

MESYS Berechnungssoftware Benutzerhandbuch

1.	Allgemein	17
1.1	Einrichtung	18
1.1.1	Konfiguration mit INI-Datei	18
1.1.1.1	Exportieren von Videos	24
1.1.1.2	Automatisches Speichern von Sicherungsdateien	24
1.1.2	Aktualisierung	25
1.2	Systemanforderungen	25
1.3	Allgemeine Bedienung	25
1.3.1	Grafiken 2D und Diagramme	27
1.3.2	Grafiken 3D	29
1.4	Parameter für die Befehlszeile	30
1.5	Datenbank	31
1.5.1	Ändern von Bezeichnungen in der Datenbank	32
1.5.2	Lager in Datenbank zufügen	33
1.5.3	Datenbank-Tabellen	34
1.5.3.1	Wälzlager Spiel und Toleranz des Lagers	34
1.5.3.2	Lager Werkstoffe	35
1.5.3.3	Hersteller von Lagern	35
1.6	Parametervariationen	35
1.6.1	Liste erzeugen	36
1.6.2	Parameterliste	37
1.6.3	Grafiken: Grafiken	38
1.6.4	Optimierung	39
1.6.5	Protokoll	42
1.6.6	Einstellungen	42
1.7	Statistische Parametervariationen	44
1.7.1	Liste erzeugen	44
1.7.2	Parameterliste	45
1.7.3	Grafiken: Grafiken	46
1.7.4	Verteilung	46
1.7.5	Protokoll	47
1.7.6	Einstellungen	47
1.8	Parametervariation (Optimierung)	48
1.8.1	Optimierung	48
1.8.2	Parameterliste	50
1.8.3	Einstellungen	50
1.9	Resultate	51
1.9.1	Resultateübersicht	51
1.9.2	Hauptprotokoll	52
1.9.2.1	Vorlage	53
1.9.3	Benutzerdefinierte Protokollvorlagen	53
1.9.4	Resultatetabellen	54

1.10	COM-Schnittstelle	54
1.10.1	Registrierung des COM-Servers	55
1.10.2	Methoden der COM Schnittstelle	55
1.10.2.1	Allgemeine Methoden	55
1.10.2.2	Zusätzliche Methoden zur Wellenberechnung	57
1.10.2.3	Zusätzliche Methoden für die Wälzlagerberechnung	58
1.10.2.4	Zusätzliche Methoden zur Berechnung für Kugelgewindetriebe	59
1.10.3	Verwendung des COM-Servers	60
1.11	Tools	61
1.11.1	Presssitz	61
2.	MESYS Wellenberechnung	63
2.1	Eingabeparameter	66
2.1.1	System Eingaben	66
2.1.1.1	Projektname und Beschreibung der Berechnung	67
2.1.1.2	Einstellungen	67
2.1.1.2.1	Gewicht und Beschleunigungen berücksichtigen	67
2.1.1.2.2	Winkel für Gewichtskraft	68
2.1.1.2.3	Eigenfrequenzen berechnen	68
2.1.1.2.4	Kreiseffekt berücksichtigen	68
2.1.1.2.5	Maximale Frequenz	70
2.1.1.2.6	Anzahl Eigenfrequenzen	70
2.1.1.2.7	Berücksichtigung dynamischer Lasten im statischen Gleichgewicht	70
2.1.1.2.8	Werkstoff Gehäuse und Gehäusetemperatur	71
2.1.1.2.9	Notwendige Lebensdauer	71
2.1.1.2.10	Zuverlässigkeit Wälzlager	71
2.1.1.2.11	Festigkeitsberechnung	71
2.1.1.2.12	Wälzlagerposition	71
2.1.1.2.13	Schubverformungen	72
2.1.1.2.14	Nichtlineares Wellenmodell verwenden	73
2.1.1.2.15	Lastkollektiv berücksichtigen	73
2.1.1.2.16	Zahnräder als Steifigkeit berücksichtigen	73
2.1.1.2.17	Zahnräder werden als Punktlast berücksichtigt	74
2.1.1.2.18	Erweiterte Lebensdauer für Wälzlager berechnen	74
2.1.1.2.19	Konfigurationen berücksichtigen	74
2.1.1.2.20	Gehäusesteifigkeit berücksichtigen	74
2.1.1.3	Schmierung	75
2.1.1.4	Einstellungen für Darstellung	75
2.1.1.5	Systemoptionen im Systembaum	76
2.1.2	Definition von Wellen	78
2.1.2.1	Allgemeine Daten der Welle	78
2.1.2.1.1	Bezeichnung	79
2.1.2.1.2	Werkstoff	79
2.1.2.1.3	Position	79
2.1.2.1.4	Drehzahl	79
2.1.2.1.5	Temperatur	80
2.1.2.2	Daten für die Festigkeitsberechnung	80
2.1.2.2.1	Lastfaktor (statisch)	80

2.1.2.2.2	Lastfaktor (Ermüdung)	80
2.1.2.2.3	Überlastfall	80
2.1.2.2.4	Durchmesser bei Wärmebehandlung	80
2.1.2.2.5	Anzahl Lastwechsel	80
2.1.2.2.6	Faktor der Oberflächenverfestigung	81
2.1.2.2.7	Spannungsverhältnis	81
2.1.2.3	Daten zur Geometrie	81
2.1.2.3.1	Hintergrundzeichnung	83
2.1.2.3.2	Geometrie als Polylinie definieren	83
2.1.2.4	Belastung	84
2.1.2.4.1	Kraft	84
2.1.2.4.2	Kupplung	85
2.1.2.4.3	Stirnrad	85
2.1.2.4.4	Kegelrad	87
2.1.2.4.5	Schnecke	88
2.1.2.4.6	Schneckenrad	88
2.1.2.4.7	Exzentrizität Kraft	89
2.1.2.4.8	Masse	89
2.1.2.4.9	Unwucht	90
2.1.2.4.10	Dynamische Belastung	91
2.1.2.4.11	Riemenscheibe	91
2.1.2.5	Randbedingungen	93
2.1.2.5.1	Randbedingungen	93
2.1.2.5.2	Allgemeine Randbedingungen	94
2.1.2.5.3	Wälzlager	95
2.1.2.5.3.1	Erweitertes Berechnungsmodell	97
2.1.2.5.3.2	Lager aus Datenbank wählen	98
2.1.2.5.4	Hydrodynamisches Radialgleitlager	99
2.1.2.5.5	Kugelgewindetrieb	100
2.1.2.5.6	Kupplung für Reaktionsmoment	100
2.1.2.5.7	Steifigkeitsmatrix	100
2.1.2.5.8	Dämpfungsmatrix	101
2.1.2.5.9	Schweisspunkt	101
2.1.2.5.10	Planetenlagerung	102
2.1.2.5.11	Axiale Steifigkeit	102
2.1.2.5.12	Zylindrische Randbedingung	102
2.1.2.5.13	Kontaktsteifigkeit	104
2.1.2.5.14	Anregungen	104
2.1.2.6	Querschnitte	105
2.1.2.7	Einstellungen	106
2.1.2.7.1	Nichtlineare Wälzlagersteifigkeit berücksichtigen	106
2.1.2.7.2	Temperatur pro Element berücksichtigen	107
2.1.2.7.3	Geometrie in der Parametervariation berücksichtigen	107
2.1.2.7.4	Knotendichte	107
2.1.2.7.5	Schnittdarstellung in 3D	107
2.1.2.7.6	Schubverformungen	107
2.1.2.7.7	Zahnräder als Steifigkeit berücksichtigen	107
2.1.2.7.8	Farbe ändern	108
2.1.2.8	Optionen im Systembaum	108

2.1.2.8.1	Wellengeometrie importieren aus CAD-Dateien	109
2.1.3	Wellen-Gruppen	110
2.1.4	Positionierung	111
2.1.5	Zahnradverbindungen	112
2.1.5.1	Stirnradpaare	113
2.1.5.1.1	Flankenlinien-Modifikationen	114
2.1.5.1.1.1	Flankenlinien-Balligkeit	115
2.1.5.1.1.2	Flankenlinien-Winkelmodifikation	116
2.1.5.1.1.3	Flankenlinien-Endrücknahme	116
2.1.5.1.2	Anregungen	118
2.1.5.2	Planetenstufen	119
2.1.6	Berechnung mit Lastkollektiv	119
2.1.6.1	Berechnung für nur ein Lastkollektiv-Element	120
2.1.7	Konfigurationen	121
2.1.8	Gehäuse-Steifigkeitsmatrix	122
2.1.9	3D-elastische Bauteile	124
2.1.9.1	3D-elastisches Bauteil als Welle	126
2.1.9.2	3D-elastische Planetenträger	128
2.1.9.2.1	Parametrischer kreisförmiger Planetenträger	129
2.1.9.2.2	Parametrischer polygonaler Planetenträger	130
2.1.9.2.3	Parametrischer Planetenträger in Sternform	130
2.1.9.3	3D-elastisches Bauteil als Gehäuse	131
2.1.9.4	CAD-Geometrie importieren	132
2.1.9.5	Flächen auf importierter Geometrie auswählen	134
2.1.9.6	Einstellungen	135
2.1.9.6.1	Details für Lagerspiel bei elastischen Lagerringen	138
2.1.9.6.2	Netz in Teilbereiche unterteilen	138
2.2	Berechnung von Eigenfrequenzen und harmonischen Antworten	139
2.3	Schnittstelle zur Wälzlager-Berechnung	140
2.4	Schnittstelle zur Berechnung für Kugelgewindetriebe	140
2.5	Schnittstelle zum SKF-Lagermodul	141
2.6	Resultate	143
2.6.1	Resultateübersicht	143
2.6.2	Ergebnistabellen	144
2.6.2.1	Tabelle für Wellen	144
2.6.2.2	Tabelle für Querschnitte	145
2.6.2.3	Tabelle für Lager	146
2.6.2.4	Tabelle für Frequenzen	147
2.6.3	Protokoll	148
2.6.3.1	Optionen für das Protokoll	149
2.6.4	Resultatetabellen	150
2.6.5	Benutzerdefinierte Protokollvorlagen	150
2.6.6	Grafiken	151
2.6.6.1	Verformung der Welle	151
2.6.6.2	Verformung der Welle (radial)	152
2.6.6.3	Kräfteverlauf der Welle	152
2.6.6.4	Momentenverlauf der Welle	153

2.6.6.5	Spannungsverläufe der Wellen	153
2.6.6.6	Vergleichsspannung der Wellen	153
2.6.6.7	Wellentemperatur	154
2.6.6.8	Campbell Diagramm	154
2.6.6.9	Harmonische Antwort über Drehzahl	154
2.6.6.10	Harmonische Antwort über Zeit	155
2.6.6.11	Harmonische Antwort 3D	155
2.6.6.12	Diagramme zur Lageranalyse	155
2.6.6.13	Wälzlager-Übersichten	155
2.6.6.14	Zuverlässigkeit Wälzlager, System	156
2.6.6.15	Geometrie 3D	156
2.6.6.16	Geometrie 3D mit Verformung	156
2.6.6.17	Geometrie 3D (animierte Verformung)	157
2.6.6.18	Geometrie 3D (animiert)	157
2.6.6.19	Geometrie 3D (Leistungsfluss)	157
2.6.6.20	3D-elastische Bauteile	157
2.6.6.20.1	Geometrie	158
2.6.6.20.2	Geometrie 3D mit Verformung	158
2.6.6.20.3	Spannungen	158
2.6.6.20.4	Verformung von Wälzlagerflächen	159
2.6.6.20.5	Kontaktspannungen von Lagerflächen	159
2.6.6.20.6	Spaltweite für Wälzlagerflächen	159
2.6.6.20.7	Abweichung der Normalverschiebung für Wälzlagerflächen	160
2.6.6.21	Verbindungs-Übersichten	160
2.6.6.22	Verbindungen	160
2.6.6.22.1	Linienlast	161
2.6.6.22.2	Spaltweite	161
2.6.6.22.3	Flankenlinien-Modifikationen	161
2.6.6.22.4	Relativverschiebungen	162
2.6.7	Bereich Grafiken	162
2.6.8	CAD Export	162

3. MESYS Wälzlagerberechnung 165

3.1	Eingabeparameter	168
3.1.1	Allgemein	168
3.1.1.1	Projektname und Beschreibung der Berechnung	169
3.1.1.2	Zuverlässigkeit	169
3.1.1.3	Grenze für aISO	169
3.1.1.4	Reibwert	170
3.1.1.5	Schmierfilmdicke berechnen	170
3.1.1.6	Fliehkraft berücksichtigen	171
3.1.1.7	Temperaturgradient in Passungen berücksichtigen	171
3.1.1.8	Oszillierendes Lager	171
3.1.1.9	Erforderliche Einhärtetiefe berechnen	172
3.1.1.10	Erforderliche Einhärtetiefe aus Dauerfestigkeit	172
3.1.1.11	Erforderliche Sicherheit für Einhärtetiefe	172
3.1.1.12	Toleranzlage für Lagerspiel	172
3.1.1.13	Temperatur des Wälzkörpers	173
3.1.1.14	Position für ersten Wälzkörper	173
3.1.1.15	Optionen für Kreiselmoment	173

3.1.1.16	Lebensdauer für Wälzkörper	175
3.1.1.17	Elastische Aufweitung der Ringe	175
3.1.1.18	Lastkollektiv verwenden	176
3.1.1.19	Erweiterte Lebensdauer berechnen	177
3.1.1.20	Erweiterte Methode für Pressungsberechnung verwenden	177
3.1.1.21	Statischen Sicherheitsfaktor über Pressung berechnen	177
3.1.2	Wälzlagergeometrie	178
3.1.2.1	Lagertypen	178
3.1.2.1.1	Radial-Rillenkugellager	180
3.1.2.1.2	Zweireihige Rillenkugellager	181
3.1.2.1.3	Axialrillenkugellager	182
3.1.2.1.4	Radial-Schräggugellager	183
3.1.2.1.5	Zweireihige Radial-Schräggugellager	183
3.1.2.1.6	Axial-Schräggugellager	185
3.1.2.1.7	Zweireihiges axiales Schräggugellager	185
3.1.2.1.8	Vierpunktlager als Radiallager	186
3.1.2.1.9	Vierpunktlager als Axiallager	187
3.1.2.1.10	Dreipunktlager	188
3.1.2.1.11	Pendelkugellager (einreihig)	188
3.1.2.1.12	Pendelkugellager (zweireihig)	188
3.1.2.1.13	Duplex Lager	189
3.1.2.1.14	Radial-Zylinderrollenlager	191
3.1.2.1.15	Radial-Zylinderrollenlager (zweireihig)	192
3.1.2.1.16	Nadellager	193
3.1.2.1.17	Axial-Zylinderrollenlager	193
3.1.2.1.18	Axial-Zylinderrollenlager (zweireihig)	194
3.1.2.1.19	Radial-Kegelrollenlager	194
3.1.2.1.20	Radial-Kegelrollenlager (zweireihig)	196
3.1.2.1.21	Axial-Kegelrollenlager	197
3.1.2.1.22	Tonnenlager	198
3.1.2.1.23	Toroidallager	198
3.1.2.1.24	Pendelrollenlager	199
3.1.2.1.25	Halbes radiales Pendelrollenlager	199
3.1.2.1.26	Axial-Pendelrollenlager	200
3.1.2.1.27	Kreuzrollenlager	201
3.1.2.1.28	Schräggrollenlager	201
3.1.2.2	Approximation der Wälzlagergeometrie	201
3.1.2.3	Tragzahlen	203
3.1.2.3.1	Dynamische Tragzahl	204
3.1.2.3.2	Statische Tragzahl	204
3.1.2.3.3	Ermüdungsgrenzbelastung	204
3.1.2.4	Innendurchmesser, Aussendurchmesser und Breite	205
3.1.2.5	Verformungen der Lagerringe	205
3.1.2.6	Anzahl Wälzkörper	207
3.1.2.7	Durchmesser Wälzkörper	208
3.1.2.8	Teilkreis-Durchmesser	208
3.1.2.9	Druckwinkel	209
3.1.2.10	Konformität des Innen- und Aussenringes	209
3.1.2.11	Konformität der Rolle	210
3.1.2.12	Abstand der Lagerreihen	210

3.1.2.13	Effektive Rollenlänge	210
3.1.2.13.1	Definieren von Rollenprofilen	210
3.1.2.14	Versatz der Rollenmitte	215
3.1.2.15	Schulterhöhe von Innen- und Außenring	215
3.1.2.16	Abstand zur Rollenmitte	217
3.1.2.17	Lagerspiel	217
3.1.2.18	Diametrales Lagerspiel	218
3.1.2.19	Axialspiel	218
3.1.2.20	Toleranz des Lagers	219
3.1.2.20.1	Mehrlagiger Presssitz	220
3.1.2.21	Passung zur Welle/Gehäuse	221
3.1.2.22	Innendurchmesser der Welle/Außendurchmesser des Gehäuses	222
3.1.2.23	Oberflächenrauheit Welle und Gehäuse	222
3.1.3	Lagerkonfiguration	222
3.1.4	Schmierstoff	223
3.1.4.1	Verunreinigungsbeiwert	224
3.1.4.2	Kinematische Viskosität	225
3.1.4.3	EP-Additive	225
3.1.4.4	Schmierstofftemperatur	225
3.1.4.5	Dichte des Öls	226
3.1.4.6	Druck-Viskositäts-Koeffizient	226
3.1.5	Werkstoff	226
3.1.5.1	Oberflächenhärte	227
3.1.5.2	Kernfestigkeit des Innen- und Außenrings	227
3.1.5.3	Oberflächenrauheit	228
3.1.5.4	Werkstoff für Lagerringe, Wälzkörper, Welle und Gehäuse	228
3.1.6	Belastung	229
3.1.6.1	Koordinatensystem	230
3.1.6.2	Innenring rotiert zur Last	230
3.1.6.3	Temperatur des Innenringes	230
3.1.7	Lastkollektiv	231
3.1.8	Stützrollen	232
3.1.8.1	Unterstützte Lagertypen	233
3.1.8.2	Geometrie der Stützrollen	233
3.1.8.3	Symmetrische Geometrie	234
3.1.8.4	Schubverformungen berücksichtigen	234
3.1.8.5	Berechnung von Standardwerten	234
3.1.8.6	Cw mit L10r = 1 berechnen	235
3.1.8.7	Berechnungsoptionen für C0w und Cuw	235
3.1.8.8	Statisch zulässige Biegespannung	236
3.1.8.9	Dynamisch zulässige Biegespannung	236
3.1.8.10	Mittelspannungseinflussfaktor	237
3.1.8.11	Axiale Position für Belastung	237
3.1.8.12	Geometriedaten direkt eingeben	237
3.1.8.13	Flächenträgheitsmomente	237
3.1.8.14	Schwerpunkt	238
3.1.8.15	Querschnittsfläche	238
3.1.8.16	Kritischer Punkt	238
3.1.8.17	Belastung der Stützrollen	238
3.1.8.17.1	Lastkollektive für Stützrollen	239

3.2	Thermisch zulässige Betriebsdrehzahl	240
3.3	Fettgebrauchsdauer	242
3.4	Grenzlastdiagramm	242
3.5	Radlagerberechnung	244
3.6	Resultate	245
3.6.1	Resultateübersicht	246
3.6.2	Hauptprotokoll der Ergebnisse	247
3.6.2.1	Speichern des Hauptberichts	248
3.6.2.2	Protokoll-Logo anpassen	248
3.6.3	Protokoll Toleranzen	249
3.6.4	Benutzerdefinierte Protokollvorlagen	249
3.6.5	Grafiken	250
3.6.5.1	Lagerkonfiguration	250
3.6.5.2	Lastverteilung	250
3.6.5.3	Lastverteilung 2D	251
3.6.5.4	Lastverteilung 3D	251
3.6.5.5	Pressungsverteilung für Wälzlager	251
3.6.5.6	Pressungsverteilung	252
3.6.5.7	Druckwinkel	252
3.6.5.8	Bohr- zu Roll-Verhältnis	252
3.6.5.9	Maximale Spaltweite Kugel-Laufbahn	253
3.6.5.10	Kugelumlaufgeschwindigkeit	253
3.6.5.11	Kugelvor-/nachlauf	253
3.6.5.12	Gyroskopischer Schlupfkoeffizient	254
3.6.5.13	Parameter für Verschleissgrösse QV	254
3.6.5.14	Verschleissparameter PVmax	254
3.6.5.15	Verschleisskenngrosse PV über grösserer Halbachse	255
3.6.5.16	Contact stress and sliding speed on major axis	255
3.6.5.17	Kontaktspannung und Gleitgeschwindigkeit auf der grossen Halbachse	255
3.6.5.18	Schmierfilmparameter	256
3.6.5.19	Schmierfilmdicke	256
3.6.5.20	Wälzkörperkräfte	256
3.6.5.21	Rollenprofilierung	257
3.6.5.22	Zuverlässigkeit	257
3.6.5.23	Schubspannungsverlauf	257
3.6.5.24	Orthogonale Schubspannung	258
3.6.5.25	Orthogonale Schubspannung über der Tiefe	258
3.6.5.26	Orthogonale Schubspannung über kleinerer Halbachse	258
3.6.5.27	Kontaktabmessungen	259
3.6.5.28	Kontaktabmessungen am Bordkontakt	259
3.6.5.29	Grenzlastdiagramm	259
3.6.5.30	Geometrie der Stützrollen	260
3.6.5.31	Momentenverlauf bei Stützrollen	260
3.6.5.32	Spannungsverlauf bei Stützrollen	260
3.6.5.33	Kräfteverlauf bei Stützrollen	261
3.6.5.34	Verschiebungen bei Stützrollen	261
3.6.5.35	Verschiebungen über Last	261
3.6.5.36	Rotation über Last	262
3.6.5.37	Lebensdauer über Last	262

3.6.5.38	Resultate für Presssitz	262
3.6.5.39	Radiale Aufweitung der Laufbahnen	263

4. MESYS Berechnung für Kugelgewindetriebe 265

4.1	Eingabeparameter	266
4.1.1	Allgemein	266
4.1.1.1	Projektname und Beschreibung der Berechnung	267
4.1.1.2	Lastkollektiv verwenden	267
4.1.1.3	Berechnung von COa nach ISO 3408-5	268
4.1.1.4	Berechnung von Ca nach ISO 3408-5	268
4.1.1.5	Berechnung des Zuverlässigkeitsfaktors nach ISO 3408-5	268
4.1.1.6	Zwei Druckwinkel zum Kontakt eingeben	268
4.1.1.7	Zuverlässigkeit S	268
4.1.1.8	Skalierungsfaktor für Spannungen in 3D-Ansicht s	269
4.1.1.9	Startwinkel für ersten Gang Ψ_0	269
4.1.1.10	Art der Spielerzeugung	269
4.1.1.11	Axiale Dehnung der Kugelgewindetriebe und der Mutter	269
4.1.1.12	Elastische Aufweitung der Ringe	269
4.1.2	Geometrie des Kugelgewindetriebs	270
4.1.2.1	Tragzahlen	271
4.1.2.1.1	Dynamische Tragzahl	271
4.1.2.1.2	Statische Tragzahl	271
4.1.2.2	Anzahl Gänge	271
4.1.2.3	Anzahl Windungen	272
4.1.2.4	Steigung	272
4.1.2.5	Steigungswinkel	272
4.1.2.5.1	Richtung	272
4.1.2.6	Anzahl tragender Kugeln pro Umlauf	272
4.1.2.7	Kugeldurchmesser	272
4.1.2.8	Teilkreis-Durchmesser	272
4.1.2.9	Druckwinkel	272
4.1.2.10	Konformität Kugelgewindetrieb und Kugelgewindemutter	272
4.1.2.11	Schulter-Durchmesser von Innen- und Außenring	273
4.1.2.12	Axialspiel	274
4.1.2.13	Toleranzklasse	274
4.1.2.14	Werkstoff	274
4.1.2.15	Innendurchmesser Kugelgewindespindel	274
4.1.2.16	Aussendurchmesser Kugelgewindemutter	274
4.1.2.17	Steigungsabweichung der Spindel	274
4.1.3	Lagerkonfiguration	274
4.1.4	Belastung	275
4.1.4.1	Koordinatensystem	276
4.1.4.2	Innenring rotiert zur Last	276
4.1.4.3	Außenring rotiert zur Last	277
4.1.4.4	Temperatur von Spindel und Mutter	277
4.1.5	Lastkollektiv	277
4.2	Resultate	278
4.2.1	Resultateübersicht	279
4.2.2	Hauptprotokoll der Ergebnisse	280
4.2.2.1	Speichern des Hauptprotokolls	280

4.2.2.2	Protokoll-Logo anpassen	280
4.2.3	Grafiken	280
4.2.3.1	Lastverteilung 3D	281
4.2.3.2	Pressungsverteilung	281
4.2.3.3	Druckwinkel zum Kontakt	281
4.2.3.4	Belastung der Kugeln	282
4.2.3.5	Kugelvor-/nachlauf	282
4.2.3.6	Kugelumlaufgeschwindigkeit	282
4.2.3.7	Kontaktspannung und Gleitgeschwindigkeit auf der grossen Halbachse	283
4.2.3.8	Kontaktabmessungen	283
5.	MESYS Hertz Berechnung	285
5.1	Eingabeparameter	286
5.1.1	Projektname und Beschreibung der Berechnung	287
5.1.2	Körper im Kontakt	287
5.1.2.1	Krümmungsradien	287
5.1.2.2	Werkstoffeigenschaften	288
5.1.3	Allgemein	288
5.1.3.1	Normalkraft	288
5.1.3.2	Winkel zwischen den Achsen	289
5.1.3.3	Länge für Linienkontakt	289
5.2	Resultate	289
5.2.1	Resultateübersicht	290
5.2.2	Hauptprotokoll der Ergebnisse	291
5.2.2.1	Speichern des Hauptprotokolls	291
5.2.2.2	Protokoll-Logo anpassen	291
5.2.3	Grafiken	291
5.2.3.1	Spannungsverläufe für Körper 1 und Körper 2	292
5.2.3.2	Verschiebungen über Last	292
5.2.3.3	Spannungen über Last	292
5.2.3.4	Orthogonale Schubspannung	293
5.2.3.5	Orthogonale Schubspannung 2D	293
6.	MESYS Axial-Radial-Rollenlager	295
6.1	Allgemeine Bedienung	296
6.2	Eingaben	297
6.2.1	Allgemein	297
6.2.1.1	Anzahl Bauteile	297
6.2.1.2	Anzahl der Lager	298
6.2.1.3	Maximaler Winkel für Vernetzung	298
6.2.1.4	Anzahl Schraubenreihen	298
6.2.1.5	Lastkollektiv berücksichtigen	298
6.2.1.6	Nur Präprozessing	298
6.2.1.7	Allgemeine Geometrieingabe zulassen	298
6.2.1.8	Anzahl Flächenlasten	298
6.2.1.9	Anzahl der Kontakte	299
6.2.1.10	Zuverlässigkeit von Wälzlagern	299
6.2.1.11	Serienberechnung	300
6.2.1.12	Schmierung	300

6.2.2	Geometrie der Bauteile	301
6.2.2.1	Größe der Elemente	302
6.2.2.2	Drehzahl	302
6.2.2.3	Randbedingungen	302
6.2.3	Verschraubung	303
6.2.4	Lager	304
6.2.4.1	Anzahl Wälzkörper	304
6.2.4.2	Durchmesser des Wälzkörpers	304
6.2.4.3	Teilkreis-Durchmesser	304
6.2.4.4	Effektive Rollenlänge	305
6.2.4.5	Radial-/Axialspiel	305
6.2.4.6	Axiale Position	305
6.2.4.7	Profilierung	305
6.2.4.8	Oberflächenhärte	309
6.2.4.9	Dynamische Tragzahl	310
6.2.4.10	Statische Tragzahl	310
6.2.4.11	Ermüdungsbelastung	310
6.2.5	Kreuzrollenlager	310
6.2.6	Belastung	311
6.2.6.1	Flächenlasten	312
6.2.6.2	Punktlasten	312
6.2.7	Lastkollektiv	312
6.3	Resultate	313
6.3.1	Faktor für Verschiebungen	313
6.3.2	Winkel für Grafik Deformationen	313
6.3.3	Minimale und Maximale Spannung für Grafiken	313
6.3.4	Berechnung der Steifigkeit berechnen	313
6.3.5	Grafiken	313
6.3.5.1	3D-Ansicht	313
6.3.5.2	Geometrie 3D Geometrie Schnittdarstellung	314
6.3.5.3	Wälzlager 3D	314
6.3.5.4	Geometrie	315
6.3.5.5	Deformation	315
6.3.5.6	Verschiebungen	316
6.3.5.7	Verschiebungen über Lastfaktor	316
6.3.5.8	Kippwinkel über Lastfaktor	317
6.3.5.9	Vergleichsspannungen in Bauteilen	317
6.3.5.10	Axiale, radiale und tangentielle Spannungen in Bauteilen	318
6.3.5.11	Pressungsverteilung für Lager	318
6.3.5.12	Pressungsverteilung über den Winkel	319
6.3.5.13	Kräfte über Winkel	320
6.3.5.14	Rollenprofilierung	320
6.3.5.15	Schraubenkräfte über Winkel	320

7. MESYS Stirnradpaar 323

7.1	Eingaben	324
7.1.1	Allgemein	324
7.1.2	Geometrie	326
7.1.2.1	Normalmodul	326

7.1.2.2	Normaleingriffswinkel	326
7.1.2.3	Schrägungswinkel	326
7.1.2.4	Achsabstand	327
7.1.2.5	Zähnezahl	327
7.1.2.6	Zahnbreite	327
7.1.2.7	Profilverschiebungsfaktor	327
7.1.2.8	Kopfkreisdurchmesser	328
7.1.2.9	Innendurchmesser	328
7.1.2.10	Zahndickenabmass nach DIN 3967	328
7.1.2.11	Toleranzklasse nach ISO 1328	328
7.1.2.12	Erforderliche Lebensdauer	328
7.1.2.13	Anwendungsfaktor	328
7.1.2.14	Drehmoment und Drehzahl	328
7.1.2.15	Werkstoffeigenschaften	329
7.1.2.16	Schmierstoff	329
7.1.3	Bezugsprofil	329
7.1.4	Details für Festigkeit	330
7.1.5	Lastkollektiv	330
7.1.5.1	Berechnung für nur ein Lastkollektiv-Element	331
7.2	Resultate	332
7.2.1	Resultategrafiken	332
7.2.1.1	Spezifisches Gleiten über Durchmesser	332
7.2.1.2	Specific sliding over profile shift	332
7.2.1.3	Spezifisches Gleiten über Profilverschiebung	333
7.2.1.4	Zahnfußspannung	333
7.2.1.5	Zahnfußspannung (2D)	333
7.2.1.6	Zahnform	334
7.2.1.7	Einzelner Zahn	334
7.2.1.8	Herstellung	334
7.2.1.9	Geometrie (2D)	335
7.2.1.10	Geometrie (3D)	335
7.2.1.11	Zahneingriff	335
7.2.1.12	Zahneingriff (3D)	336
7.2.1.13	Sicherheitsfaktoren über Lebensdauer	336
7.2.1.14	Grenzspannungen über Lebensdauer	336
7.2.1.15	Zulässige Spannung über Lebensdauer	337
7.2.1.16	Zulässiges Drehmoment über Lebensdauer	337
7.2.2	CAD Export	337
8.	MESYS Single Cylindrical Gear	339
8.1	Eingabeparameter	340
8.1.1	Allgemein	340
8.1.2	Geometrie	340
8.2	Resultate	340
9.	MESYS Zahnrad Positionsberechnung	341
9.1	Eingabeparameter	342
9.1.1	Allgemein	343
9.1.2	Drei Räder, zwei Stränge	344







9.1.2.1	Systemdaten	345
9.1.2.2	Zahnräder	346
9.1.3	Vier Räder, zwei Stränge	346
9.1.3.1	Systemdaten	347
9.2	Resultate	348
10.	Literaturverzeichnis	349
Index		355

Allgemein

1 Allgemein

Dieses Kapitel enthält einige allgemeine Informationen über die MESYS Berechnungssoftware. Es werden die Installation, Updates und die allgemeine Verwendung behandelt.

Details zu den verschiedenen Berechnungsprogrammen finden Sie in den folgenden Kapiteln. Verfügbare Programme sind:

- [Wellenberechnung](#)  64
- [Wälzlagerberechnung](#)  166
- [Berechnung für Kugelgewindetriebe](#)  206
- [Berechnung der Hertzschen Pressung](#)  286
- [Stirradpaarberechnung](#)  324
- [Axial-Radial-Rollenlager-Berechnung](#)  296
- [Zahnrad Positionsberechnung](#)  342

1.1 Einrichtung

Wenn das Installationsprogramm ausgeführt wird, kann das Installationsverzeichnis ausgewählt werden. Das Standardverzeichnis ist "\\Programme\MESYS 06/2024". Alle Dateien werden in dieses Verzeichnis installiert. Auch ein Eintrag im Startmenü wird erstellt.

Das Deinstallationsprogramm kann über das Startmenü aufgerufen werden. Dieser löscht das Installationsverzeichnis und die Einträge im Startmenü.

Ohne Lizenzdatei läuft die Software als Demoversion. In der Demoversion ist es nicht möglich, Dateien zu speichern oder zu laden, es wird bei jeder Berechnung eine Demo-Meldung angezeigt und einige Funktionen sind deaktiviert. Die Demoversion darf nur zur Evaluierung der Software verwendet werden.

Die Lizenz-Datei 'license.dat' muss im Installationsverzeichnis (im selben Verzeichnis wie MesysShaft.exe) abgelegt werden. Die Bezeichnung der Lizenzdatei darf nicht geändert werden, da sie sonst von der Software nicht gefunden wird.

1.1.1 Konfiguration mit INI-Datei

Einige Konfigurationen der Software können über 'mesys.ini' im Installationsordner vorgenommen werden.

Derzeit werden die Einstellungen für den Datenbankzugriff und die Formatierung des Protokolls verwendet.

Abschnitt	Wert	Beschreibung
General	recentfilenumber	Anzahl der letzten Dateien, die im Dateimenü der Software angezeigt werden
	floatinglicense	Pfad zur Lizenzierungsdatei für Netzwerklizenz. Sie wird von der Software geschrieben, kann aber in andere Installationen kopiert werden. Formatieren: \\Server\Share\path\license.lic Hinweis: Jeder '\' muss verdoppelt werden.
	floatingtimeout	Zeit in Sekunden, nach der eine Floating-Lizenz freigegeben wird, wenn das Programm nicht verwendet wird. Standard ist 1800.
	licenselogfile	Für Floating-Lizenzen kann mit diesem Eintrag ein Logfile definiert werden. In dieser Datei werden einige Informationen über die Softwarenutzung protokolliert. Als Pfadtrennzeichen kann entweder '/' oder '\\' verwendet werden, jedoch nicht '\'
	fontsize	Schriftgröße in Punkten, standardmäßig 0, abhängig vom Betriebssystem.
	style	Entweder windows, fusion, windowsvista.
	listseparator	Zeichen, das als Trennzeichen beim Exportieren von Tabellen verwendet wird. Wenn nicht gesetzt, wird die Standard-Einstellung des Betriebssystems verwendet.
	systemlocale	Setze auf true für Dezimalpunkt des Betriebssystems oder false für '.' als Dezimaltrennzeichen.
	usecalculatethread	Wenn auf true gesetzt, wird die Berechnung in einem separaten Thread durchgeführt, ansonsten auf false gesetzt.
	ffmpegpath	Pfad zum Programm ffmpeg zum Erstellen von Videos aus Animationen. Sie finden es unter www.ffmpeg.org . Verwenden Sie für Pfadseparatoren entweder '/' oder '\\', aber nicht '\'
	helpFormat	Verwenden Sie "CHM", um "mesys.chm" zur Anzeige der Hilfe-Informationen zu verwenden. Dies funktioniert möglicherweise nicht über das Netzwerk. Dann kann "WEB" verwendet werden, um die Hilfe in einem Webbrowser anzuzeigen. Mit "EXE" wird ein eigener Viewer "MesysManual" verwendet, der auch auf Netzwerkfreigaben funktioniert. Eine weitere Option ist "HTML", die die Hilfe im Unterordner "help" suchen würde, bitte wenden Sie sich in diesem Fall an support@mesys.ch , da

Abschnitt	Wert	Beschreibung
		der Ordner nicht in der Standardinstallation enthalten ist.
	allownesteddockwindows	Wenn diese Option auf true gesetzt ist, können angelegte Fenster in mehreren Spalten eingestellt werden. Der Standardwert ist false.
	disablewheelforlists	Wenn diese Option auf true gesetzt ist, ändert das Mauselement die Eingaben für die Auswahllisten nicht.
	showcalculationtime	Zeigt die für eine Berechnung benötigte Zeit in der Statusleiste an, wenn diese auf true gesetzt ist.
database	path	Der Pfad zur Datenbank-Datei kann definiert werden. Die Datenbank kann auf einen Server kopiert werden, so dass alle Anwender der Software die gleiche Datenbank nutzen. Wenn der Dateiname ohne Pfad angegeben wird, wird sie aus dem Installationsverzeichnis geöffnet. Als Pfadtrennzeichen kann entweder '/' oder '\\' aber nicht '\' verwendet werden.
	iswritable	Setzen Sie ihn auf true, wenn die Datenbank geändert werden darf. Bei false werden von der Software keine Änderungen an der Datenbank vorgenommen.
	usecache	Bei true wird die Datenbank in den Speicher eingelesen. Dies beschleunigt das Programm, wenn sich die Datenbank auf einem Netzlaufwerk befindet. Standard ist false.
importdatabases	path_1	Es kann ein Pfad zu zusätzlichen Datenbanken definiert werden. Diese zusätzlichen Datenbanken sind nur lesbar und optional verschlüsselt. Wenn der Dateiname ohne Pfad angegeben wird, wird die Datenbank aus dem Installationsverzeichnis geöffnet. Als Pfadtrennzeichen kann entweder '/' oder '\\' verwendet werden, jedoch nicht '\'. password_1
	password_1	Das Passwort für die verschlüsselte Datenbank
shaft	defaultinputs	Pfad zu einer xml-Datei mit Standardeinstellungen Verwenden Sie als Pfadseparatoren entweder '/' oder '\\', aber nicht '\'. preloadcadlibrary
	preloadcadlibrary	Bei true wird die CAD Bibliothek beim Programmstart geladen. Dann ist später ein Import einer STEP Datei schneller.
	calculateonfileload	Bei true wird die Berechnung durchgeführt, wenn eine Datei geladen wird. Standard ist true.
	acceptfiledrop	Wenn auf true gesetzt, kann eine *.xml-Eingabedatei geladen werden, indem sie auf dem Hauptfenster abgelegt wird.

