahnfußsspannungen aus der FEM-Berechnung.

Im Vergleich zur Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sind die mit FEM berechneten Spannungen gestiegen. Interessant ist zu sehen, wie die Fussformfaktoren Y_F gestiegen sind. Dies rührt daher, dass durch die Protuberanz ein Unterschnitt oder allgemeiner eine Reduktion der Zahndicke im kritischen Querschnitt

erzeugt wird. Die Spannungskorrekturfaktoren Y_S sind leicht gesunken da die Rundung nun einen grösseren Radius hat, die Reduktion kann aber den Anstieg der Formfaktoren nicht kompensieren.

Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02_01-ww-v2500.mCGP*

4.2 Fussrundung maximieren

Mit dem «*» Knopf wird der Kopfrundungsradius am Werkzeug, ρ_{aP0} maximiert.

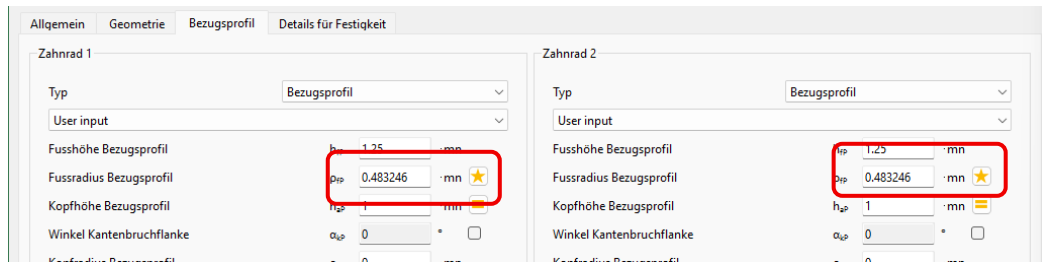


Abbildung 4-6 Kopfrundungsfaktor am Werkzeug maximieren.

Nach der erneuten Berechnung (F5) finden sich die nun tieferen Spannungen und die folgenden Werte.

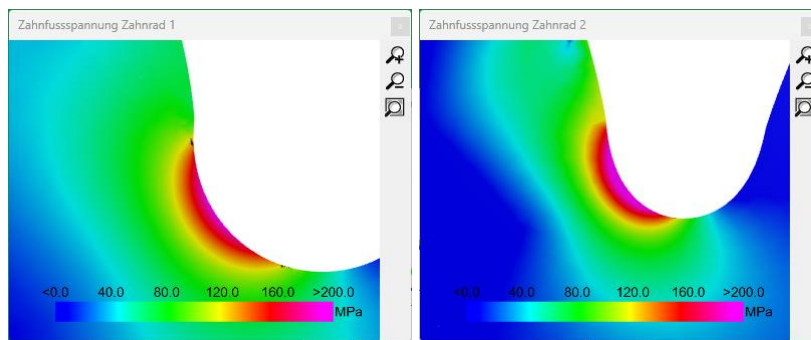


Abbildung 4-7 Fussspannungen bei maximiertem Zahnkopfradius am Werkzeug.

Eigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Zahnfussspannung Rad 1	σ_{F1}	224.15	MPa
Zahnfussspannung Rad 2	σ_{F2}	245.26	MPa
Nominelle Zahnfussspannung Rad 1	σ_{F01}	224.11	MPa
Nominelle Zahnfussspannung Rad 2	σ_{F02}	245.22	MPa
Zahnformfaktor Rad 1	Y_{F1}	1.45	-
Zahnformfaktor Rad 2	Y_{F2}	1.82	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 1	Y_{S1}	1.87	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 2	Y_{S2}	1.56	-
Nominelle Zahnfussspannung (FEM) Rad 1	σ_{F01FEA}	196.38	MPa
Nominelle Zahnfussspannung (FEM) Rad 2	σ_{F02FEA}	253.57	MPa

Tabelle 4-2 Berechnung mit Protuberanz und maximierter Zahnkopfrundung am Werkzeug, Berechnung nach ISO 6336-3 und Zahnfussspannungen aus der FEM-Berechnung.

Die Reduktion der Spannungen von $\sigma_{F01FEA} = 227.16$ zu $\sigma_{F01FEA} = 196.38$ bei Rad 1 und von $\sigma_{F01FEA} = 261.30$ zu $\sigma_{F01FEA} = 253.57$ bei Rad 2 ist unterschiedlich, sie fällt bei Rad 1 deutlicher aus.

Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02_02-ww-v2500.mCGP*

4.3 Berücksichtigung Bearbeitungszugabe

Im Tab Bezugsprofil wird der Typ auf *Fräser* umgeschaltet und die Bearbeitungszugabe $q = 0.01 \cdot m_n$, die Kopfhöhe des Fertigbearbeitungswerkzeuges $h_{aPOF} = 1.10 \cdot m_n$ sowie der Kopfradius des Fertigbearbeitungswerkzeuges $\rho_{aPOF} = 0.05 \cdot m_n$, für Rad 1 und Rad 2 eingegeben.

