

Tutorium zur Getriebemodellierung und Nachrechnung mit MDESIGN gearbox

Dipl.-Ing. Christian-Hartmann-Gerlach, DriveConcepts GmbH Dresden
Dr.-Ing. Tobias Schulze, DriveConcepts GmbH Dresden

Zusammenfassung

Dies ist eine Anleitung zur Erstellung eines Getriebemodelles und anschließender Nachrechnung der Kinematik und der einzelnen Maschinenelemente mit dem Programm „MDESIGN gearbox“. Es werden die einzelnen Schritte der 3D-Modellierung eines einstufigen Stirnradgetriebes beschrieben und anschließend erklärt, wie diese Getriebeauslegung überprüft und die Untersuchungsergebnisse dokumentiert werden können.

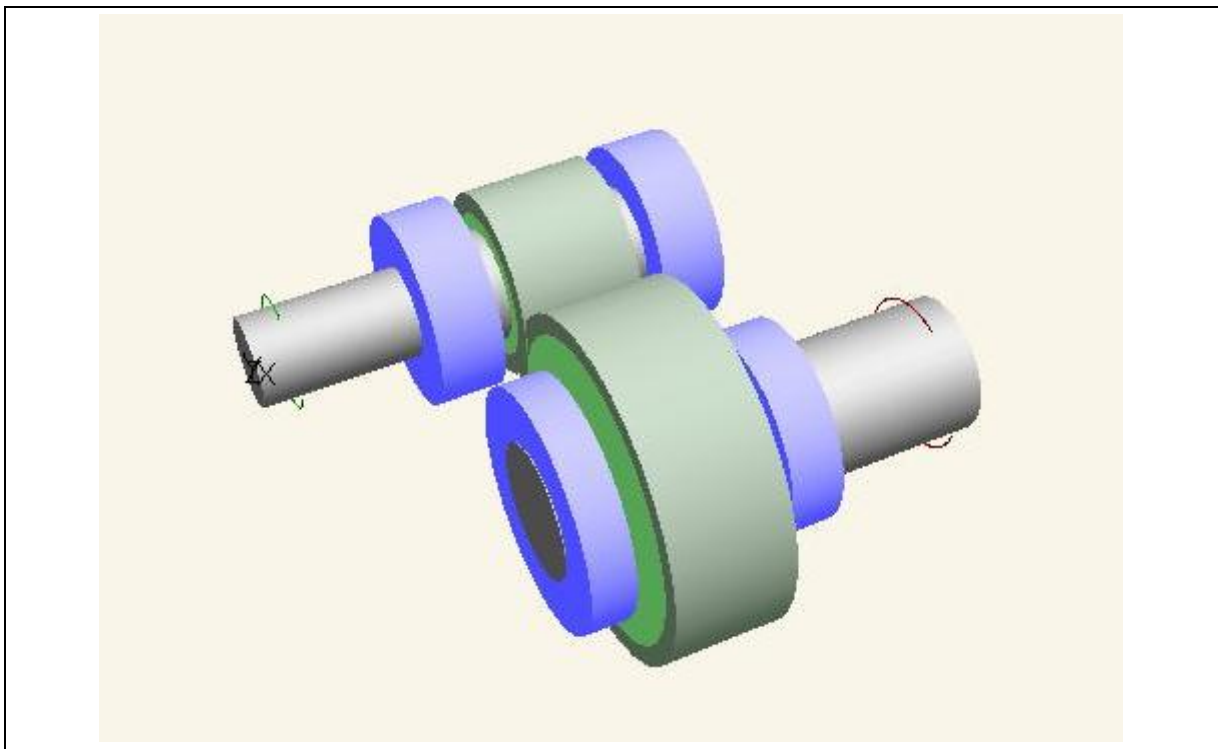


Bild 1: Beispielgetriebe in MDESIGN gearbox

1. Inhalt

Inhaltsverzeichnis

1.	Inhalt	2
2.	Starteinstellungen für Nachrechnung	3
3.	Modellierung des Getriebes.....	6
3.1.	Modellierung von Wellen	6
3.2.	Modellierung von Zahnrädern.....	9
3.3.	Modellierung von Lagern	12
3.4.	Modellierung von An- und Abtrieb	14
4.	Berechnung	16
4.1	Berechnung der Kinematik	16
4.2	Berechnung Getriebedesign.....	17
4.3	Berechnung der Zahnräder	19
4.4	Berechnung der Wellen	23
4.5	Berechnung der Lager.....	28
4.6	Komplette Berechnung	30
5.	Sicherung der Projektdaten	32
6.	Literatur.....	33

2. Starteinstellungen für Nachrechnung

Starten sie die Software MDESIGN und wählen sie im linken Explorer Menü im Ordner MDESIGN gearbox die Schaltfläche MDESIGN gearbox aus und starten sie es mittels Doppelklick.

Beginnen sie ein neues Projekt indem sie Datei →Neu →Erneuern auswählen. Alle Daten der Eingabeseite werden auf Standardwerte gesetzt.

Wählen sie unter Auswahl der Berechnung →Nachrechnung aus.

Speichern sie den Datensatz gearbox (*.xml) in einem beliebigen Verzeichnis. Sie arbeiten nun aktiv im Datensatz und können mit Speichern automatisch überschreiben.

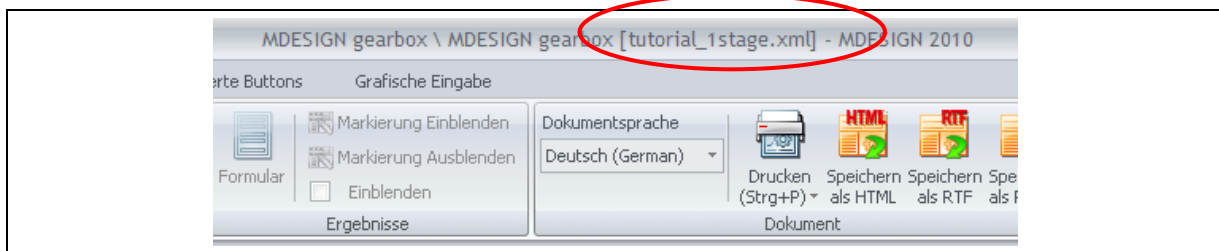


Bild 2: Aktiver Datensatz

Nun wechseln sie zur Benutzeroberfläche des 3D Designers. Wählen sie dazu im Pull-Down Menü des Hauptfensters Grafische Eingabe aus.



Bild 3: Graphische Eingabe wählen

Oberhalb der grafischen Eingabe finden sie die entsprechende Symbolleiste für die graphische Eingabe.

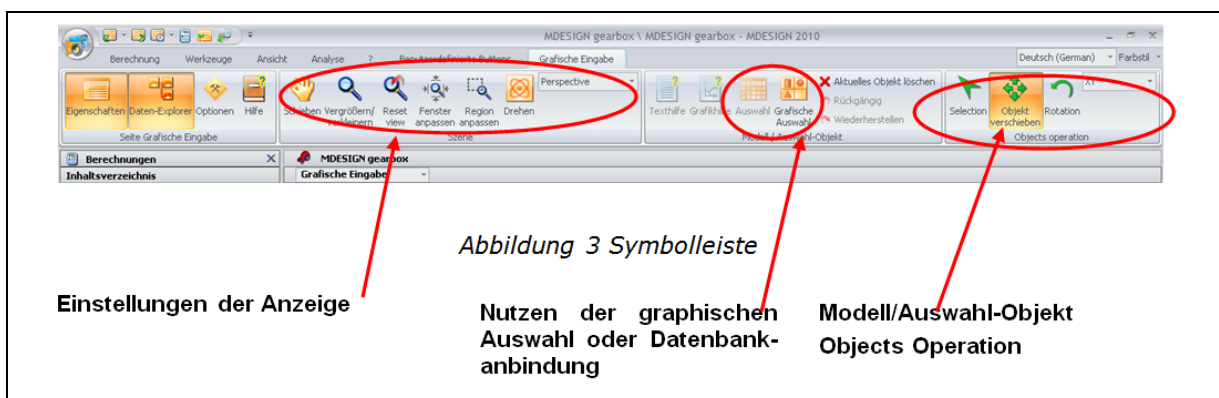


Bild 4: Symbolleiste

Detaillierte Beanspruchungsanalyse in Getrieben

Innerhalb der graph. Eingabe finden sie nun verschiedene Bereiche. Das Fenster in der Mitte, in dem ein Koordinatensystem zu sehen ist, ist das Darstellungsfenster (3D Szene) ihres Getriebes. Das Menü auf der rechten Seite ist der Elemente Explorer, in dem sie gewünschte Maschinenelemente auswählen können. Das Menü auf der linken Seite zeigt die Eigenschaften eines ausgewählten Elementes an.

Am unteren Bildschirmrand sehen sie Grafik- und Texthilfen, die ihnen das Verständnis des Programmes erleichtern sollen. In der Symbolleiste gibt es die Auswahl Objects Operation, mit der sie die 3D Objekte bewegen können. Daneben gibt es das Menü Modell/Auswahl – Objekt. In diesem können mittels Auswahl Informationen aus Datenbanken oder mittels Grafischer Auswahl Informationen aus Schemata abgerufen werden.

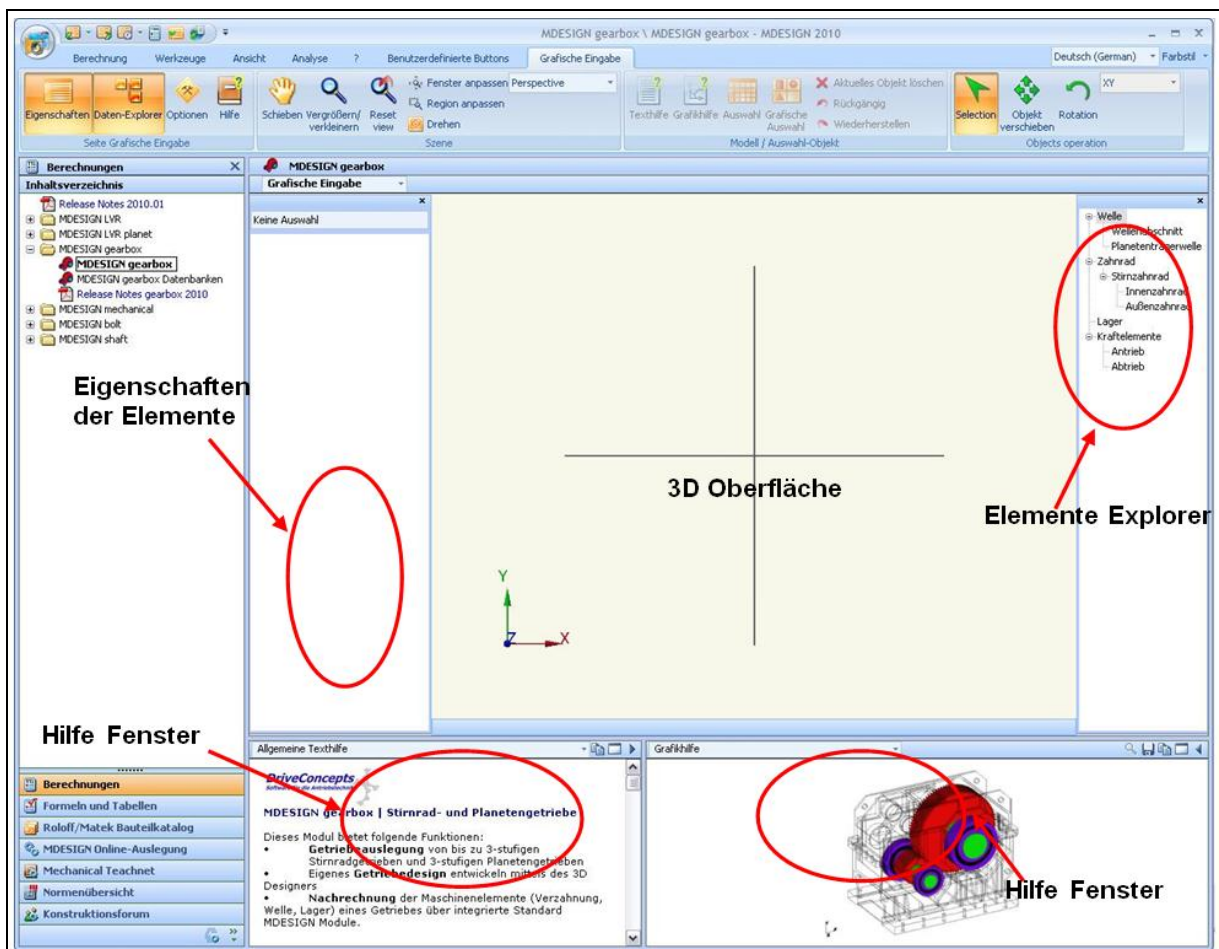


Bild 5: Bereiche der 3D Eingabe

Bevor sie mit der Modellierung starten, wechseln sie noch einmal im Pull-Down Menü zur Eingabeseite. Unter der Gruppierung Werkstoffe sehen sie zwei Tabellen, in denen die Werkstoffe für Wellen und Zahnräder bestimmt werden können. Dazu drücken sie das Datenbank-Symbol rechts über den Tabellen. Wählen sie zuvor MDESIGN oder Benutzerdatenbank.

Detaillierte Beanspruchungsanalyse in Getrieben

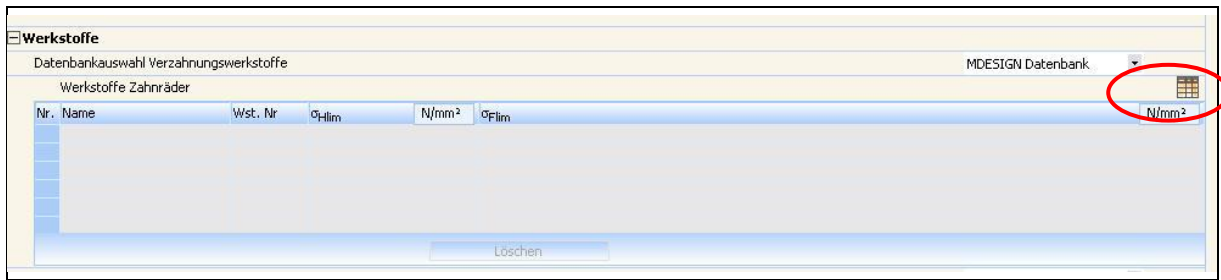


Bild 6: Werkstoffauswahl

Es öffnet sich eine Liste von Norm-Werkstoffen aus der MDESIGN Datenbank. Wählen sie für die Zahnräder den Werkstoff 16MnCr5. Für die Wellen wählen sie 16MnCr5 und E295. Denselben Vorgang wiederholen sie für die Eingabedaten der Gruppierung Schmierung und wählen Oel1.

Nun sehen sie in den Tabellen die ausgewählten Werk- und Schmierstoffe. Eine Änderung der Datenbankeinträge ist z.B. im Modul „gearbox Datenbanken“ möglich.

Weiterhin wählen sie für dieses Getriebe Umlaufschmierung. Geben sie unter Belastungsdaten $KA = 1,1$ und $KAS = 1,5$ ein. Die geforderten Sicherheiten und Lebensdauern sollten folgendermaßen vorgelegt werden:

Geforderte Sicherheiten & Lebensdauern		
Berechnung Stirnradpaar nach...		DIN 3990
Sollsicherheit Zahnflanke	$S_H \text{ min (Verzahnung) =}$	1,3
Sollsicherheit Zahnfuß	$S_F \text{ min (Verzahnung) =}$	1,3
Sollsicherheit Fressen	$S_B \text{ min (Verzahnung) =}$	1,3
Solllebensdauer Verzahnung	$L_h \text{ min (Verzahnung) =}$	60000 h
Sollsicherheit Gewaltbruch Welle	$S_F \text{ min (Welle) =}$	1,3
Sollsicherheit Dauerbruch Welle	$S_D \text{ min (Welle) =}$	1,3
Sollsicherheit Lager	$S_0 \text{ min (Lager) =}$	1,3
Solllebensdauer Lager	$L_h \text{ min (Lager) =}$	10000 h

Bild 7: Definition der geforderten Sicherheiten und Lebensdauern

Wechseln sie zurück zur Grafischen Eingabe.

3. Modellierung des Getriebes

3.1. Modellierung von Wellen

Im 3D Designer werden Wellen mittels einzelner Abschnitte modelliert. Dazu klicken sie im Elemente Explorer → Welle → Wellenabschnitt und ziehen diesen mit gedrückter Maustaste in die 3D Oberfläche. Beim Anklicken des Abschnittes sehen sie im linken Menü die einzelnen Eigenschaften. d_{a_l} und d_{a_r} sind die linken und rechten Außendurchmesser sowie d_{i_l} und d_{i_r} die jeweiligen Innendurchmesser. Geben sie nun folgende Parameter für den ersten Abschnitt ein:

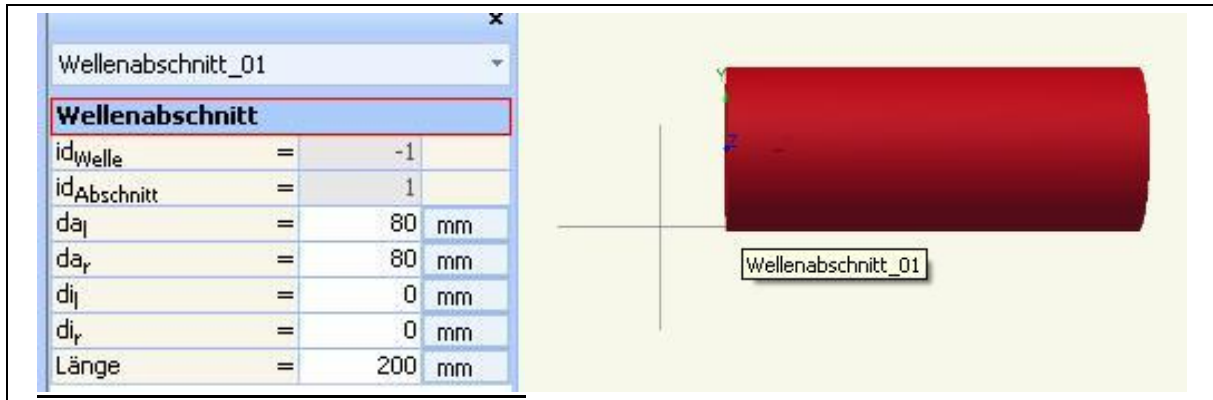


Bild 8: Definition eines Wellenabschnittes

Die Wellen in diesem Beispiel sind Vollwellen. Deshalb sind die Innendurchmesser immer null. Nun muss der erste Wellenabschnitt noch im Raum definiert werden. Dies geschieht mittels Fangebenen. Klicken sie im Menü Objects operations auf Objekt verschieben. Wenn sie nun Wellenabschnitt_01 auswählen und die linke Maustaste gedrückt halten, sehen sie an den Stirnflächen gelbe Fangebenen (untere Abbildung).