Abschnitt	Wert	Beschreibung
	logo	Hier kann ein Logo zur Verwendung auf der System-Seite definiert werden. Das Format muss PNG sein.
	backupinterval	Intervall in Sekunden zum Speichern der Dateien im Verzeichnis TEMP
	backupstates	Nummer der zu speichernden Backup-Stände. Verwenden Sie Null, um die automatische Sicherung von Dateien zu deaktivieren. Die Sicherungsdateien werden nach Datei Öffnen, Datei Speichern oder Datei Neu gelöscht.
	numberofthreads	Die Nummer der Threads, die für FEA Berechnungen verwendet werden sollen. Der Standard ist die Anzahl der physischen Kerne.
	feamaxmemory	Die maximale Speichermenge in MB, die vom FEA-Solver verwendet wird. Wenn mehr Speicher benötigt wird, wird dieser auf die Festplatte ausgelagert.
	feaswappath	Pfad eines Verzeichnisses für die Auslagerungsdatei für FEA-Berechnungen, falls nicht genügend Speicher verfügbar ist. Standard ist das Temp-Verzeichnis des Betriebssystems. Mit dieser Einstellung kann stattdessen ein schnelles Laufwerk mit ausreichend Speicherplatz verwendet werden.
	feamaxtotalmemory	Die maximale Speichermenge in MB, die vom FEA-Solver verwendet wird. Würde der Solver mehr Speicher benötigen, wird die Berechnung abgebrochen. Die Verwendung dieser Einstellung anstelle von 'feamaxmemory' vermeidet das Auslagern auf die Festplatte und damit wesentlich längere Berechnungszeiten. Im Fehlerfall müssten die Maschengrößen geändert werden.
	externalcondensationcommand	Für die Kondensation von 3D-elastischen Bauteilen kann ein Pfad zu einer ausführbaren Datei angegeben werden, die ausgeführt werden soll. Damit kann MesysShaft von einem entfernten Server gestartet werden, um eine Kondensation schneller durchzuführen. Als Pfadtrennzeichen kann entweder '/' oder '\\' aber nicht '\' verwendet werden.
	externalcondensationparameters	Oberhalb können hier die Parameter für das externe Programm angegeben werden. Ein Platzhalter %1 wird durch den Dateinamen einer temporären Datei ersetzt.
rbc	defaultinputs	Pfad zu einer xml-Datei mit Standardeinstellungen

Abschnitt	Wert	Beschreibung
		Verwenden Sie als Pfadseparatoren entweder '/' oder '\\', aber nicht '\'. Verwenden Sie für Pfadseparatoren entweder '/' oder '\\', aber nicht '\'.
	calculateonfileload	Wenn auf true gesetzt, wird die Berechnung beim Laden einer Datei durchgeführt. Standard ist true.
	acceptfiledrop	Wenn auf true gesetzt, kann eine *.xml-Eingabedatei geladen werden, indem sie auf dem Hauptfenster abgelegt wird.
	logo	Ein Logo zur Verwendung auf der System-Seite kann hier definiert werden. Das Format muss PNG sein.
	backupinterval	Intervall in Sekunden zum Speichern der Dateien im Verzeichnis TEMP
	backupstates	Nummer der zu speichernden Sicherungsstände. Verwenden Sie Null, um die automatische Sicherung von Dateien zu deaktivieren. Die Sicherungsdateien werden nach dem Öffnen, Speichern oder Neu anlegen einer Datei gelöscht.
	allowcontactangleoverride	Wenn auf true gesetzt, kann der Druckwinkel für Schrägkugellager aus der Datenbank überschrieben werden
ballscrew	defaultinputs	Pfad zu einer xml-Datei mit Standardeinstellungen Als Pfad-Trennzeichen kann entweder '/' oder '\\' verwendet werden, jedoch nicht '\'.
	calculateonfileload	Wenn auf true gesetzt, wird die Berechnung beim Laden einer Datei ausgeführt. Standard ist true.
	acceptfiledrop	Wenn auf true gesetzt, kann eine *.xml-Eingabedatei geladen werden, indem sie auf dem Hauptfenster abgelegt wird.
	logo	Ein Logo zur Verwendung auf der System-Seite kann hier definiert werden. Das Format muss PNG sein.
	backupinterval	Intervall in Sekunden zum Speichern der Dateien im Verzeichnis TEMP
	backupstates	Nummer der zu speichernden Sicherungsstände. Verwenden Sie Null, um die automatische Sicherung von Dateien zu deaktivieren. Die Sicherungsdateien werden nach Datei Öffnen, Datei Speichern oder Datei Neu gelöscht.
hertz	defaultinputs	Pfad zu einer xml-Datei mit Standardeinstellungen Verwenden Sie für Pfadseparatoren entweder '/' oder '\\', aber nicht '\'.
	calculateonfileload	Wenn auf true gesetzt, wird die Berechnung beim Laden einer Datei durchgeführt. Standard ist true.

Abschnitt	Wert	Beschreibung
	acceptfiledrop	Wenn auf true gesetzt, kann eine *.xml-Eingabedatei geladen werden, indem sie auf dem Hauptfenster abgelegt wird.
	logo	Hier kann ein Logo zur Verwendung auf der System-Seite definiert werden. Das Format muss PNG sein.
	backupinterval	Intervall in Sekunden zum Speichern der Dateien im Verzeichnis TEMP
	backupstates	Nummer der zu speichernden Backup-Stände. Verwenden Sie Null, um die automatische Sicherung von Dateien zu deaktivieren. Die Sicherungsdateien werden nach Datei Öffnen, Datei Speichern oder Datei Neu gelöscht.
axrarbc	numberofthreads	Die Nummer der Threads, die bei FEA Berechnungen verwendet werden sollen. Der Standard ist 2. Mehr Threads haben nur eine geringe Auswirkung auf die Leistung, aber die Berechnungszeit wird dennoch reduziert.
	backupinterval	Intervall in Sekunden zum Speichern von Sicherungsdateien im Verzeichnis TEMP
	backupstates	Nummer der zu speichernden Sicherungszustände. Verwenden Sie Null, um die automatische Sicherung von Dateien zu deaktivieren. Die Sicherungsdateien werden nach dem Öffnen, Speichern oder Neuanlegen einer Datei gelöscht.
report	format	Die ausgegebene Protokoll Datei kann verschiedene Formate haben. Standardmäßig ist dieser Wert gleich "INTERNALPDFA", er kann aber auch auf "INTERNALPDF", "DOCX", "DOC", "ODT" oder "PDF" (ohne Anführungszeichen) gesetzt werden.
	topmargin	Der obere Rand für das Protokoll in mm
	bottommargin	Der untere Rand für das Protokoll in mm
	leftmargin	Der linke Rand für das Protokoll in mm
	rightmargin	Der rechte Rand für das Protokoll in mm
	papersize	Die Größe des Papiers für das Protokoll. Verfügbare Werte sind A4 und Letter
	template	Pfad zu der Datei, die als Vorlage für die Erstellung des Protokolls dient. Unterstützte Dateiformate: "DOCX", "DOC" oder "ODT"
	logo	Es kann ein anderes Logo definiert werden, das im Protokoll verwendet werden soll. Das Format muss PNG sein.
	marginbox1\active	Die marginbox wird verwendet, wenn sie auf true gesetzt ist, ansonsten auf false.
	marginbox1\rect	Die Größe von marginbox wird mit Werten in mm definiert. Das Format ist @Rect(x1 y1 width

Abschnitt	Wert	Beschreibung
		height). Die Parameter x1 und y1 beschreiben die obere linke Ecke des Kastens. Positive Werte werden von oben/links gemessen, negative Werte von unten/rechts. Zum Beispiel @Rect(-35 -20 30 20) ist ein Rechteck rechts unten.
	marginbox1\text	Der Text für das Randfeld. Er muss in Anführungszeichen gesetzt werden (wie in "Text"). Es kann entweder normaler Text oder HTML verwendet werden. Es sind einige Platzhalter definiert: #page, #pageCount, #data, #datetime
	marginbox1\angle	Der Drehwinkel des Randkastens kann in Grad angegeben werden. Die Orientierung des Winkels ist im Uhrzeigersinn, wenn er positiv ist.
	marginbox1\isHtml	Abhängig vom Typ des Textes kann dieser Wert entweder auf true oder false gesetzt werden.
	marginbox1\drawBox	Bei true wird ein Rechteck gezeichnet, das die Größe des marginbox anzeigt. Andernfalls wird es auf false gesetzt.
	marginbox2\...	Wie bei Randfeld 1 können weitere Felder mit aufsteigenden Nummern definiert werden.

Bitte beachten Sie, dass die aufgeführten Optionen für Randboxen (marginbox1\...) nur gültig sind, wenn format gleich "INTERNALPDF".

1.1.1.1 Exportieren von Videos

Animationen können als Videos exportiert werden. Um diese Funktion zu aktivieren, installieren Sie "FFmpeg" von www.ffmpeg.org und setzen Sie "ffmpegpath" auf die ausführbare Datei.

Der Videoexport kann über das Kontextmenü in Grafikfenstern gestartet werden.

1.1.1.2 Automatisches Speichern von Sicherungsdateien

Wenn die Einstellungen "backupstates" und "backupinterval" auf Werte größer Null gesetzt werden, werden automatische Backups im System-Temp-Verzeichnis gespeichert. "backupstates" legt fest, wie viele Dateien aufbewahrt werden und "backupinterval" die Zeitdifferenz in Sekunden.

Die automatisch gesicherten Dateien werden bei "Datei"->"Neu" , "Datei"->"Öffnen" , "Datei"->"Schliessen" oder bei Auswahl von "Nein" bezüglich der Frage nach dem Speichern von Dateien beim Beenden des Programms entfernt. Daher stehen diese Sicherungsdateien nur im Falle eines Softwareabsturzes oder bei

Änderungen, die rückgängig gemacht werden sollen, zur Verfügung, solange die Datei nicht zwischengespeichert wurde.

Wenn eine Sicherungsdatei für eine gerade aktive Berechnung geladen werden soll, sollte dies durch Starten einer anderen Instanz der Software geschehen, da die Sicherungsdateien bei "Datei"->"Öffnen" gelöscht werden.

1.1.2 Aktualisierung

Wenn die Software mit einer neuen Version aktualisiert wird, sollte die Datenbank 'mesys.db' nicht überschrieben werden. Entweder erfolgt die Neuinstallation in einem neuen Verzeichnis oder die Datei der Datenbank wird an einen anderen Ort kopiert.

Nach dem Start der neuen Version kann die Datenbank über das Menü 'Extras'->'Datenbank'->'Import aus alter Datenbank' aktualisiert werden. Alle benutzerdefinierten Einträge werden dabei aktualisiert. Änderungen an den Standarddaten gehen verloren, da nur die benutzerdefinierten Daten kopiert werden.

Für Updates einer Floating Lizenz muss zusätzlich zur 'license.dat' die Einstellung 'floatinglicense=' in 'mesys.ini' in die neue Version kopiert werden.


1.2 Systemanforderungen

Die Software ist als 64bit Windows-Programm für Windows 10 oder 11 erhältlich. Als Minimum wird ein Intel Pentium 4 oder ein höherer Prozessor benötigt.




Für die vollständige Installation werden etwa 1,6 GB Festplattenspeicher benötigt. Alle Abhängigkeiten der Software sind im Installationsverzeichnis vorhanden. Daher kann sie einfach auf andere Rechner kopiert oder von Netzwerk- oder Wechseldatenträgern gestartet werden.

Für die Floating-Lizenz wird ein Verzeichnis auf einer Netzwerkfreigabe mit Schreibrechten benötigt.

1.3 Allgemeine Bedienung




Um eine Berechnung durchzuführen, werden zunächst die Daten auf allen Eingabeseiten eingeführt. Drücken Sie dann die Taste  oder F5, um die Berechnung auszuführen. Nachdem alle Daten definiert sind, kann die Berechnung von jeder Seite aus gestartet werden. So ist es einfach, Parametervariationen vorzunehmen.

Rechts von der Statusleiste am unteren Rand des Programms wird ein Symbol angezeigt. Dieses zeigt den aktuellen Stand der Ergebnisse an:

Symbol	Erläuterung
	Die Berechnung wurde durchgeführt und die Ergebnisse sind aktuell.
	Einige Eingaben wurden nach der Ausführung der Berechnung geändert. Abhängig von den geänderten Eingaben können die Resultate ungültig sein.
	Bei der Ausführung der Berechnung ist ein Fehler aufgetreten. Die Ergebnisse sind ungültig.

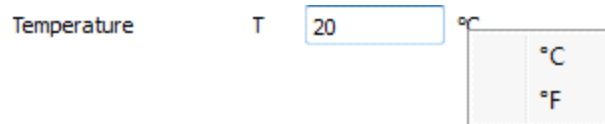
Neben diesem Symbol befindet sich in der Statusleiste eine kleine Schaltfläche mit dem Buchstaben "M" oder "A". Wenn die Schaltfläche angeklickt wird, wird zwischen "M" und "A" umgeschaltet. Bei "M" muss die Berechnen-Schaltfläche oder F5 angeklickt werden, um die Berechnung auszuführen. Wenn "A" angezeigt wird, wird die Berechnung automatisch nach jeder Eingabe ausgeführt. Diese Option sollte nicht verwendet werden, wenn die Berechnungszeit sehr lang ist, z.B. bei großen Lastkollektiven.

In der Benutzeroberfläche gibt es einige spezielle Schaltflächen, die in der folgenden Tabelle erläutert werden:

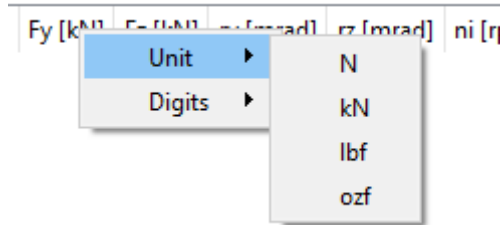
Schaltfläche	Erläuterung
	Diese Plus-Schaltfläche zeigt einen Dialog mit zusätzlichen Eingaben an. Einige dieser Eingaben müssen definiert werden, andere sind nur optional.
	Diese Umrechnungsschaltfläche ermöglicht die Umrechnung von anderen Arten der Eingabe. Zum Beispiel kann das Radialspiel aus einem Axialspiel umgerechnet werden.
	Die Schaltfläche Vorschlag bietet einen Vorschlag für eine Eingabe durch die Software.

Das Einheitensystem für die Ein- und Ausgabe kann im Menü 'Extras->Einheitensystem' entweder als metrische oder US Einheiten gewählt werden.

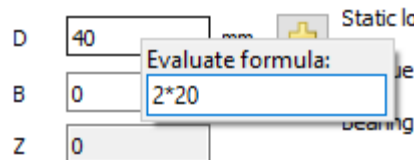
Über das Kontextmenü für die Einheiten der Eingabefelder kann die aktuelle Einheit geändert werden. Diese Einstellung wird für zukünftige Neustarts der Software gespeichert.



Bei Tabellen kann die Einheit von Spalten über das Kontextmenü (rechte Maustaste) auf der Kopfzeile geändert werden. Neben der Einheit kann auch die Anzahl der sichtbaren Ziffern geändert werden.

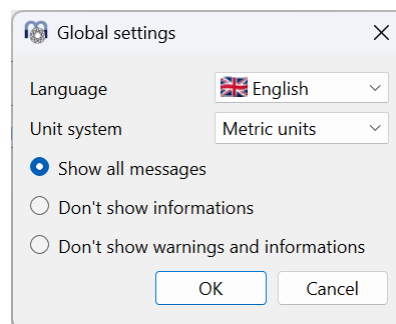


Durch Drücken der rechten Maustaste auf ein Eingabefeld wird ein Fenster zur Eingabe einer Formel eingeblendet. Dieses kann für schnelle Berechnungen genutzt werden.



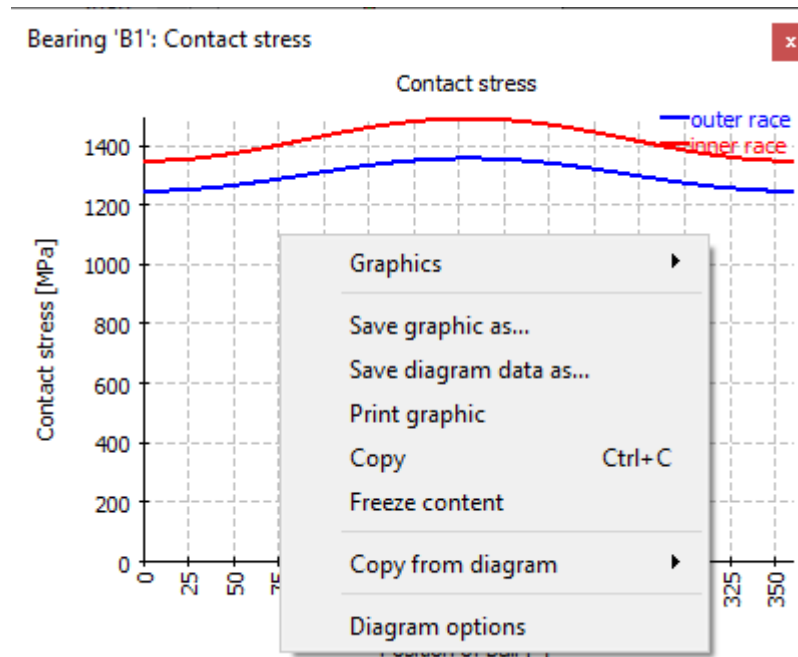
Die Software ist in den Sprachen Englisch, Deutsch, Französisch, Italienisch, Spanisch, Türkisch, Chinesisch, Koreanisch und Japanisch verfügbar. Die Sprache kann auch im Menü 'Extras' ausgewählt werden.

Meldungen wie Informationen, Warnungen und Fehler werden standardmäßig in einem Meldungsfenster und als Pop-ups angezeigt. Über das Menü 'Extras->Einstellungen' sind einige globale Einstellungen verfügbar und Informationen und Warnungen können unterdrückt werden, um als Pop-ups angezeigt zu werden.



1.3.1 Grafiken 2D und Diagramme

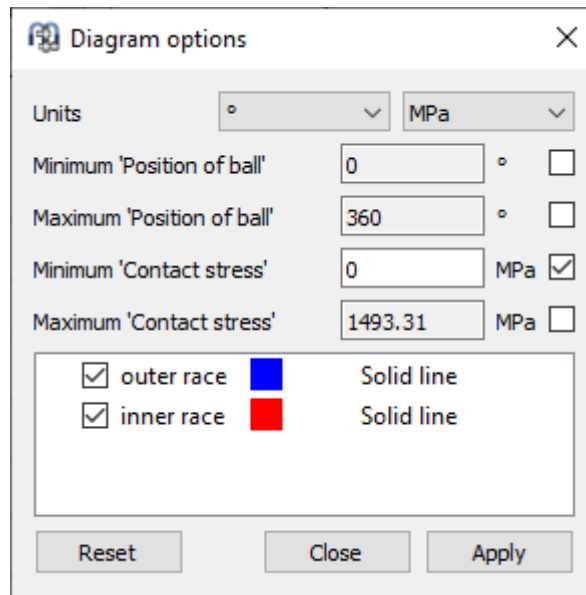
Für 2D-Grafiken und Diagramme stehen verschiedene Optionen im Kontextmenü zur Verfügung.



Alle Grafiken können über das Kontextmenü (rechte Maustaste) im Grafikenfenster gedruckt oder in verschiedenen Grafikformaten wie PNG oder JPEG exportiert werden. Für den Export kann die Größe der Grafik angegeben werden. Die Option "Kopieren" kopiert das Bild in die Zwischenablage, so dass es in andere Anwendungen eingefügt werden kann. Die Auswahl von "Inhalt einfrieren" unterdrückt die Aktualisierung der Grafik bei weiteren Durchläufen der Berechnung, dies ermöglicht einen Vergleich von Grafiken zwischen Berechnungen mit unterschiedlichen Eingabedaten.

Für Diagramme stehen zusätzlich "Diagrammdatei speichern unter...", "Von Diagramm kopieren" und "Diagramm Optionen" zur Verfügung. "Diagrammdatei speichern unter..." ermöglicht es, die numerischen Werte für die Diagramme im CSV- oder XLS-Format zu speichern. Mit "Von Diagramm kopieren" können Kurven aus anderen geöffneten Diagrammen in das aktuelle Diagramm kopiert werden, wenn sie die gleichen Einheiten haben. Dies kann für Vergleiche genutzt werden.

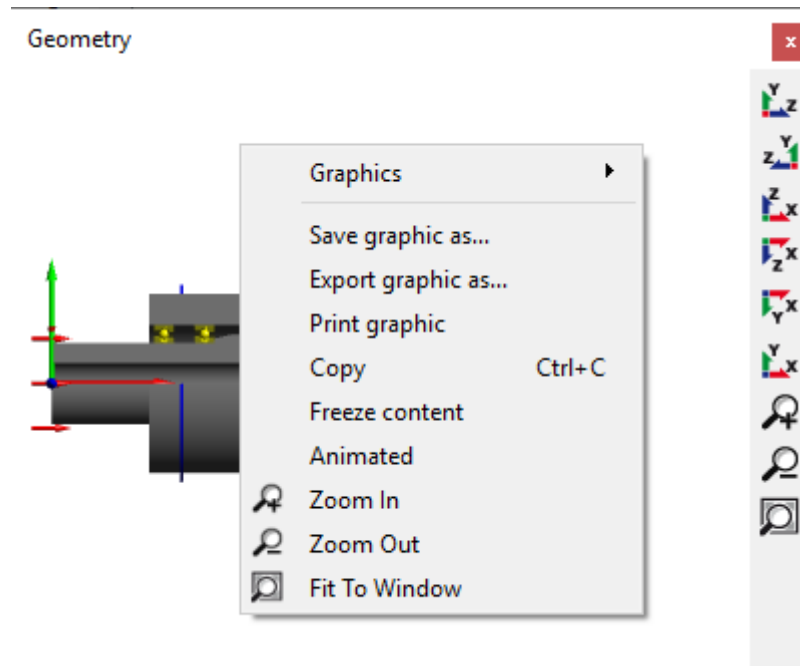
Die Diagramm-Option erlaubt es, die Formatierung des Diagramms zu ändern



Sowohl die Einheiten als auch die Begrenzungen für die Achsen können eingestellt werden. Wenn ein Diagramm nicht von Interesse ist, kann es mit den Kontrollkästchen deaktiviert werden. Die Bezeichnung, die Farbe und der Linienstil jeder Kurve können ebenfalls geändert werden. Die Änderungen in den Diagramm Optionen werden nur für das aktuelle Diagramm verwendet, sie werden nicht gespeichert und nicht für neu erstellte Grafik-Fenster verwendet.

1.3.2 Grafiken 3D

Für die 3D-Grafik-Fenster der Software gibt es verschiedene Schaltflächen zur Manipulation der Ansicht in 3D, wie z. B. die Funktionen Vergrößern, Verkleinern und Anpassen an das Fenster sowie die Möglichkeit, den Blickwinkel aus verschiedenen Ebenen zu wählen. Das 3D-Modell kann mit der Maus bei gedrückter Shift-Taste verschoben und bei gedrückter Strg-Taste ein- und ausgezoomt werden. Eine 3D-Maus wird in 3D-Grafiken unterstützt. Animierte 3D-Grafiken können als Video gespeichert werden, wenn in der [mesys.ini](#) ein Pfad zu ffmpeg angegeben ist.



"Grafik speichern als..." speichert das Bild in einem Grafikformat wie PNG. "Grafik exportieren als..." unterstützt nur STL für Standardgrafiken, aber für Grafiken aus dem Untermenü CAD ist auch ein Export als STEP möglich.

Mit "Kopieren" wird das Bild in die Zwischenablage kopiert, so dass es in anderen Programmen eingefügt werden kann.

Das Aktivieren von "Inhalt einfrieren" unterdrückt die Aktualisierung der Ansicht bei neuen Durchläufen der Berechnungen. Dies kann für Vergleiche genutzt werden.

Mit der Auswahl "Animiert" wird die Ansicht um die vertikale Achse rotiert.

1.4 Parameter für die Befehlszeile

Die Software unterstützt mehrere Parameter für die Befehlszeile:

- -highDPIRoundUp rundet einen nicht ganzzahligen Skalierungsfaktor für hohe Auflösungen auf.
- -highDPIRoundDown rundet einen nicht ganzzahligen Skalierungsfaktor für hohe Auflösungen ab.
- -highDPIRound rundet einen nicht ganzzahligen Skalierungsfaktor für hohe Auflösungen.
- -highDPIRoundPreferDown rundet einen nicht ganzzahligen Skalierungsfaktor für hohe Auflösungen. Bei 50% wird abgerundet.

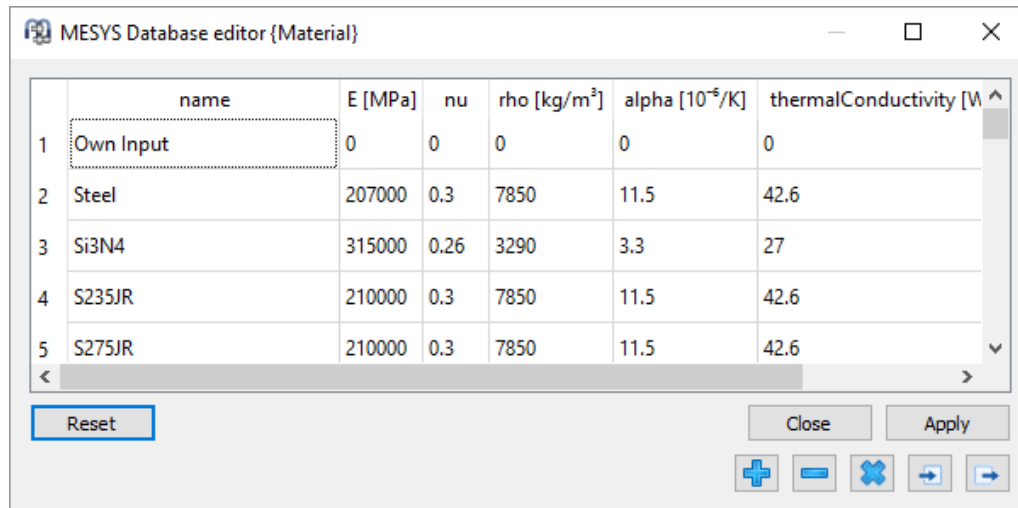
- -desktopOpenGL weist die Software an, die Hardware OpenGL zu verwenden, was der Standard ist.
- -softwareOpenGL weist die Software an, einen Softwaretreiber für 3D-Grafiken zu verwenden. Dies kann verwendet werden, wenn die beiden obigen Einstellungen nicht funktionieren.
- -ini=file.ini sagt der Software, dass sie 'file.ini' für Programmeinstellungen zu verwenden.
- -license=license.dat sagt der Software, dass sie 'license.dat' als Lizenz-Datei zu verwenden. Dies kann verwendet werden, wenn verschiedene Lizenzdateien vorhanden sind.
- -language=xx legt die Sprache für die Benutzeroberfläche fest. Gültige Optionen sind EN, DE, FR, ES, KO, ZH, JA, TR.
- -lock hält die *.xml Datei, die auch auf der Kommandozeile definiert wird, offen, bis das Programm geschlossen wird. Dies kann für Aufrufe von anderen Programmen genutzt werden, die prüfen, wann die Eingabedatei freigegeben ist.
- -generatereport=filename.pdf erzeugt ein Protokoll, wenn auf der Kommandozeile ebenfalls eine *.xml Datei übergeben wird. Danach wird das Programm geschlossen.
- -save oder -saveas=filename.xml speichert die Eingabedatei nach der Berechnung, wenn auch eine *.xml-Datei auf der Kommandozeile übergeben wird. Das Programm wird anschließend geschlossen. Bei der Wellenberechnung wird neben dem Standard-xml-Dateiformat auch eine *.rexs-Datei für die Ein- und Ausgabe unterstützt. Neben der *.xml-Dateiendung sind auch die neuen modulspezifischen Dateierweiterungen möglich.
- Wenn ein Dateiname *.xml als Parameter übergeben wird, wird die Datei von der Software geöffnet. Dies ermöglicht auch das Ablegen einer Datei auf einem Programmsymbol auf dem Desktop. Bei der Wellenberechnung kann neben *.xml auch eine *.rexs verwendet werden.

1.5 Datenbank

Als Datenbank wird eine SQLite Datenbank verwendet. Zusätzlich zu den Möglichkeiten der Software können auch Standard Tools verwendet werden, um die Datenbank zu verändern. Bitte fügen Sie nur Datensätze mit der ID > 100000 hinzu und modifizieren Sie keine Datensätze mit der ID < 0, da diese intern verwendet

werden. In zukünftigen Versionen können Datensätze mit der id < 100000 geändert oder hinzugefügt werden.

In der aktuellen Version gibt es Datenbanktabellen für Lager, Lagerspiel, Toleranz des Lagers, Werkstoff, Werkstofflager und Schmierung. Sie können über das Menü 'Datenbank' unter 'Extras' hinzugefügt werden.







The screenshot shows a window titled 'MESYS Database editor {Material}'. It contains a table with the following data:

	name	E [MPa]	nu	rho [kg/m ³]	alpha [10 ⁻⁵ /K]	thermalConductivity [W/mK]
1	Own Input	0	0	0	0	0
2	Steel	207000	0.3	7850	11.5	42.6
3	Si3N4	315000	0.26	3290	3.3	27
4	S235JR	210000	0.3	7850	11.5	42.6
5	S275JR	210000	0.3	7850	11.5	42.6

Below the table, there are buttons for 'Reset', 'Close', and 'Apply'. At the bottom right, there are five icons: a plus sign (+), a minus sign (-), a blue X, a right-pointing arrow, and a left-pointing arrow.

Die Daten werden erst in die Datenbank geschrieben, wenn Sie auf die Schaltfläche 'Übernehmen' klicken, Änderungen können durch Auswahl von 'Zurücksetzen' vor dem Klicken auf 'Übernehmen' entfernt werden.

Mit der -Schaltfläche können Zeilen hinzugefügt werden, mit der -Schaltfläche kann eine ausgewählte Zeile gelöscht werden. Über die Schaltfläche  können zusätzliche Elemente aus einer Datei importiert werden. Die Spalten in der Datei müssen in der gleichen Reihenfolge und Einheit wie in der Tabelle angegeben sein. Ebenso kann die Tabelle mit der entsprechenden -Schaltfläche exportiert werden.

1.5.1 Ändern von Bezeichnungen in der Datenbank

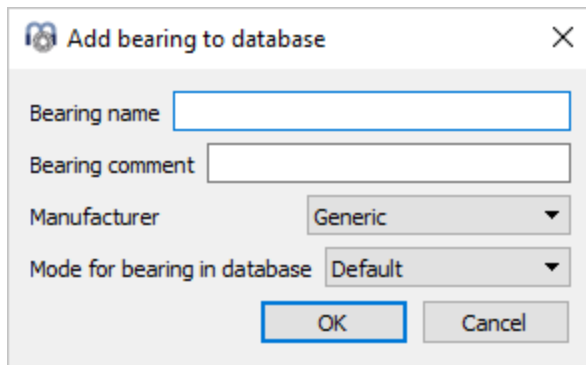
Wenn eine Berechnungsdatei belastet wird, sucht die Software in der Datenbank nach Kombinationen aus ID und Bezeichnung eines Datensatzes. Wenn der Eintrag nicht gefunden wird, werden die Eingaben in "Eigene Eingabe" geändert.

Daher werden Berechnungsdateien, die von anderen Installationen der Software mit einer anderen Datenbank geöffnet werden, "Eigene Eingabe" anzeigen und die richtigen Ergebnisse liefern.

Wenn Sie die Bezeichnung von Einträgen in der Datenbank ändern, geschieht dasselbe. In alten Dateien, die diesen Eintrag verwendet haben, wird "Eigene Eingabe" angezeigt, und es werden die Originaldaten verwendet.

1.5.2 Lager in Datenbank zufügen

Zum Hinzufügen von Lagern in die Datenbank geben Sie bitte die Geometriedaten in die Berechnungsfenster der Lagerberechnung ein, führen die Berechnung durch und wählen dann 'Extras->Datenbank->Lager in Datenbank zufügen'. Sie werden aufgefordert, den Wälzlagernamen, die Bezeichnung, den Hersteller und einen Datenbankmodus einzugeben.



Wenn die Kombination aus Name und Hersteller bereits in der Datenbank vorhanden ist, werden Sie gefragt, ob der Datensatz überschrieben werden soll.

Der Modus kann sein

- "Standard": Standard-Verhalten
- "Approximiert": Ein Kommentar zur approximierten Innengeometrie wird im Protokoll angezeigt und die Eigenfrequenzen werden nicht angezeigt.
- "Innengeometrie verstecken": Die Innengeometrie wird im Protokoll und in den Eingabedaten nicht angezeigt. Diese Option ist für zusätzliche verschlüsselte Datenbanken vorgesehen.