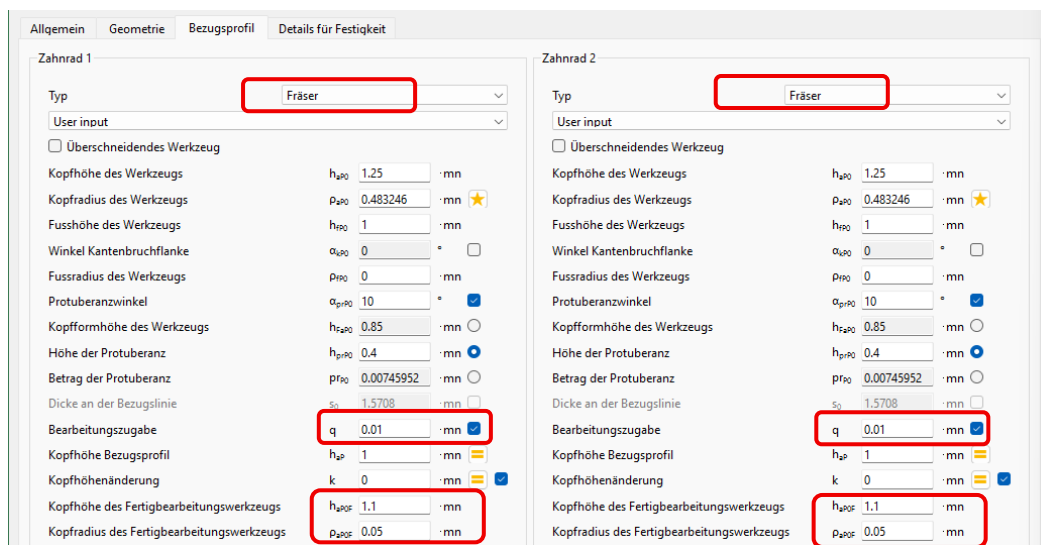


Abbildung 4-8 Eingabe für Fertigbearbeitung.

Nach der Berechnung sind Fertigbearbeitungskerbent sichtbar da die Protuberanz im Vergleich zur Bearbeitungszugabe zu klein ist.

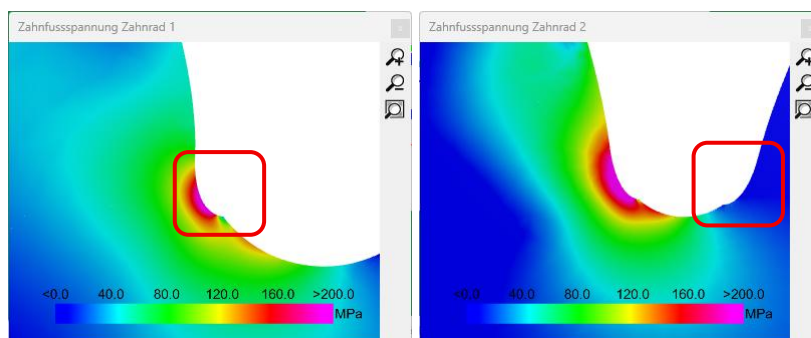


Abbildung 4-9 Kerben im Zahngrund Rad 1 und Rad 2.

Eigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Zahnfußsspannung Rad 1	σ_{F1}	182.37	MPa
Zahnfußsspannung Rad 2	σ_{F2}	231.01	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung Rad 1	σ_{F01}	182.35	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung Rad 2	σ_{F02}	230.98	MPa
Zahnformfaktor Rad 1	Y_{F1}	1.06	-

Zahnformfaktor Rad 2	Y_{F2}	1.69	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 1	Y_{S1}	2.08	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 2	Y_{S2}	1.58	-
Nominelle Zahnfußsspannung (FEM) Rad 1	σ_{F01FEA}	246.43	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung (FEM) Rad 2	σ_{F02FEA}	296.83	MPa

Tabelle 4-3 Berechnung mit Protuberanz und maximierter Zahnkopfrundung am Werkzeug, Berechnung nach ISO 6336-3 und Zahnfußsspannungen aus der FEM-Berechnung.

Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02_03-ww-v2500.mCGP*

Die Spannungsspitze liegt nun in der Schlussbearbeitungskerbe und ist vom Kopfradius des Fertigbearbeitungswerkzeugs abhängig. Erhöhen wir diesen von $\rho_{aP0F} = 0.05$ auf $\rho_{aP0F} = 0.10$, so finden wir neu $\sigma_{F01FEA} = 218.55$ MPa anstelle $\sigma_{F01FEA} = 246.43$ MPa für Rad 1.

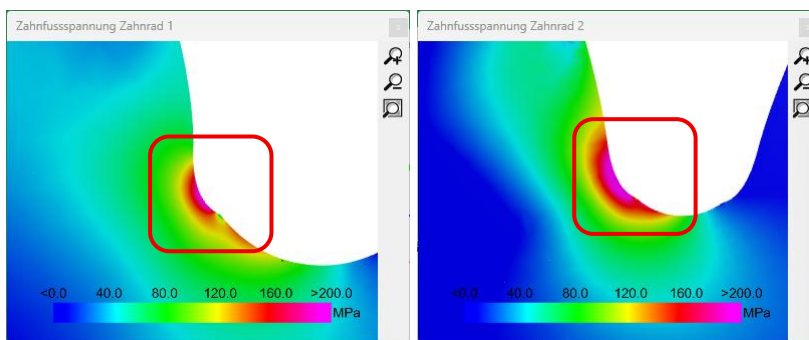


Abbildung 4-10 Kerben im Zahngrund Rad 1 und Rad 2. Kerbradius erhöht.

Eigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Zahnfußsspannung Rad 1	σ_{F1}	182.37	MPa
Zahnfußsspannung Rad 2	σ_{F2}	231.01	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung Rad 1	σ_{F01}	182.35	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung Rad 2	σ_{F02}	230.98	MPa
Zahnformfaktor Rad 1	Y_{F1}	1.06	-
Zahnformfaktor Rad 2	Y_{F2}	1.69	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 1	Y_{S1}	2.08	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 2	Y_{S2}	1.58	-
Nominelle Zahnfußsspannung (FEM) Rad 1	σ_{F01FEA}	218.55	MPa
Nominelle Zahnfußsspannung (FEM) Rad 2	σ_{F02FEA}	277.93	MPa

Tabelle 4-4 Berechnung mit Protuberanz und maximierter Zahnkopfrundung am Werkzeug, Berechnung nach ISO 6336-3 und Zahnfußsspannungen aus der FEM-Berechnung.

Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02_04-ww-v2500.mCGP*

5 Umsetzung Schritt 4

5.1 Erneute Referenzberechnung

Über *Datei/Öffnen* die Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02-REL25.mCGP* öffnen und Berechnung durchführen. Wir finden wiederum die folgenden Werte.

Eigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Zahnfußspannung Rad 1	σ_{F1}	204.85	MPa
Zahnfußspannung Rad 2	σ_{F2}	245.90	MPa
Nominelle Zahnfußspannung Rad 1	σ_{F01}	204.82	MPa
Nominelle Zahnfußspannung Rad 2	σ_{F02}	245.87	MPa
Zahnformfaktor Rad 1	Y_{F1}	1.14	-
Zahnformfaktor Rad 2	Y_{F2}	1.77	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 1	Y_{S1}	2.17	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 2	Y_{S2}	1.61	-
Nominelle Zahnfußspannung (FEM) Rad 1	σ_{F01FEA}	180.31	MPa
Nominelle Zahnfußspannung (FEM) Rad 2	σ_{F02FEA}	240.69	MPa

Tabelle 5-1 Referenzwerte Zahnfuß, Berechnung nach ISO 6336-3 und FEM-Berechnung. Werkzeug ist zahnstangenförmig.

Im Menü *Grafiken/Herstellung Rad 1* und *2* ist das zahnstangenförmige Werkzeug dargestellt. Im Menü *Grafiken/Zahnfußspannungen (2D) Zahnrad 1* und *2* sind die Zahnfußspannungen als Farbverlauf ersichtlich.

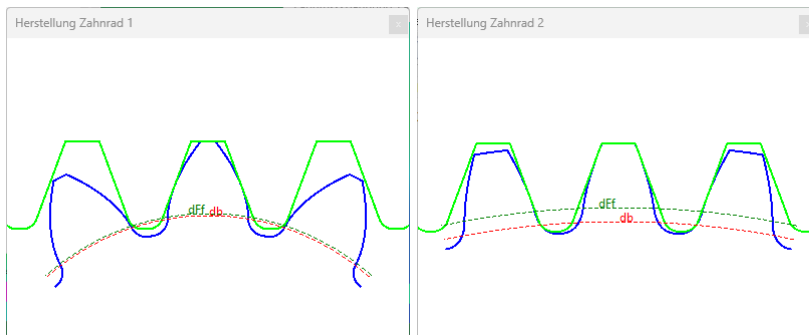


Abbildung 5-1 Zahnrad (blau) im Eingriff mit dem zahnstangenförmigen Werkzeug (grün). Links: Rad 1. Rechts: Rad 2.

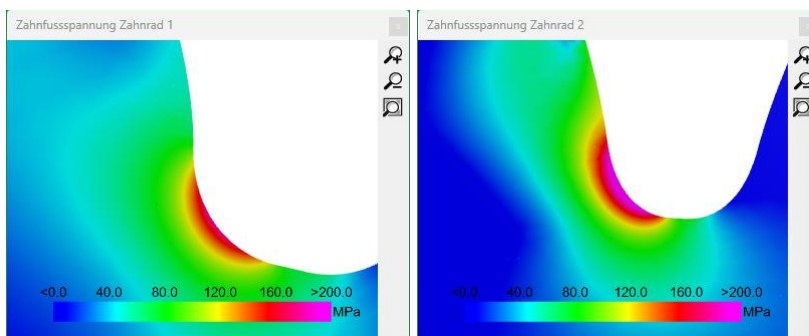


Abbildung 5-2 Zahnfußspannung aus der FEM-Berechnung. Farbskala auf 200 MPa limitiert. Links: Rad 1. Rechts: Rad 2.

5.2 Verwendung Stossrad

Im Tab *Bezugsprofil* wird nun statt der Eingabe *Bezugsprofil* (dabei wird das Bezugsprofil des Zahnrades eingegeben, daraus dann das Bezugsprofil des zahnstangenförmigen Werkzeuges hergeleitet und damit die Zahnform erzeugt) die Eingabe *Stossrad* gewählt. Die Zähnezah und die Profilverchiebung des Stossrades sollen mit $z_0 = 23$ und $x_0 = 0.10$ gegeben sein. Nach der Berechnung (F5) werden die Grafiken im Menü *Grafiken/Zahneingriff, Grafiken/Herstellung Zahnrad 1 und 2, Zahnfußspannung (2D) Zahnrad 1 und 2* betrachtet.