Verschieben sie das Segment in Richtung des schwarzen Kreuzes. Wenn die Ebenen sich blau verfärben hat das Programm die Anschlussbedingungen automatisch erkannt und fängt die linke Stirnfläche im Koordinatenursprung, sobald sie die linke Maustaste loslassen.

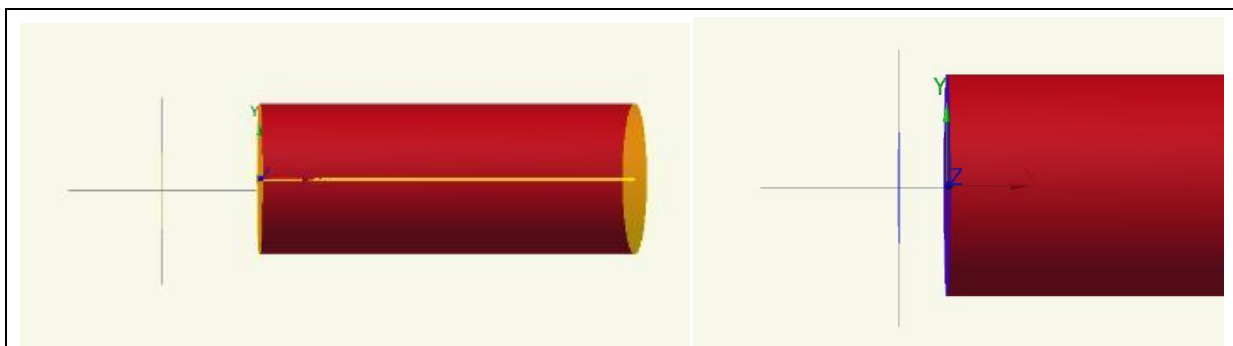


Bild 9: Fangen des ersten Wellenabschnittes am Montagezentrum

Erstellen sie nun zwei weitere Wellenabschnitte. Verbinden sie diese mittels der Fangebenen an der rechten Seite der vorhergehenden Welle. Verwenden sie folgende Parameter für die Abschnitte:

Wellenabschnitt_02				Wellenabschnitt_03			
Wellenabschnitt				Wellenabschnitt			
idWelle	=	-1		idWelle	=	-1	
idAbschnitt	=	1		idAbschnitt	=	1	
da _l	=	100	mm	da _l	=	80	mm
da _r	=	100	mm	da _r	=	80	mm
di _l	=	0	mm	di _l	=	0	mm
di _r	=	0	mm	di _r	=	0	mm
Länge	=	150	mm	Länge	=	60	mm

Bild 10: Eigenschaften Wellenabschnitt zwei und drei

Die Abschnitte können auch nach dem Fangen zur Welle ausgewählt werden (STRG + linke Maus).

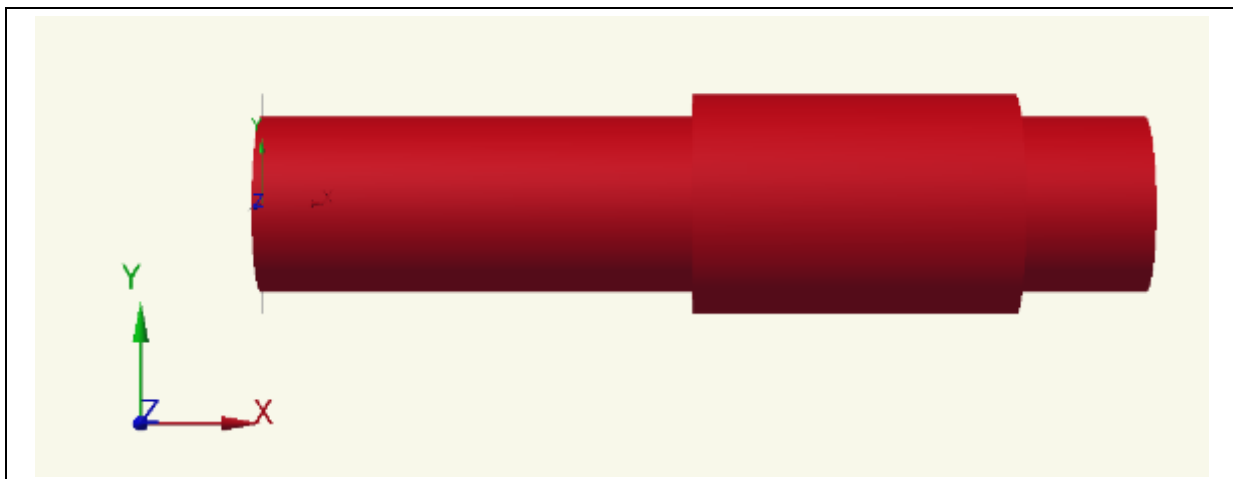


Bild 11: Darstellung der ersten Welle

Um die Baugruppe samt Koordinatensystem zu verschieben, halten sie die mittlere Maustaste gedrückt. Zum Zoomen nutzen sie das Scrollrad der Maus. Wenn sie nun die gesamte Welle anklicken, können sie in den Eigenschaften auch den Wellenwerkstoff definieren. Dazu klicken sie in die Werkstoffzeile und drücken im Modell/Auswahl – Objekt Menü den Auswahl Button. Nun können sie die vorher definierten Werkstoffe auswählen. Da Welle_01 als Ritzelwelle realisiert wird wählen sie den Werkstoff 16MnCr5. Nun erstellen sie die zweite Welle selbständig mit folgenden Abmaßen in mm:

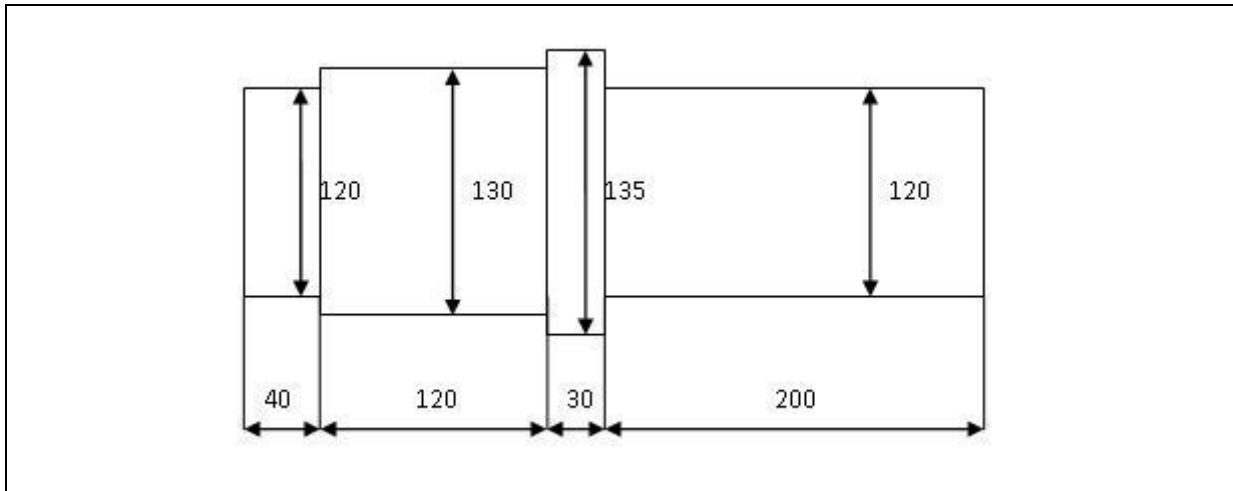


Bild 12: Abmessung der zweiten Welle

Den Ersten Abschnitt der Welle_02 können sie nun beliebig auf der 3D Oberfläche platzieren, da die genaue Position später durch den Kontakt der Zahnräder definiert wird. Achten sie darauf, dass der erste Abschnitt immer der äußerst linke ist und die weiteren immer rechts angefügt werden, da dies spätere Positionierungen von Zahnrädern und Lagern auf der Welle erleichtert. Vergessen sie nicht auch den Werkstoff für die zweite Welle zu definieren. Diese besteht aus E295.

Nun sollten sie zwei vollständige Wellen erstellt haben.

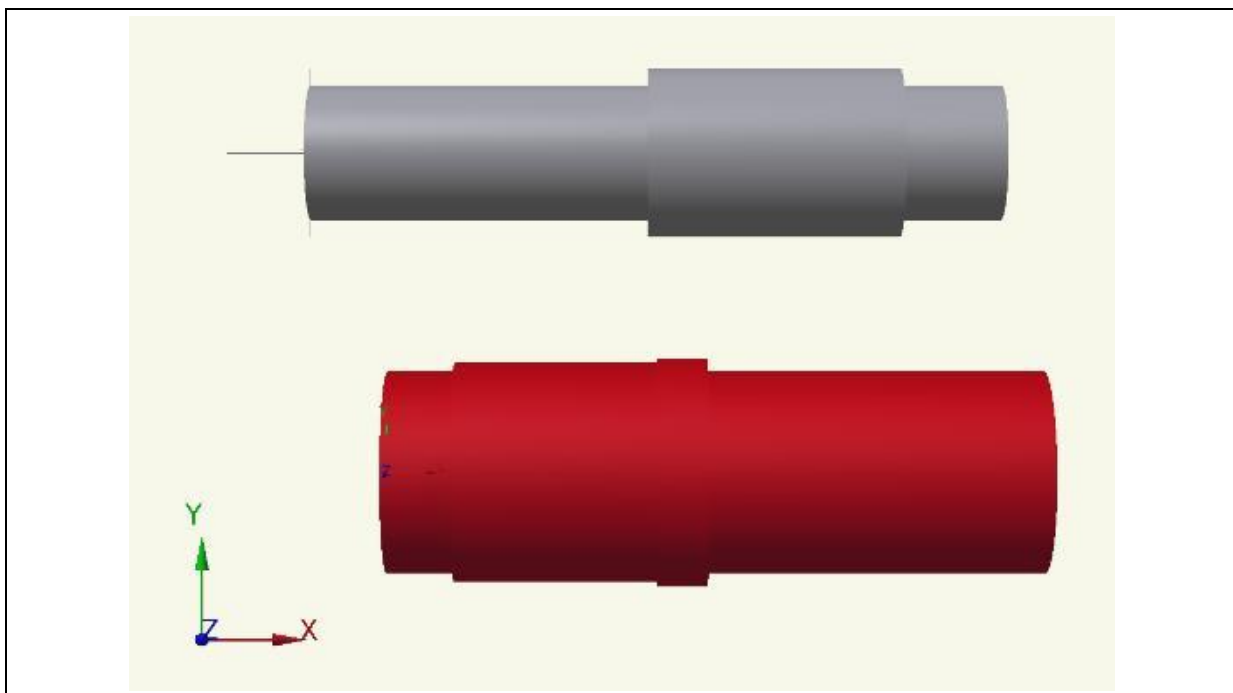


Bild 13: Design der zweiten Welle

3.2. Modellierung von Zahnrädern

Zahnräder werden ähnlich den Wellenabschnitten modelliert. Dazu wählen sie im Elemente Explorer →Zahnrad →Stirnzahnrad →Außenzahnrad aus und ziehen es wieder in die 3D Oberfläche. Es wird ein neues Stirnrad erstellt. Nun geben sie Verzahnungsparameter des Ritzels ein:

Rad_01	
Außenzahnrad	
Name	= Rad_01
id _{Welle}	= -1
Zahnbreite	= 110 mm
Radkörperinnend...	= 100 mm
Zähnezahl	= 17
m_n	= 8 mm
α_n	= 20 °
β	= 15 °
Profilverschiebung	= 0.46902
k	= 0
Wälzkreisdurchm...	= 0 mm
Werkstoff	= 16MnCr5
Position _x	= 0 mm
Schmierstoff	= Oel1

Bild 14: Eigenschaften des Ritzels

Werkstoff und Schmiermittel werden wie oben beschrieben mittels Auswahl Button in der Symbolleiste definiert. Wenn sie nun das Ritzel verschieben, wird eine gelbe Fanglinie sichtbar. Ebenfalls sieht man die Fanglinien der beiden Wellen. Verschieben sie das Zahnrad zur Welle_01 bis beide Linien sich blau verfärben und lassen sie die Maustaste los.

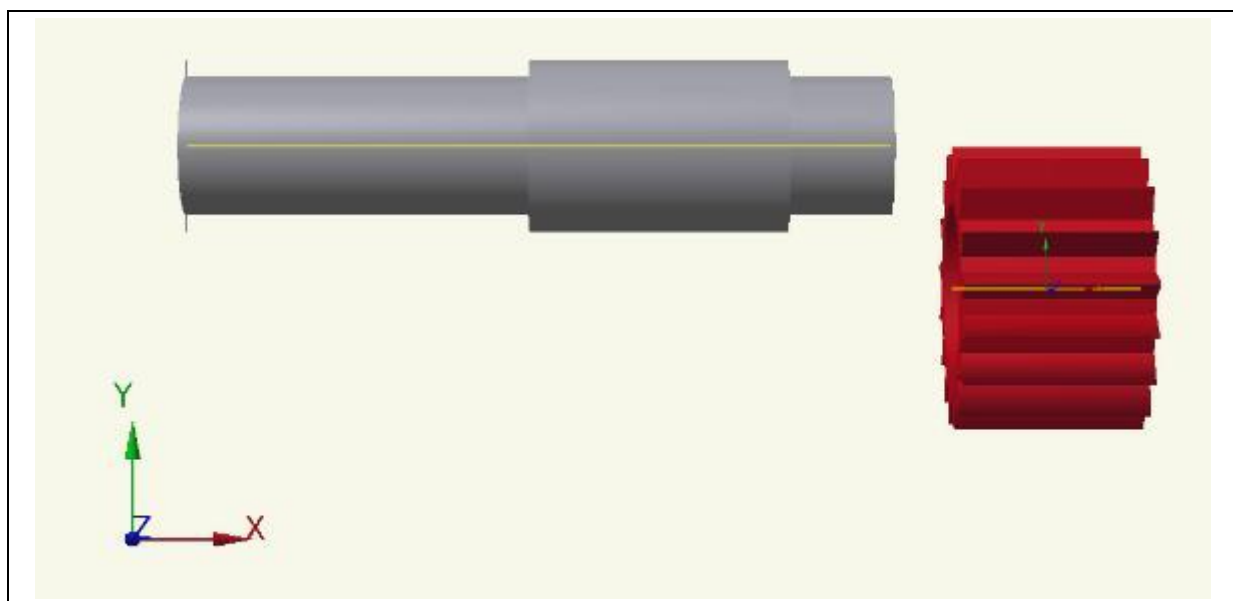


Bild 15: Erkennen möglicher Fanglinien

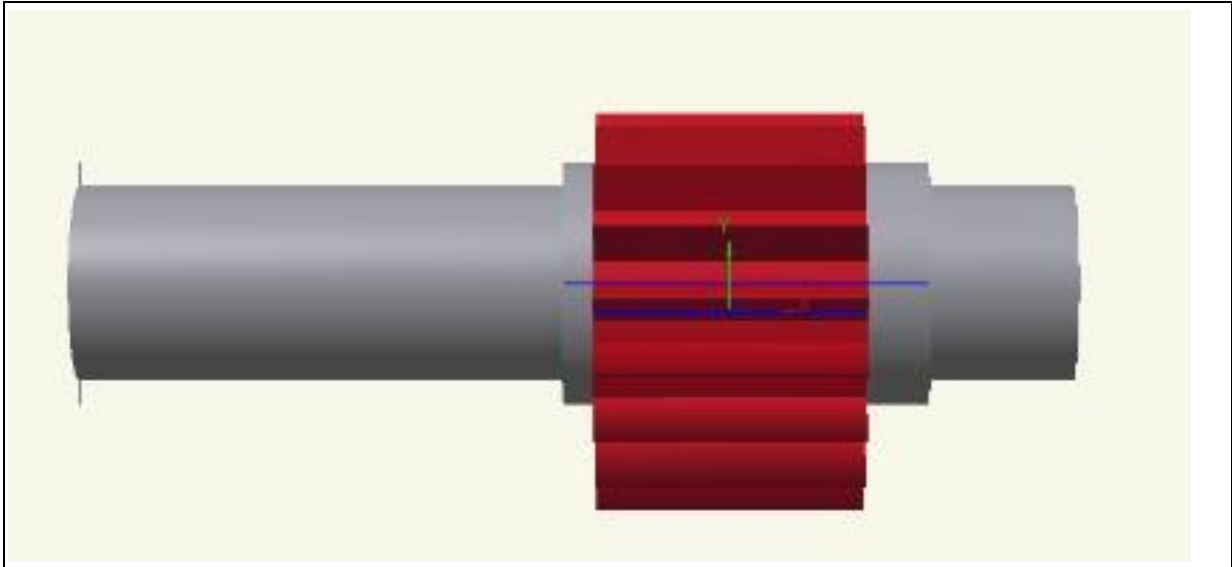


Bild 16: Fangen des Zahnrades auf der ersten Welle

Nun sind die Rotationsachsen der beiden Körper miteinander verknüpft. Jedoch ist die Position der X-Koordinate des Zahnrades noch nicht definiert. Dazu klicken sie in den Arbeitsbereich der 3D Oberfläche und anschließend wieder auf Rad_01. Klicken sie im Eigenschaftsmenü auf die Zeile Position_x und geben den Wert 275 mm ein. Der X-Abstand ist immer die Länge vom Koordinatenursprung der Welle zur Mitte des Zahnrades. Nun haben sie die Ritzelwelle erstellt.