Im Falle der Wellenberechnung wird der obige Dialog angezeigt, wenn 'Extras->Datenbank->Lager in Datenbank zufügen' gewählt wird, während das Lagerfenster aktiv ist. Andernfalls wird der folgende Dialog angezeigt:

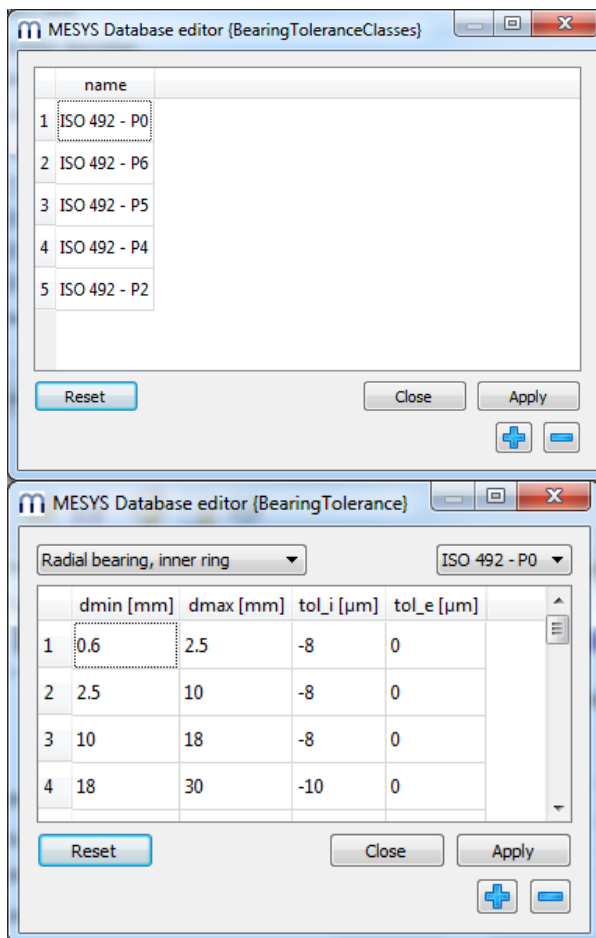
In der Wellenberechnung wird ein Fenster mit zwei Registerkarten namens "Wälzlagergeometrie" und "Werkstoff und Schmierung" geöffnet. Diese Registerkarten funktionieren auf die gleiche Weise wie die Registerkarten in der Schnittstelle der Lagerberechnung. Die Funktion bietet die Möglichkeit, ein neues Lager von Grund auf zu erstellen und hinzuzufügen, indem alle erforderlichen Daten eingegeben werden, oder indem ein bestehendes Lager aus der Datenbank ausgewählt und modifiziert wird. In beiden Fällen braucht der Anwender die Tragfähigkeitsdaten nicht im Voraus zu kennen, da die Software sie aus den erforderlichen geometrischen Eingaben herausfindet, wenn er den Knopf "Berechnen" am unteren Rand drückt. Sind alle Daten ausgefüllt, muss der Anwender auf die Schaltfläche "Übernehmen" klicken und wird aufgefordert, eine Bezeichnung für das neue Lager einzugeben.

1.5.3 Datenbank-Tabellen

Für einige Datenbanktabellen werden in den folgenden Abschnitten weitere Informationen zur Verwendung gegeben.

1.5.3.1 Wälzlager Spiel und Toleranz des Lagers

Für die Definition von Spiel und Toleranz müssen zwei Tabellen verwendet werden. In der Tabelle 'BearingClearanceClasses' bzw. 'BearingToleranceClasses' werden die verfügbaren Bezeichnungen definiert.



In der Tabelle 'BearingClearance' und 'BearingTolerance' werden dann die tatsächlichen Werte in Abhängigkeit vom Durchmesser definiert.

1.5.3.2 Lager Werkstoffe

In der Tabelle 'Werkstoff Wälzlager' können Sie zusätzliche Informationen über die zulässigen Spannungen für die Berechnung der Lager einstellen.

1.5.3.3 Hersteller von Lagern

In der Tabelle 'Lagerhersteller' können Sie zusätzliche Bezeichnungen für Lagerhersteller festlegen.

1.6 Parametervariationen

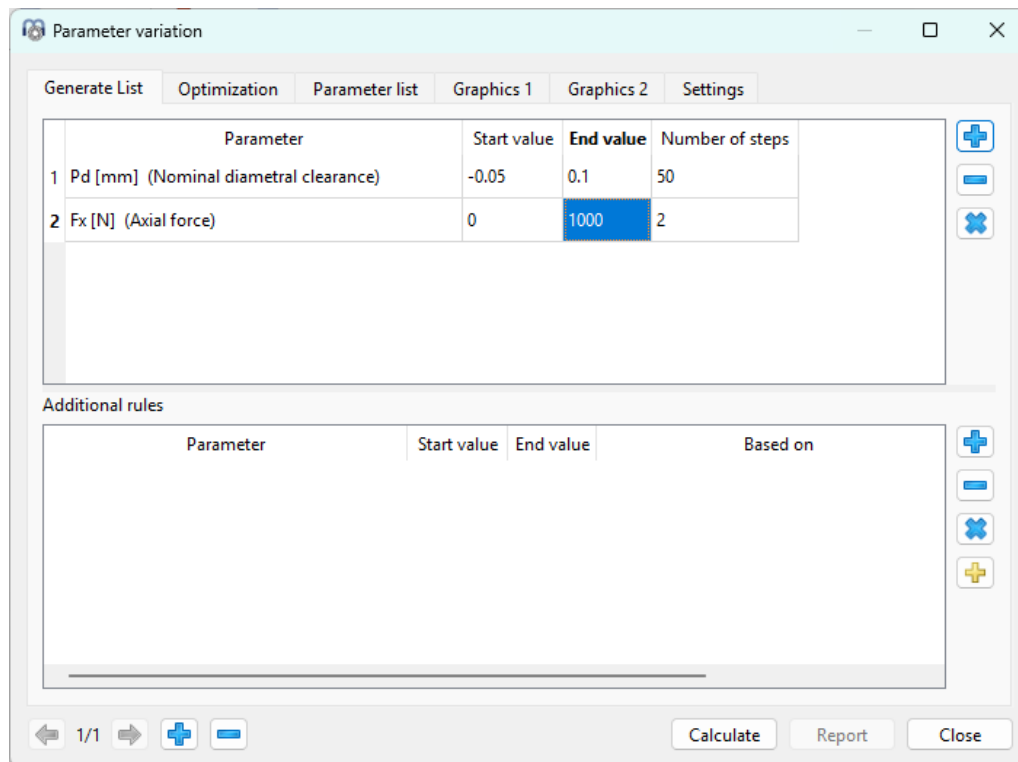
Über den Menüpunkt "Berechnung" -> "Parametervariation" wird ein Dialog für Parametervariationen angezeigt. Er ermöglicht es dem Anwender, Parameterstudien durchzuführen, deren Ergebnisse in Tabellen und Grafiken

dargestellt werden. Typische Anwendungen sind z.B. die Visualisierung von Lebensdauer über Spiel oder Verschiebungen über Last. Eine optionale Optimierung für einen Parameter ist ebenfalls verfügbar.

In der Parametervariation können über die Schaltflächen unten links mehrere Einstellungen definiert werden.

1.6.1 Liste erzeugen

In der Tabelle "Liste erzeugen" können mehrere Eingabeparameter hinzugefügt und Bereiche (Start-/Endwerte) für diese definiert werden. Bei der Lagerberechnung kann die Berechnung in Abhängigkeit vom Typ des Lagers bis zu 0,1 sec für eine einzelne Berechnung dauern, die Verwendung von Lastkollektiven und die Definition vieler Schritte kann zu langen Berechnungszeiten führen.

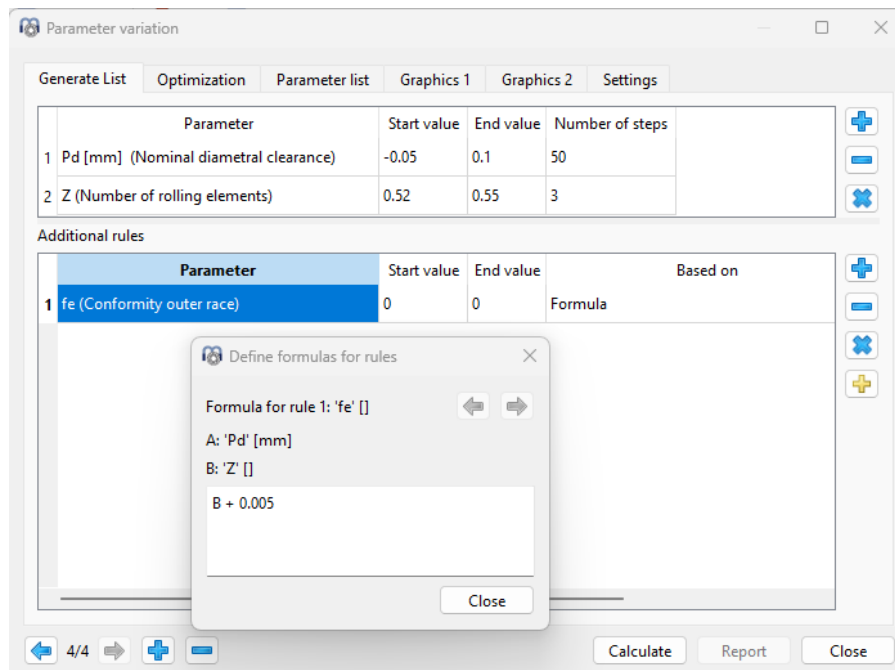


Zusätzliche Regeln können verwendet werden, um zusätzliche Eingabeparameter in Abhängigkeit von den Parametern der ersten Liste festzulegen. Der zusätzliche Parameter wird zwischen einem Start- und einem Endwert auf der Basis eines anderen Parameters interpoliert. Zum Beispiel zusätzlicher Parameter y zwischen y1 und y2 basierend auf dem Parameter x im Bereich x1 bis x2:

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Ein Beispiel für die Verwendung der Regeln kann sein, die Lagerspiele für mehrere Lager im Rahmen der Wellenberechnung auf denselben Wert zu setzen.

Die Regeln können auch mit Hilfe von Formeln definiert werden, die auf den Parametern in der ersten Tabelle basieren:

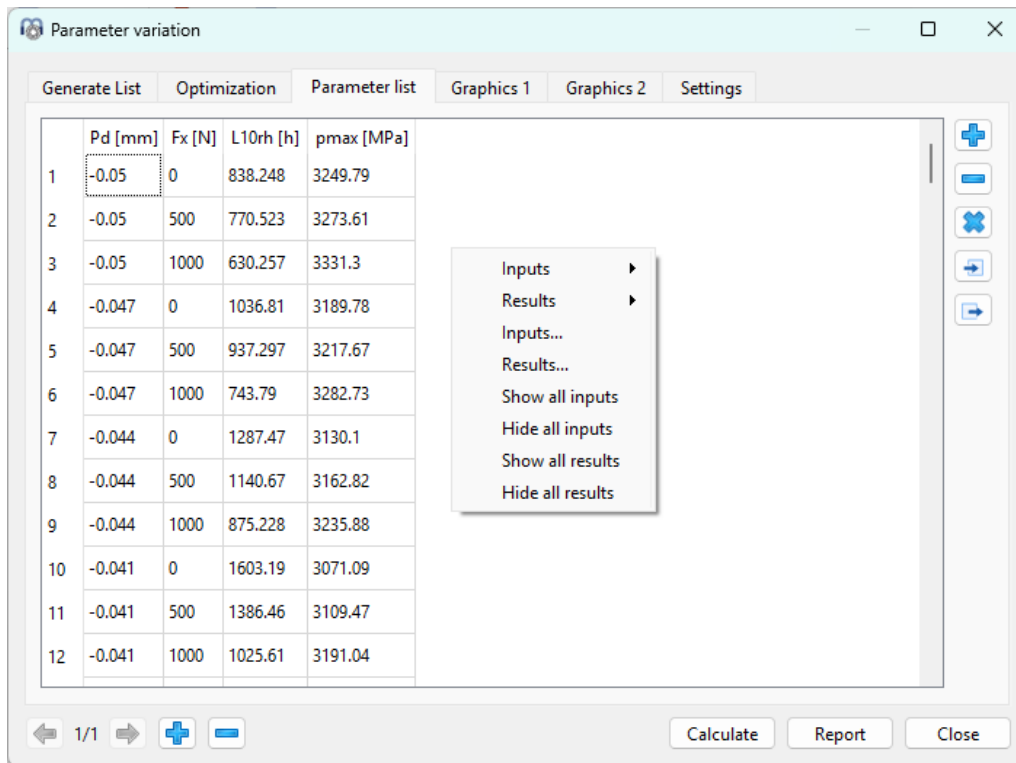


Die Formeln können über die $+$ -Schaltfläche rechts definiert werden.




1.6.2 Parameterliste

Bevor wir eine Liste erzeugen, ist es notwendig, zuerst die Ausgaben oder Variablen zu definieren, an denen wir interessiert sind, und zwar auf der Registerkarte "Parameterliste".

Wie in der Abbildung zu sehen ist, kann man mit einem rechten Mausklick auf die Registerkarte "Parameterliste" über ein Kontextmenü die Spalten hinzufügen, die den Ergebnissen entsprechen, an denen man interessiert ist. Die Zeilen enthalten die variablen Werte entsprechend den Grenzen und der Anzahl der Schritte.



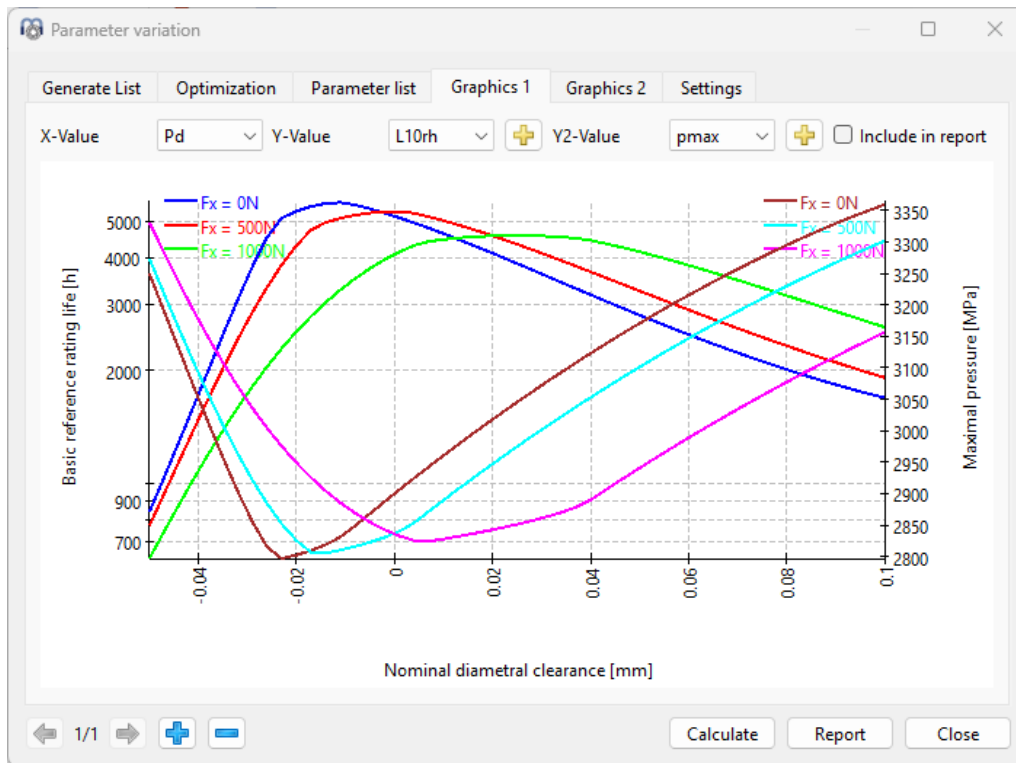
Wenn Sie auf "Berechnen" klicken, während das Registerkartenfenster "Liste erzeugen" aktiv ist, wird im entsprechenden Registerkartenfenster "Parameterliste" eine Liste aller Parameterkombinationen erstellt und die Analyse durchgeführt. Je nach gewählter Anzahl der Parameter und Schritte kann die Analyse zu langen Berechnungszeiten führen.

Eine zweite Möglichkeit, eine Tabelle (Parameterliste) zu erstellen, ist das Hinzufügen von Zeilen und die manuelle Eingabe von Werten mit der -Schaltfläche. Außerdem kann eine ganze Tabelle aus einer CSV- oder XLS-Datei über die -Schaltfläche importiert oder über die -Schaltfläche in eine Datei exportiert werden. Um die Analyse auszuführen, müssen wir dann nur noch auf "Berechnen" klicken, während diese Seite aktiv ist. Bitte beachten Sie, dass die Parameterliste nicht gespeichert wird, wenn der Dialog geschlossen wird.

1.6.3 Grafiken: Grafiken

Auf den Seiten "Grafiken1" und "Grafiken2" können die Ergebnisse als Grafik dargestellt werden.

Wenn die Parameterliste mit "Liste erzeugen" erzeugt wurde und nicht mehr als zwei Eingabeparameter verwendet werden, werden Linien für das Diagramm verwendet. Bei mehr Parametern oder anderen Quellen werden nur Punkte dargestellt.



Wurden zwei Parameter über "Liste erzeugen" variiert, werden mehrere Kurven für den zweiten Parameter angezeigt, wie im Bild oben, das eine Variation des nominalen Spiels und der Axialkraft F_x zeigt.

Der grafische Bereich besteht aus zwei verschiedenen y-Achsen, so dass es möglich ist, verschiedene Typen von Ergebnissen (Einheiten) zu einem Zeitpunkt zu vergleichen. Obwohl in der Grafik in erster Linie die Lebensdauer (L10rh) analysiert wird, können durch einen Klick auf die Schaltfläche **+** auch andere Ergebnisse mit denselben Einheiten wie Lnmrh einer der beiden verfügbaren y-Achsen hinzugefügt werden.

Unter "Einstellungen" steht eine Option zur Verfügung, mit der die Ein- und Ausgabewerte für beide Achsen in die Auswahl einbezogen werden können. Damit wäre es auch möglich, die horizontale und vertikale Achse zu vertauschen.

1.6.4 Optimierung

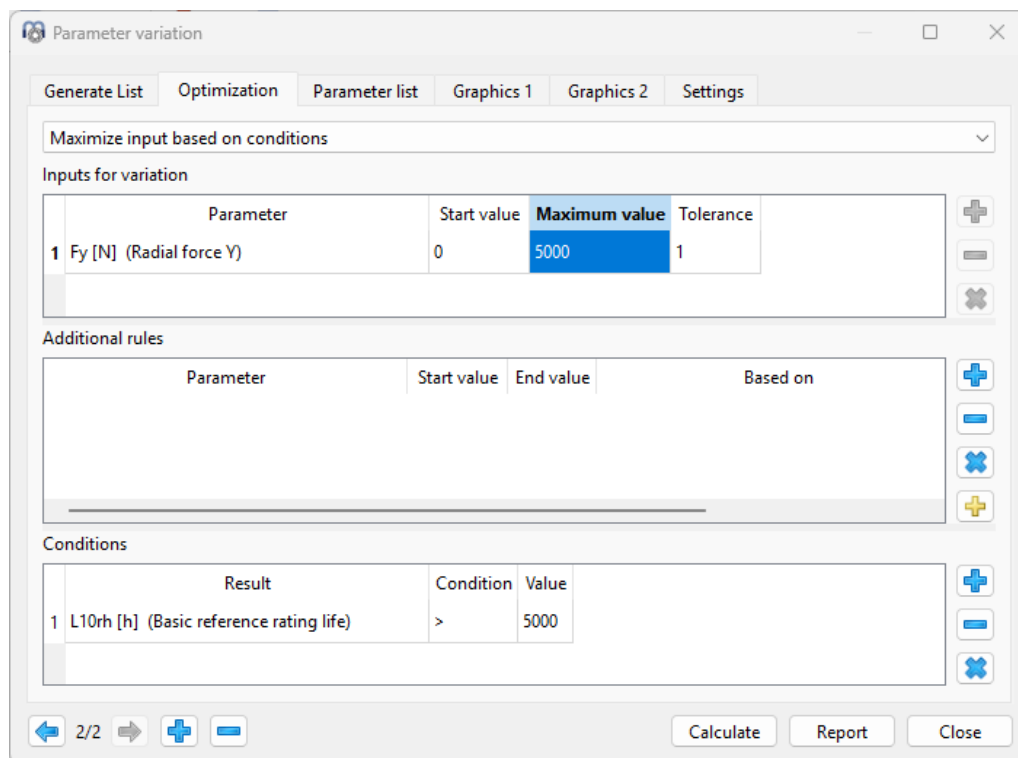
Optional kann ein Optimierungsschritt verwendet werden. Für die Optimierung eines Eingabeparameters stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung.

- Ein Eingangsparameter kann aufgrund von Bedingungen maximiert oder minimiert werden
- Ein Ergebnisparameter kann maximiert oder minimiert werden. Bei dieser Parametervariation wird nur ein Eingangsparameter verändert. Das zu

minimierende oder zu maximierende Ziel ist die Summe der Ergebnisse multipliziert mit einem Faktor. $T = \sum_i f_i \cdot R_i$

- Die Abweichung eines Ergebnisparameters von einem Ziel wird minimiert. Die Zielfunktion der Optimierung ist die Summe der Quadrate der Abweichung multipliziert mit einem Faktor. $T = \sum_i f_i \cdot (R_i - T_i)^2$

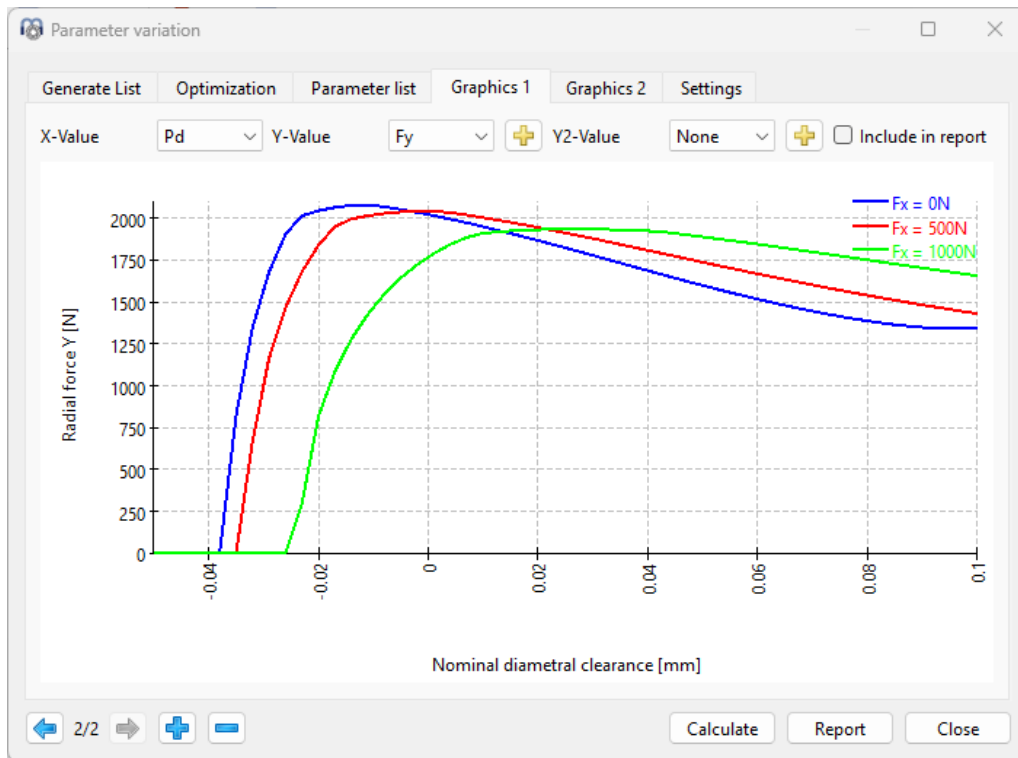
Für das obige Beispiel soll die Radialkraft F_y so maximiert werden, dass $L_{10rh}=5000h$ erreicht wird.



Die Bedingungen müssen für den Startwert des Parameters erfüllt sein. Ist dies nicht der Fall, werden die Ergebnisse auf Null gesetzt. Sind die Bedingungen auch beim Maximalwert noch erfüllt, bricht die Berechnung ab und die Ergebnisse werden ebenfalls auf Null gesetzt.

Zusätzliche Eingaben können basierend auf Optimierungsparametern definiert werden. Die zusätzlichen Eingaben werden zwischen Startwert und Endwerten interpoliert, abhängig von den Optimierungsparametern zwischen Startwert und Maximum oder Minimum.

Die Ergebnisse für F_y im Bild unten zeigen einen Fehler für ein kleines Spiel, da die 5000h nicht erreicht werden können.



Ein weiteres Beispiel zeigt die Optimierung zur Maximierung eines Ergebnisses. Das Spiel wird von der Software für mehrere Axiallasten optimiert, um die Lebensdauer des Lagers zu maximieren:

The optimization window is configured to maximize the result based on the following conditions:

Parameter	Factor
1 L10h [h] (Basic reference rating life)	1

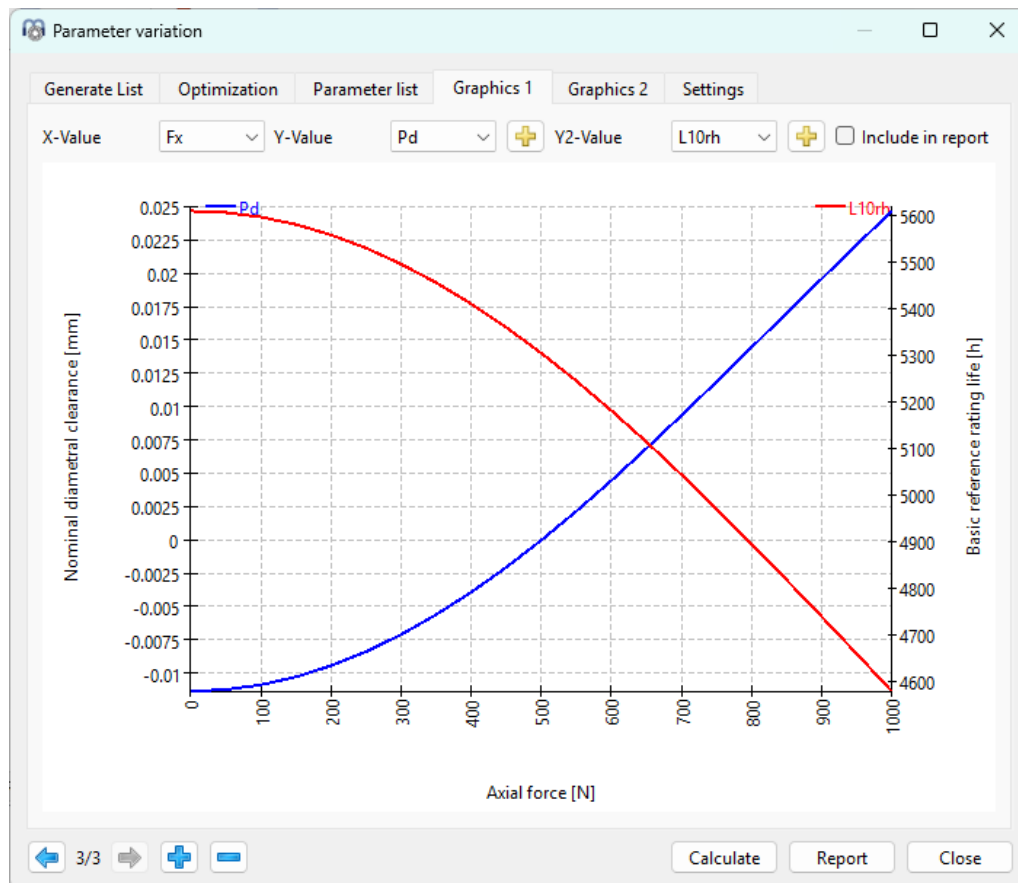
Inputs for variation:

Parameter	Start value	Minimum value	Maximum value	Tolerance
1 Pd [mm] (Nominal diametral clearance)	0	-0.05	0.1	0.01

Additional rules and conditions sections are currently empty.

Der Faktor wird zur Skalierung des Ergebniswertes verwendet und sollte für sehr kleine Ziele erhöht werden, da die interne Toleranz auf 10^{-4} festgelegt ist. Die Toleranz für den Parameter wird vom Solver verwendet und sollte auf die erforderliche Genauigkeit abgestimmt sein.

Die Ergebnisse werden als Grafik dargestellt:

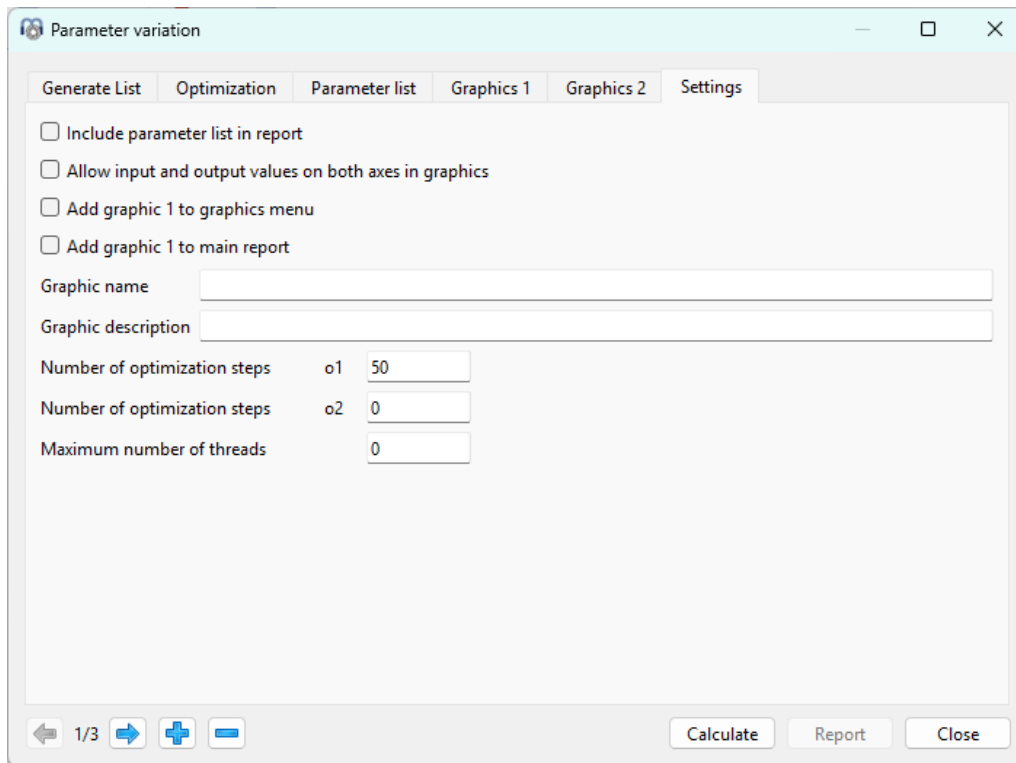


1.6.5 Protokoll

Soll die Grafik im Protokoll angezeigt werden, müssen Sie das Kontrollkästchen "Im Protokoll anzeigen" aktivieren. Außerdem steht unter der Registerkarte "Einstellungen" eine weitere Checkbox zur Verfügung, um die Parameterliste im Protokoll zu berücksichtigen.

1.6.6 Einstellungen

Einige Einstellungen sind in der Parametervariation verfügbar:



- Parameterliste im Protokoll berücksichtigen: Damit wird die Ergebnistabelle in das Protokoll aufgenommen. Abhängig von den Eingaben kann sie recht lang werden.
- Eingaben und Ausgaben für beide Achsen der Grafik zulassen: Mit dieser Option können Sie die Achsen in den Diagrammen tauschen.
- Grafik 1 zum Grafik-Menü hinzufügen: Die Auswahl für Grafik 1 wird für ein parametrisches Diagramm im Hauptgrafikmenü verwendet. Dies funktioniert nur, wenn die Daten auf der Tabelle "Liste erzeugen" basieren.
- Grafik 1 zum Protokoll hinzufügen: Hiermit wird die Grafik 1 zum Hauptprotokoll hinzugefügt. Die Grafik wird nicht gespeichert, sondern bei jedem generierten Protokoll neu erzeugt.
- Name und Beschreibung der Grafik: Diese werden für die benutzerdefinierten Diagramme im Grafikmenü und im Protokoll verwendet.
- Anzahl der Optimierungsschritte für die Optimierung der Ergebnisse mit zwei Solvern. Der erste Solver verwendet nur den Funktionswert und keinen Gradienten. Er ist weniger genau, aber viel schneller. Der zweite Solver verwendet die Funktionswerte und den Gradienten und benötigt mehr Zeit. Beide werden nacheinander aufgerufen, wenn die Anzahl der Schritte größer als Null ist.
- Maximale Anzahl Threads: Bei der Standardeinstellung von Null werden alle verfügbaren Prozessorkerne zur Berechnung herangezogen. Bei sehr großen

Modellen kann der Speicherbedarf ein Problem darstellen, dann kann hier eine kleinere Anzahl von Threads definiert werden.

1.7 Statistische Parametervariationen

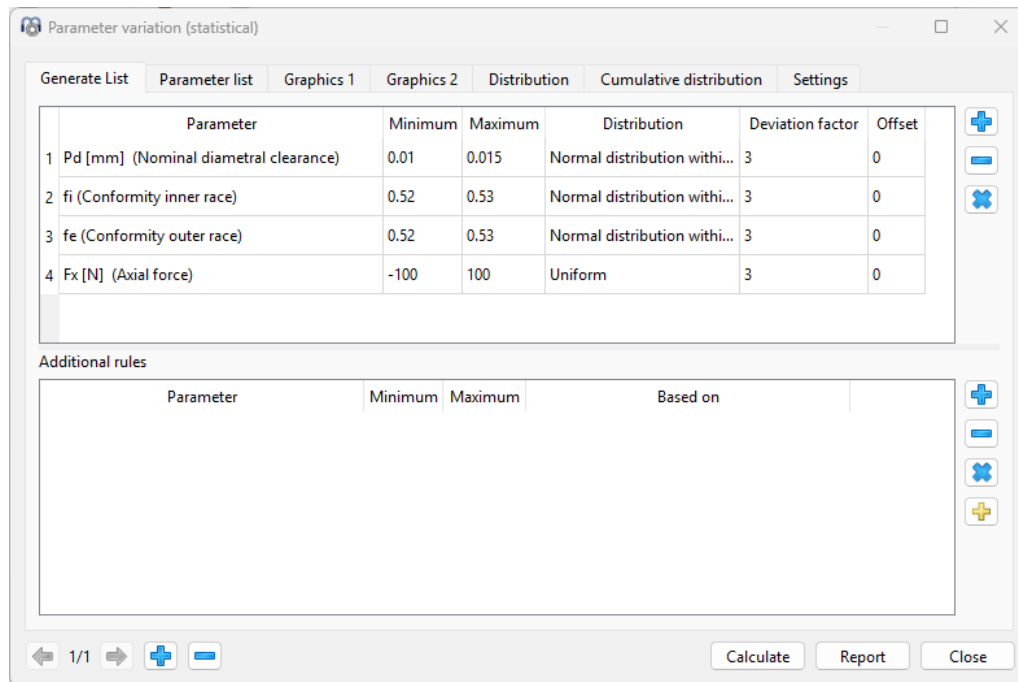
Über den Menüpunkt "Berechnung" -> "Parametervariation (statistisch)" steht ein analoges Tool zur Standard Parametervariation zur Verfügung. Der Hauptunterschied besteht darin, dass dieses Tool statistische Auswertungen bei der Parametervariation unterstützt.

Die Standardversion der Parametervariation ist hilfreich, um den Einfluss eines Parameters auf ein oder mehrere Ergebnisse zu visualisieren. Die statistische Version kann verwendet werden, wenn der Einfluss von mehreren Unsicherheiten bewertet werden soll. Anstatt mehrere Parameter manuell zu prüfen, kann eine automatische Berechnung der gesamten Bereiche durchgeführt werden. Um die Gründe für die Ergebnisse zu verstehen, müssen zwar immer noch zusätzliche Auswertungen durchgeführt werden, aber die Software zeigt die zu erwartenden Ergebnisbereiche an.

1.7.1 Liste erzeugen

Wie bei der normalen Parametervariation können mehrere Eingangsparameter in die Tabelle "Liste erzeugen" eingefügt und Bereiche (Start-/Endwerte) für sie definiert werden. Für die Bereiche sind keine Berechnungen erforderlich. Eine Begrenzung der Anzahl der statistischen Berechnungen kann jedoch auf der Registerkarte "Einstellungen" eingestellt werden.