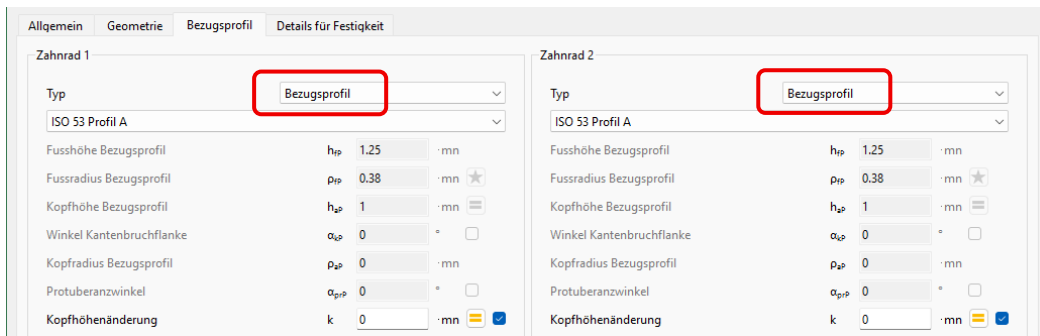


Abbildung 5-3 Tab *Bezugsprofil*, Eingabe *Bezugsprofil* Zahnrad, für Rad 1 und Rad 2.

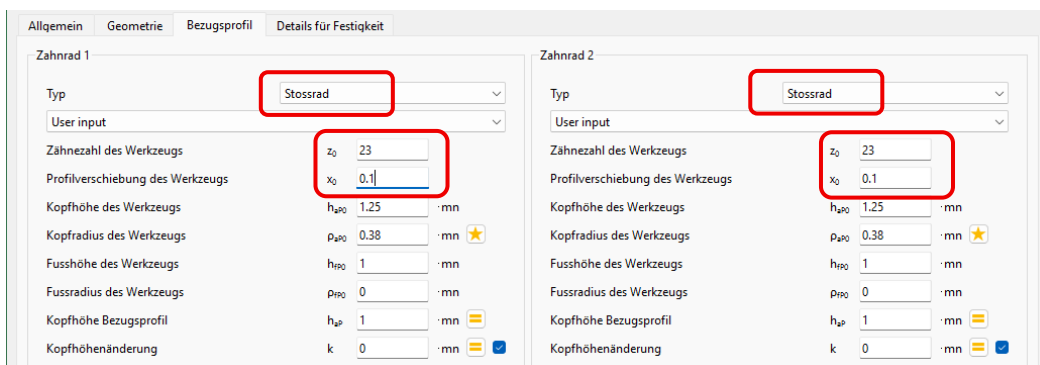


Abbildung 5-4 Tab *Bezugsprofil*, Eingabe *Stossrad*, für Rad 1 und Rad 2.

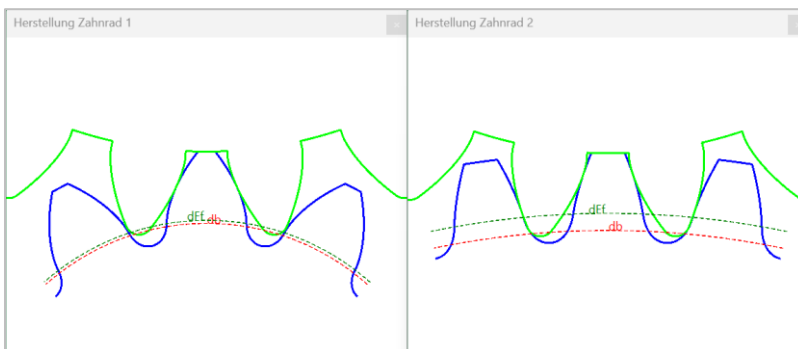


Abbildung 5-5 Herstellung Zahnrad 1 und Zahnrad 2, jeweils mit einem Stossrad.

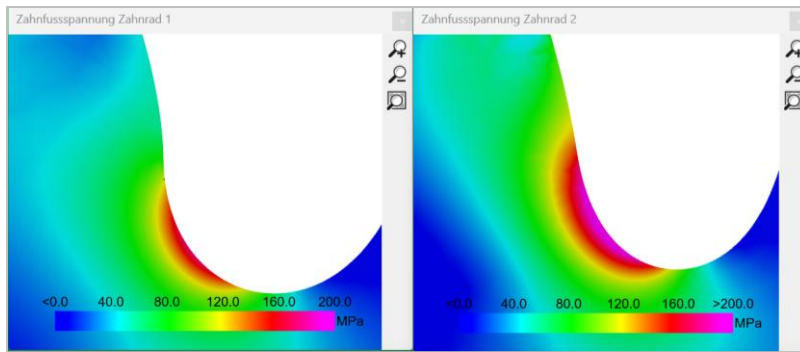


Abbildung 5-6 Zahnfußspannungen, Zahnform mit Stossrad erzeugt.

Die tabellarischen Werte sind nun wie folgt.

Eigenschaft	Symbol	Wert	Einheit
Zahnfußspannung Rad 1	σ_{F1}	192.85	MPa
Zahnfußspannung Rad 2	σ_{F2}	222.62	MPa
Nominelle Zahnfußspannung Rad 1	σ_{F01}	192.83	MPa
Nominelle Zahnfußspannung Rad 2	σ_{F02}	222.59	MPa
Zahnformfaktor Rad 1	Y_{F1}	1.19	-
Zahnformfaktor Rad 2	Y_{F2}	1.71	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 1	Y_{S1}	1.95	-
Spannungskorrekturfaktor Rad 2	Y_{S2}	1.51	-
Nominelle Zahnfußspannung (FEM) Rad 1	σ_{F01FEA}	175.31	MPa
Nominelle Zahnfußspannung (FEM) Rad 2	σ_{F02FEA}	223.47	MPa

Tabelle 5-2 Werte Zahnfuß, Berechnung nach ISO 6336-3 und FEM-Berechnung. Werkzeug ist ein Stossrad.

Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02_05-ww-v2500.mCGP*.