Erstellen sie selbstständig das zweite Zahnrad und positionieren es wie oben beschrieben auf der Welle_02. Verwenden sie dazu die folgenden Parameter:

Rad_02	
Außenzahnrad	
Name	= Rad_02
id _{Welle}	= -1
Zahnbreite	= 108 mm
Radkörperinnend...	= 130 mm
Zähnezahl	= 34
m_n	= 8 mm
α_n	= 20 °
β	= -15 °
Profilverschiebung	= 0,46902
k	= 0
Wälzkreisdurchm...	= 0 mm
Werkstoff	= 16MnCr5
Position _x	= 0 mm
Schmierstoff	= Oel1

Bild 17: Eigenschaften zweiten Zahnrades

Die X-Koordinate beträgt 106 mm.

Nun müssen beide Zahnräder miteinander in Kontakt gebracht werden. Dazu verschieben sie die Baugruppe (Welle_02 und Zahnrad) mittels gedrückter ALT-Taste. Sie sollten nicht vergessen diese Taste gedrückt zu halten, da sie sonst die Verbindung zwischen Welle und Zahnrad auflösen und neu definieren müssen. Es werden nun gelbe Fanglinien in der Mitte beider Zahnräder sichtbar. Bringen sie diese so nah aneinander bis sie sich blau färben und lassen sie die linke Maustaste los.

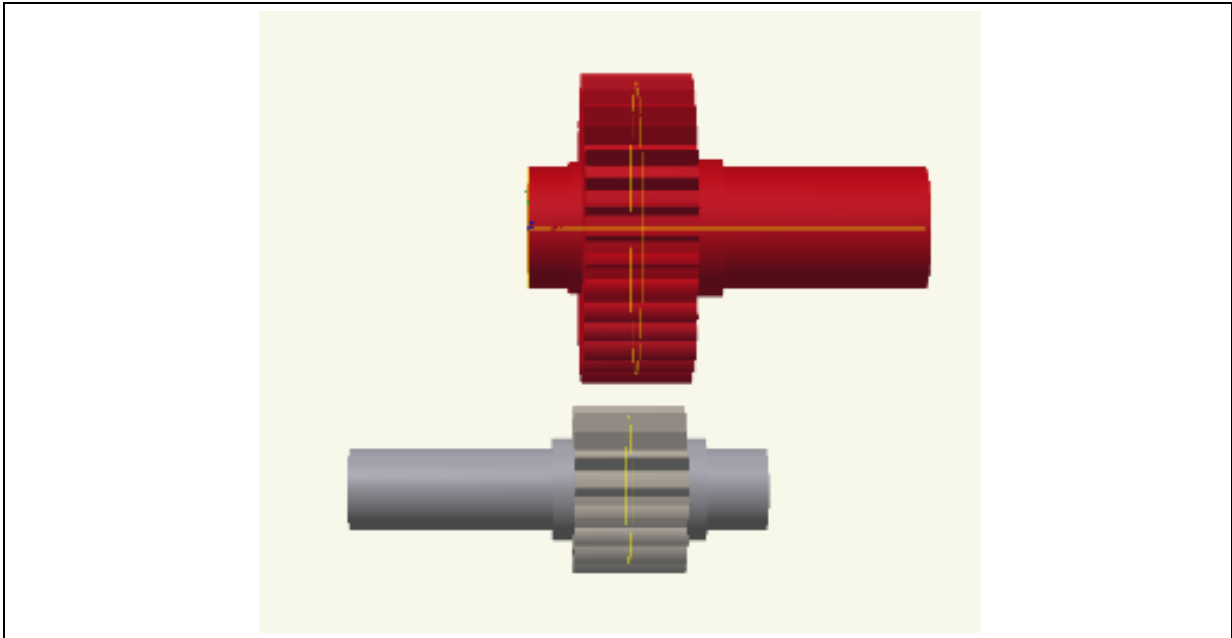


Bild 18: Fangmöglichkeit der Radpaarung

Es entsteht ein Zahnkontakt, wenn ein blaues Schloss zwischen den Rädern erscheint.

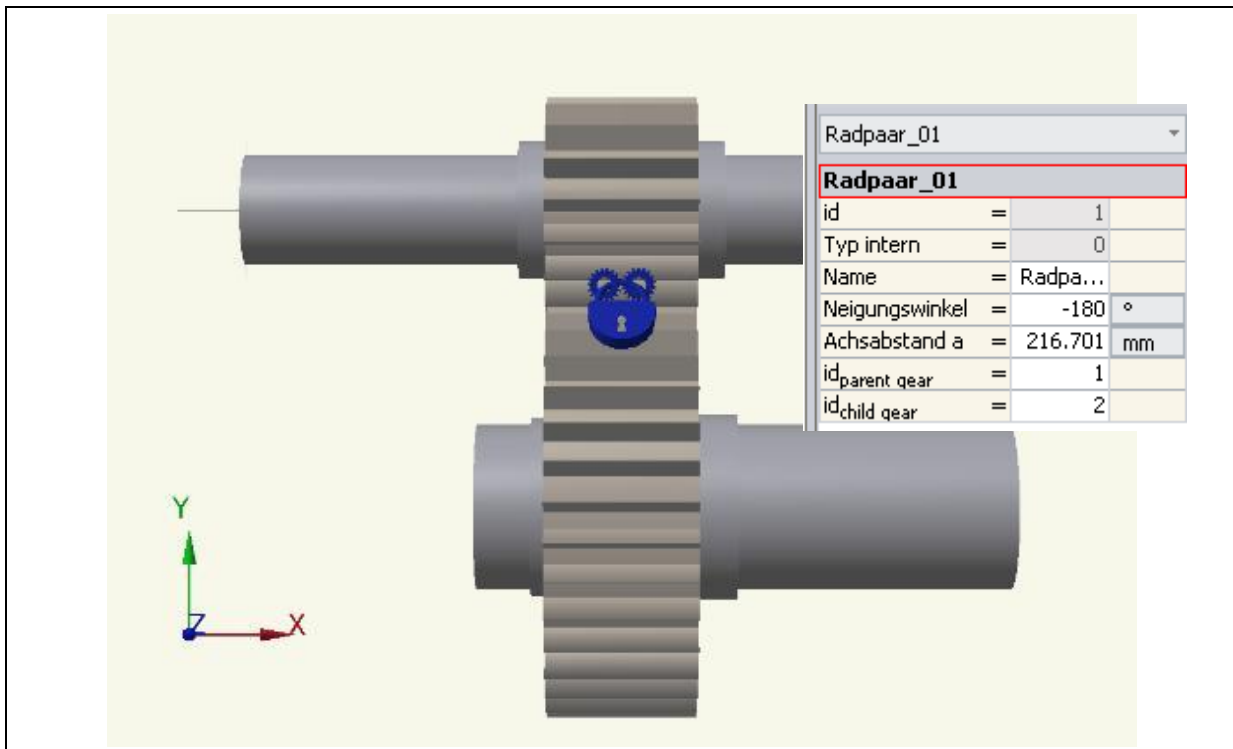


Bild 19: Definition und Eigenschaften einer Radpaarung

3.3. Modellierung von Lagern

Im Grafische Eingabe Modus werden lediglich Abmaße und Positionen der Lager bestimmt. Eine genauere Spezifikation zu Lagerart und Festigkeitseigenschaften wird erst bei der Nachrechnung der Lager vorgenommen. Ziehen sie, wie bereits die anderen Maschinenelemente, das Lager aus dem Elemente Explorer in die 3D oberfläche. Definieren sie die Parameter folgendermaßen:

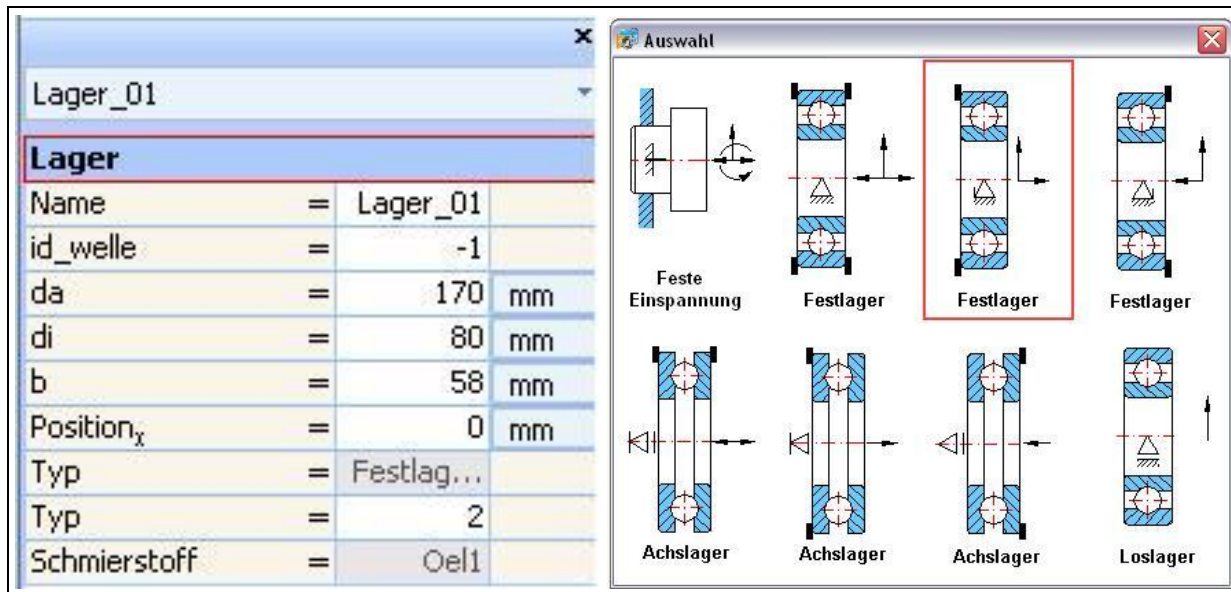


Bild 20: Eigenschaften des Lagers & Definition Lagertyp

Den Lagertyp für das Wellenberechnungsmodell können sie mittels des Grafische Auswahl Buttons bestimmen. In dem sich öffnenden Fenster wählen sie das links im Gehäuse fixierte Festlager. Den Schmierstoff wählen aus den festgelegten Getriebeölen aus.

Verschieben sie danach, wie bereits die Zahnräder, das Lager auf die Welle_01 bis beide Fanglinien blau sind und verknüpft werden. Die Position der X-Koordinate von Lager_01 beträgt 171 mm.

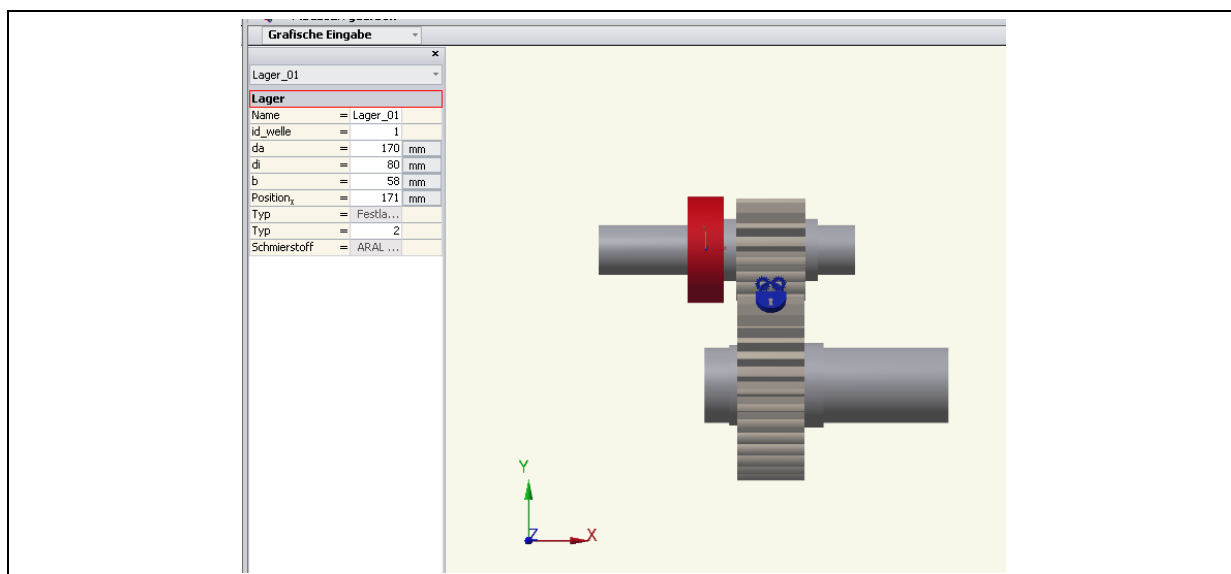


Bild 21: Verknüpfung des ersten Lagers

Erstellen sie ein weiteres Lager mit denselben Abmaßen und positionieren sie es auf der anderen Seite des Ritzels mit der X-Koordinate 379 mm. Achten sie darauf, als Lagertyp diesmal das rechts im Gehäuse fixierte Festlager auszuwählen, um somit eine Stützlagerung zu realisieren.

Erstellen sie nun die beiden Lager der Welle_02. Diese unterscheiden sich in ihren Abmaßen:

Lager_03		Lager_04	
Lager		Lager	
Name	= Lager_03	Name	= Lager_04
id_welle	= -1	id_welle	= 3
da	= 215 mm	da	= 180 mm
di	= 120 mm	di	= 120 mm
b	= 40 mm	b	= 48 mm
Position _x	= 0 mm	Position _x	= 214 mm
Typ	= Festlager...	Typ	= Festlag...
Typ	= 2	Typ	= 3
Schmierstoff	= Oel1	Schmierstoff	= Oel1

Bild 22: Eigenschaften Lager drei und vier

Die Abtriebswelle enthält ebenfalls eine Stützlagerung, deshalb müssen die Lagertypen wie bereits bei Lager_01 und Lager_02 definiert werden. Wählen sie als X-Koordinaten 20 mm und 214 mm.

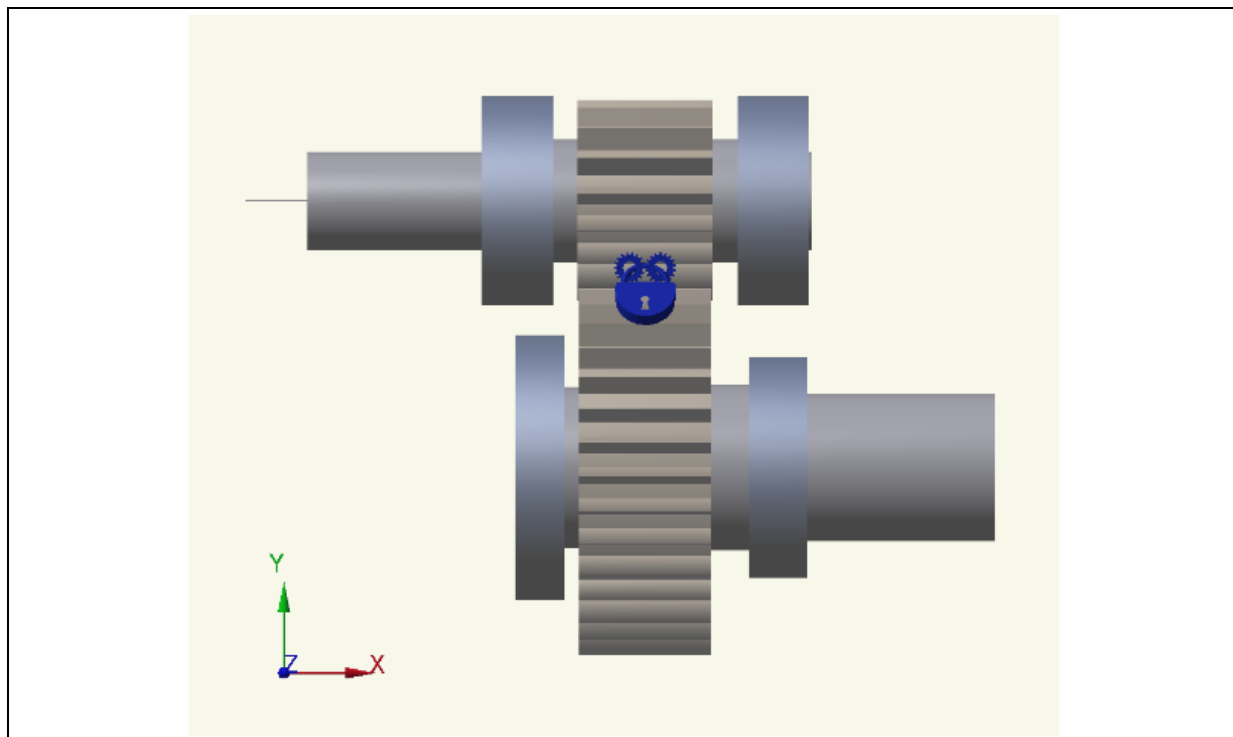


Bild 23: Alle Lager sind positioniert

3.4. Modellierung von An- und Abtrieb

Die Maschinenelemente des Getriebes sind nun weitestgehend erstellt. Um eine Nachrechnungen durchführen zu können, müssen jedoch noch die Beträge und Postionen der Belastungen noch angegeben werden. Klicken sie dazu im Elemente Explorer auf Kräftelemente → Antrieb und ziehen sie diesen auf die linke Seite der Welle_01. Um die Welle erscheint nun ein breiter grüner Pfeil.