Verschiedene Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen können aus einer Dropdown-Liste ausgewählt werden, die durch Doppelklick auf eine Zelle in der Spalte "Verteilung" für einen der Parameter angezeigt wird:



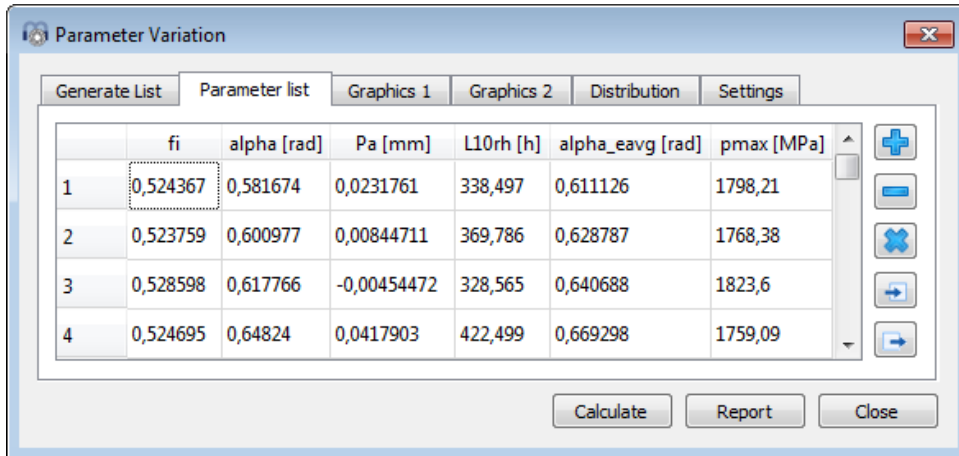
- Gleichförmig: Die Wahrscheinlichkeit ist gleichmäßig verteilt für eine Reihe von Werten zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert des Parameters.
- Normalverteilung innerhalb des Bereiches: Die Wahrscheinlichkeit wird für eine Reihe von Werten zwischen dem Minimum und dem Maximum unter Verwendung einer Normalverteilung berechnet.
- Normalverteilung unlimitiert: Die Wahrscheinlichkeit wird für eine Reihe von Werten berechnet, die theoretisch im Bereich von $(-\infty, +\infty)$ liegen, indem eine Normalverteilung verwendet wird.
- Minimum, Maximum: Die Wahrscheinlichkeit ist gleichverteilt zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert des Parameters.
- Minimum, Mittelwert, Maximum: Die Wahrscheinlichkeit ist gleichverteilt zwischen dem maximalen, mittleren und minimalen Wert des Parameters.

Zusätzlich kann ein Faktor für die Abweichung festgelegt und ein Versatzwert zwischen -1 und +1 verwendet werden, um die "Glockenkurve" horizontal in eine der beiden Richtungen zu verschieben.

1.7.2 Parameterliste

Die Generierung der Parameterliste erfolgt wie bei der nicht-statistischen Parametervariation beschrieben. Durch Anklicken von "Berechnen" bei aktivem Registerfenster "Liste erzeugen" wird im entsprechenden Registerfenster "Parameterliste" eine Liste aller Parameterkombinationen erzeugt und die statistische Auswertung durchgeführt. Abhängig von der gewählten Nummer der

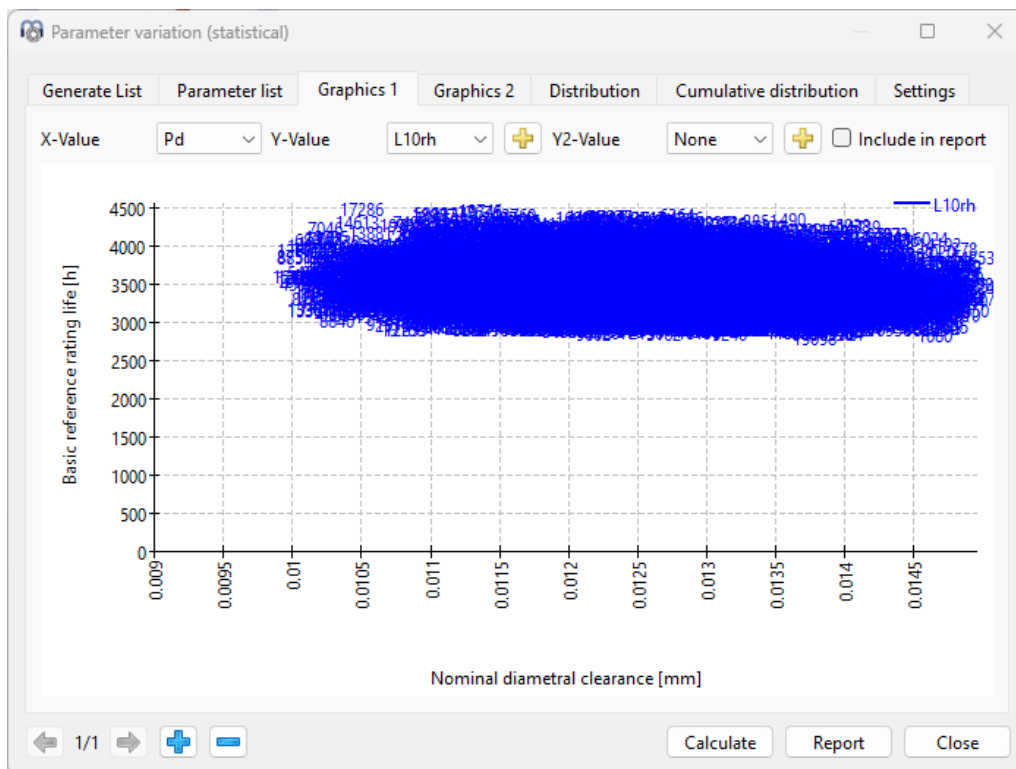
Parameter und der angegebenen Anzahl Berechnungen kann die Analyse zu langen Rechenzeiten führen.




	fi	alpha [rad]	Pa [mm]	L10rh [h]	alpha_eavg [rad]	pmax [MPa]
1	0,524367	0,581674	0,0231761	338,497	0,611126	1798,21
2	0,523759	0,600977	0,00844711	369,786	0,628787	1768,38
3	0,528598	0,617766	-0,00454472	328,565	0,640688	1823,6
4	0,524695	0,64824	0,0417903	422,499	0,669298	1759,09

1.7.3 Grafiken: Grafiken

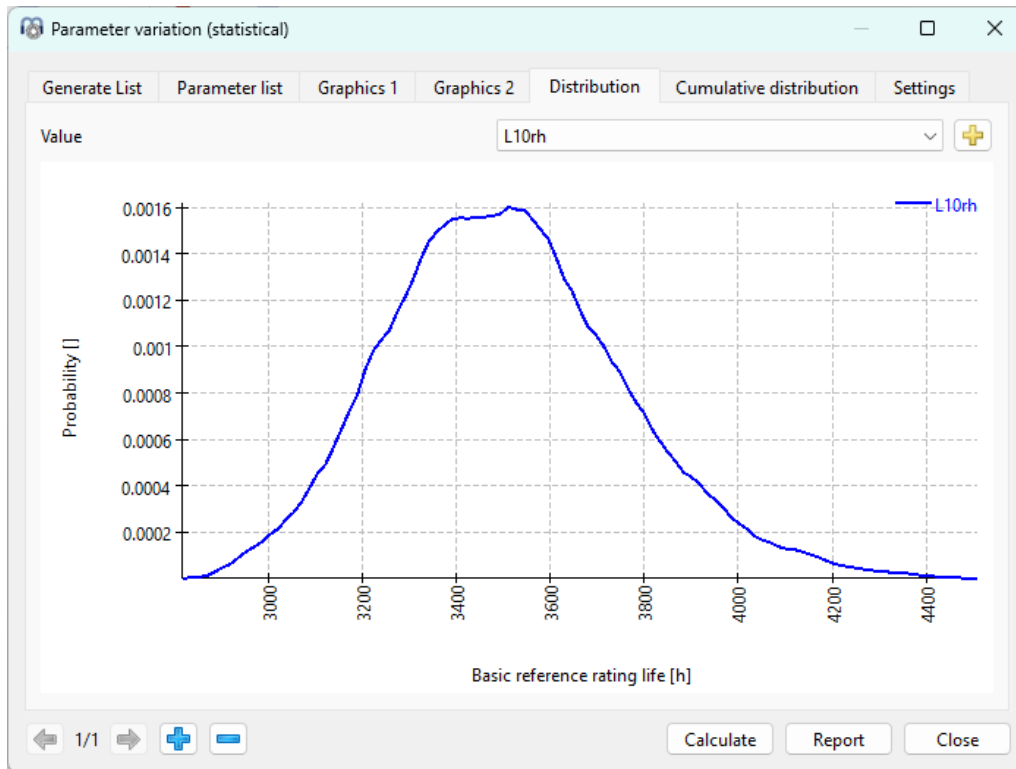
Auf den Registerkarten 'Grafiken' können beliebige Variablenkombinationen in Form von Punktwolken visualisiert werden, wobei einige Trends für die Beziehung zwischen den Parametern zu erkennen sind, wie in der Abbildung unten dargestellt.



1.7.4 Verteilung

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird auf der Registerkarte "Verteilung" grafisch dargestellt. Mit Hilfe der -Schaltfläche ist es möglich, Vergleiche zwischen den statistischen Ergebnissen für verschiedene mechanische Komponenten in einem

System anzustellen. Die kumulative Verteilung ermöglicht es, den Wert für eine Wahrscheinlichkeit von z.B. 50% oder 90% zu ermitteln.

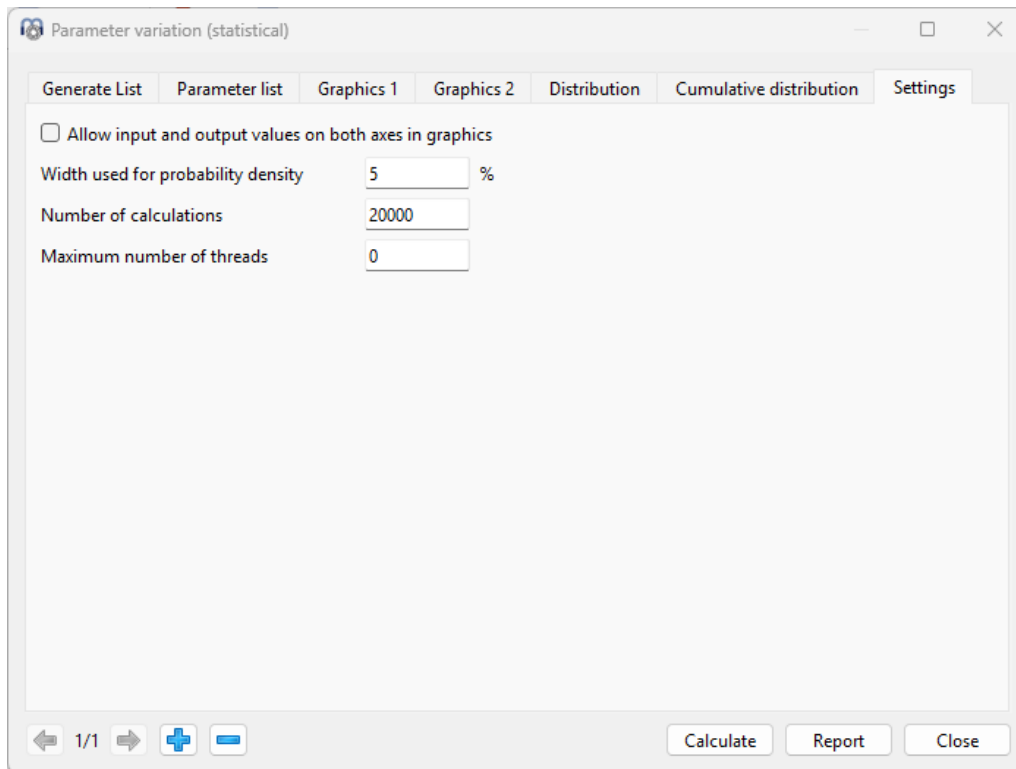


1.7.5 Protokoll

Sie müssen das Kontrollkästchen "Im Protokoll anzeigen" aktivieren, wenn die Grafik dem Protokoll hinzugefügt werden soll. Das Protokoll zeigt auch Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung für jedes ausgewählte Ergebnis an.

1.7.6 Einstellungen

Einige Einstellungen sind in der statistischen Parametervariation verfügbar:



- Eingaben und Ausgaben für beide Achsen der Grafik zulassen: Mit dieser Option können Sie die Achsen in den Ergebnisdiagrammen tauschen.
- Breite, die für die Wahrscheinlichkeitsdichte verwendet wird: Um die Verteilung darzustellen, ist eine Breite für die internen Bins erforderlich. Dies kann hier geändert werden. Ein größerer Wert führt zu einer glatteren Kurve.
- Anzahl Berechnungen: Diese Eingabe definiert die Anzahl der Berechnungen, die durchgeführt werden sollen. Für gut aussehende Verteilungen sollten mehrere tausend Berechnungen durchgeführt werden.
- Maximale Anzahl Threads: Bei der Standard-Einstellung von Null werden alle verfügbaren Prozessorkerne für die Berechnungen verwendet. Bei sehr großen Modellen kann die Speichernutzung ein Problem darstellen, dann kann hier eine kleinere Anzahl von Threads definiert werden.

1.8 Parametervariation (Optimierung)

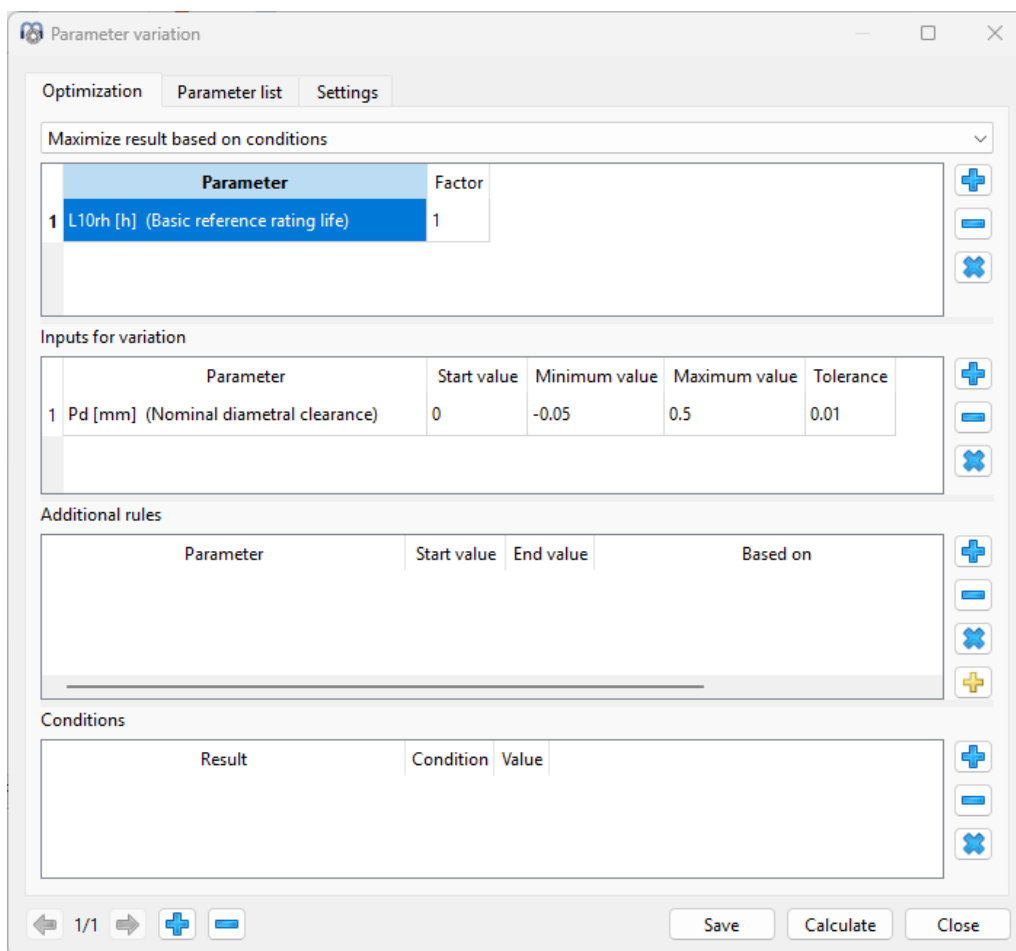
Die Parametervariation (Optimierung) führt lediglich die Optimierung für einen Einzelfall durch. Eine "Speichern"-Schaltfläche ermöglicht das Zurücklesen der Ergebnisse in die Hauptberechnung.

1.8.1 Optimierung

Bei der Optimierung stehen mehrere Optionen zur Verfügung:

- Ein Eingabeparameter kann auf der Grundlage von Bedingungen maximiert oder minimiert werden
- Ein Ergebnisparameter kann maximiert oder minimiert werden. Dabei können mehrere Eingangsparameter definiert werden. Das zu minimierende oder zu maximierende Ziel ist die Summe der Ergebnisse multipliziert mit einem Faktor.

$$T = \sum_i f_i \cdot R_i$$
- Die Abweichung eines Ergebnisparameters von einem Ziel wird minimiert. Die Zielfunktion der Optimierung ist die Summe der Quadrate der Abweichung, multipliziert mit einem Faktor. $T = \sum_i f_i \cdot (R_i - T_i)^2$

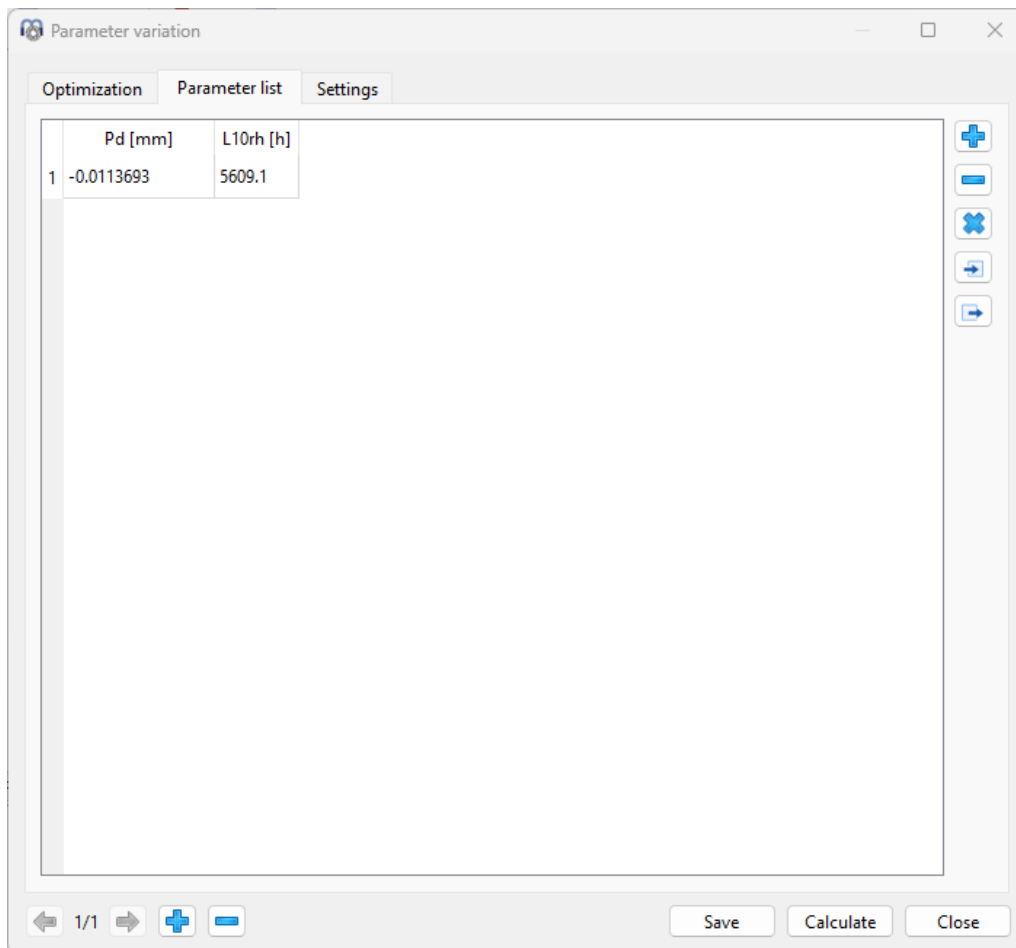


Für die ersten beiden Optionen, bei denen eine Eingabe maximiert oder minimiert wird, sind Bedingungen erforderlich. Bei den Optionen, die Ergebniswerte betreffen, sind die Bedingungen optional.

Der Faktor für das Optimierungsziel kann zur Skalierung der Ergebnisse verwendet werden. Die interne Toleranz für die Konvergenz wird auf 10^{-4} gesetzt. Die Toleranz für die Eingabewerte sollte sich an der erforderlichen Genauigkeit der Eingabewerte orientieren.

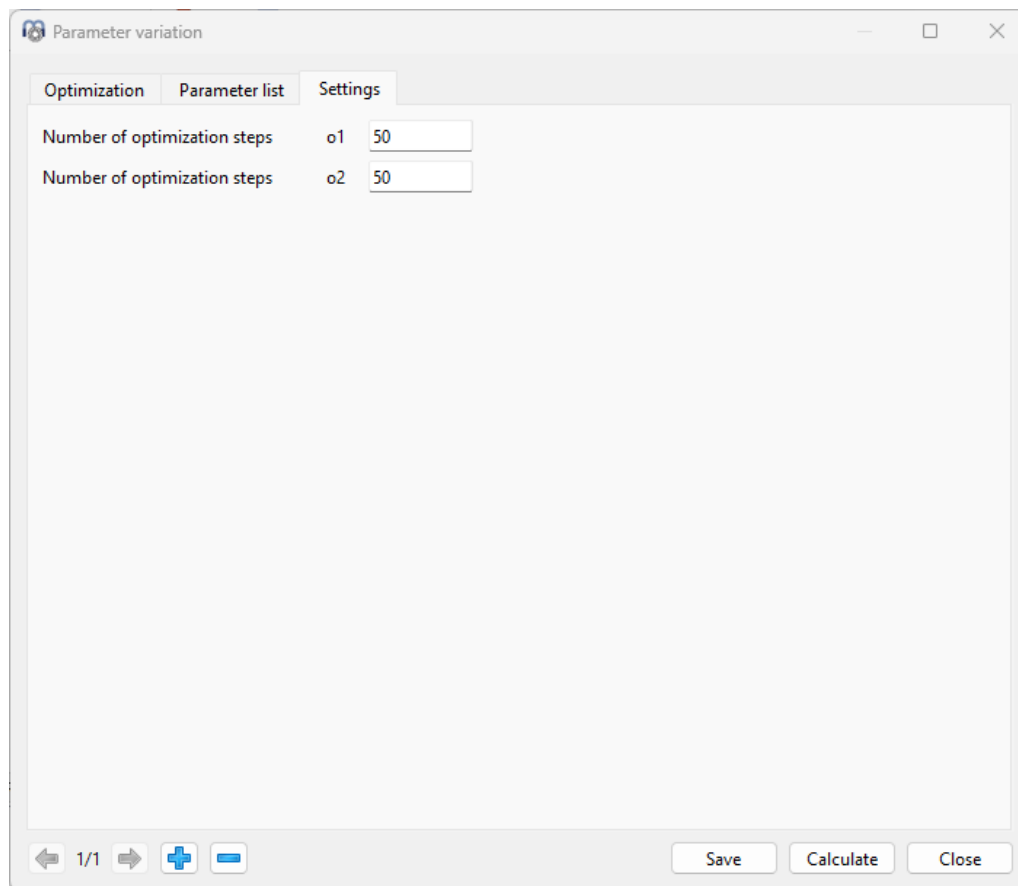
1.8.2 Parameterliste

Wenn auf der Seite "Parameterliste" keine Zeile definiert ist, wird beim Ausführen der Berechnung eine Zeile hinzugefügt. Normalerweise wird nur eine Zeile verwendet, aber es kann Fälle geben, in denen eine Optimierung für mehrere Eingabefälle durchgeführt werden soll. In diesem Fall können mehrere Zeilen manuell erstellt werden.



1.8.3 Einstellungen

Die Anzahl der Optimierungsschritte für die Optimierung der Ergebnisse mit zwei Solvern kann unter Einstellungen definiert werden. Der erste Solver verwendet nur den Funktionswert und keinen Gradienten. Er ist weniger genau, aber viel schneller. Der zweite Solver verwendet die Funktionswerte und den Gradienten und benötigt mehr Zeit. Beide werden nacheinander aufgerufen, wenn die Anzahl der Schritte größer als Null ist.



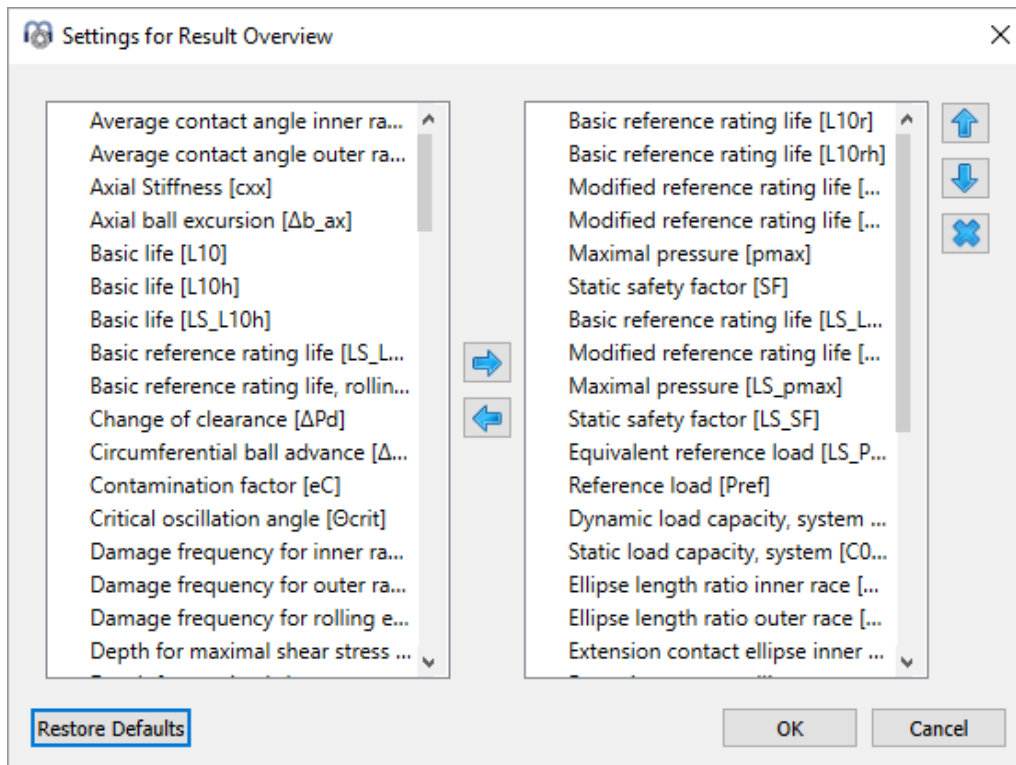
1.9 Resultate

Ergebnisse werden in Form einer kleinen Resultateübersicht direkt in der Software, einem Haupttextbericht im PDF-Format als Standard und optionalen zusätzlichen Berichten in Abhängigkeit vom Berechnungsmodul bereitgestellt. Unter Protokoll->'Resultattabellen' kann standardmäßig eine Tabellenkalkulation mit Resultaten im XLSX-Format geöffnet werden.

Grafik-Fenster können an die Hauptprogrammoberfläche angedockt werden und werden bei jeder Berechnung automatisch aktualisiert.

1.9.1 Resultateübersicht

Die Ergebnisübersicht am unteren Rand des Fensters zeigt die wichtigsten Ergebnisse an. Die Resultateübersicht kann unter Extras->Resultateübersicht konfiguriert werden.



Die Liste links zeigt alle verfügbaren Einträge für die Resultateübersicht an. Mit den Pfeilen können die ausgewählten Einträge in die rechte Liste verschoben werden, die für die Resultateübersicht verwendet wird. Die Reihenfolge der ausgewählten Ergebnisse kann mit den Auf-/Abwärtspfeilen rechts geändert werden. Beachten Sie, dass in der Resultateübersicht tatsächlich nur gültige Resultate-Werte angezeigt werden. Sie sehen also weniger Werte als in den Einstellungen ausgewählt.

Die Einstellungen der Resultateübersicht werden in den Benutzereinstellungen gespeichert, nicht in der Datei der Berechnung. Sie sind also für verschiedene Berechnungen gleich.

1.9.2 Hauptprotokoll

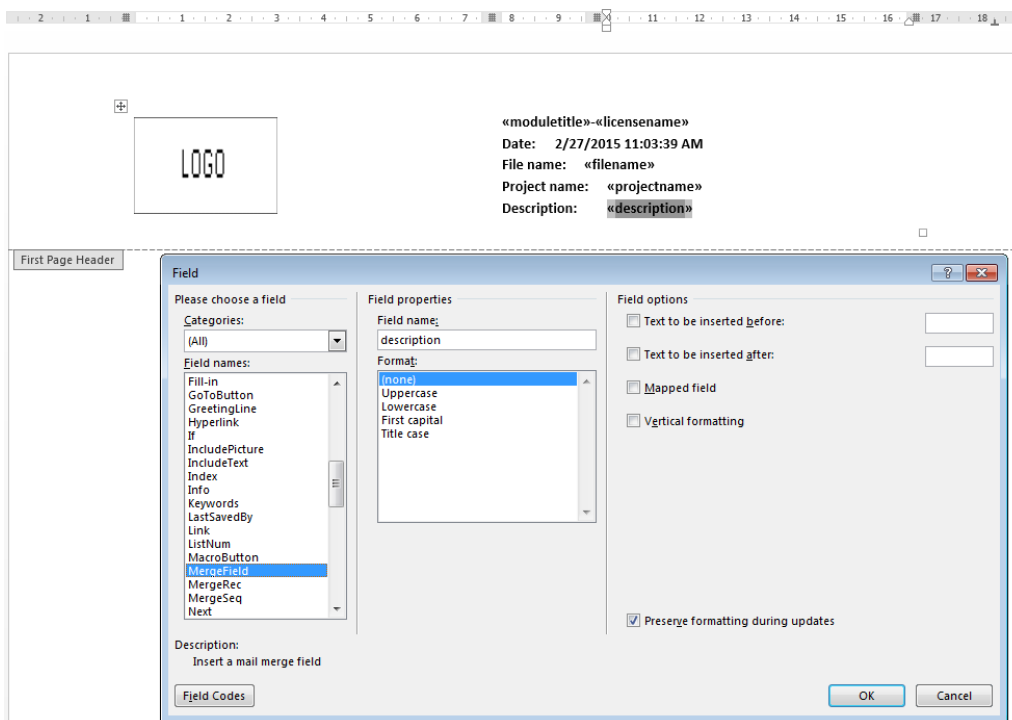
Das Hauptprotokoll kann durch Auswahl von Report->'Protokoll anzeigen' erstellt werden. Er kann mit Protokoll->'Protokoll speichern als' in verschiedenen Formaten gespeichert werden.

Im Menü Protokoll->Optionen kann der Inhalt des Protokolls konfiguriert werden. Die einzubeziehenden Grafiken können ausgewählt werden und einige Querschnitte des Protokolls können verworfen werden, wenn sie nicht von Interesse sind. Die Legende für alle Parameter der Tabelle kann im Protokoll angezeigt werden.

Das Logo im Protokoll kann in 'mesys.ini' konfiguriert werden. Siehe [Konfiguration mit INI-Datei](#)

1.9.2.1 Vorlage

Es kann eine Vorlage im (.docx)-Format erstellt und in 'mesys.ini' definiert werden, so dass sie bei der Erstellung des Software-Protokolls verwendet wird. Bei der aktuellen Version können nur die in der Kopf- und Fußzeile enthaltenen Informationen bearbeitet werden, wobei es möglich ist, Informationen zur Software wie 'Modultitel', 'Lizenzname', 'Datum', 'Dateiname', 'Projektname' oder 'Beschreibung' mit Hilfe der Textfeldoption in Microsoft Word zu verknüpfen. Zusätzlich kann ein Firmenlogo eingefügt werden, anstelle des MESYS Logos, das standardmäßig im Protokoll angezeigt wird:



Verfügbare Felder für die Option 'Mergefield' sind:

- filename
- projectname
- description
- licensename
- username
- modultitle

1.9.3 Benutzerdefinierte Protokollvorlagen

Benutzerdefinierte Protokollvorlagen können im Unterverzeichnis "templates/module-id" hinzugefügt werden. Basiert auf diesen Vorlagen können

Berichte durch Auswahl der Protokollvorlage unter Protokoll->Protokollvorlagen erstellt werden.

Die Protokollvorlagen sind Word-Dateien mit DOCVARIABLE-Feldern. Diese Felder werden bei der Erstellung des Protokolls ausgefüllt.

Mögliche Felder sind:

- DOCVARIABLE VAR-Name [Einheit]: Es wird die Variable mit der Bezeichnung 'Name' gedruckt. Optional kann eine Einheit in Klammern angegeben werden, zum Beispiel [mm]. Zusätzlich könnte ein Format wie %6.3g oder %6.3f hinzugefügt werden, wobei 'f' immer eine Festpunktausgabe und 'g' eine Exponentialausgabe für große Zahlen erzeugt.
- DOCVARIABLE VARU name [unit]: die Variable mit der Bezeichnung 'name' plus die Einheit werden ausgegeben. Optional kann eine Einheit in Klammern angegeben werden, zum Beispiel [mm].
- DOCVARIABLE TABLE tablename: Es wird eine Tabelle eingefügt.
- DOCVARIABLE GRAPHIC graphicName width=130 height=70: Es wird eine Grafik eingefügt. Optional können Höhe und Breite in Millimetern angegeben werden.

Bezüglich Details zu Variablenbezeichnungen, Tabellennamen und Grafiknamen fragen Sie bitte support@mesys.ch nach zusätzlicher Dokumentation.

1.9.4 Resultatetabellen

Im Menü Protokoll->Resultatetabellen ist es möglich, die Ergebnisdaten in Form von Tabellen auszugeben, die in verschiedenen Dateiformaten erzeugt werden können, wie zuvor unter [Konfiguration mit INI-Datei](#)¹⁸ erläutert

1.10 COM-Schnittstelle

Die Software kann über eine COM-Schnittstelle unter Windows angesprochen werden. Die Installation der COM-Schnittstelle ist optional und kann bei der Installation ausgewählt werden. Vor der ersten Benutzung muss der COM-Server registriert werden.

1.10.1 Registrierung des COM-Servers

Der COM-Server kann registriert werden, indem MesysCOM(64).exe mit dem Parameter -regserver als Administrator ausgeführt wird. Dies muss einmalig durchgeführt werden. Zum Deregistrieren kann der Parameter -unregserver verwendet werden.

Im Installationsverzeichnis werden zwei Batchdateien RegisterMesysCOM und UnRegisterMesysCOM bereitgestellt, so dass die Registrierung ohne Kommandofenster erfolgen kann. Sie können als Administrator mit der rechten Maustaste gestartet werden. Dies funktioniert nicht, wenn die Installation auf einer Netzwerkfreigabe erfolgt, im Falle eines Netzwerks muss ein Kommandofenster verwendet werden.

1.10.2 Methoden der COM Schnittstelle

Der Server stellt die Schnittstelle MesysCOM zur Verfügung, mit der Berechnungsmodule erstellt werden können. Verfügbare Methoden sind:

- `void setLanguage([in] BSTR p_lang);`
Pass language as two characters ("de", "en", "fr", "es", "tr", "ko", "zh", "ja")
- `int getVersion();`
Returns version in format yyyyymm.
- `MesysRBC* createRBC();`
Create bearing calculation module without user interface.
- `MesysSHAFT* createSHAFT();`
Create shaft calculation module without user interface.
- `MesysHERTZ* createHERTZ();`
Create Hertz stress calculation module without user interface.
- `MesysBALLSCREW* createBALLSCREW();`
Create ball screw calculation module without user interface.
- `MesysCYLGEARPAIR* createCYLGEARPAIR();`
Create cylindrical gear pair calculation module without user interface.
- `MesysGUIRBC* createGUIRBC();`
Create bearing calculation module with user interface.
- `MesysGUIHERTZ* createGUIHERTZ();`
Create hertz stress calculation module with user interface.
- `MesysGUISHAFT* createGUISHAFT();`
Create shaft calculation module with user interface.
- `MesysGUIBALLSCREW* createGUIBALLSCREW();`
Create ball screw calculation module with user interface.
- `MesysGUICYLGEARPAIR* createGUICYLGEARPAIR();`
Create cylindrical gear pair calculation module with user interface.

Die Schnittstellen MesysRBC, MesysSHAFT und andere ohne GUI erzeugen Berechnungsmodule ohne Benutzeroberfläche. MesysGUIRBC, MesysGUISHAFT sind Berechnungsmodule mit Benutzeroberfläche.