6 Umsetzung Schritt 5

6.1 Erneute Referenzberechnung

Über *Datei/Öffnen* die Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02-REL25.mCGP* öffnen und Berechnung durchführen. Wir finden wiederum die Werte wie oben in Tabelle 5-1.

6.2 Schnitte am Stirnrad

Die FEM-Berechnungen oben sind am Normalschnitt durchgeführt. Im Normalschnitt und im Axialschnitt einer evolventischen Schrägverzahnung ist die Flankenform nicht mehr evolventisch.

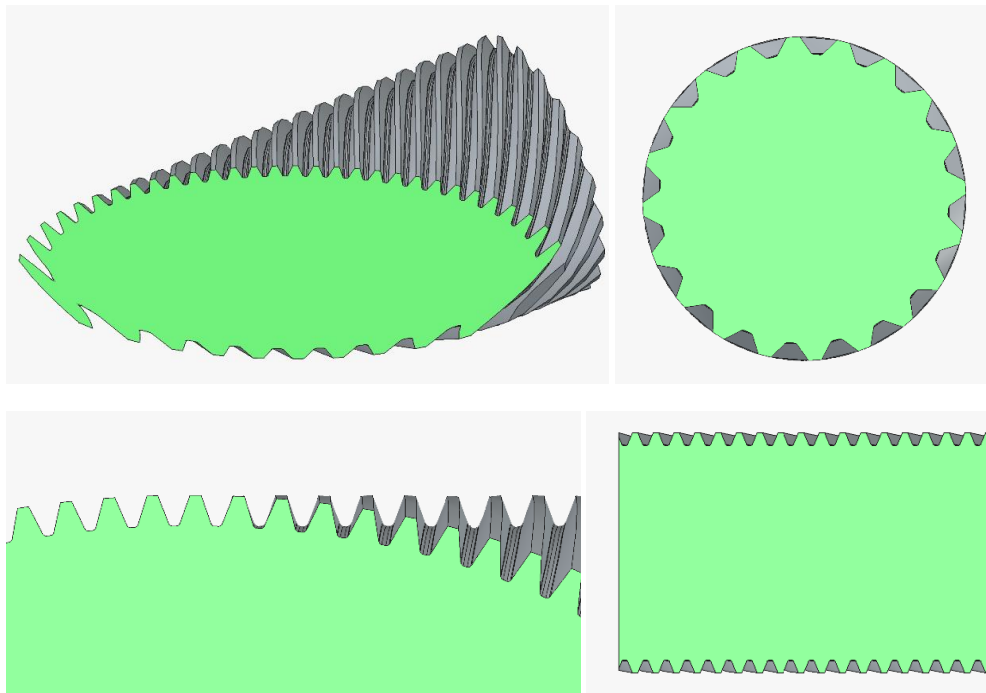


Abbildung 6-1 Links oben: Normalschnitt, perspektivisch. Rechts oben: Stirnschnitt. Links unten: Normalschnitt. Rechts unten: Axialschnitt.

In der Berechnung nach ISO 6336 wird für Schrägverzahnungen ein virtuelles, geradverzahntes Stirnrad (ISO 6336 verwendet den Begriff «virtual spur gear», DIN 3990 den Begriff «Ersatz-Geradverzahnung») verwendet. Dieses wird so erzeugt, dass es eine Zahnform hat, die der des schrägverzahnten Stirnrades im Normalschnitt nahekommt. Damit bleiben die Eigenschaften, z.B. Zahnfußdicke des schrägverzahnten Stirnrades im Normalschnitt erhalten. In MESYS ist die Berechnung sowohl am Normalschnitt der Schrägverzahnung als auch am virtuellen, geradeverzahnten Stirnrad möglich.

Im Tab *Allgemein* wird mit der Auswahl *Zahnfußsspannungen per FEM berechnen* die Berechnung am Normalschnitt aufgerufen. Wird zusätzlich der Flag *FEM Zahnfußsspannungen basierend auf virtueller Geradverzahnung* aktiviert, so wird die FEM-Berechnung an eben diesem ausgeführt.

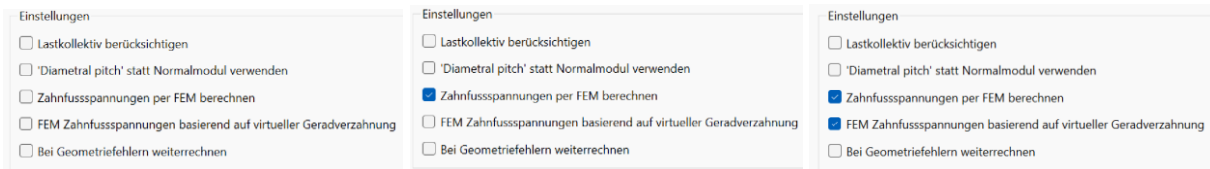


Abbildung 6-2 Tab *Allgemein*, Auswahl der FEM-Zahnfußspannungsberechnung. Links: Keine Berechnung. Mitte: Berechnung am Normalschnitt. Rechts: Berechnung am virtuellen Stirnrad.

Zuerst wird die Berechnung im Normalschnitt ausgeführt, indem der erste Flag aktiviert und der zweite Flag deaktiviert wird, siehe Abbildung oben, Mitte. Grafiken *Zahnfußspannung (2D) Zahnrad 1* und *2*, *Zahnfußspannung Zahnrad 1* und *2* öffnen. Grafikeinstellungen für *Zahnfußspannung (2D) Zahnrad 1* und *2* wie folgt wählen.