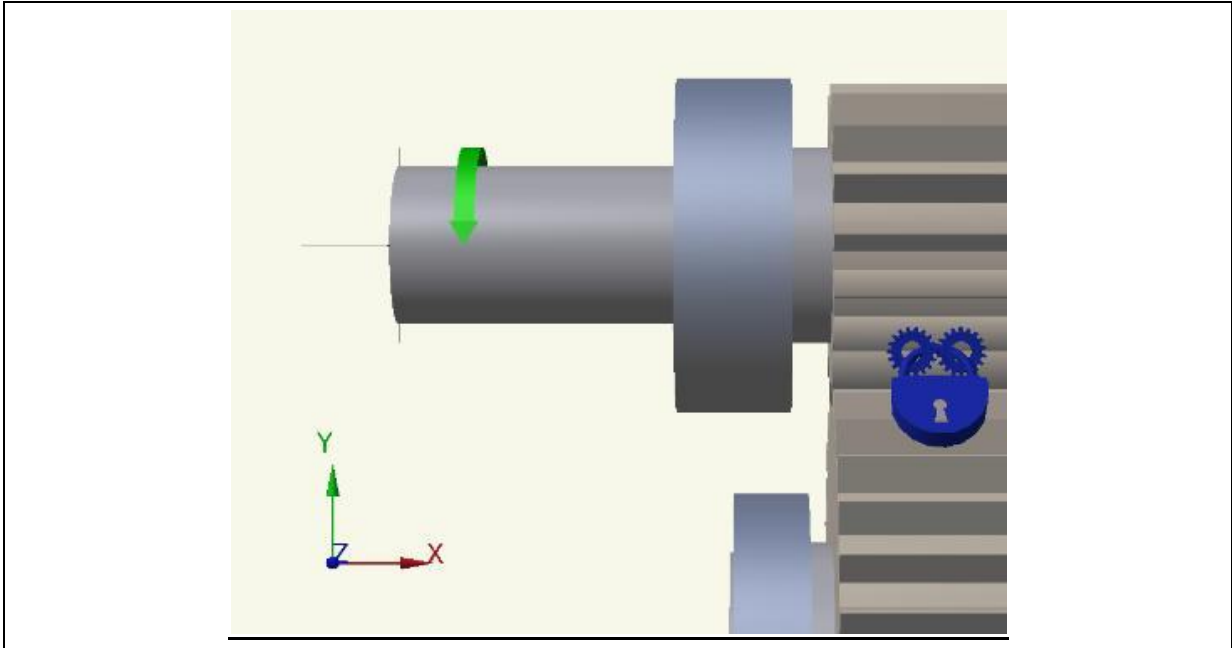


Bild 24: Definition des Antriebes

Im Eigenschaftsmenü können sie bei Drehzahl? Und Drehmoment? mittels Grafischer Auswahl bestimmen, ob sie diese vorgeben oder berechnen lassen wollen.

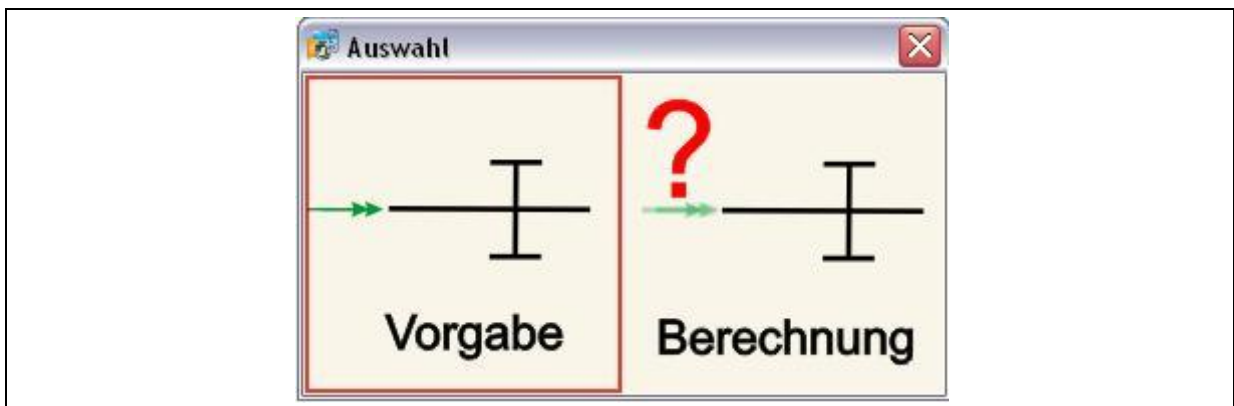


Bild 25: Vorgabe Moment und Drehzahl

Wählen sie für beide Vorgabe und tragen sie dann die folgenden Werte ein. Die Vorzeichen der Drehzahl bestimmen die Drehrichtung. Es ist darauf zu achten, dass bei Antrieben das Produkt aus Moment und Drehzahl größer null sein muss.

Antrieb_01		
Antrieb_01		
id	=	1
Name	=	Antrieb...
idWelle	=	1
Position _x	=	30
Drehzahl?	=	Vorgabe
Moment?	=	Vorgabe
Drehzahl	=	1000 1/min
Leistung	=	0 kW
Nennmoment	=	4774.65

Bild 26: Eigenschaften Abtrieb

Ziehen sie nun ein Abtriebsselement auf die rechte Seite der Welle_02. Wählen sie diesmal für Drehzahl und Drehmoment Berechnung aus und geben sie die X-Position 360 mm vor. Damit ist die Grafische Eingabe der Getriebedaten beendet.

Wenn sie alle Schritte dieses Tutorials nacheinander abgearbeitet haben, müsste ihr Getriebemodell wie folgt aussehen:

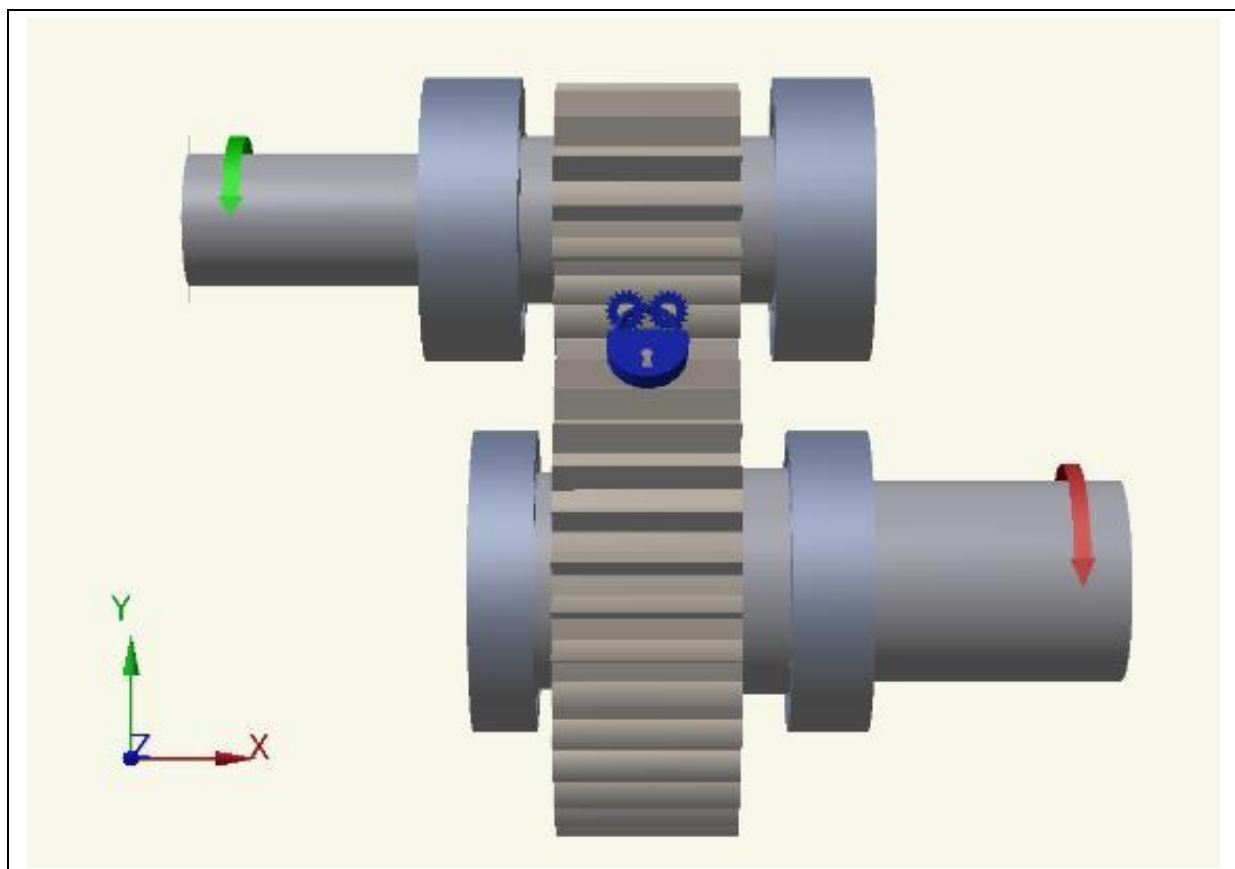


Bild 27: Fertiges Getriebemodell

4. Berechnung

4.1 Berechnung der Kinematik

Wechseln sie nun wieder auf die Oberfläche Eingabeseite. Dort wählen sie bei Auswahl Berechnung im Pull-Down Menü den Punkt Nachrechnung aus. Nun können sie Gearbox unterschiedliche Rechnungen ausführen lassen. Die Auswahl der Getriebedetaillierung können sie entweder in der Eingabeseite aussuchen oder in der oberen Menüleiste unter Aktionen den gewünschten Button drücken.

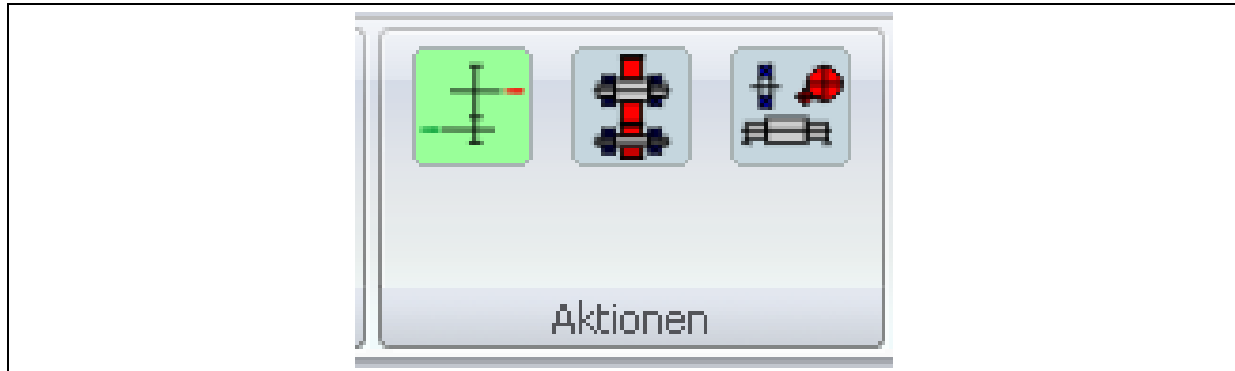


Bild 28: Auswahl Kinematik-Berechnung in Symbolleiste

In den Gruppierungen Werkstoffe, Schmierung, Belastungsdaten, geforderte Sicherheiten und Lebensdauern der Eingabeseite sind bereits alle von ihnen bereits ausgewählten Daten vorhanden.

Die meisten Parameter der Maschinenelemente sind bereits durch die Grafische Eingabe definiert. Unter der Gruppierung ausgewählte Parameter der gewählten Variante → Verbindungen → Radpaare müssen sie lediglich noch den Wirkungsgrad der Verzahnung eingeben. Wählen sie dafür $\eta=0,99$. Weitere Eingaben sind nicht nötig. Drücken sie nun F10 um die Berechnung der Kinematik zu starten.

Auf der rechten Seite des Bildschirms entsteht ein Fenster mit der Ausgabeseite. Diese enthält die Ergebnisse der Nachrechnung (Momente, Drehzahlen, Leistungen, Übersetzungen). Im Bereich Dokument der oberen Menü-Leiste können sie nun ihre Ergebnisse dokumentieren. Dabei werden zuerst die Eingabedaten und danach die Ausgabedaten in der Dokumentation aufgeführt. Sie können diese entweder sofort drucken, oder als Textformat (HTML, RTF, PDF) speichern. Sollten sie die Dokumentation in Englisch benötigen, müssen sie nur für die Auswahl Dokumentsprache die Einstellung entsprechend ändern und sie Erhalten eine englischsprachige Dokumentation.

Kinematikberechnung erfolgreich!

Kinematik

Antrieb	Abtrieb	Drehzahl [1/min]	Nennmoment [N*m]	Leistung [kW]
Antrieb_01	-	1000.000	4774.650	500.000
-	Abtrieb_01	-500.000	9453.807	-495.000

Übersetzungen

Verhältniss	kinematische Übersetzung	statische Übersetzung
Antrieb_01/Abtrieb_01	-2.000	0.505

Verzahnung

Radpaar	Rad ₁	Rad ₂	M ₁ [N*m]	M ₂ [N*m]	n ₁ [1/min]	n ₂ [1/min]	SH ₁	SH ₂	SF ₁	SF ₂	SB (Blitztemp.)	SinB (Integralmeth.)
Radpaar_01	Rad_01	Rad_02	-4774.650	-9549.300	1000.000	-500.000	-	-	-	-	-	-

Bild 29: Ergebnisse der Kinematik-Berechnung

4.2 Berechnung Getriebedesign

Schließen sie nun das Ausgabefenster wieder. Bevor sie weitere Nachrechnungen starten, sollten sie kontrollieren, ob ihr erstelltes 3D-Modell auch keine Fehler enthält. Wählen sie dazu in der oberen Menü-Leiste unter Aktionen den Punkt Getriebedesign aus.

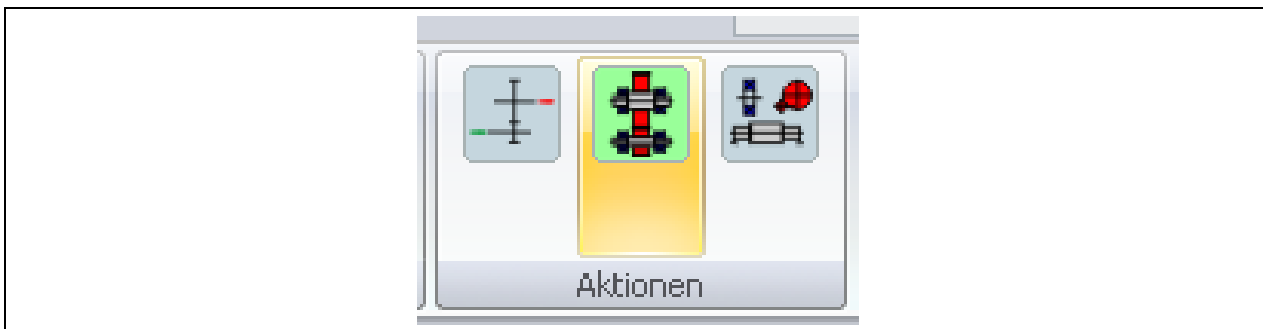


Bild 30: Auswahl Getriebedesign

Drücken sie F10. Wenn das Modell fehlerfrei ist, sollte auf der Ausgabeseite folgendes erscheinen:

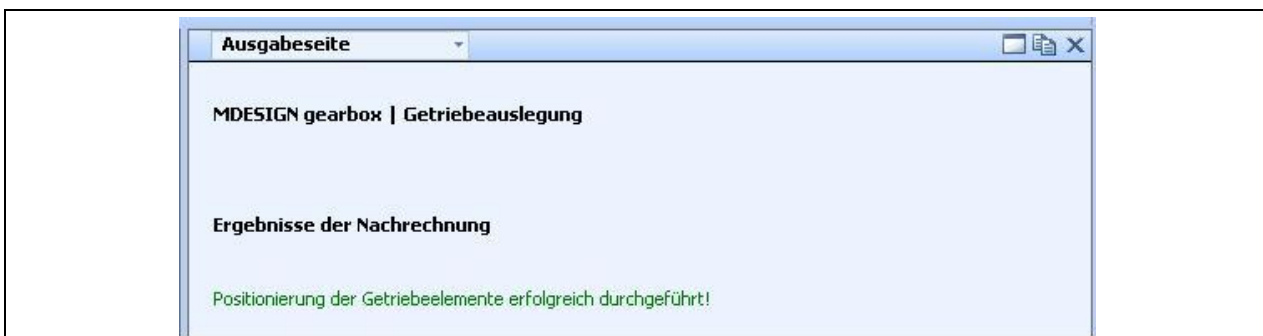


Bild 31: Anzeige nach Berechnung Getriebedesign

Außerdem sehen sie in der unteren Rechten Ecke des Bildschirms eine weitere 3D Abbildung des erstellten Getriebes, die das interne Berechnungsmodell zeigt.