1.10.2.1 Allgemeine Methoden

Allgemeine Methoden für alle Berechnungsmodule sind:

- `VARIANT_BOOL calculate();`
Run calculation.
- `VARIANT_BOOL loadFile([in] BSTR p_filename);`
Load file.
- `VARIANT_BOOL saveFile([in] BSTR p_filename);`
Save calculation file.
- `VARIANT_BOOL generateReport([in] BSTR p_filename);`
Generate a report into the filename.
- `VARIANT_BOOL showReport([in] BSTR p_filename);`
Generate the report into the filename and call a program to view it.
- `VARIANT_BOOL generateSpecialReport([in] BSTR p_type, [in] BSTR p_filename);`
Generate a special report into the filename. Use type as "resultTables" for result tables.
- `VARIANT_BOOL generateImage([in] BSTR p_imageID, [in] BSTR p_filename, [in] int p_dpi, [in] int p_widthinMM, [in] int p_heightinMM);`
Generate an image and save it as file.
- `VARIANT_BOOL generateImage3D([in] BSTR p_imageID, [in] BSTR p_filename, [in] int p_dpi, [in] int p_widthinMM, [in] int p_heightinMM, [in] double p_dirX, [in] double p_dirY, [in] double p_dirZ, [in] double p_upX, [in] double p_upY, [in] double p_upZ);`
Generate an image of a 3D-scene and save it as file. dir is a vector in view direction, up is a vector for the up-direction of the view.
- `SAFEARRAY(VARIANT) getDiagramData([in] BSTR p_imageID);`
Get the diagram data for diagrams. The format of the return value is [{"name", ["x", "abscissa label", "abscissa unit", [1, 2, 3, ...], ["y", "ordinate label", "ordinate unit", [1, 2, 3, ...]], ["name", ...]}]
- `VARIANT_BOOL saveVariableList([in] BSTR p_path);`
Save the list of available variables into an XLSX file. The available variables depend on the input data.
- `SAFEARRAY(VARIANT) getVariableList();`
Get the available variables as list. The available variables depend on the input data. The format is [{"name", "type", "unit", "description"}, ...]
- `VARIANT_BOOL runParameterVariation([in] int p_index, [in] BSTR p_resultFilePath);`
Call the parameter variation with defined input settings for given index and saves the result table
- `SAFEARRAY(VARIANT) runParameterVariation_1([in] int p_index);`
Call the parameter variation with defined input settings for given index and returns the result table
- `VARIANT_BOOL setVarDouble([in] BSTR p_name, [in] double p_value);`
Set variable to double value.
- `VARIANT_BOOL setVarBool([in] BSTR p_name, [in] VARIANT_BOOL p_value);`
Set variable to boolean value.
- `VARIANT_BOOL setVarInt([in] BSTR p_name, [in] int p_value);`
Set variable to integer value.
- `VARIANT_BOOL setVarString([in] BSTR p_name, [in] BSTR p_value);`
Set variable to character value.
- `VARIANT_BOOL getVarDouble([in] BSTR p_name, [in,out] double *p_value);`
Read back double variable.
- `VARIANT_BOOL getVarBool([in] BSTR p_name, [in,out] VARIANT_BOOL *p_value);`
Read back boolean variable.
- `VARIANT_BOOL getVarInt([in] BSTR p_name, [in,out] int *p_value);`
Read back integer variable.
- `VARIANT_BOOL getVarString([in] BSTR p_name, [in,out] BSTR *p_value);`
Read back character variable.

- `VARIANT_BOOL setVar([in] BSTR p_name, [in] VARIANT p_value);`
Set variable using variant
- `VARIANT getVar([in] BSTR p_name);`
Get variable using variant
- `VARIANT_BOOL resizeArray([in] BSTR p_name, [in] int p_count);`
Resize array variable

Jedes Berechnungsmodul mit GUI bietet folgende Methoden:

- `void showWindow();`
Show user interface.
- `void hideWindow();`
Hide user interface.
- `void exec();`
Show user interface and process events until the window is closed.
- `void setLanguage([in] BSTR p_lang);`
Pass language as two characters ("de", "en", "fr", "es", "tr", "ko", "zh", "ja")
- `MesysModule* getCalcModule();`
Get the calculation module from the user interface.
- `void setCalcModule(MesysModule*);`
Set the calculation module for the user interface.

Die Namen für die Variablen der Berechnungsmodul sind die gleichen, wie sie für die [benutzerdefinierten Protokollvorlagen](#)⁵³ vorgesehen sind. Die Wellenberechnung ist derzeit nur eingeschränkt nutzbar, da zusätzliche Funktionen zur Änderung von Lasten und Randbedingungen fehlen.

1.10.2.2 Zusätzliche Methoden zur Wellenberechnung

Weitere Methoden für die Wellenberechnung sind:

- `VARIANT_BOOL importREXS([in] BSTR p_path);`
Import system in REXS format
- `VARIANT_BOOL exportREXS([in] BSTR p_path);`
Export system in REXS format
- `void resizeLoadSpectrum([in] int p_count);`
Resize load spectrum, which needs to be active.
- `VARIANT_BOOL setLoadSpectrumElement([in] int p_id, [in] BSTR p_component, [in] int p_index, [in] double p_value);`
Set data for load spectrum element
- `VARIANT_BOOL setPosition([in] int p_id, [in] double p_position);`
Set position for force or support
- `SAFEARRAY(VARIANT) getShaftIds();`
Get list of shaft IDs
- `SAFEARRAY(VARIANT) getForceIds();`
Get list of force IDs
- `SAFEARRAY(VARIANT) getSupportIds();`
Get list of support IDs
- `SAFEARRAY(VARIANT) getSectionIds();`
Get list of section IDs
- `SAFEARRAY(VARIANT) getBearingIds();`
Get list of bearing IDs
- `SAFEARRAY(VARIANT) getBallScrewIds();`
Get list of ballscrew IDs
- `SAFEARRAY(VARIANT) getGroupIds();`
Get list of group IDs
- `SAFEARRAY(VARIANT) getElasticPartIds();`
Get list of elastic part IDs

- `int` getShaftIdByName([in] BSTR p_name);
Get ID for first shaft with given name. Returns zero if not found.
- `int` getForceIdByName([in] BSTR p_name);
Get ID for first force with given name. Returns zero if not found.
- `int` getSupportIdByName([in] BSTR p_name);
Get ID for first support with given name. Returns zero if not found.
- `int` getSectionIdByName([in] BSTR p_name);
Get ID for first section with given name. Returns zero if not found.
- `int` getBearingIdByName([in] BSTR p_name);
Get ID for first bearing with given name. Returns zero if not found.
- `int` getBallScrewIdByName([in] BSTR p_name);
Get ID for first ballscrew with given name. Returns zero if not found.
- `int` getElasticPartIdByName([in] BSTR p_name);
Get ID for first elastic part with given name. Returns zero if not found.
- BSTR getName([in] int p_id);
Get element name for ID
- VARIANT getIDVar([in] int p_id, [in] BSTR p_name);
Get variable for element with given ID
- VARIANT_BOOL setIDVar([in] int p_id, [in] BSTR p_name, [in] VARIANT p_value);
Set variable for element with given ID
- VARIANT_BOOL resizeIDArray([in] int p_id, [in] BSTR p_name, [in] int p_count);
Resize array variable for element with given ID
- MesysRBC* getBearingModule([in] int p_id);
Get bearing calculation for given ID as copy
- VARIANT_BOOL setBearingModule([in] int p_id, [in] MesysRBC* p1);
Set bearing calculation for given ID
- MesysBALLSCREW* getBallScrewModule([in] int p_id);
Get ballscrew calculation for given ID as copy
- VARIANT_BOOL setBallScrewModule([in] int p_id, [in] MesysBALLSCREW* p1);
Set ballscrew calculation for given ID
- double getForceValue([in] int p_id, [in] BSTR p_name);
Get parameters for force elements like 'x', 'b', 'Fx', 'Fy', 'Fz', 'Mx', 'My', 'Mz'
- VARIANT_BOOL setForceValue([in] int p_id, [in] BSTR p_name, [in] double p_value);
Set parameters for force elements like 'x', 'b', 'Fx', 'Fy', 'Fz', 'Mx', 'My', 'Mz'

1.10.2.3 Zusätzliche Methoden für die Wälzlagerberechnung

Weitere Methoden für die Berechnung von Lagern sind:

- VARIANT_BOOL calculateBearing([in] VARIANT_BOOL p_enterFx, [in] double p_Fx_or_Ux, [in] VARIANT_BOOL p_enterFy, [in] double p_Fy_or_Uy, [in] VARIANT_BOOL p_enterFz, [in] double p_Fz_or_Uz, [in] VARIANT_BOOL p_enterMy, [in] double p_My_or_Ry, [in] VARIANT_BOOL p_enterMz, [in] double p_Mz_or_Rz, [in] double p_ni, [in] double p_ne, [in] double p_Ti, [in] double p_Te);
Run bearing calculation with given loading.
- VARIANT_BOOL setupLoadSpectrum([in] int p_count, [in] VARIANT_BOOL p_enterFx, [in] VARIANT_BOOL p_enterFy, [in] VARIANT_BOOL p_enterFz, [in] VARIANT_BOOL p_enterMy, [in] VARIANT_BOOL p_enterMz);
Setup load spectrum definition.
- VARIANT_BOOL setLoadSpectrumLoad([in] int p_loadCase, [in] double p_frequency, [in] double p_Fx_or_Ux, [in] double p_Fy_or_Uy, [in] double p_Fz_or_Uz, [in] double p_My_or_Ry, [in] double p_Mz_or_Rz,

- ```
[in] double p_ni, [in] double p_ne, [in] double p_Ti, [in] double
p_Te, [in] double p_TOil);
Set load spectrum load for each load case
```
- VARIANT\_BOOL selectBearingFromDatabase([in] BSTR p\_manufacturer, [in] BSTR p\_bearingName);  
Selects a bearing based on name and manufacturer from the database
  - VARIANT\_BOOL getStiffnessMatrix([in,out] double \*p\_c11, [in,out] double \*p\_c12, [in,out] double \*p\_c13, [in,out] double \*p\_c14, [in,out] double \*p\_c15, [in,out] double \*p\_c21, [in,out] double \*p\_c22, [in,out] double \*p\_c23, [in,out] double \*p\_c24, [in,out] double \*p\_c25, [in,out] double \*p\_c31, [in,out] double \*p\_c32, [in,out] double \*p\_c33, [in,out] double \*p\_c34, [in,out] double \*p\_c35, [in,out] double \*p\_c41, [in,out] double \*p\_c42, [in,out] double \*p\_c43, [in,out] double \*p\_c44, [in,out] double \*p\_c45, [in,out] double \*p\_c51, [in,out] double \*p\_c52, [in,out] double \*p\_c53, [in,out] double \*p\_c54, [in,out] double \*p\_c55);  
Reads back the bearing stiffness matrix with units N, Nm, mm, rad. The order of rows and columns is like in the report ux, uy, uz, ry, rz.
  - SAFEARRAY(VARIANT) getStiffnessMatrixAsVector();  
Reads back the bearing stiffness matrix as vector with units N, Nm, mm, rad. The order of the elements is per row.
  - SAFEARRAY(VARIANT) getRollingElementResults([in] int p\_loadCase, [in] int p\_bearing, [in] int p\_row, [in] int p\_rollingElement, [in] int p\_section);  
Returns results for single rolling elements. The parameter 'section' is only used for roller bearings, for section=-1 the forces acting on the roller are returned. The parameter 'loadCase' is only used if a load spectrum is defined.

#### 1.10.2.4 Zusätzliche Methoden zur Berechnung für Kugelgewindetriebe

Weitere Methoden für die Berechnung für Kugelgewindetriebe sind:

- VARIANT\_BOOL calculateBallScrew([in] VARIANT\_BOOL p\_enterFx, [in] double p\_Fx\_or\_Ux, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterFy, [in] double p\_Fy\_or\_Uy, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterFz, [in] double p\_Fz\_or\_Uz, [in] double p\_Rx, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterMy, [in] double p\_My\_or\_Ry, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterMz, [in] double p\_Mz\_or\_Rz, [in] double p\_ni, [in] double p\_ne, [in] double p\_Ti, [in] double p\_Te);  
Run ball screw calculation with given loading
- VARIANT\_BOOL setupLoadSpectrum([in] int p\_count, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterFx, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterFy, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterFz, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterMy, [in] VARIANT\_BOOL p\_enterMz);  
Setup load spectrum definition
- VARIANT\_BOOL setLoadSpectrumLoad([in] int p\_loadCase, [in] double p\_frequency, [in] double p\_Fx\_or\_Ux, [in] double p\_Fy\_or\_Uy, [in] double p\_Fz\_or\_Uz, [in] double p\_Rx, [in] double p\_My\_or\_Ry, [in] double p\_Mz\_or\_Rz, [in] double p\_ni, [in] double p\_ne, [in] double p\_Ti, [in] double p\_Te);  
Sets load spectrum load for each load case
- VARIANT\_BOOL getStiffnessMatrix([in,out] double \*p\_c11, [in,out] double \*p\_c12, [in,out] double \*p\_c13, [in,out] double \*p\_c14, [in,out] double \*p\_c15, [in,out] double \*p\_c21, [in,out] double \*p\_c22, [in,out] double \*p\_c23, [in,out] double \*p\_c24, [in,out] double \*p\_c25, [in,out] double \*p\_c31, [in,out] double \*p\_c32, [in,out] double \*p\_c33, [in,out] double \*p\_c34, [in,out] double \*p\_c35, [in,out] double \*p\_c41, [in,out] double \*p\_c42, [in,out] double \*p\_c43, [in,out] double \*p\_c44, [in,out] double \*p\_c45, [in,out] double \*p\_c51, [in,out] double \*p\_c52, [in,out] double \*p\_c53, [in,out] double \*p\_c54, [in,out] double \*p\_c55);

- Reads back the stiffness matrix with units N, Nm, mm, rad. The order of rows and columns is like in the report ux, uy, uz, ry, rz.
- SAFEARRAY(VARIANT) getStiffnessMatrixAsVector();  
Reads back the bearing stiffness matrix as vector with units N, Nm, mm, rad. The order of the elements is per row.
  - SAFEARRAY(VARIANT) getRollingElementResults([in] int p\_loadCase, [in] int p\_bearing, [in] int p\_thread, [in] int p\_rollingElement);  
Returns results for single rolling elements. The parameter 'loadCase' is only used if a load spectrum is defined and should be set to zero otherwise.

### 1.10.3 Verwendung des COM-Servers

Der COM-Server kann verwendet werden, um Funktionen innerhalb der MESYS-Software aus anderen Programmen heraus aufzurufen.

Ein einfaches Beispiel in einer VisualBasic-Funktion:

```
Public Sub test()
Dim mesys As MesysCOM
Set mesys = New MesysCOM
Dim rbc As MesysRBC

Set rbc = mesys.createRBC
Dim d As Long
Dim pmax As Double

Call rbc.setVarInt("inputType", 2)
Call rbc.setVarInt("Z", 12)
Call rbc.setVarDouble("Dw", 5)
Call rbc.setVarDouble("Dpw", 50)
Call rbc.setVarDouble("Fy", 1000)
Call rbc.setVarDouble("ni", 500)

result = rbc.Calculate
Call rbc.showReport("c:/temp/report.pdf")
Call rbc.getVarDouble("pmax", pmax)
Call rbc.getVarInt("Z", d)
Call rbc.calculateBearing(True, 0, True, 1000, True, 0, False, 0, False, 0, 500, 0, 20, 20)
Call rbc.getVarDouble("pmax", pmax)
Set rbc = Nothing
Set mesys = Nothing

End Sub
```

And here the same example in Python using the members with variants as [in, out] parameters do not work from python:

Und hier das gleiche Beispiel in Python mit den Funktionen mit VARIANTS da die [in, out] Parameter in Python nicht funktionieren:

```
import comtypes.client

mesys = comtypes.client.CreateObject("MesysCOM64.MesysCOM")
rbc = mesys.createRBC()
rbc.setVar("inputType", 2)
rbc.setVar("Z", 12)
rbc.setVar("Dw", 5)
rbc.setVar("Dpw", 50)
rbc.setVar("Fy", 1000)
rbc.setVar("ni", 500)
rbc.calculate()
rbc.showReport("c:/temp/report.pdf")
pmax = rbc.getVar("pmax")
z = rbc.getVar("Z")
rbc.calculateBearing(True, 0, True, 1000, True, 0, False, 0, False, 0, 500, 0, 20, 20)
pmax2 = rbc.getVar("pmax")
stiffness = rbc.getStiffnessMatrixAsVector();
rbc = None
mesys = None
```

## 1.11 Tools

Im Menü "Extras"->"Tools" sind einige zusätzliche Berechnungswerkzeuge verfügbar.

### 1.11.1 Presssitz

Dieses Tool ermöglicht die Berechnung von mehrlagigen Presssitzen unter Berücksichtigung von Wärmedehnung und Fliehkräften.

Calculate interference fit ✖

Inner diameter d  mm Number of layers

Internal pressure pi  MPa External pressure pe  MPa

Rotation speed n  rpm Width b  mm

|                                                           | 1         | 2       |
|-----------------------------------------------------------|-----------|---------|
| Diameter D [mm]                                           | 50        | 70      |
| Interference lw [ $\mu\text{m}$ ]                         | 5         | 0       |
| Temperature T [ $^{\circ}\text{C}$ ]                      | 20        | 20      |
| Youngs modulus E [MPa]                                    | 207000    | 207000  |
| Poisson number $\nu$ [-]                                  | 0.3       | 0.3     |
| Density rho [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]                    | 7850      | 7850    |
| Thermal elongation coeff. $\alpha$ [ $10^{-6}/\text{K}$ ] | 11.5      | 11.5    |
| Friction coefficient $\mu$                                | 0.1       | 0.1     |
| Inner diameter change $\Delta d$ [ $\mu\text{m}$ ]        | 0         | 4.14279 |
| Outer diameter change $\Delta D$ [ $\mu\text{m}$ ]        | -0.857214 | 3.57137 |
| Radial stress at inner diameter $\sigma_{ri}$ [MPa]       |           | -5.0693 |
| Radial stress at outer diameter $\sigma_{re}$ [MPa]       | -5.0693   | 0       |
| Tangential stress at inner diameter $\sigma_{ti}$ [MPa]   |           | 15.6303 |
| Tangential stress at outer diameter $\sigma_{te}$ [MPa]   | -5.0693   | 10.561  |
| Maximal axial force Fmax [N]                              | 0         |         |
| Maximal torque Tmax [Nm]                                  | 0         |         |

Der Innendurchmesser für den inneren Abschnitt kann oben im Fenster definiert werden, jeder Abschnitt hat dann nur noch den Außendurchmesser als Eingabe. Außerdem kann ein Innendruck für die innere Schicht und ein Außendruck für die

äußere Schicht definiert werden. Das Übermaß ist eine zusätzliche Eingabe für jeden Abschnitt und wird nicht durch die Durchmesser bestimmt.

Wird ein Reibwert und eine Breite definiert, so werden in den letzten beiden Zeilen eine maximal zulässige Axialkraft und ein maximal zulässiges Drehmoment angezeigt.

# MESYS Wellenberechnung

## 2 MESYS Wellenberechnung

Die Wellenberechnung (Version 06/2024) berechnet die Verformungen, Schnittgrößen und die Eigenfrequenzen von mehreren durch Randbedingungen verbundenen Wellen. Die folgenden Funktionen werden unterstützt:

- Definition von mehreren coaxialen Wellen ist möglich
- Definition von parallelen Wellen (mit Erweiterung für Wellensysteme)
- Definition von Wellen in beliebiger Richtung (mit Erweiterung für erweiterte Wellensysteme)
- Die Geometrie der Wellen wird durch zylindrische und konische Elemente definiert
- Innen- und Aussengeometrie können unabhängig voneinander definiert werden
- Schubverformungen können optional berücksichtigt werden
- Ein nichtlineares Wellenmodell kann optional verwendet werden
- Das Gewicht der Welle kann optional berücksichtigt werden
- Auf jeder Welle kann eine beliebige Anzahl von Lasten entweder als Punkt- oder Linienlasten definiert werden. Lasten (ohne Massen) können auch außerhalb der Geometrie der Welle definiert werden. Verfügbare Belastungselemente sind:
  - Kraftelement mit je drei Komponenten für Kraft und Moment
  - Exzentrisches Kraftelement mit drei Kraftkomponenten in Polarkoordinaten
  - Stirnrad-Element mit Zahnradaten und Drehmoment als Eingabe
  - Kegelrad/Hypoidrad-Element mit Zahnradaten und Drehmoment als Eingabe
  - Schneckenrad-Element mit Zahnradaten und Drehmoment als Eingabe
  - Kupplungs-Element für die Eingabe eines Drehmoments
  - Riemenscheiben-Element für Drehmoment und Vorspannung
  - Masse zur Eingabe von Gewicht und Trägheit für Eigenfrequenzen
  - Unwucht und Dynamische Kraft als periodische Lasten für Harmonische Antwort



- Eine Beschleunigung kann für das System definiert werden und wird als Trägheitskraft berücksichtigt
- Eine beliebige Anzahl von Randbedingungen können entweder zwischen einer Welle und einem starren Gehäuse oder zwischen zwei coaxialen Wellen definiert werden.
- Mehrere Gehäuse-Steifigkeitsmatrizen können entweder mit drei oder sechs Freiheitsgraden pro Knoten berücksichtigt werden
- Geometrie der Welle importieren als 2D DXF oder 3D STEP Datei
- Festigkeitsberechnung nach DIN 743 (mit Erweiterung für Wellenfestigkeit)
- Verbindungen durch Stirnradpaare (mit Erweiterung für Wellensysteme)
- Verbindungen durch Kegelradpaare (mit Erweiterung für erweiterte Wellensysteme)
- Verbindungen durch Schnecken-Schneckenräder (mit Erweiterung für erweiterte Wellensysteme)
- Planetenstufen (mit Erweiterung für erweiterte Wellensysteme)
- Fliehkräfte werden bei Planetenwellen berücksichtigt
- Berechnung der Drehzahlen von Wellen unter Berücksichtigung gegebener Bedingungen (mit Erweiterung für Wellensysteme)
- Datenaustausch mit mehreren Programmen zur Berechnung von Zahnrädern (mit Erweiterung für Wellensysteme)
- Nichtlineare Wälzlagersteifigkeit kann berücksichtigt werden
- Lager können aus einer Datenbank gewählt werden
- [MESYS Wälzlagerberechnung](#)<sup>166</sup> ist vollständig in die Wellenberechnung integriert
- [MESYS Kugelgewindetriebe](#)<sup>266</sup> ist vollständig in die Wellenberechnung integriert
- [MESYS Stirnradpaarberechnung](#)<sup>324</sup> ist vollständig in die Berechnung der Welle integriert
- Berechnung mit Lastkollektiven

- Eigenfrequenzen werden unter Berücksichtigung der Torsions-, Biege- und Axialmoden berechnet (mit Erweiterung für die Modalanalyse)
- Campbell Diagramm (mit Erweiterung für die Modalanalyse)
- Harmonische Antwort auf periodische Kräfte (mit Erweiterung für die Modalanalyse)
- Frequenzgang über einen gegebenen Bereich (mit Erweiterung für die Modalanalyse)
- Thermische Ausdehnungen, optional mit variierender Temperatur an einer Welle
- Parametervariationen
- 3D-achsensymmetrische elastische Bauteile, die von 3D FEA berücksichtigt werden (mit Erweiterung für 3D-elastische Bauteile)
- 3D-elastische Planetenträger über Parameter definiert oder als STEP-Datei importiert (mit Erweiterung für 3D-elastische Bauteile)
- Import von Gehäusen als STEP-Datei und Berücksichtigung als Steifigkeitsmatrix und optional durch modale Reduktion (mit Erweiterung für 3D-elastische Bauteile)
- Berücksichtigung der elastischen Verformung der Lagerringe (mit Erweiterung für 3D-elastische Bauteile und Vollversion der Wälzlagerberechnung)
- Berücksichtigung der Verformung von Zahnrädern (mit Erweiterung für 3D-elastische Bauteile und Wellensysteme)

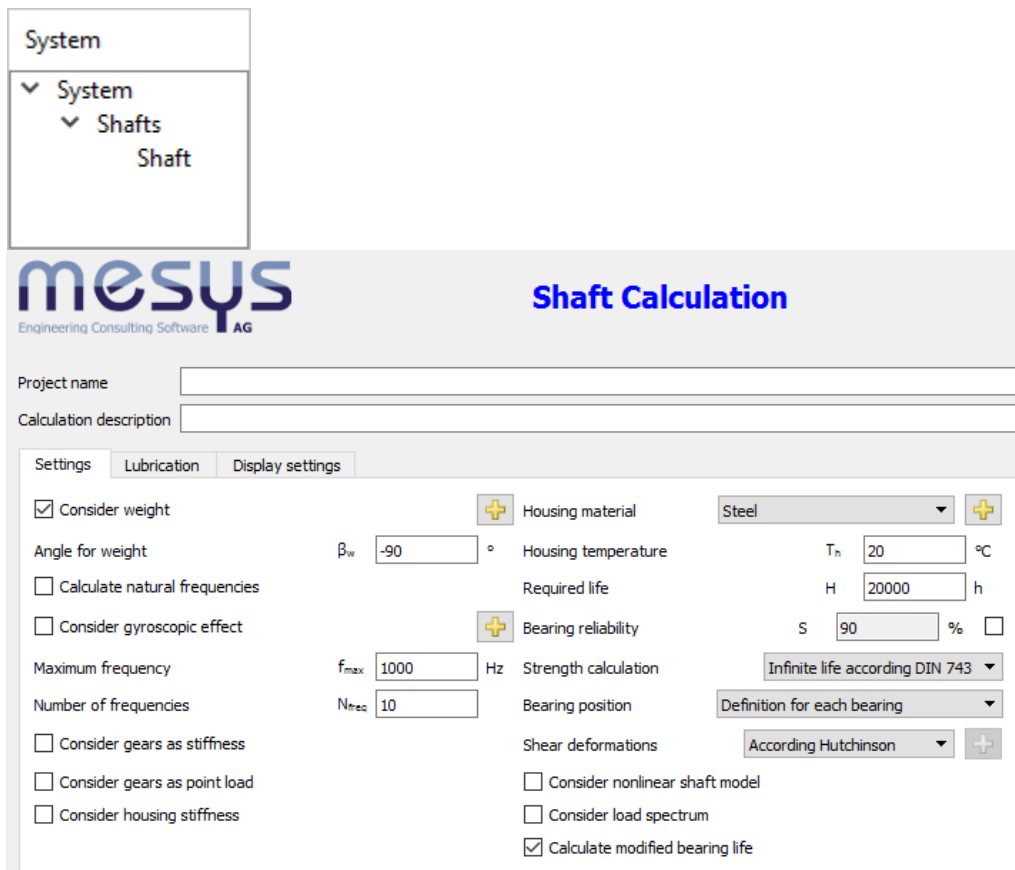
## 2.1 Eingabeparameter

---

Die Eingabeparameter werden auf mehreren Seiten dargestellt, die in einem Systembaum ausgewählt werden können.

### 2.1.1 System Eingaben

Wenn das Element 'System' im Systembaum links ausgewählt ist, können einige allgemeine Daten definiert werden.



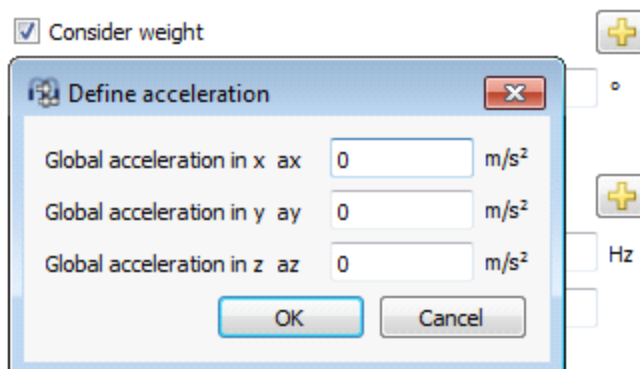
### 2.1.1.1 Projektname und Beschreibung der Berechnung


Der Projektname und die Beschreibung der Berechnung sind lediglich Eingaben, die im Protokollkopf angezeigt werden. Sie können verwendet werden, um Informationen über den Zweck der Berechnung zur Dokumentation einzugeben.

### 2.1.1.2 Einstellungen

#### 2.1.1.2.1 Gewicht und Beschleunigungen berücksichtigen

Das Gewicht der Wellen und Zusatzmassen wird bei der Berechnung berücksichtigt, wenn diese Option gesetzt ist.

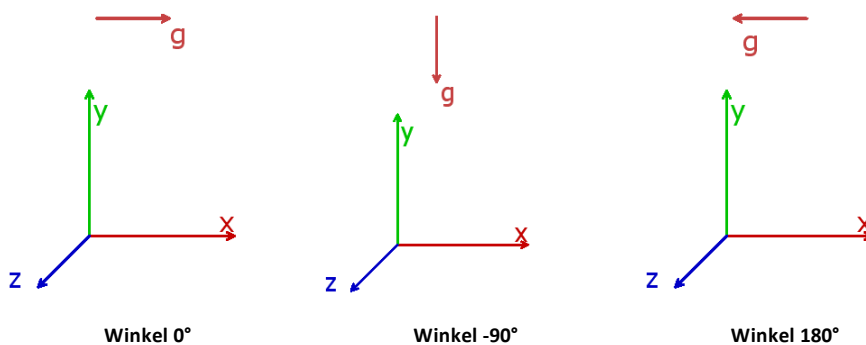


Die -Schaltfläche neben dem Kontrollkästchen Gewicht ermöglicht die Definition von globalen Beschleunigungen für die drei Achsen. Die Beschleunigungen stehen auch bei der Definition eines Lastkollektivs zur Verfügung.

Das Gewicht wird bereits durch Setzen des Flags "Gewicht berücksichtigen" berücksichtigt. Es muss nicht als Beschleunigung eingegeben werden. Die Eingabe von Beschleunigungen ist für zusätzliche Beschleunigungen wie bei Getrieben in Fahrzeugen gedacht.

#### 2.1.1.2.2 Winkel für Gewichtskraft

Mit dieser Einstellung kann die Richtung der Gewichtskraft festgelegt werden. Der Winkel liegt in der x-y-Ebene und ist eine Rotation um die z-Achse. Ein Wert von Null ergibt ein Gewicht in Richtung der Achse der Welle. Die Richtung des Gewichts wird auch in der Grafik der Welle als Pfeil dargestellt und kann innerhalb des Lastkollektivs variiert werden.



#### 2.1.1.2.3 Eigenfrequenzen berechnen

Die Berechnung der Eigenfrequenzen kann hier aktiviert werden. Die Durchführung einer Berechnung ist schneller, wenn keine Eigenfrequenzen berechnet werden. Ist ein Lastkollektiv aktiv, werden die Eigenfrequenzen nur für das ausgewählte Ergebniselement berechnet.

Die Berechnung der Eigenfrequenzen muss auch aktiviert werden, wenn eine Harmonische Antwort auf dynamische Lasten berechnet werden soll.

#### 2.1.1.2.4 Kreiseffekt berücksichtigen

Ist diese Einstellung aktiviert, wird bei der Berechnung der Eigenfrequenzen eine gyroskopische Matrix berücksichtigt. Für diese gyroskopische Matrix werden das Massenträgheitsmoment um die x-Achse und die Drehzahl der Welle benötigt.

Campbell diagram options

Start factor for speed: 0

End factor for speed: 5

Factor for frequency range: 1

Number of speeds: 15

Number of harmonics: 1

Maximum number of threads: 0

Accuracy for critical frequency: 0.02 Hz

Increase accuracy for mode changes

Calculate critical frequencies

Consider gear frequencies

Simplified method for harmonic response

Coefficient for global Rayleigh damping  $\alpha$ : 0 rad/s

Coefficient for global Rayleigh damping  $\beta$ : 0 s

OK Cancel

Die -Schaltfläche ermöglicht zusätzliche Eingaben für das Campbell Diagramm:

- Das Diagramm wird für Drehzahlen zwischen Start- und Endfaktor mal dem aktuellen Eingabewert für die Drehzahl erstellt.
- Der Faktor für den Frequenzbereich bestimmt die Länge der Ordinate des Campbell-Diagramms. Bei einem grösseren Faktor werden höhere Frequenzen für einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich berechnet.
- Die Anzahl der Drehzahlen ist die Anzahl der Berechnungspunkte. Verringern Sie sie für eine schnellere Berechnung. Bei der Harmonischen Antwort über Drehzahl führt ein größerer Wert zu glatteren Kurven.
- Die Anzahl Harmonische zeigt zusätzliche Linien für Vielfache der Wellendrehzahl an.
- Das Campbell Diagramm wird standardmäßig parallel berechnet. Die Maximale Anzahl Threads kann verwendet werden, um die Anzahl der verwendeten Threads zu begrenzen. Dies kann sinnvoll sein, wenn der Systemspeicher für mehrere parallele Berechnungen großer Systeme nicht ausreicht.
- Die Genauigkeit für kritische Frequenzen ist eine Toleranz für die Berechnung von kritischen Drehzahlen als Schnittpunkt von Wellendrehzahl und Eigenfrequenz.

- Wenn 'Genauigkeit für Typänderungen der Eigenform erhöhen' ausgewählt ist, werden zusätzliche Punkte berechnet, wenn z.B. eine Axialform in eine Radialform übergeht.
- Wenn 'Kritische Frequenzen berechnen' ausgewählt ist, werden die kritischen Frequenzen berechnet, wenn das Campbell Diagramm angezeigt wird. Andernfalls werden sie nur für das Protokoll der kritischen Drehzahlen berechnet. Das Diagramm Harmonische Antwort über Drehzahl wird genauer, wenn diese Option eingestellt ist, da zusätzliche Berechnungspunkte bei den kritischen Drehzahlen berücksichtigt werden.
- Wenn 'Zahneingriffsfrequenzen berücksichtigen' gewählt wird, werden zusätzliche Zeilen für die Zahnradfrequenzen angezeigt und die entsprechenden kritischen Frequenzen berechnet.
- Wenn die Vereinfachte Methode für harmonische Antwort aktiviert ist, wird die Harmonische Antwort als Überlagerung von Eigenformen berechnet. Die Genauigkeit der Lösungen hängt in diesem Fall von der berechneten Anzahl der Eigenformen ab. Bei großen Systemen kann die Berechnung schneller sein, wenn die Option aktiviert ist. Das Ergebnis ist genauer, wenn die Option nicht aktiviert ist.
- Die Faktoren für globale Rayleigh-Dämpfung werden verwendet, um eine globale Dämpfungsmatrix als  $D=a*M+b*K$  unter Verwendung der globalen Massenmatrix M und der globalen Steifigkeitsmatrix K zu definieren. Mit Hilfe der Auslegungsschaltfläche können die Werte so berechnet werden, dass sich für zwei vorgegebene Frequenzen ein benutzerdefiniertes Dämpfungsverhältnis ergibt.

#### 2.1.1.2.5 Maximale Frequenz

Hier kann der Maximalwert für interessierende Eigenfrequenzen eingegeben werden. Wird diese maximale Frequenz zu klein gewählt, werden in manchen Fällen keine Resultate für Eigenfrequenzen angezeigt.

#### 2.1.1.2.6 Anzahl Eigenfrequenzen

Hier kann die Anzahl der Eigenfrequenzen angegeben werden, die berechnet werden sollen. Normalerweise sind nur die ersten paar Moden von Interesse. Beide Grenzen, die Anzahl der Frequenzen und das Maximum, werden berücksichtigt. Wenn das Campbell Diagramm zu wenig Linien zeigt, sind diese Einschränkungen oft der Grund.

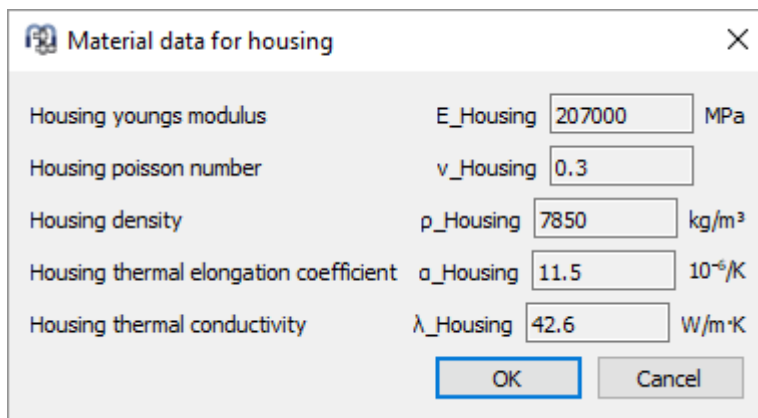
#### 2.1.1.2.7 Berücksichtigung dynamischer Lasten im statischen Gleichgewicht

Wenn diese Option gesetzt ist, werden dynamische Kräfte und Unwucht im statischen Gleichgewicht berücksichtigt. Diese Näherung ist ausreichend, wenn die

Drehzahl der Welle deutlich unter der kritischen Drehzahl liegt. Der Wert der Kraft wird für die Zeit Null genommen, so dass die Richtung einer Unwucht in Richtung der eingegebenen Phase liegt.