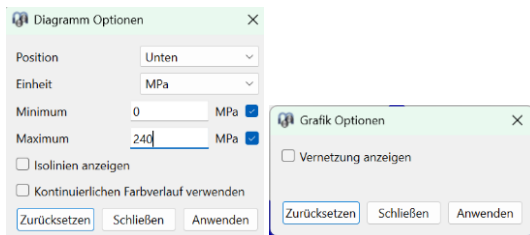


Abbildung 6-3 Links: Diagramm Optionen. Rechts: Grafik Optionen.

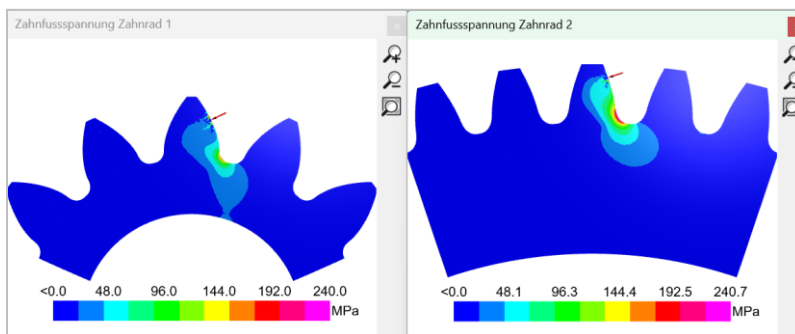


Abbildung 6-4 Verteilung erste Hauptspannung an Rad 1 und Rad 2, im Normalschnitt.

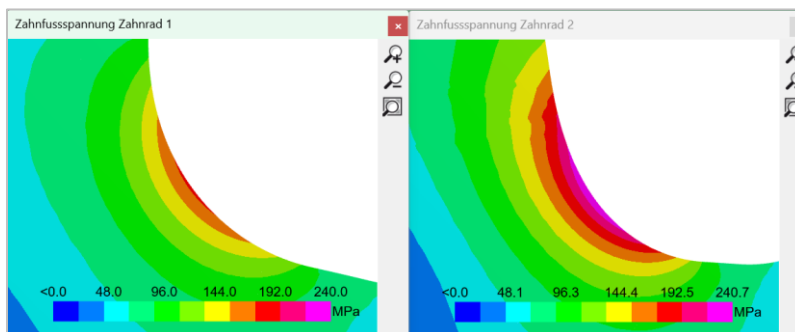


Abbildung 6-5 Verteilung erste Hauptspannung an Rad 1 und Rad 2, im Normalschnitt, Ausschnitt.

Die folgenden Grafiken zeigen die Spannung an der Oberfläche des Fusses, von links nach rechts vom Fussgrund zur Flanke hin. Beachte, *sig1* ist die erste Hauptspannung, diese ist mit den Spannungen gemäss ISO 6336 zu vergleichen. *sigM* ist die von Mises Spannung.

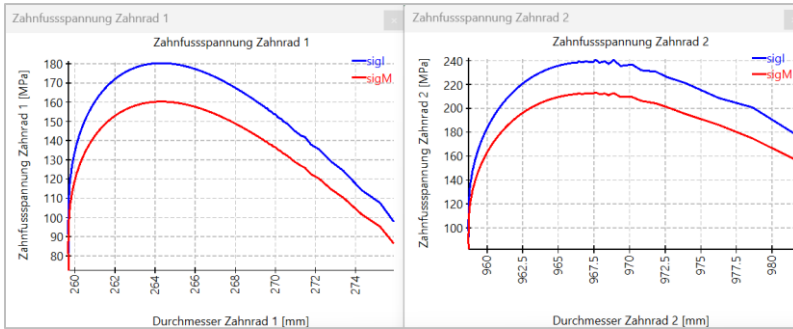


Abbildung 6-6 Verlauf der Spannung an der Oberfläche des Zahnfusses, im Normalschnitt.

Die Berechnung wird nun wiederholt, nun mit dem Flag *FEM Zahnfussspannungen basierend auf virtueller Geradverzahnung* aktiviert. Die Grafiken sind nun wie folgt.

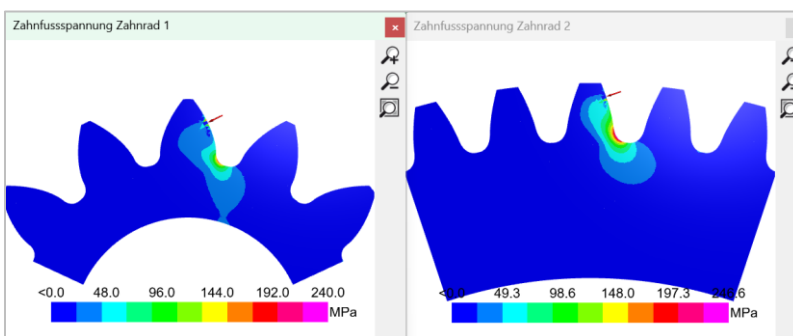


Abbildung 6-7 Verteilung erste Hauptspannung an Rad 1 und Rad 2, an der virtuellen Geradverzahnung.