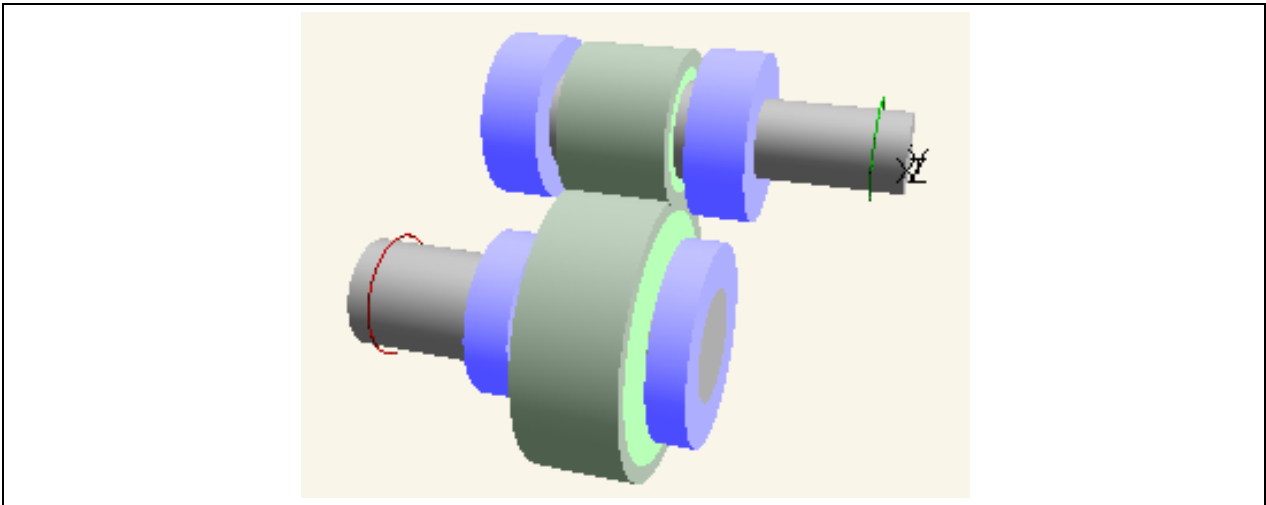


Bild 32: 3D gearbox Berechnungsmodell

Unter der Gruppierung Einstellungen können sie die graphische 3D Darstellung ergänzen z.B. um die Bezeichnung der Elemente. Weiterhin kann ein Bauraum unter der Gruppierung Bauraum um das globale KS aufgespannt werden und die erste Welle bezüglich des globalen KS verschoben werden unter der Tabelle Welle → lokale x,y,z Koordinaten.

Getriebewellen														
Nr.	Name	id	Wellentyp	Werkstoff	Referenz	Referenz	mm	y	mm	mm	mm	mm	lges	mm
1	Welle_01	1	Welle	16MnCr5		0	-150	350	150	150	150	-150	410	
2	Welle_02	2	Welle	E295		0	0	0	0	133.299	150	19	390	

Bild 33: Verschiebung KS der ersten Welle bezüglich globalen KS
(x = -150 mm, y = 350 mm, z = 150 mm)

Die Bauraumausdehnung wird gewählt mit x = 300 mm, y = 500 mm und z = 300 mm.

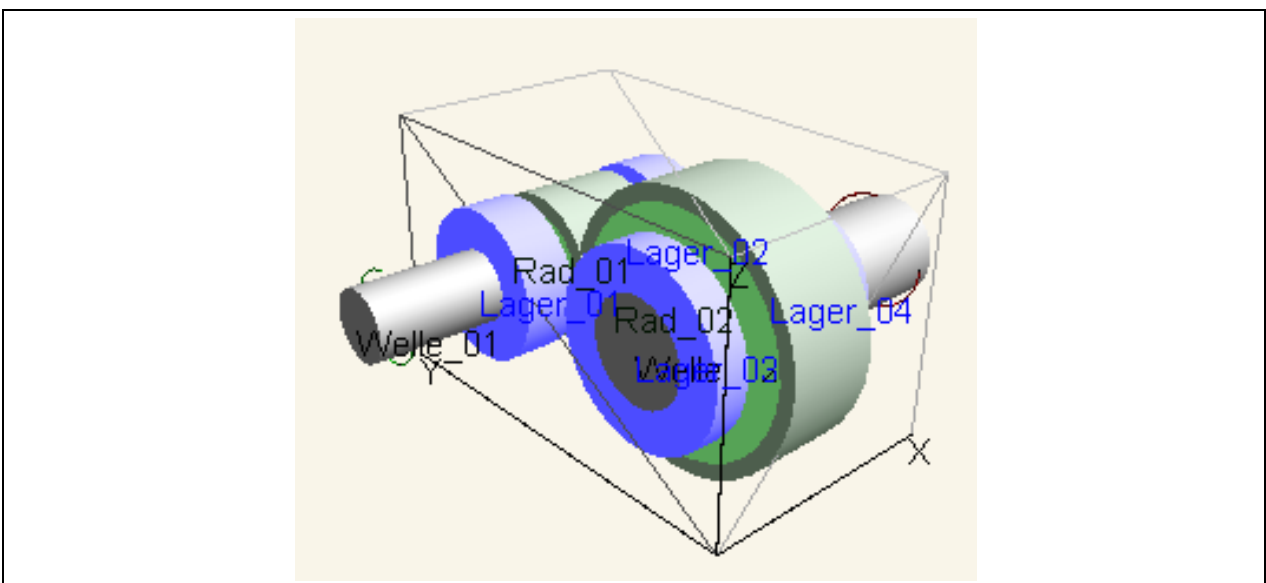


Bild 34: Beschriftung und Bauraumdarstellung

4.3 Berechnung der Zahnräder

Schließen sie erneut die Ausgabeseite und wählen sie unter Aktionen nun Detaillierung → Auswahl Maschinenelemente. Es erscheint ein grafisches Auswahlfenster, in dem sie das zu berechnende Maschinenelement bestimmen können. Wählen sie Radpaar.



Bild 35: Auswahl Detaillierung

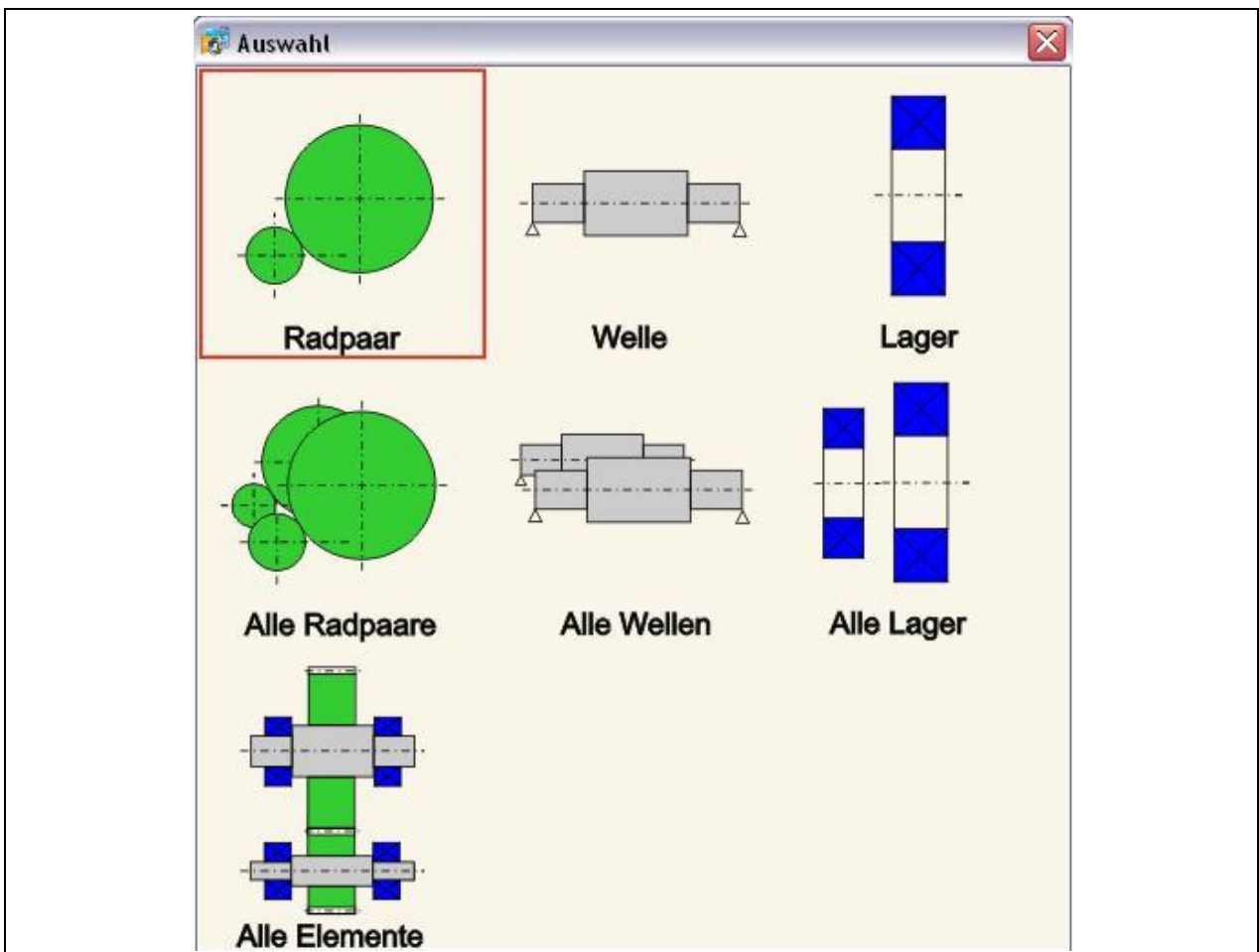


Bild 36: Auswahl Maschinenelemente

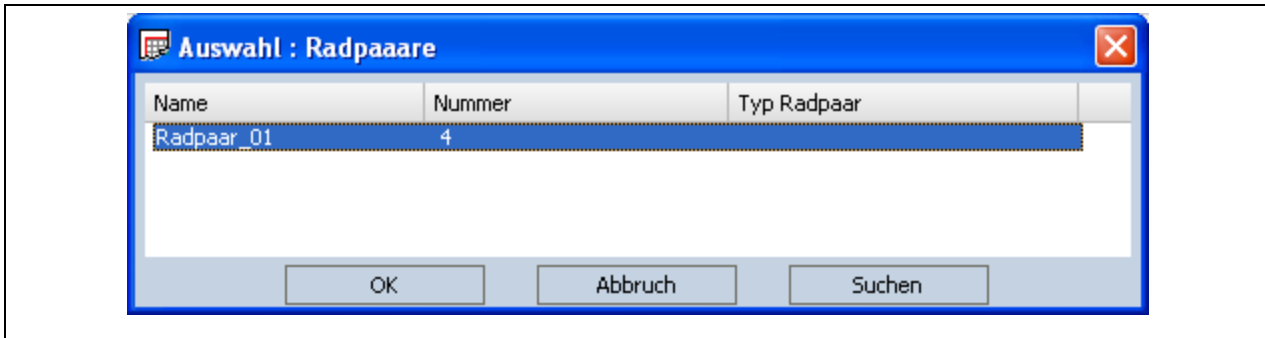


Bild 37: Auswahl des Radpaares

Im darauffolgenden Datenbankfenster können sie zwischen allen Radpaaren wählen, welche im Getriebe vorhanden sind. In diesem Fall ist dies lediglich Radpaar_01. Wählen sie dieses aus. Es erscheint eine Meldung, dass ein Bezugsprofil für die Stirnräder gewählt werden muss. Wählen sie dazu unter erweiterte Parameter der gewählten Variante → Maschinenelemente → Stirnzahnräder unter Bezugsprofil mittels des Auswahl-Buttons ein Bezugsprofil aus. In diesem Fall ist dies für beide Zahnräder das oberste in der Tabelle.

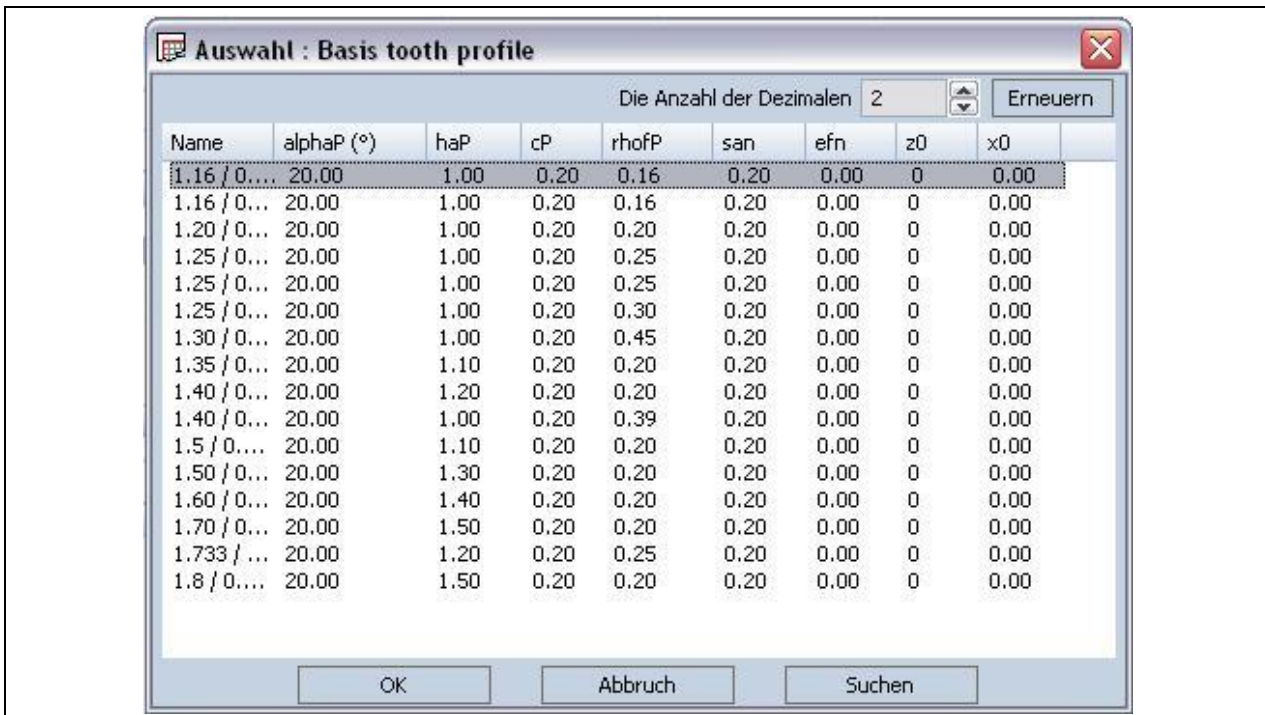


Bild 38: Auswahl eines Verzahnungsprofils

Betätigen sie erneut unter Auswahl Getriebedetaillierung → Konfiguration der Verzahnungsdaten für gewählte Variante den Button Anwenderfunktion oder Verwenden sie wie beschrieben die Symbolleiste.

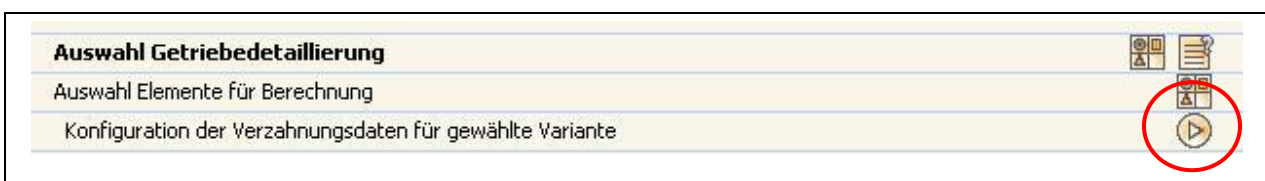


Bild 39: Erneute Auswahl des zu detaillierenden Radpaares

Nun befindet sie sich im Detaillierungsmodus der Verzahnung und können weitere Parameter der Verzahnung ändern. Setzen sie zuerst den Achsabstand auf 218 mm. Unter Vorgaben für Kopfkürzungen wählen sie im Pull-Down Menü keine Vorgabe. Zuletzt geben sie alle Stirnlastfaktoren mit eins vor. Wenn diese Eingaben als null vorgegeben werden, berechnet das Programm diese Faktoren selbstständig nach Norm. Starten sie die Berechnung (F10). Nach kurzer Zeit können sie die berechneten Sicherheiten der Zahnräder betrachten. Sollten diese geringer als die vorgegebenen Mindestsicherheiten sein, wird dies in roter Schrift auf der Ausgabeseite angezeigt. Anschließend werden alle zur Berechnung benötigten Zwischenergebnisse angezeigt. Zudem können sie im rechten unteren Grafikmenü unterschiedliche Abbildungen zu ihren Zahnrädern betrachten und auch speichern. Beispiele hierzu wären die Zahnformen, Grübchen- und Zahnfuß-Tragfähigkeitsdiagramme sowie verschiedene Ansichten der Zahnräder.