#### 2.1.1.2.8 Werkstoff Gehäuse und Gehäusetemperatur

Die Werkstoffdaten des Gehäuses werden zusammen mit der Gehäusetemperatur zur Berechnung der Axialverschiebung für die mit dem Gehäuse verbundenen Randbedingungen verwendet. Für die Wellenberechnung ist nur der thermische Ausdehnungskoeffizient wichtig, die anderen Daten werden nur zur Übergabe an die Wälzlagerberechnung verwendet.



| Property                               | Variable  | Value  | Unit                |
|----------------------------------------|-----------|--------|---------------------|
| Housing young's modulus                | E_Housing | 207000 | MPa                 |
| Housing poisson number                 | v_Housing | 0.3    |                     |
| Housing density                        | ρ_Housing | 7850   | kg/m³               |
| Housing thermal elongation coefficient | α_Housing | 11.5   | 10 <sup>-6</sup> /K |
| Housing thermal conductivity           | λ_Housing | 42.6   | W/m·K               |

#### 2.1.1.2.9 Notwendige Lebensdauer

Die Notwendige Lebensdauer wird an Berechnungen von Zahnrädern weitergegeben, die mit dem System verbunden sind, und wird für die Festigkeitsberechnung der Welle verwendet.

#### 2.1.1.2.10 Zuverlässigkeit Wälzlager

Die Zuverlässigkeit der Lager kann optional auf Systemebene definiert werden und wird dann an alle Berechnungen der Lager übergeben.

#### 2.1.1.2.11 Festigkeitsberechnung

Die Methode für Festigkeitsberechnung der Welle kann ausgewählt werden. Derzeit ist nur [DIN 743 \(2012\)](#)<sup>350</sup> verfügbar. Es kann ausgewählt werden, ob die Berechnung unter Berücksichtigung der unendlichen oder endlichen Lebensdauer erfolgen soll. Bei endlicher Lebensdauer wird die Anzahl der Zyklen über die Eingabe für "Notwendige Lebensdauer" berechnet.

#### 2.1.1.2.12 Wälzlagerposition

Die Position für den ersten Wälzkörper von Wälzlagern kann mit diesen Einstellungen global festgelegt werden. Siehe [Position für ersten Wälzkörper](#)<sup>173</sup>.

Bei Lagern mit Spiel und sehr kleinen Lasten kann es vorkommen, dass nur ein Wälzkörper belastet wird. Dies kann zu Konvergenzproblemen führen, da die Steifigkeit normal zur Belastung null ist. Dann kann die Einstellung "Lastrichtung zwischen Wälzkörpern" hilfreich sein. Ansonsten führt die Einstellung "Erster Wälzkörper in Lastrichtung" in den meisten Fällen zur maximalen Kontaktspannung und zur minimalen Lebensdauer des Lagers. In der Regel macht sich dies nur bei Lagern mit einer geringen Anzahl von Wälzkörpern bemerkbar.

### 2.1.1.2.13 Schubverformungen

Schubverformungen sollten normalerweise berücksichtigt werden, da es diese Verformungen gibt. Zum Vergleich mit anderen Berechnungen können die Schubverformungen vernachlässigt werden. Bei nichtlinearen Wellenmodellen sollten die Schubverformungen berücksichtigt werden, um die Konvergenz zu verbessern.

Es sind verschiedene Optionen verfügbar. Entweder kann ein fester Wert eingegeben werden. Bei Zylindern wird in der Regel 1/1,1 verwendet. Die Optionen 'nach Cowper' und 'nach Hutchinson' berücksichtigen auch einen Innendurchmesser für Hohlwellen und die Querkontraktionszahl des Werkstoffs. Nach [Hutchinson](#)<sup>[353]</sup> werden in seiner Formel Terme höherer Ordnung berücksichtigt als nach [Cowper](#)<sup>[353]</sup>:

- Hutchinson (Kreisförmige Querschnittsfläche):

$$k = \frac{6(1 + \nu)^2}{7 + 12\nu + 4\nu^2}$$

- Hutchinson (hohler kreisförmiger Querschnitt):

$$k = \frac{6(a^2 + b^2)^2(1 + \nu)^2}{7a^4 + 34a^2b^2 + 7b^4 + \nu(12a^4 + 48a^2b^2 + 12b^4) + \nu^2(4a^4 + 16a^2b^2 + 4b^4)}$$

wobei 'b' der äußere Radius, 'a' der innere Radius und 'v' die Poissonsche Übersetzung ist.

- Cowper (kreisförmige Querschnittsfläche):

$$k = \frac{6(1 + \nu)}{7 + 6\nu}$$

- Cowper (hohler kreisförmiger Querschnitt):

$$k = \frac{6(1 + \nu)(1 + m^2)^2}{(7 + 6\nu)(1 + m^2)^2 + (20 + 12\nu)m^2}$$

wobei  $m = b/a$  das Verhältnis von innerem zu äußerem Radius und 'v' die Poissonzahl ist.



#### 2.1.1.2.14 Nichtlineares Wellenmodell verwenden

Es kann ein nichtlineares Modell der Welle berücksichtigt werden. Das nichtlineare Modell berechnet das Gleichgewicht der Lasten im verformten Zustand.

Ein auf einer Seite fester Balken, der auf der anderen Seite radial belastet wird, weist im linearen Modell nur radiale Verformungen auf. Beim nichtlinearen Modell verschiebt sich der Endpunkt auch in axialer Richtung, und die Länge des Trägers nimmt nicht zu. Ein beidseitig fester Balken weist eine erhöhte Steifigkeit gegen die Belastung in der Mitte auf, die Steifigkeit nimmt mit der Belastung aufgrund der erzeugten Axialkräfte zu. Das nichtlineare Modell wird nur bei großen Verformungen benötigt; normale Wellen im Maschinenbau erfordern kein nichtlineares Modell.

#### 2.1.1.2.15 Lastkollektiv berücksichtigen

Wenn ein Lastkollektiv berücksichtigt werden soll, wählen Sie diese Option. Ein zusätzlicher Eintrag für das Lastkollektiv wird in der Baumstruktur links angezeigt. Siehe [Berechnung mit Lastkollektiv](#) <sup>119</sup> für die Definition des Lastkollektivs.

#### 2.1.1.2.16 Zahnräder als Steifigkeit berücksichtigen

Standardmäßig wird ein Zahnrad nur als Krafterelement betrachtet, das weder Masse noch Steifigkeit zu den Wellen hinzufügt.

Optional kann der Zahnradkörper als Masse und Steifigkeit berücksichtigt werden. Verfügbare Optionen sind:

- "Vergrößerung des Wellendurchmesser ": Wenn diese Option gewählt wird, wird der Wellendurchmesser automatisch auf den Fusskreisdurchmesser plus  $0.4 \cdot \text{Modul}$  erhöht. Für den Fusskreisdurchmesser wird eine Fusshöhe des Bezugsprofils von 1.25 angenommen. Die Welle wird mit dieser Option zu steif, da sie sich nicht innerhalb des Zahnradkörpers verformen kann.
- "3D-Modell mit Zentralknoten": Für den Getriebekörper wird ein 3D-FEA-Modell verwendet, mit der Einschränkung, dass der innere und der äußere Zylinder zylindrisch bleiben. Die Torsions- und Biegeverformungen am Innen- und Aussendurchmesser können aufgrund des 3D-Modells unterschiedlich sein. Der Aussendurchmesser des 3D-Modells wird auf den Fußdurchmesser plus  $0.4 \cdot \text{Modul}$  gesetzt. Es werden die gleichen Materialeigenschaften wie für die Welle verwendet.
- "3D-Modell": Für den Zahnradkörper wird ein 3D-FEA-Modell verwendet, als ob ein 3D-elastisches Bauteil als elastisches Zahnrad verwendet wird. Die Lizenz für 3D-elastische Teile ist erforderlich. Die Torsions- und Biegeverformungen am Innen- und Außendurchmesser können aufgrund des 3D-Modells unterschiedlich sein. Der Aussendurchmesser des 3D-Modells wird auf den Fusskreisdurchmesser

plus  $0.4 \cdot \text{Modul}$  gesetzt. Es werden die gleichen Materialeigenschaften wie für die Welle verwendet.

- "3D-Modell mit Zähnen": Ein 3D-FEA-Modell wird für den Zahnradkörper verwendet, als ob ein 3D-elastisches Teil als elastisches Zahnrad verwendet wird und die Zähne werden zum 3D-Modell hinzugefügt. Die Lizenz für 3D-elastische Teile ist erforderlich. Die Torsions- und Biegeverformungen am Innen- und Außendurchmesser können aufgrund des 3D-Modells unterschiedlich sein. Diese Option erfordert einen deutlich höheren anfänglichen Berechnungsaufwand und muss bei jeder Änderung der Zahnradaten aktualisiert werden. Daher sollte sie erst in der Endphase der Konstruktion aktiviert werden. Es werden die gleichen Materialeigenschaften wie für die Welle verwendet.

#### 2.1.1.2.17 Zahnräder werden als Punktlast berücksichtigt

Ist diese Option gewählt, wird die Last aus dem Zahneingriff in eine Punktlast umgewandelt. Dies ist nützlich für die Berechnung von Lagerlasten, wenn der Anwender perfekt zentrierte Zahnradlasten berücksichtigen möchte, d.h. keine Fluchtungsfehler im Zahneingriff.

#### 2.1.1.2.18 Erweiterte Lebensdauer für Wälzlager berechnen

Diese Einstellung wird an die Lagerberechnung weitergegeben und aktiviert oder unterdrückt die Ausgabe der Erweiterten Lebensdauer für Wälzlager in den Resultaten. Sie kann deaktiviert werden, wenn keine Informationen über die Schmierung vorhanden sind.

#### 2.1.1.2.19 Konfigurationen berücksichtigen

Wenn mehrere Gruppen verwendet werden, wird eine zusätzliche Option angezeigt, um Konfigurationen zu aktivieren. Über die neue Eingabeseite für Konfigurationen kann der Status von Verbindungen geändert werden, um verschiedene Optionen für den Leistungsfluss zu ermöglichen. Siehe [Konfigurationen](#) <sup>121</sup> zur Verwendung.

#### 2.1.1.2.20 Gehäusesteifigkeit berücksichtigen

Wenn diese Option gesetzt ist, wird im Systembaum eine zusätzliche Seite zur Definition einer Gehäuse-Steifigkeitsmatrix angezeigt. Siehe [Gehäuse Steifigkeitsmatrix](#) <sup>122</sup> für Details zur Verwendung.

Eine Gehäusesteifigkeit kann auch berücksichtigt werden, indem ein [3D-elastisches Bauteil als Gehäuse](#) <sup>131</sup> verwendet wird; dies ist einfacher zu handhaben als eine globale Steifigkeitsmatrix.

### 2.1.1.3 Schmierung

Die Daten für die Schmierung sind nur zur Übergabe an die Berechnungen für Lager oder Zahnräder gedacht. Details zu den Eingaben entnehmen Sie bitte der Dokumentation der Wälzlagerberechnung. Die 'FZG Laststufe' ist eine zusätzliche Eingabe, die an eine Zahnrad-Berechnung weitergegeben wird.

### 2.1.1.4 Einstellungen für Darstellung

Auf der Registerkarte 'Einstellungen' können verschiedene Ansichtsoptionen eingestellt werden.

Schnittdarstellung in 3D: Es besteht die Möglichkeit, eine Schnittdarstellung für alle vorhandenen Wellen zu erzeugen. Bei Bedarf kann die Schnittdarstellung auch nur für die Hohlwellen angewendet werden. Diese Einstellung kann für einzelne Wellen überschrieben werden.

Bei den Einstellungen für die 3D-Animation sind sowohl die Frequenz für die Formen als auch die Drehzahl für die Rotation einstellbar. Die Standard Frequenz von 0.2Hz für die obige Form führt zu einer Steigung von 5 Sekunden in der Animation. Die 3D-Druckverteilung der Lager kann mit einem Skalierungsfaktor 'Sp' leicht übertrieben werden. Und mit dem 'Su' kann die deformierte Form in 3D ebenfalls skaliert werden. Setzt man 'Su' auf Null, wird die verformte Form in 3D ohne Skalierung dargestellt, also Skalierungsfaktor eins.

Das Aussehen der Wellen Geometrie in 2D kann durch einen Beleuchtungsfaktor 'fl' hervorgehoben werden. Der Faktor 'fld' wird für die Hintergrundgrafik der Welle in 2D Grafiken verwendet.

Mit dem Eingabewert für 'sigV' kann der Anwender die maximal zulässige Spannung angeben, die eine Welle unter Belastung erreichen soll. Auf diese Weise zeigt die Software grafisch eine Annäherung an den Notwendigen Durchmesser der Wellen, die einem Maximalwert der Vergleichsspannung ausgesetzt sind. Wie Sie das Diagramm des Notwendigen Durchmessers visualisieren können, entnehmen Sie bitte dem Querschnitt "Grafikbereich" in diesem Dokument.

Rechts im Fenster können die Farben für die Lager festgelegt werden. Die linke Schaltfläche gilt für Lager, die mit einer Welle und dem Gehäuse verbunden sind, während die rechte Schaltfläche für Lager gilt, die mit zwei Wellen verbunden sind. Die obere Farbe gilt für Lager aus der Datenbank mit approximierter Innengeometrie, dann für Lager aus der Datenbank mit Innengeometrie und schließlich für Lager mit benutzerdefinierter Geometrie.

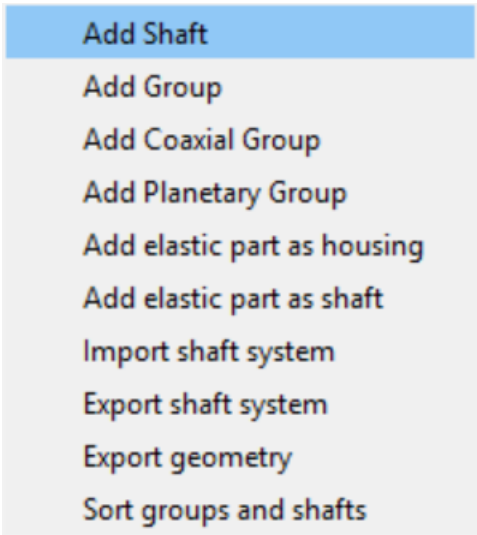
Zusätzlich kann eine Standardfarbe für Wellen und Zahnräder festgelegt werden.

### 2.1.1.5 Systemoptionen im Systembaum

Im Systembaum stehen unter "Wellen" und "Lager" über das Kontextmenü verschiedene Optionen zur Verfügung.

Das Kontextmenü unter "Wellen" bietet folgende Optionen:

- "Welle hinzufügen" fügt eine Welle zum System hinzu. Bei Verwendung von Gruppen können Wellen nur zu Gruppen hinzugefügt werden.
- "Gruppe hinzufügen" fügt dem System eine Gruppe hinzu.
- "Koaxiale Gruppe hinzufügen" fügt eine koaxiale Gruppe hinzu. Der Unterschied zwischen koaxialen Gruppen und Gruppen ist, dass koaxiale Gruppen nur eine axiale Position haben und Stützelemente zwischen Wellen in verschiedenen koaxialen Gruppen verwendet werden können.
- "Planetengruppe hinzufügen" fügt eine Planetengruppe hinzu. Eine Planetengruppe rotiert um eine Trägerwelle und es kann eine Anzahl



Add Shaft  
Add Group  
Add Coaxial Group  
Add Planetary Group  
Add elastic part as housing  
Add elastic part as shaft  
Import shaft system  
Export shaft system  
Export geometry  
Sort groups and shafts

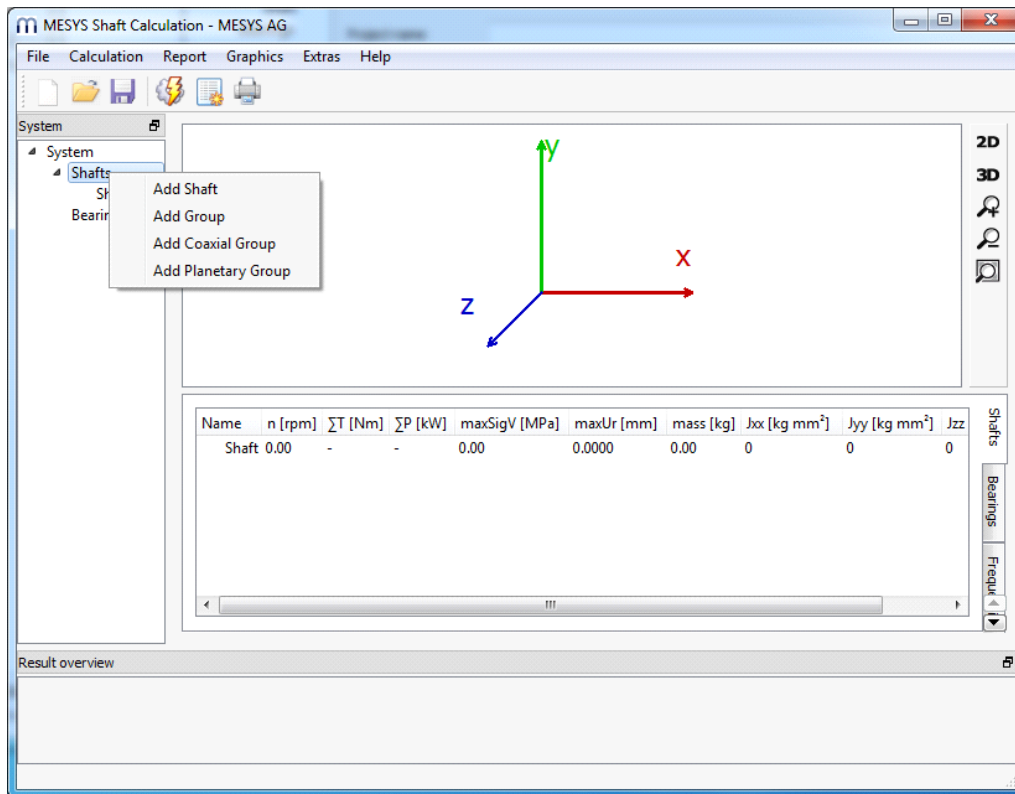
Planeten auf der Gruppe definiert werden. Alle Elemente werden "Anzahl Planeten" mal generiert.

- "Elastisches Bauteil als Gehäuse zufügen" fügt ein 3D-elastisches Bauteil als Gehäuse hinzu. Dieses Bauteil ist nicht rotierend. Siehe [3D-elastisches Bauteil als Gehäuse](#)<sup>131</sup> für Details.
- "Elastisches Bauteil als Welle zufügen" fügt ein 3D-elastisches Bauteil als Welle hinzu. Dieses Bauteil kann rotieren und es kann auch ein Planetenträger sein. Siehe [3D-elastisches Bauteil als Welle](#)<sup>126</sup> für Details.
- "Wellensystem importieren" erlaubt es, ein bestehendes Wellensystem zu importieren. Es kann entweder eine Datei einer MESYS Wellenberechnung ausgewählt werden oder eine Datei im REXS Format.
- "Wellensystem exportieren" ermöglicht den Export des Systems im REXS-Format. Dieses Format ermöglicht den Datenaustausch mit anderer CAE-Software.
- "Geometrie exportieren" exportiert das System als STEP-Datei. Bei Zahnrädern und Lagern wird nur eine vereinfachte Geometrie verwendet. Der Export kann z.B. zum Prüfen der Passung zum Gehäuse verwendet werden.
- "Gruppen und Wellen sortieren" sortiert Wellen und Gruppen alphabetisch. Zunächst werden die Elemente in der Erstellungsreihenfolge sortiert.
- "System zufügen" erzeugt ein Stirnradgetriebe oder ein Planetengetriebe.

Das Kontextmenü unter "Wälzlager" erlaubt es, Einstellungen für alle Wälzlagerberechnungen gleichzeitig zu aktivieren oder zu deaktivieren:

Activate 'Extended pressure distribution' for all roller bearings  
Deactivate 'Extended pressure distribution' for all roller bearings  
Activate 'Consider centrifugal force' for all bearings  
Deactivate 'Consider centrifugal force' for all bearings  
Select minimum clearance for all bearings  
Select medium clearance for all bearings  
Select maximum clearance for all bearings  
Select 'Elastic ring expansion is not considered' for all bearings  
Select 'Elastic ring expansion based on minimum radial force' for all bearings  
Select 'Elastic ring expansion based on medium radial force' for all bearings  
Select 'Gyroscopic moment is not considered' for all ball bearings  
Select 'Gyroscopic moment based on outer raceway control' for all ball bearings  
Select 'Gyroscopic moment based on outer raceway control, distributed force' for all ball bearings  
Select 'Gyroscopic moment based on friction' for all ball bearings

## 2.1.2 Definition von Wellen



Im Systembaum können mit einem Rechtsklick auf "Wellen" weitere Wellen zum System hinzugefügt werden. Die Welle kann durch Auswahl im Systembaum definiert werden.

Es können Wellen direkt hinzugefügt werden, wenn nur einzelne oder koaxiale Wellen verwendet werden. Für allgemeine Wellensysteme können Gruppen oder koaxiale Gruppen verwendet werden, um Wellensysteme zu erstellen. Planetengruppen werden für Planetenwellen verwendet, um Planetenstufen zu modellieren.


### 2.1.2.1 Allgemeine Daten der Welle

Auf der ersten Seite "Allgemein" können für jede Welle einige allgemeine Daten und Daten für die Festigkeitsberechnung definiert werden.

### 2.1.2.1.1 Bezeichnung

Für jede Welle kann eine Bezeichnung definiert werden, die im Systembaum, in Meldungen und im Protokoll zur Identifizierung der Welle verwendet wird.

### 2.1.2.1.2 Werkstoff

Der Werkstoff kann aus der Datenbank ausgewählt werden. Die -Schaltfläche ermöglicht es, die Werkstoffdaten zu sehen oder die Daten zu ändern, wenn die Benutzereingabe ausgewählt ist.

### 2.1.2.1.3 Position

Wenn mehrere Wellen definiert sind, können sie unterschiedliche axiale Positionen haben. Der Wert für Position definiert die Lage des Startpunktes bzw. des linken Endes einer Welle relativ zur Gruppe. Alle Belastungen und Randbedingungen werden dann relativ zu diesem Startpunkt definiert.

Die Position der Welle kann auch durch Ziehen der Welle in der 2D-Ansicht mit der linken Maustaste zusammen mit den Umschalt- und Steuerungstasten geändert werden.

### 2.1.2.1.4 Drehzahl

Die Drehzahl der Welle hat einen Einfluss auf die Lebensdauer der Lager und die Eigenfrequenzen mit gyroskopischem Effekt. Wenn das Kontrollkästchen hinter der Eingabe nicht aktiviert ist, versucht die Software, sie mit Hilfe von Bedingungen zu berechnen. Sie wird auf Null gesetzt, wenn die Welle nicht mit anderen verbunden ist.

Eine positive Drehzahl ist eine im Uhrzeigersinn rotierende Drehung mit Blick in die X-Richtung.

### 2.1.2.1.5 Temperatur

Hier kann die Temperatur der Welle definiert werden. Die Temperatur wird in die Berechnung des Lagers übernommen und führt zu axialen Spannungen in der Welle.

Für den Fall, dass die Temperatur der Welle nicht gleichförmig ist, muss der Anwender auf der Registerkarte 'Einstellungen' das Flag 'Temperatur pro Element berücksichtigen' setzen. Damit kann der Anwender für jedes an der Aussengeometrie erzeugte Element eine Temperaturdifferenz ' $\Delta T$ ' ( $\pm$ ) auf die zuvor auf der Registerkarte 'Allgemein' eingestellte Temperatur addieren. Die Referenztemperatur ohne Spannungsfeld beträgt 20°C.

### 2.1.2.2 Daten für die Festigkeitsberechnung

Es gibt mehrere Eingaben für die Festigkeitsberechnung nach DIN 743, die für jede Welle definiert sind.

#### 2.1.2.2.1 Lastfaktor (statisch)

Für die Berechnung des statischen Sicherheitsfaktors wird die maximale Last mit dem statischen Lastfaktor multipliziert.

#### 2.1.2.2.2 Lastfaktor (Ermüdung)

Für die Berechnung des Sicherheitsfaktors gegen Dauerbruch wird die maximale Last mit dem Lastfaktor (Ermüdung) multipliziert.

#### 2.1.2.2.3 Überlastfall

Der Überlastfall definiert, wie die zulässige Spannung berechnet wird. Es kann entweder "Konstantes Spannungsverhältnis" oder "Konstante Mittelspannung" gewählt werden. "Konstantes Spannungsverhältnis" führt zu kleineren Sicherheitsfaktoren und ist daher auf der sicheren Seite.

#### 2.1.2.2.4 Durchmesser bei Wärmebehandlung

Der Durchmesser bei Wärmebehandlung wird zur Berechnung der Zugfestigkeit und der Streckgrenze für den jeweiligen Werkstoff verwendet. Die Software stellt ihn automatisch auf den maximalen Durchmesser der Wellen ein, aber für Hohlwellen kann die Wandstärke manuell gewählt werden, wenn eine Wärmebehandlung für die Hohlwelle durchgeführt wurde.

#### 2.1.2.2.5 Anzahl Lastwechsel

Wird eine Berechnung für die endliche Lebensdauer durchgeführt, so wird die Anzahl Lastwechsel standardmäßig aus der Drehzahl und der notwendigen



Lebensdauer abgeleitet. Für nicht rotierende Wellen ist dies jedoch nicht möglich. Dann kann die Anzahl Lastwechsel manuell eingegeben werden.

#### 2.1.2.2.6 Faktor der Oberflächenverfestigung

In DIN 743 erhöht ein Faktor für die Oberflächenverfestigung KV die zulässige Spannung. Er kann für das Härten oder eine mechanische Behandlung wie das Kugelstrahlen festgelegt werden. Da die Norm einen großen Bereich für diesen Wert vorsieht, muss er vom Anwender definiert werden.

#### 2.1.2.2.7 Spannungsverhältnis

Das Spannungsverhältnis R ist in der Regel definiert als minimaler Spannungswert geteilt durch den maximalen Spannungswert, was zu Werten zwischen  $-\infty$  und  $+1$  führt.

Die Software verwendet stattdessen einen Wert zwischen  $-1$  und  $+1$  und definiert das Spannungsverhältnis anhand der folgenden Definition:

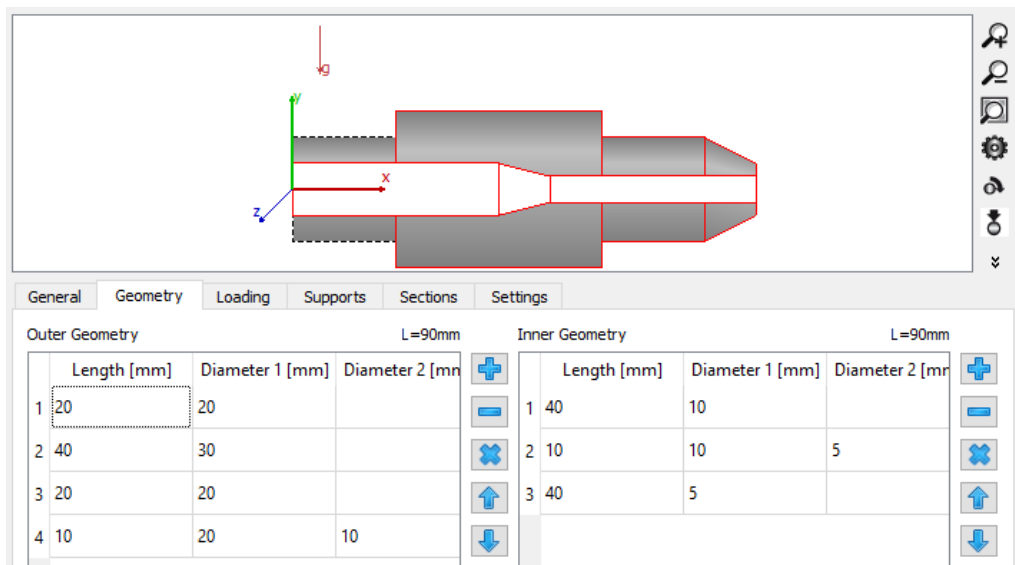
$$R = \begin{cases} \frac{\sigma_1}{\sigma_2} & |\sigma_2| > |\sigma_1| \\ \frac{\sigma_2}{\sigma_1} & |\sigma_1| > |\sigma_2| \end{cases}$$

Mit dieser Definition kann  $R = 0$  für schwellende Lasten zwischen Null und einem positiven oder negativen Wert verwendet werden. Bei wechselnder Belastung ist  $R = -1$  und bei konstanter Last  $R = +1$ .

Das Spannungsverhältnis kann für Zug, Biegung und Torsion unabhängig voneinander definiert werden. Bei einer rotierenden Welle sollte das Spannungsverhältnis für Biegung in der Regel  $-1$  sein. Wenn das Spannungsverhältnis für Torsion nicht angegeben ist, ist eine Berechnung mit zwei Fällen durchzuführen: z. B. konstant und schwellend. Es hängt von der aktuellen Belastung ab, welcher Fall konservativ ist.

#### 2.1.2.3 Daten zur Geometrie

Die Geometriedaten einer Welle werden auf der Seite "Geometrie" definiert. Die Geometrie kann mit zylindrischen und konischen Elementen für die Außen- und Innengeometrie definiert werden. Die Wellengeometrie kann auch aus CAD-Dateien importiert werden, siehe [Wellengeometrie importieren aus CAD-Dateien](#) <sup>109</sup>.



Für beide Geometrien, die innere und die äußere, gibt es eine Eingabetabelle. Die Plus- und Minus-Schaltflächen ermöglichen das Hinzufügen und Entfernen von Zeilen, die Pfeile können verwendet werden, um ein Element in der Tabelle nach oben oder unten zu verschieben.

Länge und Durchmesser 1 müssen für jedes Element definiert werden. Wenn Durchmesser 2 leer gelassen wird, wird ein Zylinder verwendet, sonst ein Kegel. Es sind keine negativen Werte erlaubt. Die Gesamtlänge wird oberhalb der Tabelle angegeben.

Soll eine Bohrung von rechts als Innengeometrie definiert werden, so ist ein erstes Element mit Durchmesser Null einzugeben, um die Startposition auf der Bohrung zu erreichen.

Die Abmessungen der einzelnen Elemente können auch in der Ansicht geändert werden. Benutzen Sie dazu Shift und die linke Maustaste. Um die Länge zu ändern, muss der Klick im rechten Drittel eines Elements erfolgen. Zum Ändern des Durchmessers muss er sich im oberen Drittel eines Elements befinden. Um einen Zylinder in ein Kegelelement zu verwandeln, muss die Maus im linken Drittel eines Elements stehen. Die interaktive Änderung ist auf ein 1mm-Raster beschränkt. Mit den Tasten Shift und Control wird die Welle bewegt, anstatt ein Element zu verändern.

Die Tabelle für die Aussengeometrie erlaubt auch die Eingabe einer Temperaturdifferenz, wenn die entsprechende Option unter Einstellungen aktiviert ist.

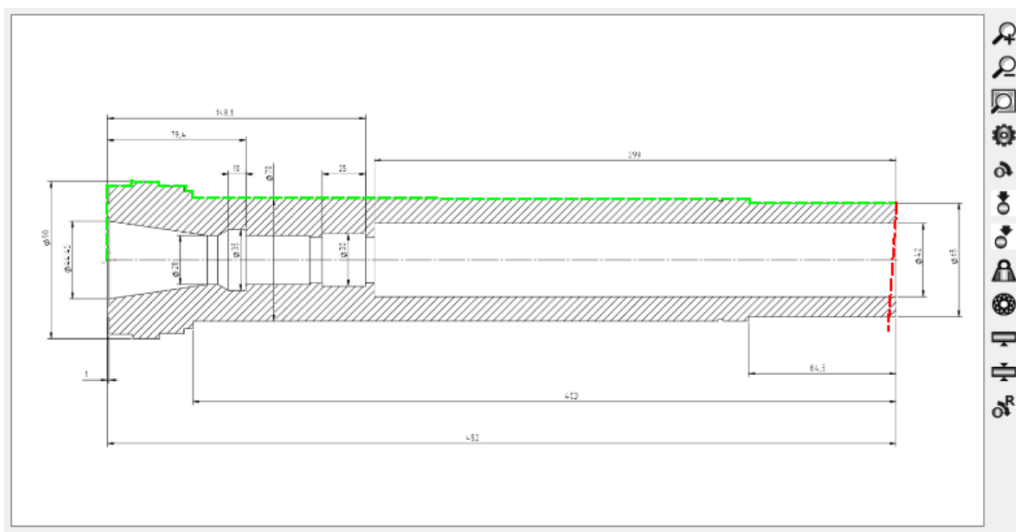
### 2.1.2.3.1 Hintergrundzeichnung

Über das Kontextmenü (rechte Maustaste) kann eine Hintergrundgrafik zur 2D-Grafik hinzugefügt werden. Hier kann eine CAD-Zeichnung als Hintergrundbild gesetzt werden, wenn nur eine PDF-Zeichnung vorhanden ist.

Die Hintergrundzeichnung wird nach dem Kopieren eines Querschnitts in der PDF-Zeichnung mit "Aus Zwischenablage setzen" hinzugefügt. Dann wird mit "Ursprung setzen" die Position der Zeichnung definiert und mit "Horizontale Skalierung definieren" oder "Vertikale Skalierung definieren" der Skalierungsfaktor festgelegt. Die Position in der Zeichnung ist die Stelle, an der der Rechtsklick ausgeführt wird. Klicken Sie also zuerst mit der rechten Maustaste auf die Position des Ursprungs und wählen Sie "Ursprung setzen", dann klicken Sie auf einen Punkt mit einem bestimmten vertikalen oder horizontalen Abstand und wählen den Maßstab.

Die Hintergrundzeichnung kann auch über das Kontakt-Menü in den Vordergrund verschoben oder rotiert werden.

Anschließend kann die Geometrie der Welle an die Zeichnung angepasst werden. Entweder durch Änderung der Geometrieelemente oder durch die Eingabe als Polylinie. Definieren Sie zuerst die innere Geometrie und dann die Aussengeometrie.



### 2.1.2.3.2 Geometrie als Polylinie definieren

Über das Kontextmenü kann eine Eingabe von innerer oder äußerer Geometrie als Polylinie aktiviert werden. Dies geschieht in der Regel nach dem Setzen einer Hintergrundzeichnung, ist aber unabhängig davon.

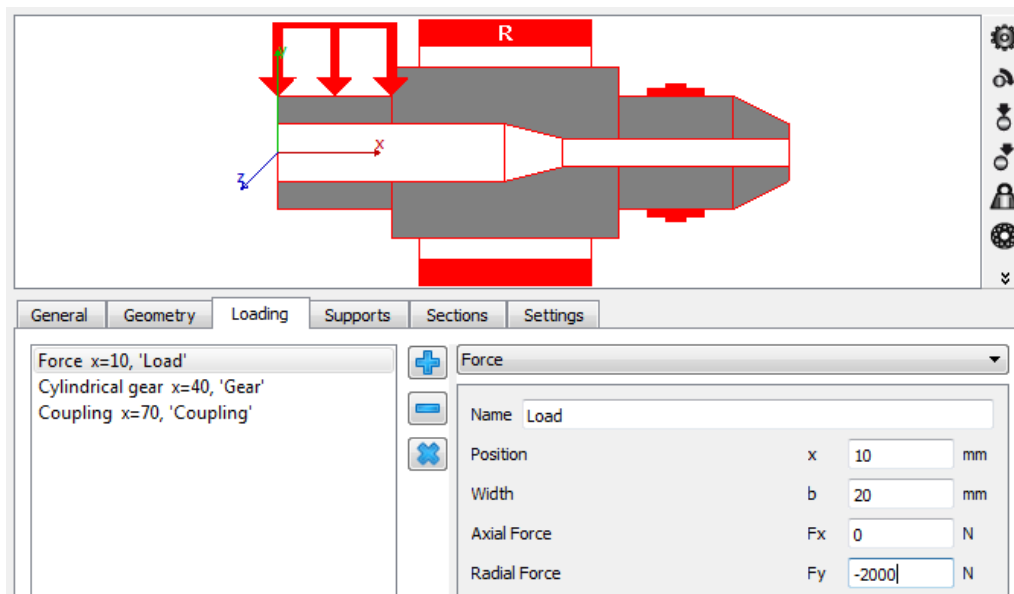
Mit der linken Maustaste können Punkte für den Linienzug hinzugefügt werden. Eine rote Linie zeigt eine ungültige Position für den nächsten Punkt an und dieser wird nicht akzeptiert. Mit Shift plus linker Taste wird der zuletzt ausgewählte Punkt

wieder entfernt. Mit der rechten Maustaste wird die Eingabe gestoppt und das Ergebnis in die Tabelle für die innere oder äußere Geometrie übernommen.