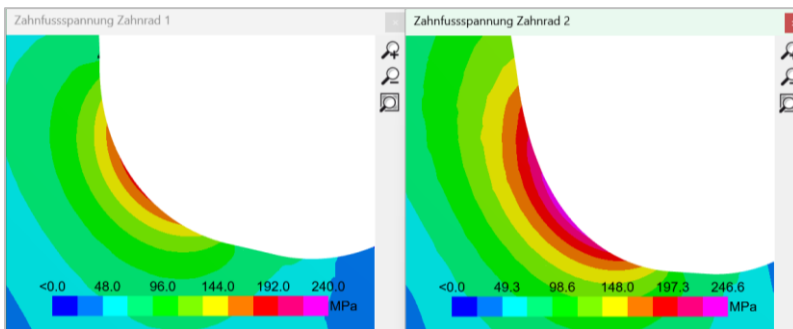


Abbildung 6-8 Verteilung erste Hauptspannung an Rad 1 und Rad 2, an der virtuellen Geradverzahnung, Ausschnitt.

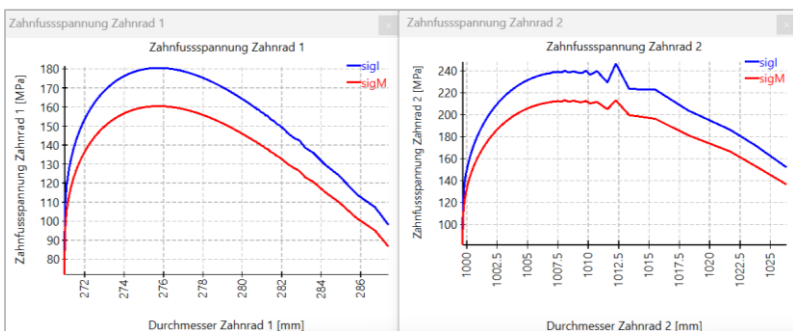


Abbildung 6-9 Verlauf der Spannung an der Oberfläche des Zahnfusses, an der virtuellen Geradverzahnung.

Im direkten Vergleich (oben für Zahnfussspannung im Normalschnitt, unten für an der virtuellen Geradverzahnung) zeigen sich nur minimale Unterschiede.

Damit ist für diesen Fall bestätigt, dass der Ansatz über die virtuelle Geradverzahnung wie in ISO 6336 für die Fussspannungsberechnung verwendet genau ist.

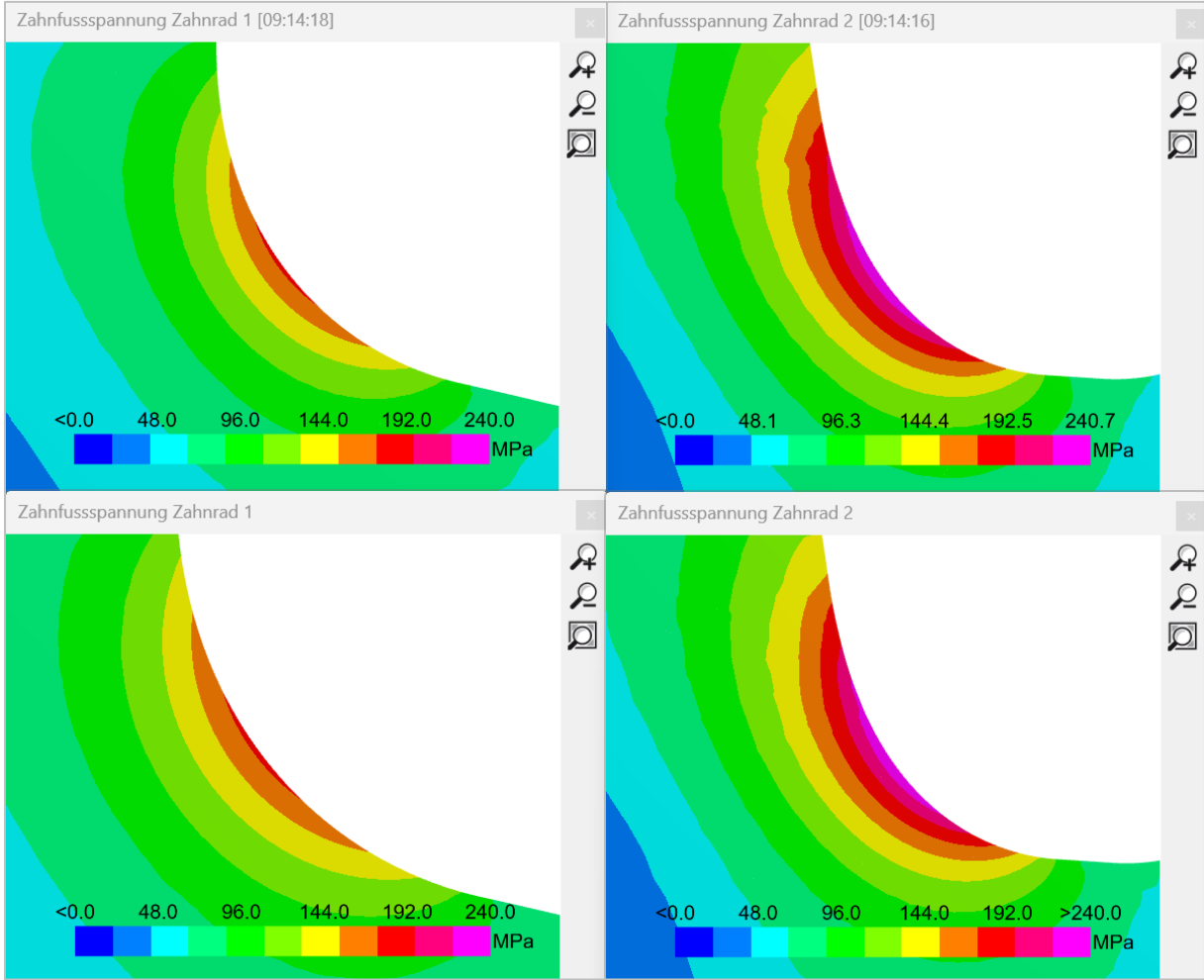


Abbildung 6-10 Links: Rad 1. Rechts: Rad 2. Oben: Berechnung im Normalschnitt. Unten: Berechnung an der virtuellen Geradverzahnung. Verteilung erste Hauptspannung.