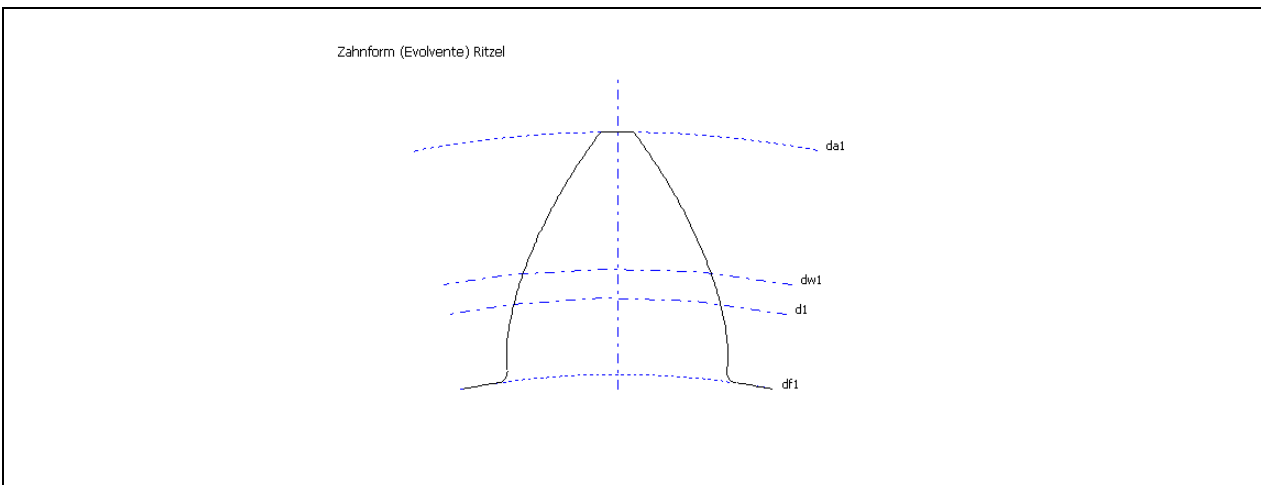


Bild 40: Profilansicht eines Ritzels

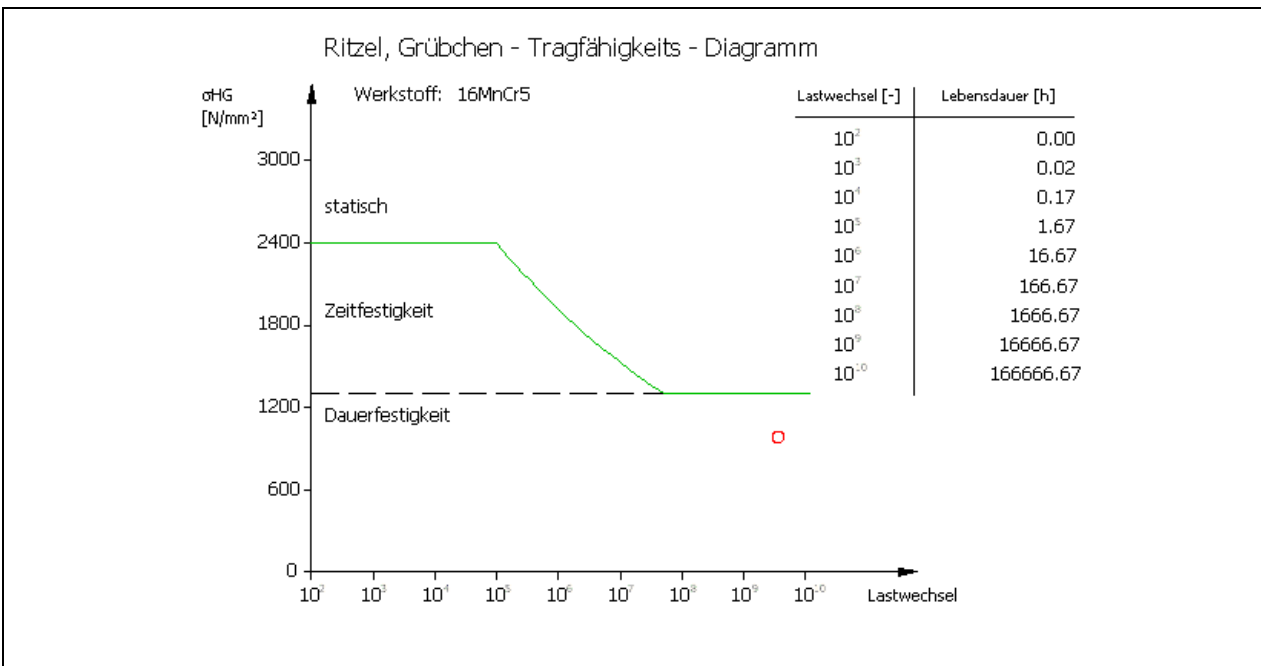


Bild 41: Tragfähigkeits-Diagramm

Detaillierte Beanspruchungsanalyse in Getrieben

Ergebnisse der Einzelrechnung
Element = Radpaar_01

Verzahnung

Radpaar	Rad ₁	Rad ₂	M ₁ [N*m]	M ₂ [N*m]	n ₁ [1/min]	n ₂ [1/min]	SH ₁	SH ₂	SF ₁	SF ₂	SB (Blitztemp.)	SinB (Integralmeth.)
Radpaar_01	Rad_01	Rad_02	-4774.650	-9549.300	1000.000	-500.000	1.350	1.350	2.810	3.033	17.693	12.386

Ergebnisse:

- Allgemeine daten
- Geometrische Parameter
- Werkzeugdaten der Zahnstange für Ritzel
- Ergebnisse Tragfähigkeitsnachweis
- Allgemeine Faktoren
- Grübchentragfähigkeit
- Zahnfußtragfähigkeit
- Fresstragfähigkeit
- Blitztemperaturverfahren
- Integralverfahren

Bild 42: Ergebnisübersicht Einzelberechnung Radpaar

Verlassen sie den Radpaardetaillierungsmodus über das Kreuz.



Bild 43: Verlassen des Detaillierungsmodus

4.4 Berechnung der Wellen

Um eine Welle zu berechnen und zu detaillieren, drücken sie diesmal unter Aktionen → Detaillierung → Auswahl Maschinenelemente die Schaltfläche Welle und wählen sie die Welle_01 aus. Der Großteil der geometrischen Daten für die Welle ist bereits bestimmt und kann natürlich auch geändert werden (Radius, Wellenabsatzgeometrie,...). Jedoch müssen zusätzlich zu den Wellenabsätzen weitere Kerben, die an der fertigen Welle vorhanden sind, definiert werden.

Diese können unter Kerbform in einer Tabelle hinzugefügt werden.

In der Spalte Typ kann mit dem Button Grafikhilfe eine Hilfe angezeigt werden in dem die verschiedenen Kerbformen mit benötigten Abmaßen dargestellt sind.

Oberhalb der Tabelle kann mit dem Button Grafische Auswahl eine Kerbe ausgewählt werden. Wählen sie „Passfederverbindung 1Nut“.

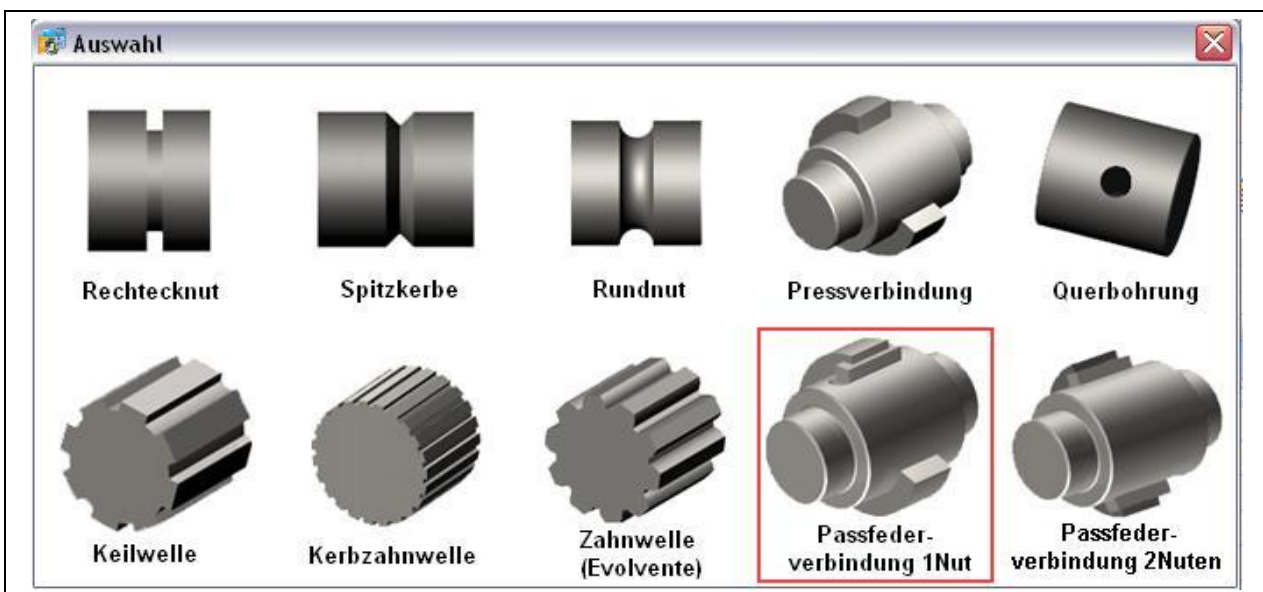


Bild 44: Einfügen einer Kerbe – Passfederverbindung

Geben sie folgende Parameter ein:

Kerbform										
Nr.	Typ =	x mm	d: mm	t: mm	r mm	2r mm	m mm	L mm		
1	Passfederverbindung ...	20	80	0	0	0	0	60		

Bild 45: Eigenschaften der Passfederverbindung

Ob alle Parameter korrekt sind, können sie mittels des Grafikhilfe Buttons über der Tabelle kontrollieren. Es müsste in der rechten Grafikdarstellung ein 3D-Modell der Welle entstehen, in dem alle Kräfte, Momente, Lager, und Kerben dargestellt sind. Nun können sie wieder die Berechnung mit F10 starten.

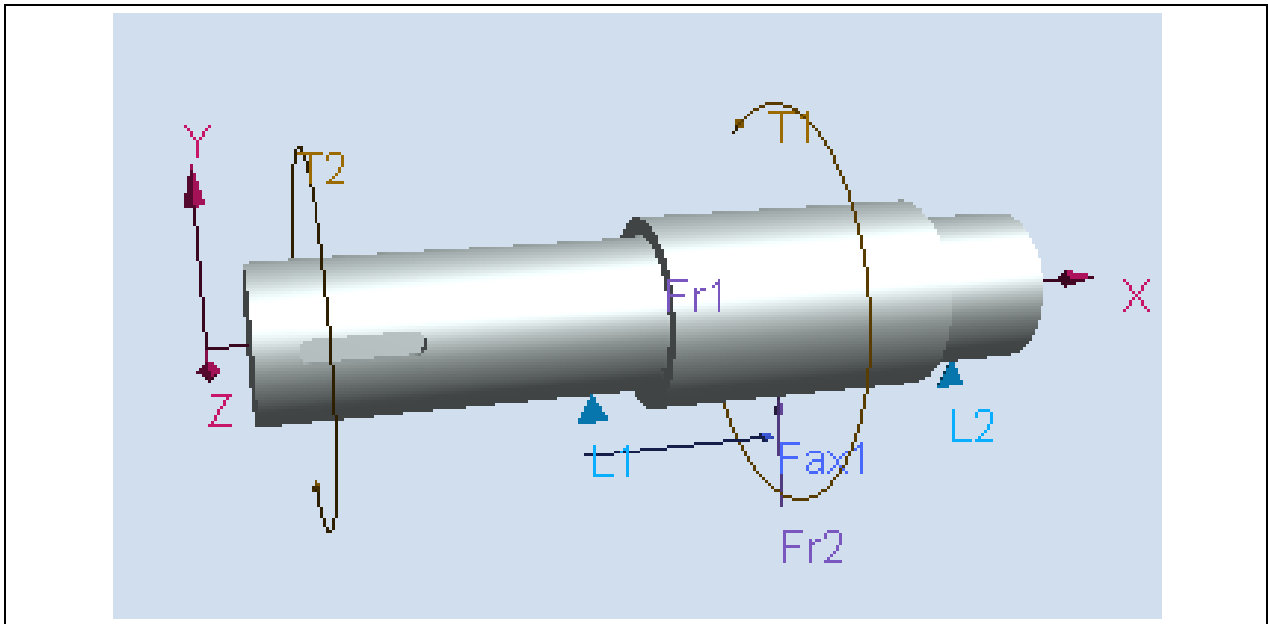


Bild 46: 3D Berechnungsmodell Welle_01

Die resultierende Ausgabeseite enthält die resultierenden Sicherheiten sowie anschließend Zwischenergebnisse der Rechnung. Diese können, wenn gewünscht, wieder dokumentiert werden.

Detaillierte Beanspruchungsanalyse in Getrieben

Ergebnisse der Einzelrechnung											
Element		= Welle_01									
Wellenberechnung											
Welle	Sicherheit gegen Gewaltbruch S_F	Sicherheit gegen Dauerbruch S_d		Drehzahl [1/min]							
Welle_01	3.630	3.322		1000.000							
Lager											
Lager	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_r [N]	F_a [N]	Bezeichnung	Lebensdauer [h]	stat. Sicherheit	d_i [mm]	d_a [mm]	B [mm]
Lager_01	0.000	-9837.800	-36138.500	-	-	-	-	-	-	-	-
Lager_02	-19990.300	-23811.700	-36138.500	-	-	-	-	-	-	-	-
Ergebnisse:											
Berechnungsgang: dynamischer und statischer Festigkeitsnachweis											
Gesamtlänge der Welle			L	=	410.000	mm					
Gesamtmasse der Welle			m	=	19.507	kg					
Massenträgheitsmoment der Welle			J	=	0.01977	kg*m ²					
Geometrisches Trägheitsmoment der Welle			I	=	892.998	cm ⁴					
Position des Schwerpunktes auf der X-Achse			x_s	=	216.947	mm					
Verdrehwinkel der Welle			φ	=	0.181	°					
Zusätzliche Wellendaten:											
Wellenabsatznr.	l [mm]	I_p [cm ⁴]	W_t [cm ³]	m [kg]	J [kg*m ²]	I [cm ⁴]	W_b [cm ³]				

Bild 47: Ergebnisse der Wellenberechnung Welle_01

Außerdem können im unteren Grafikbereich unterschiedliche Darstellungen und Diagramme wie Kraft- und Momentverläufe, Durchbiegung der Wellen, resultierende Sicherheiten mit Position, etc. betrachtet und gespeichert werden.

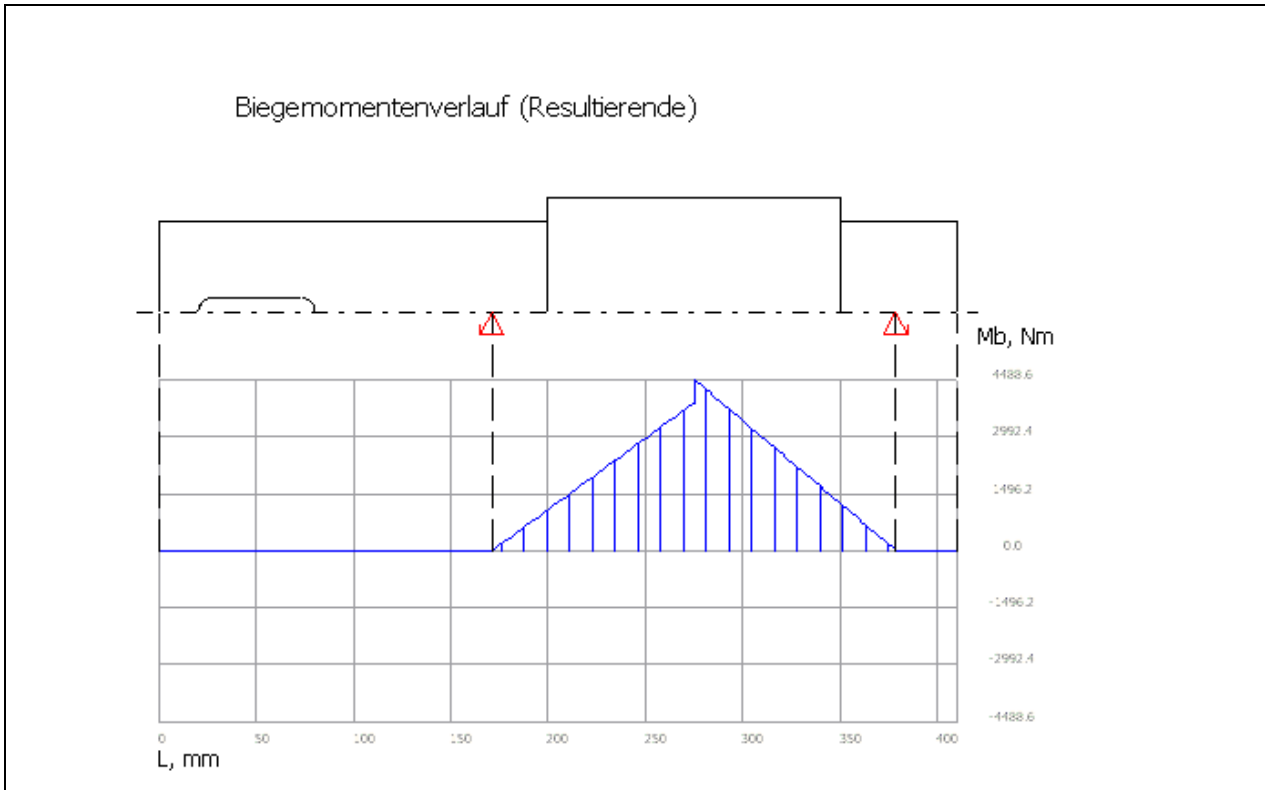


Bild 48: Biegemomentenverlauf

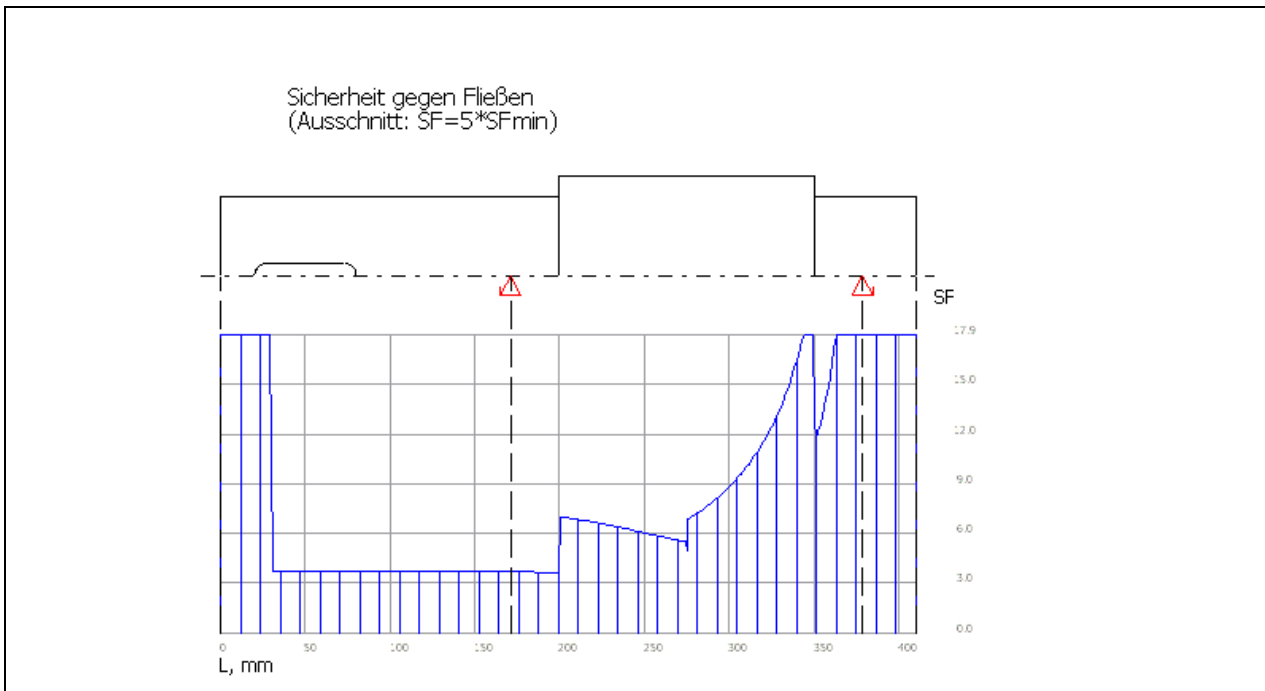


Bild 49: Verlauf Sicherheit gegen Fließen

Führen sie nun die Nachrechnung für Welle_02 aus. Tragen sie dazu folgende zusätzliche Kerben ein:

Kerbform										
Nr.	Typ =	x	d:	t:	r	2r	m	L		
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
1	Keilwelle	390	112	0	0	0	0	80		
2	Pressverbindung	50	130	0	0	0	0	108		

Bild 50: Eigenschaften der Kerben für die zweite Welle

Das resultierende 3D-Modell müsste nun folgendermaßen aussehen:

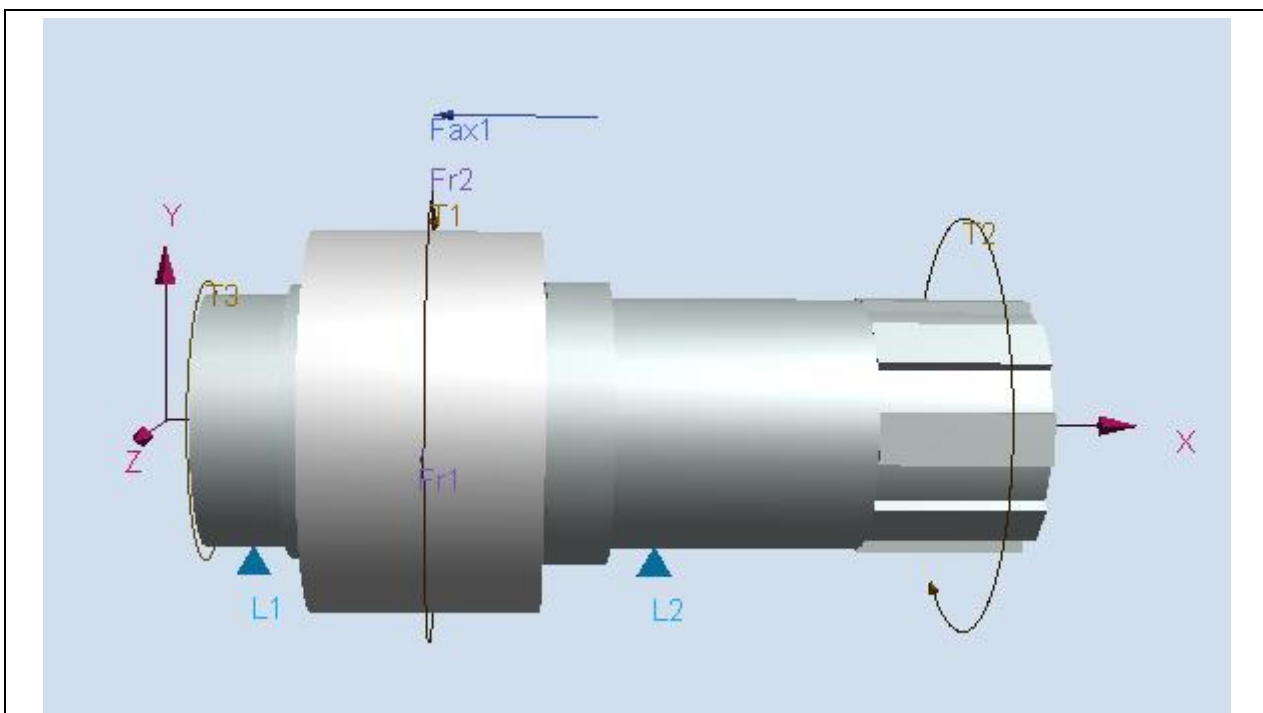


Bild 51: 3D Berechnungsmodell der zweiten Welle im Detaillierungsmodus

Verlassen sie den Detaillierungsmodus über Klick auf das Kreuz bei erweiterter Parameter Welle.

4.5 Berechnung der Lager

Wählen sie diesmal unter Aktionen Detaillierung → Auswahl der Maschinenelemente → Lager aus.

Aus der Tabelle der vorhandenen Lager wählen sie Lager_01.

Jetzt können sie für ihr Getriebe die Anforderungen an die Lagerung bestimmen, damit Gearbox ihnen geeignete Lager aus der integrierten Datenbank vorschlägt. Für dieses Getriebe können sie die Einstellungen beibehalten. Unter Lagerparameter → Lagertyp können sie mittels der Grafischen Auswahl das gewünschte Lager aussuchen. Wählen sie Radial-Kegelrollenlager

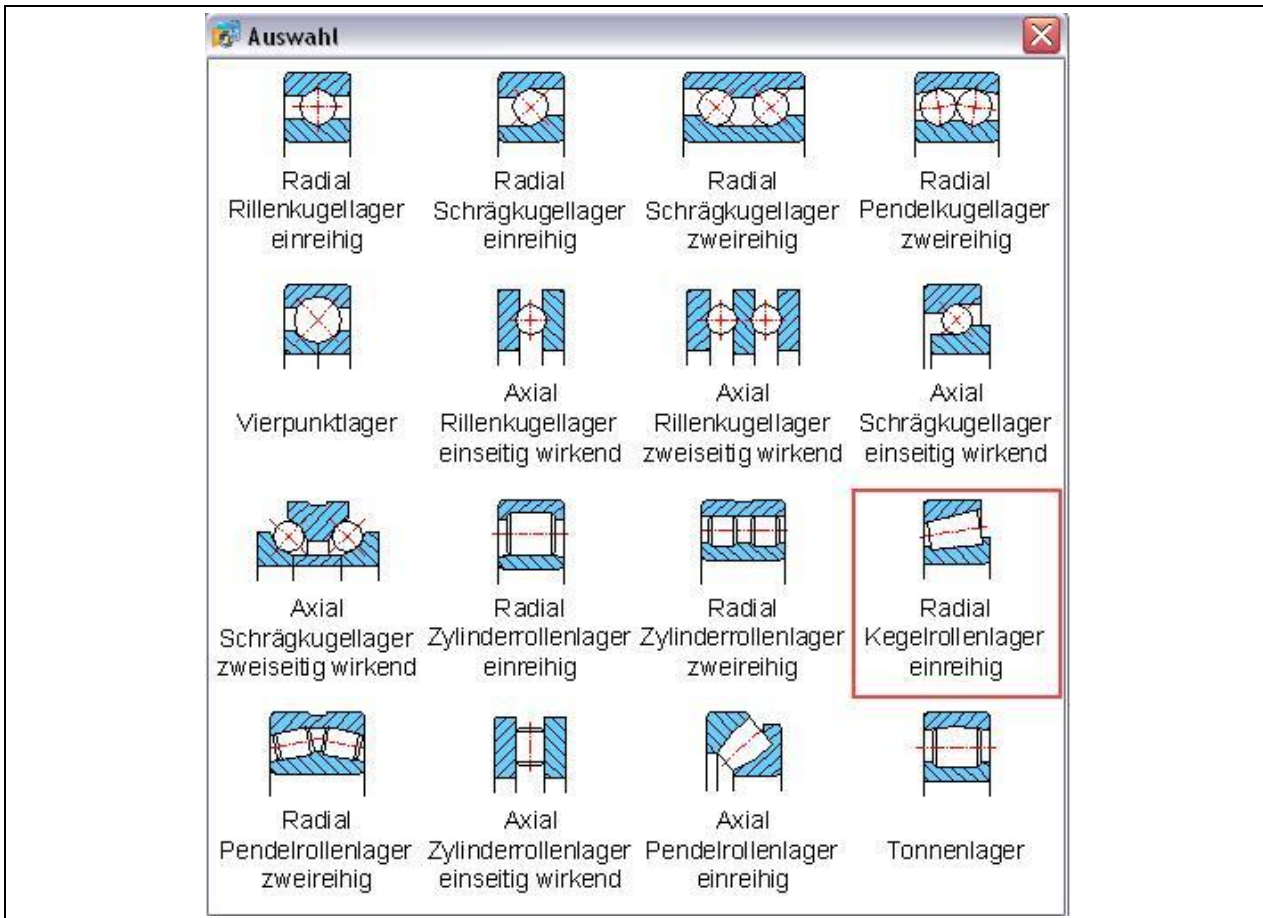


Bild 52: Auswahl Lagertyp für Auswahl aus Lagerkatalog

Wenn sie ein bestimmtes Lager für ihr Getriebe vorgesehen haben, können sie die Lagerparameter weiter spezifizieren. Nötig ist es in diesem Fall nicht.

Starten sie die Berechnung mit F10. Es erscheint eine Tabelle mit der Auswahl unterschiedlicher Kegelrollenlager, die die gewünschte Lebensdauer erfüllen. Wählen sie das Lager 32316A aus.

Detaillierte Beanspruchungsanalyse in Getrieben

Auswahl : Radial Kegelrollenlager einreihig												
										Die Anzahl der Dezimalen	2	Erneuern
d, mm	Da, mm	B, mm	Co, kN	C, kN	ng, 1/min	m, kg	Kurzzeichen	Reihe	Form	Hersteller		
80.00	170.00	39.00	345.00	290.00	4500.00	4.34	30316A	303	normal	FAG		
80.00	170.00	58.00	540.00	400.00	4500.00	6.57	32316A	323	normal	FAG		
80.00	170.00	58.00	510.00	360.00	4300.00	7.02	32316B	323	normal	FAG		
85.00	150.00	49.00	440.00	290.00	4500.00	3.50	33217	332	normal	FAG		
85.00	180.00	41.00	375.00	310.00	4300.00	4.83	30317A	303	normal	FAG		
85.00	180.00	60.00	585.00	430.00	4300.00	7.50	32317A	323	normal	FAG		
85.00	180.00	60.00	600.00	415.00	4300.00	7.86	32317	323	normal	FAG		
90.00	150.00	45.00	425.00	265.00	4500.00	3.19	33118	331	normal	FAG		
90.00	160.00	40.00	360.00	260.00	4500.00	3.78	32218A	322	normal	FAG		
90.00	190.00	43.00	325.00	275.00	4000.00	5.50	31318	313	normal	FAG		
90.00	190.00	43.00	400.00	335.00	4000.00	5.83	30318A	303	normal	FAG		
90.00	190.00	64.00	655.00	490.00	4000.00	8.51	32318A	323	normal	FAG		
95.00	170.00	43.00	415.00	300.00	4300.00	4.24	32219A	322	normal	FAG		
95.00	200.00	45.00	440.00	365.00	3600.00	6.77	30319A	303	normal	FAG		
95.00	200.00	45.00	365.00	305.00	3600.00	6.50	31319A	313	normal	FAG		
95.00	200.00	67.00	710.00	530.00	3600.00	10.30	32319A	323	normal	FAG		
100.00	180.00	46.00	475.00	335.00	4000.00	5.67	32220A	322	normal	FAG		
100.00	215.00	47.00	510.00	415.00	4300.00	8.38	30320A	303	normal	FAG		
100.00	215.00	51.00	480.00	380.00	3000.00	8.81	31320X	313	normal	FAG		
100.00	215.00	73.00	850.00	610.00	3400.00	12.90	32320A	323	normal	FAG		
105.00	160.00	43.00	450.00	265.00	4300.00	3.34	33021	330	normal	FAG		
105.00	190.00	36.00	365.00	280.00	4000.00	4.23	30221A	302	normal	FAG		
105.00	190.00	50.00	550.00	380.00	3600.00	6.07	32221A	322	normal	FAG		
105.00	225.00	77.00	930.00	670.00	3000.00	15.10	32321A	323	normal	FAG		
110.00	170.00	47.00	520.00	300.00	4300.00	4.16	33022	330	normal	FAG		
110.00	200.00	38.00	415.00	315.00	3600.00	5.23	30222A	302	normal	FAG		
110.00	200.00	53.00	600.00	415.00	3400.00	7.35	32222A	322	normal	FAG		
110.00	240.00	50.00	585.00	480.00	2800.00	11.10	30322A	303	normal	FAG		
110.00	240.00	57.00	585.00	465.00	2800.00	12.30	31322X	313	normal	FAG		
110.00	240.00	80.00	102...	735.00	2800.00	19.10	32322A	323	normal	FAG		
120.00	180.00	48.00	560.00	310.00	3600.00	4.55	33024	330	normal	FAG		

Bild 53: Lagerauswahl aus der Datenbank

Als Ergebnis auf der Ausgabeseite erhalten sie die zu erwartende Lebensdauer des Lagers sowie die statische Sicherheit. Außerdem werden weitere Daten des in der Tabelle ausgewählten Lagers mit angegeben.

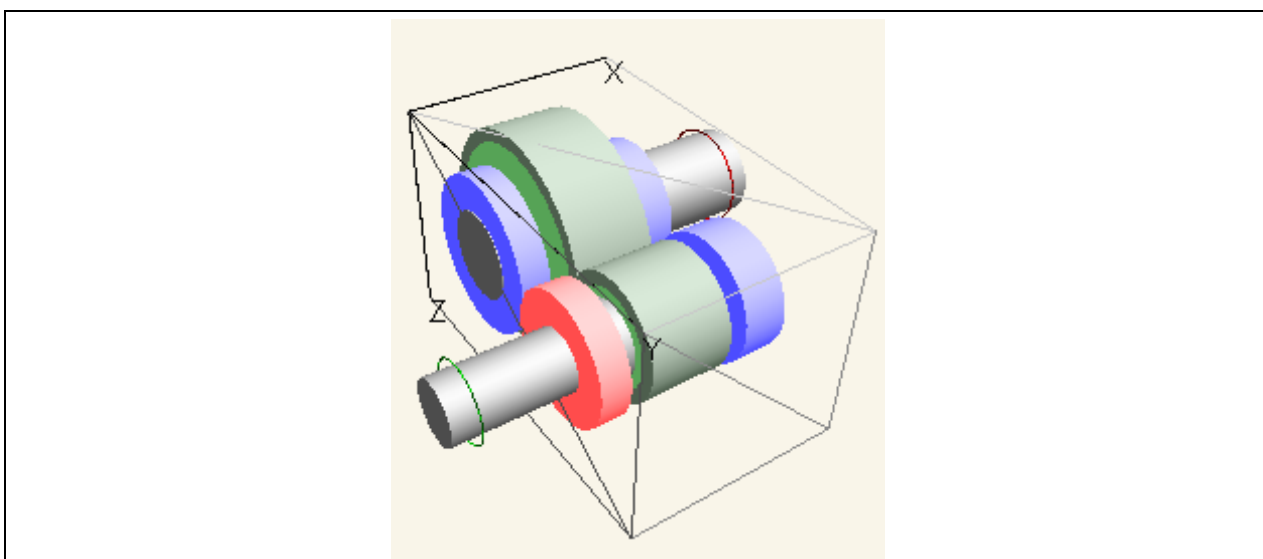
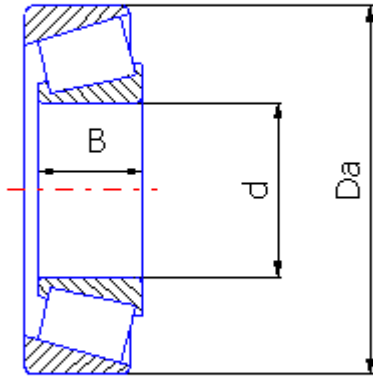


Bild 54: Lager_01 in 3D-Berechnungsmodell

Kurzbezeichnung des Lagers 32316A



$$D_a = 170.0 \text{ mm}$$

$$D = 80.0 \text{ mm}$$

$$B = 48.3 \text{ mm}$$

Bild 55: Graphische Zeichnung des ausgewählten Kegelrollenlagers

Verwenden Sie das Lager in der weiteren Berechnung durch Wahl Lagerauswahl → Wiederholen auf der Eingabeseite und verlassen sie den Detaillierungsmodus des Lagers durch Klick auf das Kreuz bei „erweiterte Parameter Lager“.

Führen sie nun analog die Nachrechnungen für die drei anderen Lager durch. Verwenden sie dafür folgende Typen:

Lager_02: Radial-Kegelrollenlager – 32316A

Lager_03: Radial-Kegelrollenlager – 30224A

Lager_04: Radial-Kegelrollenlager – 33024

Nun haben sie das Getriebe vollständig ausgelegt und ausreichend dimensioniert/detailliert. Beachten sie, dass dies jedoch ein grober Getriebeentwurf zur Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte ist.

4.6 Komplette Berechnung

Nachdem alle einzelnen Maschinenelemente detailliert sind, kann eine Gesamtberechnung durchgeführt werden.

Wählen sie dafür unter Aktionen Detaillierung → Auswahl der Maschinenelemente → Alle Elemente aus.