Die ausgewählten Punkte werden auf einen Millimeter gerundet.

### 2.1.2.4 Belastung

Belastungen können auf der Seite "Belastung" für jede Welle definiert werden. Kräfte können außerhalb einer Welle definiert werden; Massen dürfen nicht außerhalb einer Welle liegen. Belastungen können auch durch Doppelklick in der Grafik geändert werden. Sie können in der Grafik mit der Umschalttaste und der linken Maustaste verschoben werden.



Belastungen können mit dem Plus-Button neben der Liste hinzugefügt werden. Der Typ der Belastung kann über die Liste rechts ausgewählt werden. Jedes Last-Element hat eine Bezeichnung zur Identifizierung, eine Position relativ zum linken Ende der Welle und eine Breite.

Die grafische Darstellung zeigt nur ein Symbol für die Last, nicht die tatsächliche Richtung, da sie sechs Komponenten haben kann. Das Koordinatensystem ist links abgebildet. Die Achse der Welle liegt in x-Richtung, die y-Achse geht nach oben und die z-Achse nach vorne. Das Gewicht ist standardmäßig in negativer y-Richtung (Winkel  $\beta_w = -90^\circ$ ).

#### 2.1.2.4.1 Kraft

Das Last-Element "Kraft" erlaubt die Definition einer Kraft und eines Moments mit jeweils drei Komponenten. Die Momente sind Kippmomente um eine Achse.  $F_x$  ist also die Axialkraft und  $M_x$  ist das Moment um die x-Achse, also ein Drehmoment.

### 2.1.2.4.2 Kupplung

Die Kupplung erlaubt nur die Definition eines Drehmoments. Die Richtung des Drehmoments kann entweder durch sein Vorzeichen oder durch die Auswahl "Welle wird angetrieben" (Drehmoment hat das gleiche Vorzeichen wie die Drehzahl) oder "Welle treibt an" (Drehmoment hat ein anderes Vorzeichen als die Drehzahl) definiert werden.

### 2.1.2.4.3 Stirnrad

Die Last kann durch Eingabe der Geometrie eines Stirnrads und eines Drehmoments definiert werden.

Die Richtung des Drehmomentes kann entweder durch sein Vorzeichen oder durch die Auswahl "Welle wird angetrieben"/"Welle treibt an" definiert werden. Der Kontaktpunkt ist durch einen Kontaktwinkel gegeben, der auf der y-Achse Null und auf der z-Achse 90° beträgt.

Das Zahnrad ist durch die üblichen Angaben auf einer Zahnradzeichnung definiert:

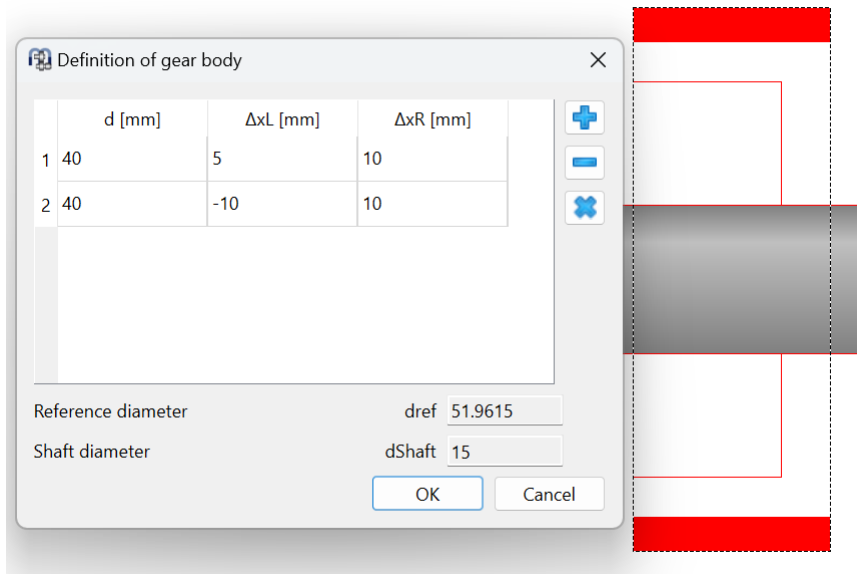
Nummer der Zähne, Normalmodul, Normaleingriffswinkel, Schrägungswinkel mit dessen Richtung. Optionale Eingaben sind die Zähnezahzahl des Gegenrades und der Achsabstand. Werden sie angegeben, werden die Lasten für den Betriebsachsabstand berechnet, was genauer ist als beim Teilkreisdurchmesser.

Bei Innenverzahnungen muss die Zähnezahzahl als negativer Wert eingegeben werden, der Achsabstand ist immer positiv, wie in ISO 21771 für die Zahnradgeometrie definiert.

Optional kann ein Radkörper für Aussenverzahnungen definiert werden. Die Radkörperinformation kann über eine axiale Position für die linke und rechte Breite des Zahnradkörpers über den Durchmesser definiert werden. Die ersten Punkte werden auf den Wellendurchmesser projiziert. Die letzten Punkte sind mit dem Fussdurchmesser des Rades verbunden. Intern wird der Radkörper als Faktor zu Wellen- und Teilkreisdurchmesser und der Zahnradbreite gespeichert. Wenn also die Zahnraddaten geändert werden, ändert sich auch der Zahnradkörper. Der

|                                |             |    |    |
|--------------------------------|-------------|----|----|
| Name                           | Gear        |    |    |
| Position                       | x           | 40 | mm |
| Width                          | b           | 30 | mm |
| Torque                         | T           | 0  | Nm |
| Direction of torque            | Own Input ▼ |    |    |
| Angle to contact               | $\zeta$     | 0  | °  |
| Number of teeth                | z           | 25 |    |
| Normal module                  | mn          | 2  | mm |
| Normal pressure angle          | $\alpha_n$  | 20 | °  |
| Helix angle                    | $\beta_n$   | 0  | °  |
| Helix direction                | Spur gear ▼ |    |    |
| Number of teeth of mating gear | z2          | 25 |    |
| Center distance                | a           | 50 | mm |

Radkörper wird nur berücksichtigt, wenn die Option [Zahnräder als Steifigkeit berücksichtigen](#) <sup>73</sup> gesetzt ist, um elastische Zahnradkörper zu berücksichtigen.



## 2.1.2.4.4 Kegelrad

Die Last kann mit Hilfe des Drehmoments und der Geometrie eines Kegelrads oder Hypoidrads definiert werden.

Die Richtung des Drehmomentes kann entweder durch sein Vorzeichen oder durch die Auswahl "Welle wird angetrieben"/"Welle treibt an" definiert werden. Der Kontaktpunkt wird durch einen Winkel zum Kontakt angegeben, der auf der y-Achse Null und auf der z-Achse 90° beträgt.

Der Teilkegelwinkel kann entweder direkt definiert werden oder er wird über den Achswinkel und die Zähnezahl des Gegenrades berechnet.

Anstelle des mittleren Normalmoduls kann auch der Teilkreis aussen als Eingabe verwendet werden.

Die Breite ist die Breite des Zahnrads (die Länge der Flanke), die axiale Länge der belasteten Welle ist abhängig vom Teilkegelwinkel kleiner.

|                                |                   |         |                                     |
|--------------------------------|-------------------|---------|-------------------------------------|
| Name                           | Bevel gear        |         |                                     |
| Position                       | x                 | 40      | mm                                  |
| Width                          | b                 | 20      | mm                                  |
| Torque                         | T                 | 0       | Nm                                  |
| Direction of torque            | Own Input         |         |                                     |
| Orientation                    | Apex on the right |         |                                     |
| Angle to contact               | $\zeta$           | 0       | °                                   |
| Number of teeth                | z                 | 25      |                                     |
| Normal module                  | mn                | 2       | mm <input checked="" type="radio"/> |
| Pitch diameter                 | de                | 64.1421 | mm <input type="radio"/>            |
| Profile shift coefficient      | x                 | 0       |                                     |
| Generated pressure angle       | $\alpha_{nd}$     | 20      | °                                   |
| Generated pressure angle       | $\alpha_{nc}$     | 20      | °                                   |
| Helix angle                    | $\beta_m$         | 0       | °                                   |
| Helix direction                | Spur gear         |         |                                     |
| Pitch angle                    | $\delta$          | 45      | ° <input type="checkbox"/>          |
| Number of teeth of mating gear | z2                | 25      |                                     |
| Axis angle                     | $\Sigma$          | 90      | °                                   |
| Center distance                | a                 | 0       | mm                                  |

## 2.1.2.4.5 Schnecke

Die Last kann über das Drehmoment und die Geometrie einer Schnecke definiert werden.

Die Richtung des Drehmomentes kann entweder durch sein Vorzeichen oder durch die Auswahl "Welle wird angetrieben"/"Welle treibt an" definiert werden. Der Kontaktpunkt ist durch einen Kontaktwinkel gegeben, der auf der y-Achse Null und auf der z-Achse 90° beträgt. Das Zahnrad ist durch die üblichen Angaben auf einer Zahnradzeichnung definiert: Zähnezahl, Axialmodul, Normaleingriffswinkel, Steigungswinkel mit seiner Richtung. Der Reibwert der Verzahnung,  $\mu_z$ , kann für den Zahnradkontakt eingestellt werden.

|                           |                 |      |    |
|---------------------------|-----------------|------|----|
| Name                      | Worm            |      |    |
| Position                  | x               | 1500 | mm |
| Width                     | b               | 200  | mm |
| Torque                    | T               | 0    | Nm |
| Direction of torque       | Own Input       |      |    |
| Angle to contact          | $\zeta$         | 0    | °  |
| Number of teeth           | z               | 1    |    |
| Axial module              | $m_x$           | 20   | mm |
| Normal pressure angle     | $\alpha_n$      | 20   | °  |
| Lead angle                | $\gamma_m$      | 5    | °  |
| Helix direction           | Helix left hand |      |    |
| Gear friction coefficient | $\mu_z$         | 0    |    |

## 2.1.2.4.6 Schneckenrad

Die Last kann mit Hilfe des Drehmoments und der Geometrie eines Schneckenrades definiert werden.

Die Richtung des Drehmomentes kann entweder durch sein Vorzeichen oder durch die Auswahl "Welle wird angetrieben"/"Welle treibt an" definiert werden. Der Kontaktpunkt ist durch einen Winkel zum Kontakt gegeben, der auf der y-Achse Null und auf der z-Achse 90° beträgt. Das Zahnrad ist durch die üblichen Angaben auf einer Zahnradzeichnung definiert: Zähnezahl, Stirnmodul, Normaleingriffswinkel, Schrägungswinkel mit seiner Richtung. Optionale Eingaben sind die Zähnezahl des Gegenrades und der Achsabstand. Für den Kontakt des Zahnrades kann der Reibwert der Verzahnung,  $\mu_z$ , eingestellt werden.

|                           |                 |     |    |
|---------------------------|-----------------|-----|----|
| Name                      | Worm gear       |     |    |
| Position                  | x               | 500 | mm |
| Width                     | b               | 200 | mm |
| Torque                    | T               | 0   | Nm |
| Direction of torque       | Own Input       |     |    |
| Angle to contact          | $\zeta$         | 0   | °  |
| Number of teeth           | z               | 40  |    |
| Transverse module         | $m_t$           | 20  | mm |
| Profile shift coefficient | x               | 0   |    |
| Normal pressure angle     | $\alpha_n$      | 20  | °  |
| Helix angle               | $\beta_m$       | 5   | °  |
| Helix direction           | Helix left hand |     |    |
| Gear friction coefficient | $\mu_z$         | 0   |    |




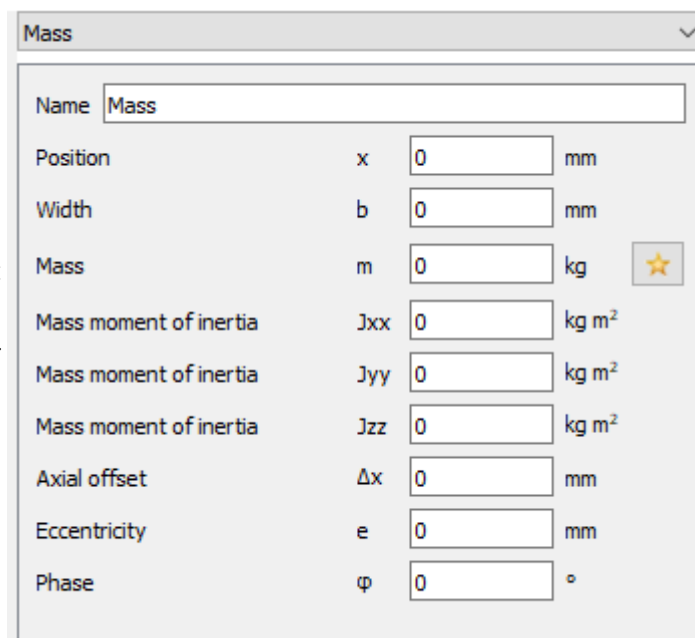
## 2.1.2.4.7 Exzentrizität Kraft


Die exzentrische Kraft ermöglicht die Eingabe einer Kraft mit drei Komponenten an einem Punkt, der nicht auf der Achse der Welle liegt. Der Punkt und die Kraft sind in Polarkoordinaten definiert. Der Winkel wird auf die gleiche Weise definiert wie der Winkel zum Kontakt im Stirnrad (siehe oben).

Die Radialkraft ist positiv, wenn sie von der Wellenmitte weg wirkt, die Tangentialkraft ist positiv in Richtung des Winkels. Die Momente werden durch die angegebenen Punkte und Kräfte berechnet.

## 2.1.2.4.8 Masse

Zusätzliche Masse kann mit dem Element "Masse" definiert werden. Zusätzlich zu ihrer Masse kann auch das Massenträgheitsmoment um drei Achsen definiert werden. Das Gewicht der Masse wird berücksichtigt und fließt in die Berechnung der Eigenfrequenzen ein. Die -Schaltfläche ermöglicht die Berechnung von Masse und Trägheit basierend auf einer Zylinder-Geometrie.



| Mass                   |     |      |                                                                                        |
|------------------------|-----|------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Name                   |     | Mass |                                                                                        |
| Position               | x   | 0    | mm                                                                                     |
| Width                  | b   | 0    | mm                                                                                     |
| Mass                   | m   | 0    | kg  |
| Mass moment of inertia | Jxx | 0    | kg m <sup>2</sup>                                                                      |
| Mass moment of inertia | Jyy | 0    | kg m <sup>2</sup>                                                                      |
| Mass moment of inertia | Jzz | 0    | kg m <sup>2</sup>                                                                      |
| Axial offset           | Δx  | 0    | mm                                                                                     |
| Eccentricity           | e   | 0    | mm                                                                                     |
| Phase                  | φ   | 0    | °                                                                                      |

Wird eine Breite eingegeben, wird die Masse gleichmäßig auf dieser Linie verteilt. Das Gesamt Massenträgheitsmoment dieser verteilten Masse sind die Eingaben, die zu einem minimalen Wert für Jyy und Jzz führen. Sind die eingegebenen Werte zu klein, wird eine Meldung angezeigt. Der axiale Versatz ist der axiale Abstand zwischen der Mitte der Breite des Lastelementes und dem Massenschwerpunkt.

Wenn die hinzugefügte Masse eine Exzentrizität hat, verursacht sie eine rotierende Unwucht und kann als harmonische Kraft gemäß der Formel betrachtet werden:  $F = m e_{cc} \omega^2 \cdot e^{i(\omega t + \phi)}$  (ecc: Exzentrizität in mm). Eine Phasenverschiebung,  $\phi$  (°), für die Unwucht-Kraft kann ebenfalls in Betracht gezogen werden. Die Unwucht wirkt sich nur auf die Resultate für die harmonische Antwort aus. Lagerlebensdauer, Kontaktspannungen oder Sicherheitsfaktoren für die Festigkeit der Wellen ändern sich nicht. Die Einstellung der Option [Dynamische Lasten im statischen Gleichgewicht berücksichtigen](#) <sup>70</sup> führt zu einer Änderung der Lagerlebensdauer oder der Sicherheitsfaktoren, dies ist jedoch nur eine Näherung.


### 2.1.2.4.9 Unwucht

Wenn eine Unwucht nur als Kraft betrachtet werden soll, ohne der Welle Masse hinzuzufügen, muss dieses Element verwendet werden. Die Unwucht wird als harmonische Kraft betrachtet und wie eine exzentrische Masse

berechnet, d. h.:  $F = m e_{cc} \omega^2 \cdot e^{i(\omega t + \varphi)}$  Die Trägheit und die Eigenfrequenzen der Welle bleiben jedoch unberührt. Der axiale Versatz erlaubt es, einen axialen Versatz zwischen dem Ort des Kraftelements und dem Unwuchtzentrum zu definieren. Er führt zu einem zusätzlichen Kippmoment.

Die Unwucht wirkt sich nur auf die Resultate für die harmonische Antwort aus. Die Lagerlebensdauer, die Kontaktspannungen oder die Sicherheitsfaktoren für die Festigkeit der Wellen werden nicht verändert.

Die Einstellung der Option [Dynamische Lasten im statischen Gleichgewicht berücksichtigen](#) <sup>70</sup> führt zu einer Änderung der Lagerlebensdauer oder der Sicherheitsfaktoren, dies ist jedoch nur eine Näherung.

| Imbalance    |            |   |                                                                                        |
|--------------|------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Name         | Imbalance  |   |                                                                                        |
| Position     | x          | 0 | mm                                                                                     |
| Mass         | m          | 0 | kg  |
| Axial offset | $\Delta x$ | 0 | mm                                                                                     |
| Eccentricity | e          | 0 | mm                                                                                     |
| Phase        | $\varphi$  | 0 | °                                                                                      |

### 2.1.2.4.10 Dynamische Belastung

Dieses Element ermöglicht es dem Anwender, harmonische Lasten (Momente oder Kräfte) auf einer Welle gemäß zu berücksichtigen:  

$$F = \bar{F} \cdot e^{i(\omega t + \varphi)}$$
 Ein Faktor  $h$  wird mit der Frequenz der Wellenrotation multipliziert. Falls die Frequenz nicht von der Drehzahl der Welle abhängt, kann sie manuell durch

| Dynamic force  |               |   |                             |
|----------------|---------------|---|-----------------------------|
| Name           | Dynamic force |   |                             |
| Position       | x             | 0 | mm                          |
| Axial Force    | Fx            | 0 | N                           |
| Radial Force   | Fy            | 0 | N                           |
| Radial Force   | Fz            | 0 | N                           |
| Torque         | Mx            | 0 | Nm                          |
| Bending moment | My            | 0 | Nm                          |
| Bending moment | Mz            | 0 | Nm                          |
| Frequency      | f             | 0 | Hz <input type="checkbox"/> |
| Harmonic       | h             | 1 |                             |
| Phase          | $\varphi$     | 0 | °                           |

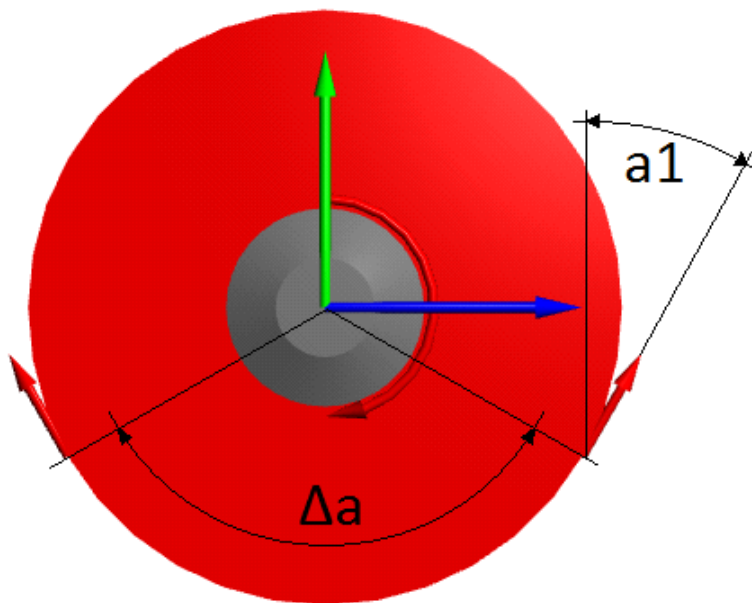
Ankreuzen des Kästchens neben der "Frequenz" im Software-Dialog festgelegt werden. Auch für die Kraft kann eine Phasenverschiebung definiert werden.

Die dynamische Belastung wirkt sich nur auf die Resultate für die Harmonische Antwort aus. Die Lagerlebensdauer, die Kontaktspannungen oder die Sicherheitsfaktoren für die Festigkeit der Wellen werden nicht verändert. Die Einstellung der Option [Dynamische Lasten im statischen Gleichgewicht berücksichtigen](#) <sup>70</sup> führt zu einer Änderung der Lagerlebensdauer oder der Sicherheitsfaktoren, aber dies ist nur eine Annäherung.

### 2.1.2.4.11 Riemenscheibe

Die Last kann durch die Definition eines Drehmoments auf der Riemenscheibe und dessen Vorspannung durch einen Riemen definiert werden.

| Pulley               |                  |     |                                     |
|----------------------|------------------|-----|-------------------------------------|
| Name                 | Pulley           |     |                                     |
| Position             | x                | 40  | mm                                  |
| Width                | b                | 10  | mm                                  |
| Pretension force     | Fpre             | 20  | N                                   |
| Torque               | T                | 200 | Nm                                  |
| Direction of torque  | Shaft is driving |     |                                     |
| Angle of first force | $\alpha_1$       | 30  | °                                   |
| Wrap angle           | $\Delta\alpha$   | 120 | °                                   |
| Diameter             | d                | 60  | mm <input checked="" type="radio"/> |
| Number of teeth      | z                | 0   | <input type="radio"/>               |
| Pitch                | p                | 0   | mm                                  |

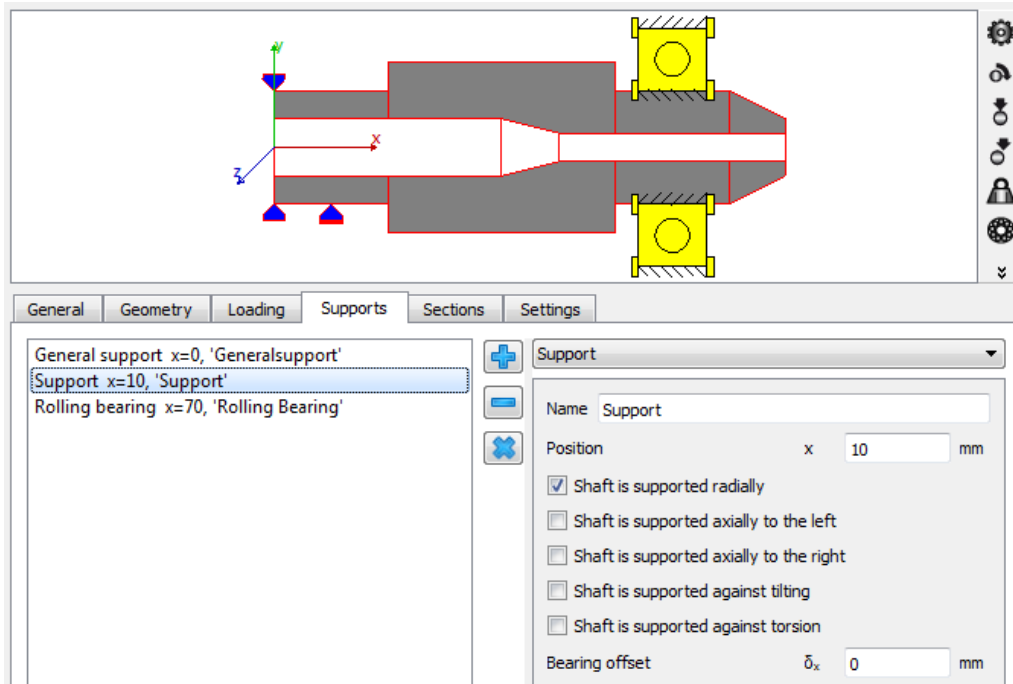


Die Richtung des Drehmomentes kann entweder durch sein Vorzeichen oder durch die Auswahl "Welle wird angetrieben"/"Welle treibt an" definiert werden. Die Positionierung der Kontaktfläche wird durch einen Winkel angegeben, der auf der y-Achse im Uhrzeigersinn von Null ausgeht, gefolgt vom Umschlingungswinkel, wie in der Abbildung unten dargestellt. Der Durchmesser der Riemenscheibe kann direkt oder über ihre Zähnezah und Teilung eingestellt werden.

Ein Drehmoment führt zu einer Erhöhung der Kraft auf einer Seite des Riemens und zu einer Verringerung der Kraft auf der anderen Seite. Dies ist das richtige Modell, wenn keine Spansscheibe verwendet wird.

## 2.1.2.5 Randbedingungen

Randbedingungen können auf der Seite "Lager" definiert werden. Sie können auch durch einen Doppelklick in der Grafik bearbeitet oder mit Shift und der linken Maustaste verschoben werden. Elemente wie Wälzlager definieren nur Randbedingungen, sie haben keine Masse oder Gewicht. Für die meisten Lager kann eine Anregung definiert werden, die bei der Berechnung der Harmonischen Antwort berücksichtigt wird, siehe [Anregung](#) <sup>104</sup>.



### 2.1.2.5.1 Randbedingungen

Das Element "Lager" ist ein einfach zu verwendendes Element, mit dem Randbedingungen zwischen Welle und Gehäuse definiert werden können. Es gibt fünf Kontrollkästchen, um zu definieren, in welche Richtungen die Welle gelagert wird. Für die axiale Richtung kann die Bewegung nach rechts und nach links unabhängig voneinander festgelegt werden.

Für die drei Richtungen kann ein Lagerversatz definiert werden. Ein Versatz bedeutet, dass der Punkt am Gehäuse in diese Richtung verschoben wird. Die resultierende Kraft auf die Welle liegt in der Richtung des Versatzes.

## 2.1.2.5.2 Allgemeine Randbedingungen

Die "Allgemeine Randbedingung" erlaubt die Definition von Bedingungen zwischen einer Welle und dem Gehäuse oder zwischen zwei Wellen für alle sechs Freiheitsgrade unabhängig voneinander.


Zunächst kann ausgewählt werden, mit welchem Element die Welle verbunden ist. Das kann das Gehäuse oder eine zweite Welle sein.

Für jeden Freiheitsgrad kann dann ein Typ von Zwangsbedingung definiert werden:

- Keine Bedingung: Es wird keine Bedingung in der Richtung definiert.
- Fest: Der Freiheitsgrad zwischen beiden Elementen ist sowohl in positiver als auch in negativer Richtung gekoppelt. Optional kann ein Versatz oder ein Spiel definiert werden. Ein positiver Wert für den Versatz resultiert in einer Bewegung der aktuellen Welle in diese Richtung bzw. in einer Kraft auf die ausgewählte Welle in dieser Richtung. Das Spiel ist entweder Null oder ein positiver Wert, er darf nicht negativ sein. Das Spiel ist als Abstand zwischen den beiden Endwerten definiert.
- Fest nach links (oder rechts): Die Auswahl "Fest nach links" bedeutet, dass die ausgewählte Welle nur in negativer Richtung (links auf einer horizontalen Achse) belastet wird. "Fest nach rechts" bedeutet, dass die Beschränkung nur in positiver Richtung gilt. Für die unidirektionale Beschränkung kann ein Versatz definiert werden.
- Steifigkeit: Die "Steifigkeit" wirkt wie eine Feder. Es kann ein Versatz und ein Spiel definiert werden. Versatz und Spiel werden wie oben für "Fest" beschrieben definiert.
- Steifigkeit nach links (oder rechts): Wie bei der Fest-Bedingung kann auch die Steifigkeit nur in eine Richtung definiert werden. Es können die Steifigkeit und ein Versatz definiert werden.

The screenshot shows the 'General Constraint' configuration interface. At the top, the name is 'General Constraint' and the position is 'x 0 mm'. A dropdown menu is set to 'Connect to housing'. Below, there are sections for 'Translation in x-direction', 'Translation in y-direction', 'Translation in z-direction', 'Rotation around x-axis', 'Rotation around y-axis', and 'Rotation around z-axis'. Each section has a 'Type' dropdown and input fields for 'Offset' and 'Clearance'.

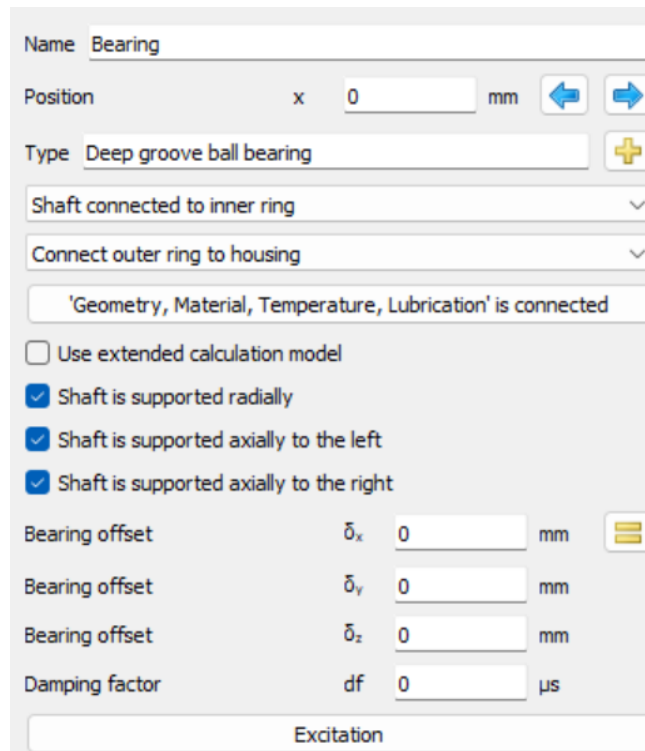
- Translation in x-direction:** Type: No constraint
- Translation in y-direction:** Type: Fixed; Offset  $\delta_y$ : 0 mm; Clearance  $\Delta_y$ : 0 mm
- Translation in z-direction:** Type: Fixed to the left; Offset  $\delta_z$ : 0 mm
- Rotation around x-axis:** Type: Stiffness; Stiffness  $c_{rx}$ : 0 Nm/r; Offset  $\delta_{rx}$ : 0 rad; Clearance  $\Delta_{rx}$ : 0 rad
- Rotation around y-axis:** Type: Stiffness to the left; Stiffness  $c_{ry}$ : 0 Nm/r; Offset  $\delta_{ry}$ : 0 rad
- Rotation around z-axis:** Type: No constraint

Mit der -Schaltfläche kann der axiale Versatz in x-Richtung basierend auf einer vorgegebenen Vorspannung berechnet werden. Der Versatz wird so lange variiert, bis die Axialkraft auf das Lager gleich der Vorspannung ist. Das Vorzeichen des Wertes der Vorspannung ist wichtig. Die Berechnung funktioniert nur, wenn die Welle vollständig definiert ist und basiert auf einer iterativen Lösung des gesamten Wellensystems.

### 2.1.2.5.3 Wälzlager

Das Element "Wälzlager" definiert eine Verbindung zur Wälzlagerberechnung.

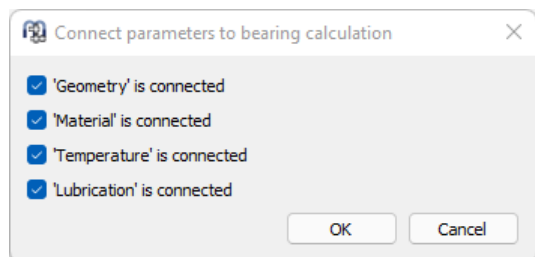
Die aktuelle Welle kann mit dem Innen- oder dem Außenring eines Wälzlagers verbunden werden. Der andere Ring des Lagers kann entweder mit dem Gehäuse oder einer anderen Welle verbunden werden. Die Position ist die Mitte der gesamten Lagerbreite und mit Hilfe der blauen Pfeile kann das Lager zwischen den Wellenabsätzen verschoben werden.



The screenshot shows the 'Bearing' configuration window with the following details:

- Name: Bearing
- Position: x 0 mm (with left and right arrow buttons)
- Type: Deep groove ball bearing (with a plus icon)
- Shaft connected to inner ring (dropdown)
- Connect outer ring to housing (dropdown)
- 'Geometry, Material, Temperature, Lubrication' is connected (button)
- Use extended calculation model
- Shaft is supported radially
- Shaft is supported axially to the left
- Shaft is supported axially to the right
- Bearing offset  $\delta_x$ : 0 mm (with yellow button icon)
- Bearing offset  $\delta_y$ : 0 mm
- Bearing offset  $\delta_z$ : 0 mm
- Damping factor  $df$ : 0  $\mu s$
- Excitation (button)


Durch Anklicken des Buttons "'Geometrie, Werkstoff, Temperatur, Schmierung' ist verbunden" wird der Benutzer mittels eines Pop-up-Fensters aufgefordert, die Verknüpfungen der Daten zu definieren, die in die Berechnung des Lagers übernommen werden sollen. Wellendurchmesser, Werkstoffdaten, Schmierung und Temperaturdaten können in die Lagerberechnung übernommen werden. Verschiebungen, Lasten und Drehzahlen sind immer miteinander verbunden.





The screenshot shows the 'Connect parameters to bearing calculation' dialog box with the following details:

- 'Geometry' is connected
- 'Material' is connected
- 'Temperature' is connected
- 'Lubrication' is connected
- OK button
- Cancel button

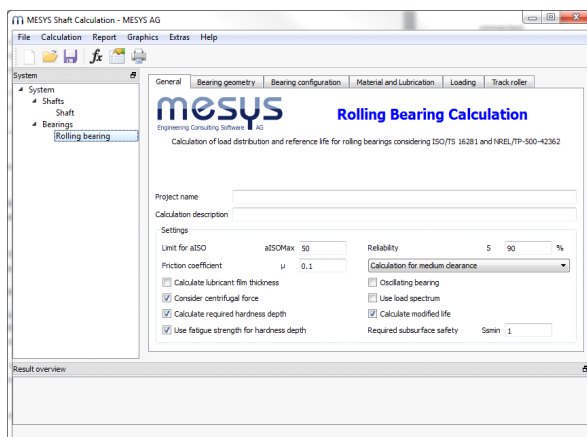
Im Standard-Berechnungsmodell ist das Wälzlager eine nichtlineare Feder zwischen den Knoten an der inneren und äußeren Welle des Lagers. Die Welle kann radial und axial nach links und rechts unterstützt werden. Diese Einstellung ändert die Verbindung des Lageraußenrings mit der Welle/dem Gehäuse. Wenn das Lager eine bestimmte Bewegung nicht einschränken kann, treten auch keine Kräfte in dieser Richtung auf.

Durch den Versatz des Lagers wird der Knotenpunkt der Sekundärwelle (oder des Gehäuses) in diese Richtung verschoben, es werden also Kräfte auf die aktuelle Welle in Richtung des Versatzes erzeugt. Der Versatz kann verwendet werden, um eine Lagervorspannung in axialer Richtung zu erzeugen oder um eine Fehlausrichtung des Gehäuses zu berücksichtigen. Mit der -Schaltfläche kann der axiale Versatz basierend auf einer vorgegebenen Vorspannung berechnet werden. Der Versatz wird so lange variiert, bis die axiale Kraft des Lagers gleich der Vorspannung ist. Das Vorzeichen des Wertes der Vorspannung ist wichtig. Die Berechnung funktioniert nur, wenn die Welle vollständig definiert ist und basiert auf einer iterativen Lösung des gesamten Wellensystems.