7 Umsetzung Schritt 6

7.1 Erneute Referenzberechnung

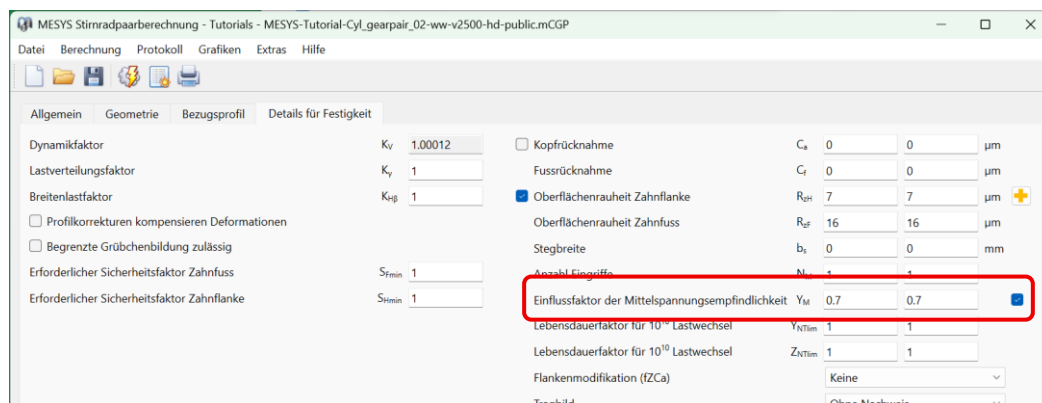
Über *Datei/Öffnen* die Datei *MESYS-Tutorial-Cyl_gearpair_02-REL25.mCGP* öffnen und Berechnung durchführen. Wir finden wiederum die Werte wie oben in **Fehler!**

Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..

7.2 Einfluss Mittelspannung

In den Berechnungen oben wurden die wirkenden Spannungen im Zahnfuß betrachtet. Liegt der Fall vor, dass der Zahn nicht nur in eine Richtung belastet wird, sondern in beide Richtungen, so ändert das Spannungsniveau nicht. Dies ist z.B. bei einem Planetenrad der Fall, im Eingriff mit der Sonne wird der Zahn in eine Richtung gebogen, im Eingriff mit dem Hohlrad in die andere Richtung. Dabei können der Winkel der Kraftrichtung und der Kraftangriffspunkt leicht unterschiedlich sein, entsprechend kann die Zahnfußspannung in den beiden Eingriffen ebenso leicht unterschiedlich sein.

Der Einfluss des Spannungszyklus mit Zug- und Druckspannung wird über den Mittelspannungseinflussfaktor berücksichtigt. Dieser ist für den Fall der Wechselbelastung in ISO 6336-5, Abschnitt 5.3.3 zu 0.70 gesetzt, die zulässigen Spannungen werden damit multipliziert. Im informativen Annex B der ISO 6336-3 steht eine erweiterte Berechnung für den Mittelspannungseinflussfaktor Y_M zur Verfügung. Da diese nur informativ und nicht normativ ist, kann in MESYS ein Wechselbiegungsfaktor direkt eingegeben werden.



D.h. dass dieser Faktor nicht die vorhandenen Spannungen, sondern die zulässigen Spannungen beeinflusst. Nach Durchführung der Berechnung finden sich im Protokoll die folgenden Werte.

Nominelle Zahnfußspannung	σ_F	204.8215	245.8699 MPa
Zahnfußspannung	σ_F	204.8469	245.9004 MPa
Zahnfußfestigkeit	σ_{FG}	806.2467	890.1866 MPa
Sicherheitsfaktor Zahnfuß	SF	3.9359	3.6201

Abbildung 7-1 Zahnfußfestigkeit, Angabe im Protokoll, für Referenzberechnung ohne Wechselbiegung.

Nach der Eingabe $Y_M = 0.70$ für beide Räder und Durchführung der Berechnung findet sich die geänderte Zahnfussfestigkeit, der damit geänderte Sicherheitsfaktor Zahnfuss und die Zahnfussspannung sind wie folgt.

Nominelle Zahnfussspannung	σ_{F0}	204.8215	245.8699 MPa
Zahnfussspannung	σ_F	204.8469	245.9004 MPa
Zahnfussfestigkeit	σ_{FG}	564.3727	623.1307 MPa
Sicherheitsfaktor Zahnfuss	SF	2.7551	2.5341

Abbildung 7-2 Zahnfussfestigkeit, Angabe im Protokoll, für Referenzberechnung mit Wechselbiegung.

Die auftretenden Spannungen Nominelle Zahnfussspannung und Zahnfussspannung ist in beiden Fällen dieselbe. Die Zahnfussfestigkeit war $\sigma_{FG} = 806.25$ MPa und ist nun neu $\sigma_{FG} = 806.25$ MPa * 0.70 = 564.37 MPa. Dabei ist der Mittelspannungseinflussfaktor $Y_M = 0.70$. Entsprechend sinkt der Sicherheitsfaktor Zahnfuss S_F .