Detaillierte Beanspruchungsanalyse in Getrieben

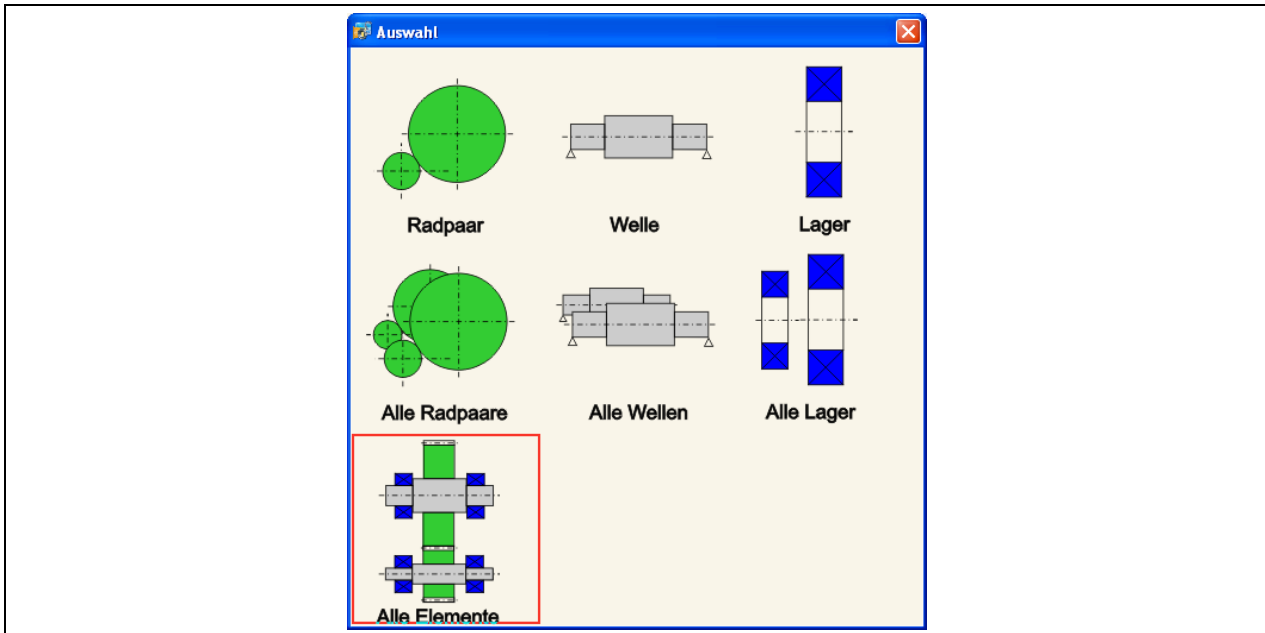


Bild 56: Berechnung aller Elemente

Als Ergebnis erhält man eine Übersicht über alle Nachrechnungsergebnisse.

Ergebnisse der Gesamtnachrechnung												
Kinematik												
Antrieb	Abtrieb	Drehzahl [1/min]	Nennmoment [N*m]	Leistung [kW]								
Antrieb_01	-	1000.000	4774.650	500.000								
-	Abtrieb_01	-500.000	9453.807	-495.000								
Übersetzungen												
Verhältniss	kinematische Übersetzung		statische Übersetzung									
Antrieb_01/Abtrieb_01	-2.000		0.505									
Verzahnung												
Radpaar	Rad ₁	Rad ₂	M ₁ [N*m]	M ₂ [N*m]	n ₁ [1/min]	n ₂ [1/min]	SH ₁	SH ₂	SF ₁	SF ₂	SB (Blitztemp.)	SinB (Integralmeth.)
Radpaar_01	Rad_01	Rad_02	-4774.650	-9549.300	1000.000	-500.000	1.350	1.350	2.810	3.033	17.693	12.386
Wellenberechnung												
Welle	Sicherheit gegen Gewaltbruch S _F		Sicherheit gegen Dauerbruch S _d			Drehzahl [1/min]						
Welle_01	3.630		3.322			1000.000						
Welle_02	3.330		4.375			-500.000						
Lager												
Lager	F _x [N]	F _y [N]	F _z [N]	F _r [N]	F _a [N]	Bezeichnung	Lebensdauer [h]	stat. Sicherheit	d _i [mm]	d _a [mm]	B [mm]	
Lager_01	0.000	-9837.800	-36138.500	37453.618	0.000	Radial Kegelrollenlager einreihig FAG 32316A	44709.800	14.400	80.000	170.000	58.000	
Lager_02	-19990.300	-23811.700	-36138.500	43278.034	19990.300	Radial Kegelrollenlager einreihig FAG 32316A	14884.900	12.500	80.000	170.000	58.000	
Lager_03	19990.300	33879.460	40444.990	52759.976	19990.300	Radial Kegelrollenlager einreihig FAG 30224A	16600.700	8.600	120.000	215.000	40.000	
Lager_04	0.000	-229.964	31831.700	31832.531	0.000	Radial Kegelrollenlager einreihig FAG 33024	65742.600	17.600	120.000	180.000	48.000	

Bild 57: Berechnung aller Elemente

5. Sicherung der Projektdaten

Alle Berechnungsdatensätze (*.XML) der Maschinenelemente-Berechnung werden während der Berechnung in einem Projektordner gespeichert.

Standardmäßig ist das Zielverzeichnis ein temporäres Verzeichnis auf ihrem Rechner. Beim Neu laden einer Datei werden alle temporären Daten aus diesem temporären Verzeichnis gelöscht. Deshalb ist ein neues Zielverzeichnis zu wählen. Wird dies am Ende der Berechnung gemacht, können alle erzeugten XML Datensätze in dieses neue Projektverzeichnis kopiert werden.

Wählen sie einen entsprechenden Pfad wie abgebildet aus, bestätigen sie den Kopiervorgang mit Ja und speichern sie erneut den gearbox Datensatz. Die Daten im Projektverzeichnis müssen mit gespeichert werden, damit bei Neustart der Software oder Laden des gearbox Datensatzes auf die bereits detaillierten Berechnungsergebnisse zugegriffen werden kann.

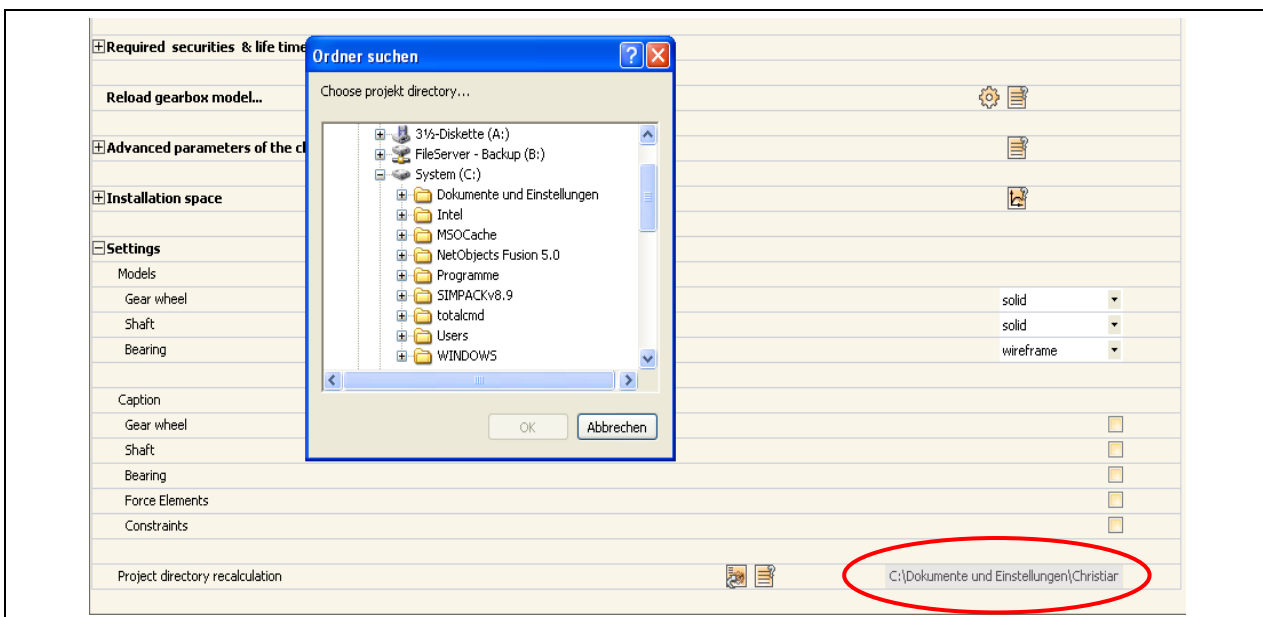


Bild 58: Definition des Projektverzeichnisses

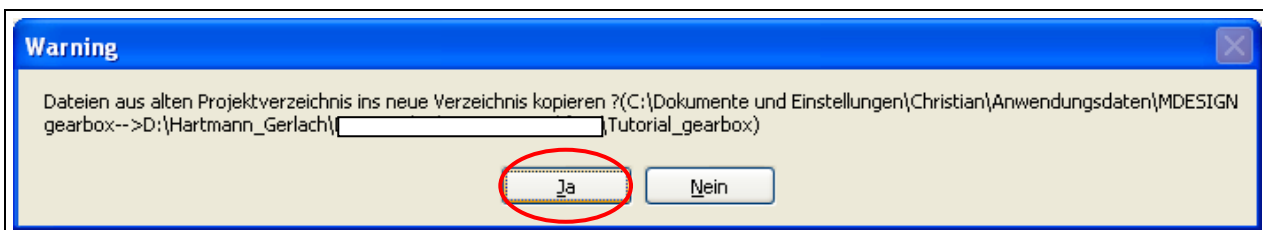


Bild 59: Kopieren der Berechnungsdatensätze aus temporären Arbeitsverzeichnis in Projektverzeichnis

Beispiel Tutorial.xml	209 KB	XML-Dokument	03.11.2010 13:48
Lager_01_1.xml	24 KB	XML-Dokument	03.11.2010 14:26
Lager_02_2.xml	24 KB	XML-Dokument	03.11.2010 14:21
Lager_03_3.xml	24 KB	XML-Dokument	03.11.2010 14:21
Lager_04_4.xml	24 KB	XML-Dokument	03.11.2010 14:21
Radpaar_01_1.xml	94 KB	XML-Dokument	03.11.2010 14:21
Welle_01_1.xml	44 KB	XML-Dokument	03.11.2010 14:21
Welle_02_2.xml	46 KB	XML-Dokument	03.11.2010 14:21

Bild 60: Berechnungsdatensätze im Projektordner

6. Literatur

- [1] Börner, J., Senf, M., Linke, H.; Beanspruchungsanalyse bei Stirnradgetrieben – Nutzung der Berechnungssoftware LVR; Vortrag DMK 2003, Dresden, 23. und 24. September 2003
- [2] Baumann, F, Trempler U.: Analyse zur Beanspruchung der Verzahnung von Planetengetrieben, Vortrag DMK 2007, Dresden
- [3] Börner, J.: Modellreduktion für Antriebssysteme mit Zahnradgetrieben zur vereinfachten Berechnung der inneren dynamischen Zahnkräfte. Dissertation TU Dresden, 1988
- [4] Börner, J.; Senf, M.: Verzahnungsbeanspruchung im Eingriffsfeld – effektiv berechnet. Antriebstechnik 34, 1995, 1
- [5] Börner, J.: Genauere Analyse der Beanspruchung von Verzahnungen. Beitrag zur Tagung „Antriebstechnik, Zahnradgetriebe“, Dresden, 09/2000
- [6] Bulligk, Chr.: Theoretische Untersuchung zur modularisierten Berechnung und Auslegung von Getrieben, Diplomarbeit, DriveConcepts GmbH, 2009
- [7] CalculiX: freies FEM Programm , MTU Aero-ingenier-GmbH, (www.calculix.de);
- [8] Gajewski, G.: Untersuchungen zum Einfluss der Breitenballigkeit auf die Tragfähigkeit von Zahnradgetrieben. Dissertation TU Dresden, 1984
- [9] Gajewski, G.: Ermittlung der allgemeinen Einflussfunktion für die Berechnung der Lastverteilung bei Stirnrädern. Forschungsbericht, TU Dresden, Sektion Grundlagen des Maschinenwesens, 1984
- [10] Hartmann-Gerlach, Christian: Erstellung eines Berechnungskerns für die Software MDESIGN LVR^{planet}. Unveröffentlichte interne Arbeit, DriveConcepts GmbH 2007
- [11] Hartmann-Gerlach, Christian: Verformungsanalyse von Planetenträgern unter Verwendung der Finiten Elemente Methode. Unveröffentlichte interne Arbeit, DriveConcepts GmbH 2008
- [12] Hartmann-Gerlach, Christian: Effiziente Getriebeberechnung von der Auslegung bis zur Nachrechnung mit MDESIGN gearbox und MDESIGN LVR^{planet}, Vortrag anlässlich des SIMPEP Kongresses in Würzburg, 18.-19. Juni 2009
- [13] Heß, R.: Untersuchungen zum Einfluss der Wellen und Lager sowie der Lagerluft auf die Breitenlastverteilung von Stirnradverzahnungen. Diss. TU Dresden, 1987
- [14] Hohrein, A.; Senf, M.: Reibungs-, Schmierungs-, Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen an Zahnradgetrieben. Forschungsbericht TU Dresden, 1977
- [15] Hohrein, A.; Senf, M.: Untersuchungen zur Last- und Spannungsverteilung an schrägverzahnnten Stirnrädern. Diss. TU Dresden, 1978
- [16] Linke, H.: Untersuchungen zur Ermittlung dynamischer Zahnkräfte. Diss. TU Dresden, 1969
- [17] Linke, H.: Stirnradverzahnung – Berechnung, Werkstoffe, Fertigung. München, Wien : Hanser, 1996

- [18] Linke, H.; Mitschke, W.; Senf, M.: Einfluss der Radkörpergestaltung auf die Tragfähigkeit von Stirnradverzahnungen. In: Maschinenbautechnik 32 (1983) 10, S 450-456
- [19] Neugebauer, G.: Beitrag zur Ermittlung der Lastverteilung über die Zahnbreite bei schrägverzahnten Stirnrädern. Dissertation TU Dresden, 1962
- [20] Oehme, J.: Beitrag zur Lastverteilung schrägverzahnter Stirnräder auf der Grundlage experimenteller Zahnverformungsuntersuchungen. Diss. Technische Universität Dresden. 1975
- [21] Polyakov, D.: Entwicklung eines durchgängigen Rechenmodells zur Bestimmung der Gehäusesteifigkeit unter Verwendung der FE Methode, Diplomarbeit, DriveConcepts GmbH
- [22] Schlecht, B., Hantschack, F., Schulze, T.: Einfluss der Bohrungen im Kranz auf die Tragfähigkeit von Hohlradverzahnungen; Antriebstechnik 41 (2002), Teil I, Heft 12, S. 45-47; Antriebstechnik 42 (2003), Teil II, Heft 2, S. 51-55
- [23] Schlecht, B. Senf, M.; Schulze, T.: Beanspruchungsanalyse bei Stirnradgetrieben und Planetengetrieben - Haus der Technik e.V., Essen, 09./10. März 2010
- [24] Schlecht, B.; Schulze, T.; Hartmann-Gerlach, C.: Berechnung der Lastverteilung in Planetengetrieben unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse - Zeitschriftenbeitrag Konstruktion 06/2009 S12.ff, DriveConcepts GmbH, 2009
- [25] Schulze, Tobias: Getriebeberechnung nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen, Vortrag anlässlich des Dresdner Maschinenelemente DMK2007 in Dresden, DriveConcepts GmbH, 2007
- [26] Schulze, Tobias: Load Distribution in planetary gears under consideration of all relevant influences, Vortrag anlässlich JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, Sendai (Japan), 13.-15. Mai 2009
- [27] Schulze, Tobias: Berechnung der Lastverteilung in Planetengetrieben unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse, Vortrag auf KT2009 in Bayreuth zur Lastverteilung in Planetengetrieben, 08.-09.10.2009
- [28] Schulze, Tobias: Ganzheitliche dynamische Antriebsstrangsbetrachtung von Windenergieanlagen. Sierke Verlag 2008, Dissertation TU Dresden
- [29] Schulze, Tobias: Load distribution in planetary gears. Danish gear society "Gearteknik InteresseGruppe", 11th february 2010 at SDU in Odense, Denmark
- [30] Schulze, Tobias: Calculation of load distribution in planetary gears for an effective gear design process. AGMA Fall Technical Meeting 2010, October 17-19, 2010, Milwaukee Wis, USA

Normen | Standards

- [31] DIN 867:1986 – Bezugsprofile für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern (Zylinderrädern) für den allgemeinen Maschinenbau und den Schwermaschinenbau.
- [32] DIN 3960:1987 – Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderpaare) mit Evolventenverzahnung.

- [33] Beiblatt 1 zu DIN 3960:1980 – Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderpaare) mit Evolventenverzahnung; Zusammenstellung der Gleichungen
- [34] DIN 3990:1987, Teil 1 - 5 Tragfähigkeit von Stirnrädern.
- [35] DIN 743:2008 T1-T4 & Beiblatt 1,2 Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen
- [36] DIN ISO 281:2009 Wälzlager – Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer - Berechnung der modifizierten nominellen Referenz-Lebensdauer für Wälzlager
- [37] ISO 6336:2008 Calculation of load capacity of spur and helical gears
- [38] VDI 2737:2005, Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit von Innenverzahnungen mit Zahnkranzeinfluss, VDI-Richtlinie

Software

- [39] MDESIGN[®] LVR 2010, software for load distribution of multi stage spur- and helical gears. DriveConcepts GmbH, 2010
- [40] MDESIGN[®] LVR^{planet} 2010, software for load distribution of planetary gear stages. DriveConcepts GmbH, 2010
- [41] MDESIGN[®] gearbox 2010, design and calculation software for multi stage gearboxes. DriveConcepts GmbH, 2010