Wenn ein Dämpfungsfaktor definiert wird, erzeugt dieser eine steifigkeitsabhängige Dämpfungsmatrix und der Faktor überschreibt die globale Rayleigh Dämpfung, die in [Kreiseffekt berücksichtigen](#)  angegeben ist.

Über die -Schaltfläche neben dem Lagertyp wird ein Fenster der Wälzlagerberechnung angezeigt, um ein Lager aus der Datenbank auszuwählen. Dieser Dialog kann auch durch einen Rechtsklick auf das Lager in der 2D-Grafik angezeigt werden.

Wird ein Wälzlagerelement hinzugefügt, so wird ein Eintrag für das Lager im Systembaum hinzugefügt. Wird dieses Element ausgewählt, sind die Dialoge der Wälzlagerberechnung aktiv, um das Lager zu definieren.





## 2.1.2.5.3.1 Erweitertes Berechnungsmodell

Das erweiterte Berechnungsmodell erlaubt es, verschiedene Elemente für axiale und radiale Kontakte zu definieren. Es ermöglicht auch die Berücksichtigung des Spiels zwischen Lagerring und Welle oder Gehäuse. Das Spiel zwischen Lagerring und Welle oder Gehäuse ist ein Ergebnis der Wälzlagerberechnung und kann optional elastische Aufweitungen des Rings einschließen, wenn die [elastische Aufweitung des Ringes](#) in der Lagerberechnung aktiviert wird.

Für jeden Ring stehen mehrere Optionen zur Verfügung:

- "Keine Zusatzwelle für den Innen-/Außenring": Der Ring wird wie im Standardmodell über einen einzigen zentralen Knoten mit der Welle verbunden. Axial- und Radialkräfte werden übertragen und kein Spiel (zwischen Lagerring und Welle oder Gehäuse) wird unterstützt.
- "Zusatzwelle für den Innen-/Außenring, axial frei": Es wird eine zusätzliche innere Welle für den Ring erzeugt, die axial frei ist. In radialer Richtung wird das in der Wälzlagerberechnung definierte Spiel berücksichtigt. Liegt ein Radialspiel vor, kann der Ring auch basierend auf Spiel und Breite kippen.
- "Zusatzwelle für den Innen-/Außenring mit axialem Kontakt": Es wird eine zusätzliche innere Welle für den Ring erzeugt und der axiale Kontakt für beide Seiten kann entweder zur gleichen Welle wie der radiale Kontakt, zu einer anderen Welle oder zu einem benachbarten Lager definiert werden. Die angeschlossene Welle oder das benachbarte Lager muss bis zum Lagerring reichen. Es kann ein Axialspiel definiert werden. Optional kann eine axiale Steifigkeit und ein Spiel zur Blocklänge der Feder definiert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Feder auf dem Nenndurchmesser des Rings wirkt und ein

The screenshot shows a configuration window for a bearing. Key parameters include:
 

- Name: Bearing
- Position: x 0 mm
- Type: Deep groove ball bearing
- Shaft connected to inner ring: No additional shaft for inner ring
- Connect outer ring to housing: Left side of outer ring connected to outer ring shaft
- Use extended calculation model:
- Axial clearance left (PaLe): 0 mm
- Axial stiffness left (CaLe): 0 N/mm
- Axial clearance right (PaRe): 0 mm
- Axial stiffness right (CaRe): 0 N/mm
- Bearing offset (delta\_x, delta\_y, delta\_z): 0 mm
- Damping factor (df): 0 micrometers
- Excitation: (empty)

Reaktionsmoment bei Kippwinkeln auftritt. Wie zuvor wird das Radialspiel, wie in der Wälzlagerberechnung definiert, berücksichtigt.

Wenn der Ring mit einem benachbarten Lagerring verbunden ist, wird ein Abstand zwischen den Lagerringen unterstützt. In diesem Fall kann ein Durchmesser für eine Distanzhülse festgelegt werden, die den gleichen Werkstoff und die gleiche Temperatur wie das rechte Lager hat.

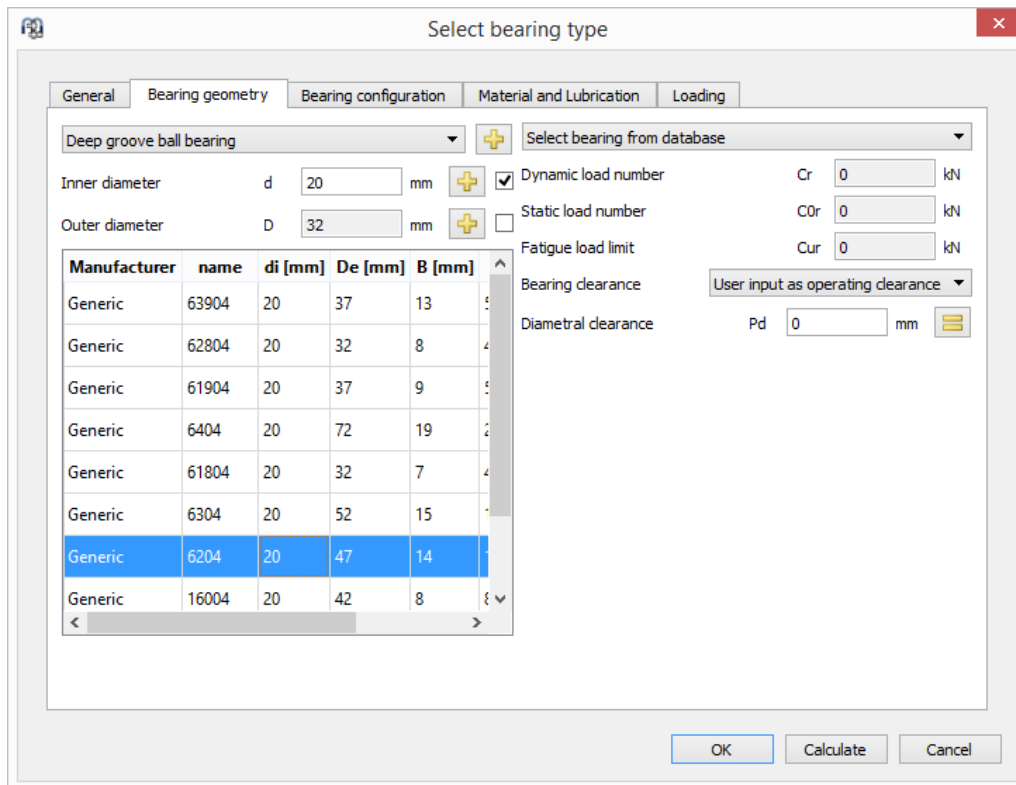
Wird zusätzliches Spiel berücksichtigt, können Konvergenzprobleme auftreten, wenn das System nicht statisch definiert ist. Ein Lager ohne Last und ohne Vorspannung kann zu Konvergenzproblemen führen, wenn das Spiel zwischen Lagerring und Gehäuse definiert ist. Dieser Fall wird in der Praxis in der Regel vermieden, da er zu einem Lagerschaden führen kann. Daher sollte das erweiterte Lagermodell nur aktiviert werden, wenn zusätzliche Effekte ausgewertet werden müssen, aber nicht als Standardeinstellung.

Wird das erweiterte Berechnungsmodell mit zusätzlichen Wellen zusammen mit 3D-elastischen Bauteilen verwendet, so darf nur der radiale Kontakt vom Typ "elastisches Lager" im 3D-Teil sein. Die axialen Kontakte dürfen nur als Einzelknoten mit dem Typ "starr" oder "Mittelwert" definiert sein.

#### **2.1.2.5.3.2 Lager aus Datenbank wählen**

Zur Auswahl eines Wälzlagers wird die Standardoberfläche der Wälzlagerberechnungssoftware angezeigt. Entweder wird ein Lager aus der Datenbank gewählt oder es wird eine benutzerdefinierte Eingabe gewählt. Wird das Lager aus der Datenbank gewählt, können Einschränkungen für den Innen- und Außendurchmesser vorgenommen werden; der Wellendurchmesser an der Position des Lagers ist als Standardwert eingestellt.

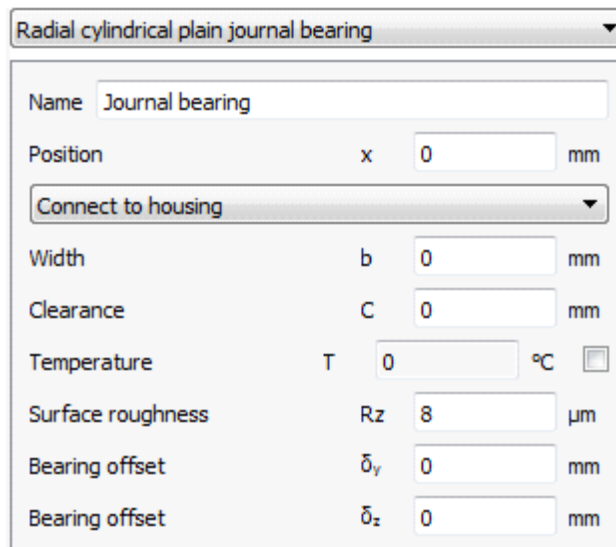
Bei Schrägrollenlagern oder Kegelrollenlagern kann die Richtung des Druckwinkels auch am unteren Rand des Dialogs festgelegt werden.



### 2.1.2.5.4 Hydrodynamisches Radialgleitlager

Das Last-Verschiebungs-Verhalten des Gleitlagers wird nach [ISO 7902-2](#) <sup>351</sup> berechnet. Das Verhältnis von Breite zu Durchmesser ist demnach beschränkt auf  $0.25 \leq B/D \leq 1.5$ .

Die Parameter, die zur Definition dieses Lagertyps verwendet werden, sind in der beigefügten Abbildung dargestellt. Das Spiel stellt das gesamte diametrale



Betriebsspiel zwischen dem Zapfen und dem Lager dar. Jede Exzentrizität wird durch die entsprechenden Eingaben für den Versatz in y- und x-Richtung eingegeben.

Die optionale Eingabe der Temperatur wirkt sich nur auf die Viskosität des Schmierstoffs aus. Sie hat keinen Einfluss auf das Spiel.

Die Oberflächenrauheit ist der Mittelwert zwischen Welle und Lager und wird zur Berechnung der minimal erforderlichen Schichtdicke verwendet.

Der Durchmesser, der für die Berechnung des hydrodynamischen zylindrischen Gleitlagers verwendet wird, ist der Außendurchmesser der Welle, in die das Lager eingesetzt wird. Der Außenring des Lagers kann entweder mit dem Gehäuse oder einer anderen Welle verbunden werden.

Für die Modalanalyse wird die unsymmetrische Steifigkeitsmatrix des Gleitlagers durch zwei orthogonale Federn ersetzt, da die FEA-Bibliothek keine unsymmetrischen Steifigkeiten unterstützt. Daher sind alle Eigenfrequenzen nur eine Approximation. Mit dieser Software kann keine Stabilitätsanalyse durchgeführt werden. Auch die Dämpfung wird nicht berücksichtigt.

#### 2.1.2.5.5 Kugelgewindetrieb

Eine Kugelgewindespindel kann als Randbedingung verwendet werden und definiert eine Verbindung zur Berechnung des Kugelgewindetriebs. Die Geometrie der Kugelgewindespindel kann am Kugelgewindetrieb im Systembaum oder durch Klicken auf "Kugelgewindetrieb definieren" festgelegt werden.

Ball screw

Name Ball screw

Position x 0 mm

Shaft connected to inner ring

Connect outer ring to housing

Define ball screw

#### 2.1.2.5.6 Kupplung für Reaktionsmoment

Eine Kupplung für Reaktionsmoment hält den Rotationswinkel einer Welle fest. Die Summe der Drehmomente wird an diesem Element aufgenommen.

Ein zusätzliches Kontrollkästchen erlaubt es, die Kopplung in der Modalanalyse zu berücksichtigen oder nicht zu berücksichtigen.

#### 2.1.2.5.7 Steifigkeitsmatrix

Eine allgemeine symmetrische Steifigkeitsmatrix kann zwischen einer Welle und dem Gehäuse oder zwischen zwei Wellen definiert werden.

Stiffness matrix

Name Stiffness matrix

Position x 100 mm

Connect to housing

|         | ux [mm] | uy [mm] | uz [mm] | rx [mrad] | ry [mrad] | rz [mrad] |
|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Fx [N]  | 0       | 0       | 0       | 0         | 0         | 0         |
| Fy [N]  |         | 0       | 0       | 0         | 0         | 0         |
| Fz [N]  |         |         | 0       | 0         | 0         | 0         |
| Mx [Nm] |         |         |         | 0         | 0         | 0         |
| My [Nm] |         |         |         |           | 0         | 0         |
| Mz [Nm] |         |         |         |           |           | 0         |

### 2.1.2.5.8 Dämpfungsmatrix

Eine allgemeine Dämpfungsmatrix kann zwischen einer Welle und dem Gehäuse oder zwischen zwei Wellen definiert werden.

Damping matrix

Name Damping matrix

Position x 0 mm

Connect to housing

|         | vx [m/s] | vy [m/s] | vz [m/s] | $\omega_x$ [rad/s] | $\omega_y$ [rad/s] | $\omega_z$ [mrad/s] |
|---------|----------|----------|----------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Fx [N]  | 0        | 0        | 0        | 0                  | 0                  | 0                   |
| Fy [N]  |          | 500      | 0        | 0                  | 0                  | 0                   |
| Fz [N]  |          |          | 0        | 0                  | 0                  | 0                   |
| Mx [Nm] |          |          |          | 0                  | 0                  | 0                   |
| My [Nm] |          |          |          |                    | 0                  | 0                   |
| Mz [Nm] |          |          |          |                    |                    | 0                   |

### 2.1.2.5.9 Schweisspunkt

Ein Schweisspunkt ist ein Festpunkt für alle sechs Freiheitsgrade. Er ist einfacher zu handhaben als eine [Allgemeine Randbedingung](#)<sup>94</sup>, bei der alle Komponenten auf 'Fest' gesetzt sind, hat aber die gleiche Funktionalität. Der Schweisspunkt hat die zusätzliche Option, eine Breite zu definieren. Falls eine Breite > 0 definiert ist, werden automatisch mehrere Schweisspunkte berücksichtigt.

### 2.1.2.5.10 Planetenlagerung

Für Planetenwellen gibt es eine Planetenlagerung. Die Planetenwelle wird immer in radialer und tangentialer Richtung durch den Träger gelagert. Die Begrenzungen in axialer Richtung, gegen Kippen oder Torsion können unabhängig voneinander aktiviert werden.

### 2.1.2.5.11 Axiale Steifigkeit

Die axiale Steifigkeit kann verwendet werden, um eine nichtlineare Feder in axialer Richtung zu definieren. Ein Axialspiel kann verwendet werden, um Spiel oder Vorspannung zu definieren, die Daten in der Tabelle müssen mit (0, 0) beginnen. Wenn ein Durchmesser definiert wird, wirkt die axiale Steifigkeit als verteilte Steifigkeit auf diesem Durchmesser, daher kann das Lager auch Kippmomente aufnehmen, wenn es axial belastet wird.

**Axial stiffness** ▾

Name

Position x  mm

Connect to housing ▾

Stiffness to the right ▾

Axial clearance Pa  mm

Diameter D  mm

|   | u [mm] | F [N] |
|---|--------|-------|
| 1 | 0      | 0     |
| 2 | 1      | 500   |
| 3 | 2      | 2000  |

+
-
✖
↶
↷

Die axiale Steifigkeit wird auf einen sehr großen Wert hinter dem letzten Punkt für die Verschiebung in der Tabelle gesetzt. Damit ist also auch eine Blocklänge definiert.

### 2.1.2.5.12 Zylindrische Randbedingung

Die zylindrische Randbedingung ermöglicht die Definition eines radialen Spiels über bestimmte Breiten und eines axialen Spiels zwischen zwei Bauteilen. Sie kann verwendet werden, um einen Ring auf oder in einer Welle zu modellieren. Die Bedingung kann starr sein oder es kann eine Steifigkeit definiert werden. Für die axialen Zwänge kann ein Durchmesser definiert werden, so dass er auch eine Momentenbelastung mit einer verteilten axialen Steifigkeit aufnimmt. Die zylindrische Randbedingung sollte auf der inneren Welle definiert werden.

Cylindrical constraint

Name

Position x  mm

Connect to housing

Width b  mm

Diametral clearance Pd  mm

Radial stiffness Cr  N/mm

Consider temperature for radial clearance

Shaft is supported against torsion

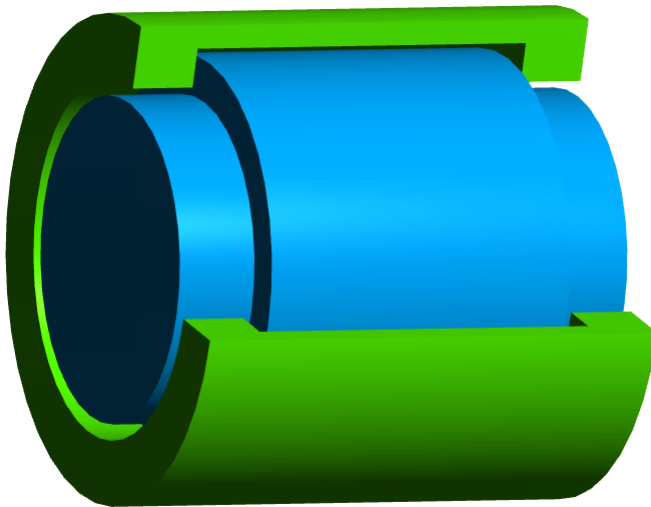
Shaft is supported axially to the left

Axial clearance PaL  mm

Diameter DL  mm

Axial stiffness CaL  N/mm

Shaft is supported axially to the right



### 2.1.2.5.13 Kontaktsteifigkeit

Die Kontaktsteifigkeit definiert nichtlineare Federn an verschiedenen Positionen des Umfangs. Sie wird hauptsächlich bei 3D-elastischen Bauteilen und elastischen Flächen eingesetzt. Das Lager kann mit Flächen vom Typ "elastisches Lager" verbunden werden. Die Federn wirken in einer Richtung normal zur Fläche, auf der sie definiert ist. Für die axiale Steifigkeit ist es wichtig, den richtigen Durchmesser zu definieren. Das Spiel ist das Spiel für eine einzelne Feder, daher basiert es für einen radialen Kontakt auf dem Radius und nicht auf dem Durchmesser.

Das Steifigkeitsgesetz kann in einer Tabelle mit Kräften für verschiedene Verschiebungen definiert werden. Die Tabelle muss mit den Werten (0, 0) beginnen. Für Verschiebungen, die größer als die letzten Werte sind, wird die Steifigkeit sehr groß.

Die Positionen der Federn können über eine Winkelposition definiert werden. Wenn das Spiel nicht global definiert ist, kann für jede Feder ein eigenes Spiel definiert werden. Die ★-Schaltfläche ermöglicht es, die Tabelle mit äquidistanten Federn zu füllen.

v
Contact stiffness

Name

Position x  mm

Connect to housing v

Clearance C  mm

Diameter D  mm

Definition of stiffness

|   | u [mm] | F [N] |
|---|--------|-------|
| 1 | 0      | 0     |
| 2 | 1      | 500   |
| 3 | 2      | 2000  |

Definition of positions

|   | $\varphi$ [°] |
|---|---------------|
| 1 | 0             |
| 2 | 90            |
| 3 | 180           |
| 4 | 270           |

### 2.1.2.5.14 Anregungen

Anregungen können für Randbedingungen definiert werden, die mit der starren Umgebung verbunden sind. Sie werden bei der Berechnung der harmonischen Antwort berücksichtigt.



**Housing:S1**

Base excitation

|   | f [Hz] | phase [°] | ux [mm] | uy [mm] | uz [mm] | rx [rad] | ry [rad] | rz [rad] |
|---|--------|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 100    | 0         | 0       | 0.001   | 0       | 0        | 0        | 0        |

Excitation based on shaft rotation

|   | h | phase [°] | ux [mm] | uy [mm] | uz [mm] | rx [rad] | ry [rad] | rz [rad] |
|---|---|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 1 | 0         | 0       | 0.001   | 0       | 0        | 0        | 0        |

OK Cancel

Es können mehrere Typen von Anregungen berücksichtigt werden:

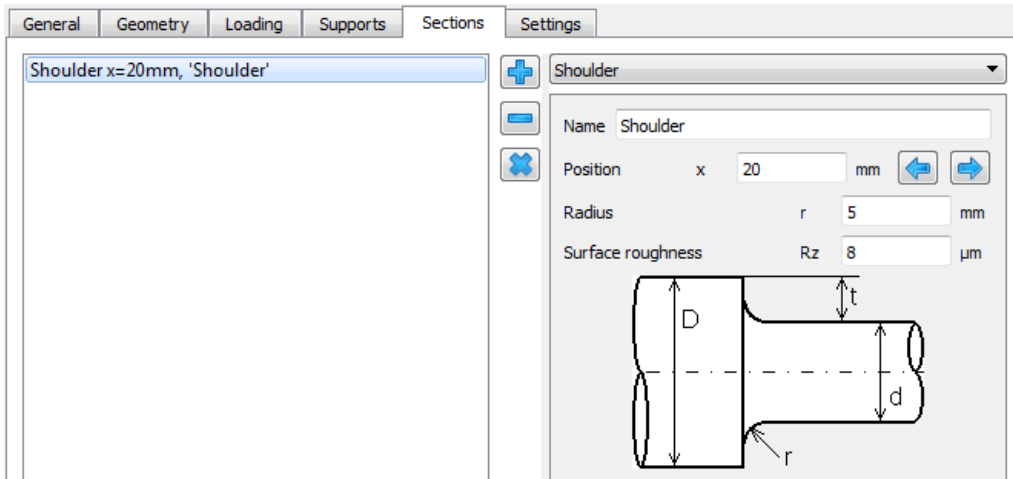
- Eine Fusspunkterregung ist eine harmonische Verschiebung oder Rotation des Knotens in der starren Umgebung. Sie muss durch Angabe einer Frequenz definiert werden. Sie könnte für Vibrationen des Fundamentes verwendet werden.
- Eine Anregung auf Basis der Wellenrotation wird mit der Welle rotieren. Sie kann zur Modellierung von Rundheitsfehlern verwendet werden. Es wird ein Faktor für die Harmonische definiert und ein Faktor von eins ist eine Anregung mit der Wellenrotation.
- Eine Anregung basierend auf Innenringrotation kann für Wälzlager bei starren Lagerringen definiert werden. Auch hier wird eine Harmonische definiert und die Anregung rotiert mit dem Innenring. Für
- Eine Anregung basierend auf Aussenringrotation kann für Wälzlager bei starren Lagerringen definiert werden. Auch hier ist eine Harmonische definiert, und die Anregung rotiert mit dem Außenring.
- Eine Anregung basierend auf Käfigrotation kann für Wälzlager bei starren Lagerringen definiert werden. Auch hier wird eine Harmonische definiert, und die Anregung rotiert mit der Drehzahl des Käfigs. Die Käfigdrehzahl wird anhand des Nenndruckwinkels berechnet.

### 2.1.2.6 Querschnitte

Mit "Querschnitte" können mehrere Querschnitte für die Festigkeitsberechnung definiert werden. Ein Typ von Querschnitten ist der "Dokumentationspunkt", der ohne das Modul zur Festigkeitsberechnung verwendet werden kann. In diesem Fall

werden nur Verschiebungen und Kräfte im Protokoll dokumentiert, eine Festigkeitsberechnung nach DIN 743 wird nicht durchgeführt.

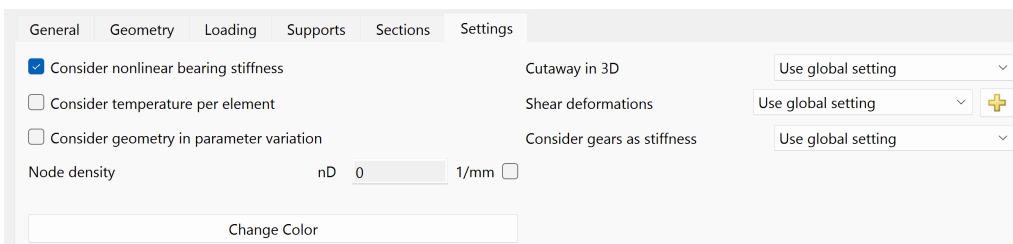
Je nach gewähltem Typ des Querschnittes sind mehrere Eingaben notwendig, um Details der Kerbwirkung zu definieren. Es werden alle Typen aus (DIN 743-2, Dezember 2012) unterstützt.



Der "Dokumentationspunkt" hat die Einstellung "Steifigkeit berechnen". Ist die Option aktiviert, wird die Steifigkeit in 6 Freiheitsgraden für diesen Punkt der Welle in der Resultateübersicht und im Protokoll angezeigt. Die Steifigkeit ist der Kehrwert der Hauptdiagonalen der Nachgiebigkeitsmatrix der auf diesen Punkt reduzierten Systemsteifigkeit. So ist z.B.  $c_{xx}=dF_x/d_{ux}$  für konstante andere Kräfte und Momente  $F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ .

### 2.1.2.7 Einstellungen

Einige Einstellungen können für eine einzelne Welle eingegeben werden:



#### 2.1.2.7.1 Nichtlineare Wälzlagersteifigkeit berücksichtigen

Standardmäßig wird die nichtlineare Wälzlagersteifigkeit für Wälzlager berücksichtigt. Bei großen Systemen kann diese Option gelöscht werden, um die Berechnungszeit zu verkürzen. Ohne diese Option werden die Lager als starr betrachtet. Die Option ist für jede Welle verfügbar, so dass sie dort eingestellt werden kann, wo die Steifigkeit der Lager wichtig ist, und bei anderen Wellen gelöscht werden kann.

Wenn Lager mit Druckwinkel verwendet werden, sollte die nichtlineare Steifigkeitsmatrix berücksichtigt werden, um die Kopplung von Axial- und Radiallasten zu berücksichtigen.

#### 2.1.2.7.2 Temperatur pro Element berücksichtigen

Durch Setzen dieses Flags kann der Anwender für jedes an der Aussengeometrie erzeugte Element eine Temperaturdifferenz ' $\Delta T$ ' ( $\pm$ ) auf die zuvor auf der Registerkarte 'Allgemein' eingestellte Temperatur addieren. Die Temperaturdifferenz kann auch innerhalb eines Lastkollektivs variiert werden.

#### 2.1.2.7.3 Geometrie in der Parametervariation berücksichtigen

Wenn diese Option gesetzt ist, kann die Geometrie dieser Welle in der Parametervariation variiert werden. Sie ist standardmäßig nicht aktiv, da sie bei Getrieben mit vielen Wellen zu vielen Eingabeparametern in der Parametervariation führen kann.

#### 2.1.2.7.4 Knotendichte


Der Anwender kann eine Knotendichte für das FEA-Modell überschreiben. Bei einer statischen linearen Berechnung fügt die Software zusätzliche Knoten für eine verbesserte Auflösung der Diagramme hinzu. Ergebnisse werden nur für konische Geometrien beeinflusst, nicht für zylindrische Elemente. Bei der Modalanalyse kann die Anzahl Knoten einen Unterschied ausmachen.

Eine Verringerung der Knotendichte verkürzt die Berechnungszeit.

#### 2.1.2.7.5 Schnittdarstellung in 3D

Für jede Welle kann die Einstellung für Schnittdarstellung in 3D unabhängig von der allgemeinen Option auf der Registerkarte 'Einstellungen für Darstellung' festgelegt werden.

#### 2.1.2.7.6 Schubverformungen

Hier kann festgelegt werden, welcher Wert des Schubkorrekturfaktors ( $\kappa$ ) für die ausgewählte Welle berücksichtigt wird. Standardmäßig wird der in den globalen Einstellungen definierte Wert verwendet. Die anderen Ansätze für die Berechnung von  $\kappa$  können aus der Dropdown-Liste ausgewählt werden. Wenn 'Eigene Eingabe für  $\kappa$ ' ausgewählt ist, muss der Anwender die -Schaltfläche drücken, um den gewünschten Wert einzugeben.

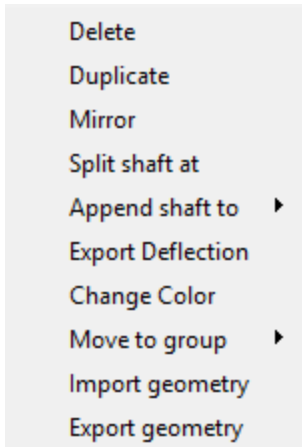
#### 2.1.2.7.7 Zahnräder als Steifigkeit berücksichtigen

Für jede Welle kann die Einstellung zur Berücksichtigung von Zahnrädern als Steifigkeit individuell eingestellt werden, unabhängig von der globalen Einstellung bei [Zahnräder als Steifigkeit berücksichtigen](#) <sup>73</sup>.

### 2.1.2.7.8 Farbe ändern

Die Farbe der Welle kann geändert werden. Die Transparenz wird nur in der 3D-Ansicht berücksichtigt, nicht in der 2D-Ansicht.

### 2.1.2.8 Optionen im Systembaum




Das Kontextmenü mit der rechten Maustaste auf der Welle im Systembaum bietet einige zusätzliche Optionen:

- "Löschen" löscht die Welle.
- "Duplizieren" dupliziert die Welle. Dies ist hilfreich, wenn mehrere ähnliche Wellen in einem Getriebe benötigt werden.
- "Spiegeln" spiegelt die Wellengeometrie und die Positionen der Kräfte und Lager. Die Orientierung von Kräften und Lagern wird nicht verändert.
- "Welle teilen bei" fragt nach einer Position auf der Welle und teilt die Welle in zwei Wellen auf.
- "Welle anfügen an" fügt die Welle an eine andere Welle der gleichen Gruppe an.
- "Verformung exportieren" exportiert eine \*.csv Datei für die Verformung einer Welle. Die "Resultatetabellen" im Menü Protokoll enthalten ebenfalls diese Informationen, aber für alle Wellen statt nur für eine.
- Mit "Farbe ändern" kann die Farbe einer Welle geändert werden.
- "In Gruppe verschieben" ermöglicht es, eine Welle in eine andere Gruppe zu verschieben. Dies wird oft nach "Duplizieren" verwendet.
- "Geometrie importieren" ermöglicht die Eingabe der Wellengeometrie als 2D DXF oder 3D STEP, siehe unten für Details.

- "Geometrie exportieren" exportiert die Welle als 3D STEP oder IGES. Zahnräder und Lager werden beim Exportieren mit einbezogen.

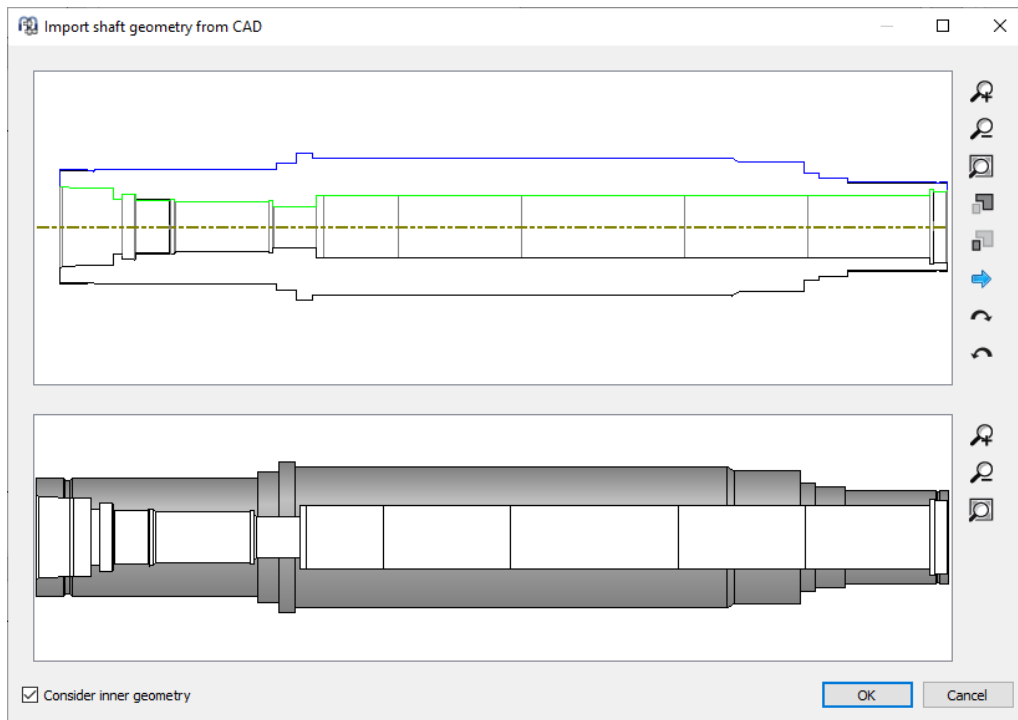
#### 2.1.2.8.1 Wellengeometrie importieren aus CAD-Dateien

Die Wellengeometrie kann aus 2D-DXF- oder 3D-STEP-Dateien importiert werden. Im Falle einer 3D-STEP-Datei wird ein Schnitt des Bauteils in der x/y-Ebene, der x/z-Ebene und der y/z-Ebene durchgeführt und die resultierenden Kanten werden wie bei der DXF-Eingabe berücksichtigt. Freistiche im CAD-Modell können zu vielen importierten Elementen führen.

Für die DXF-Datei kann eine normale Zeichnung ausgewählt werden. Mit der linken Maustaste kann eine Geometrie ausgewählt werden. Die ausgewählte Geometrie kann entweder gelöscht oder ausgeschnitten werden. So kann die richtige Geometrie für den Import ausgewählt werden. Die -Schaltfläche ermöglicht es, durch verschiedene Ebenen innerhalb der DXF-Datei oder durch verschiedene Bauteile oder Querschnitte beim STEP-Import zu wechseln.

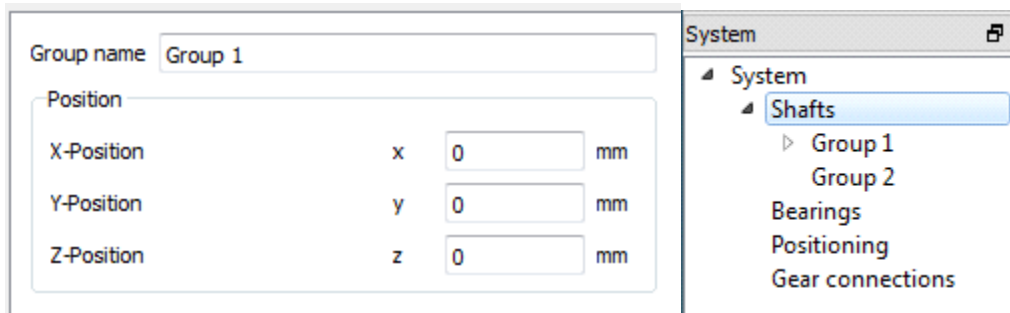
Soll auch eine innere Geometrie importiert werden, muss das Flag am unteren Rand des Fensters aktiviert werden.

Die DXF-Datei enthält nur Linien. Manchmal kann die Software die richtigen Verbindungen zwischen diesen Linien nicht erkennen. In diesem Fall können die falsch verwendeten Linien markiert und gelöscht werden. Im unteren Teil des Fensters wird die aktuell erkannte Geometrie-Eingabe angezeigt. Durch Markieren einiger Segmente mit Hinterschnitt und Drücken der Taste "c" kann der Hinterschnitt entfernt werden. Die Auswahl von zwei Linien mit einer Lücke und das Drücken der Taste "c" ermöglicht das Schließen der Lücke. Durch Markieren von zwei Linien mit demselben axialen Anfangs- und Endpunkt und Drücken der Taste "c" werden vertikale Linien hinzugefügt, die zur Positionierung der Achse dienen.



### 2.1.3 Wellen-Gruppen

Für Systeme mit Wellen, die nicht koaxial sind, müssen Wellengruppen hinzugefügt werden. Für jede Gruppe kann eine Position definiert werden.



Die Positionen können auch von der Software berechnet werden, wenn für die Positionierung Bedingungen verwendet werden. Siehe unten.


Es gibt drei Arten von Gruppen:

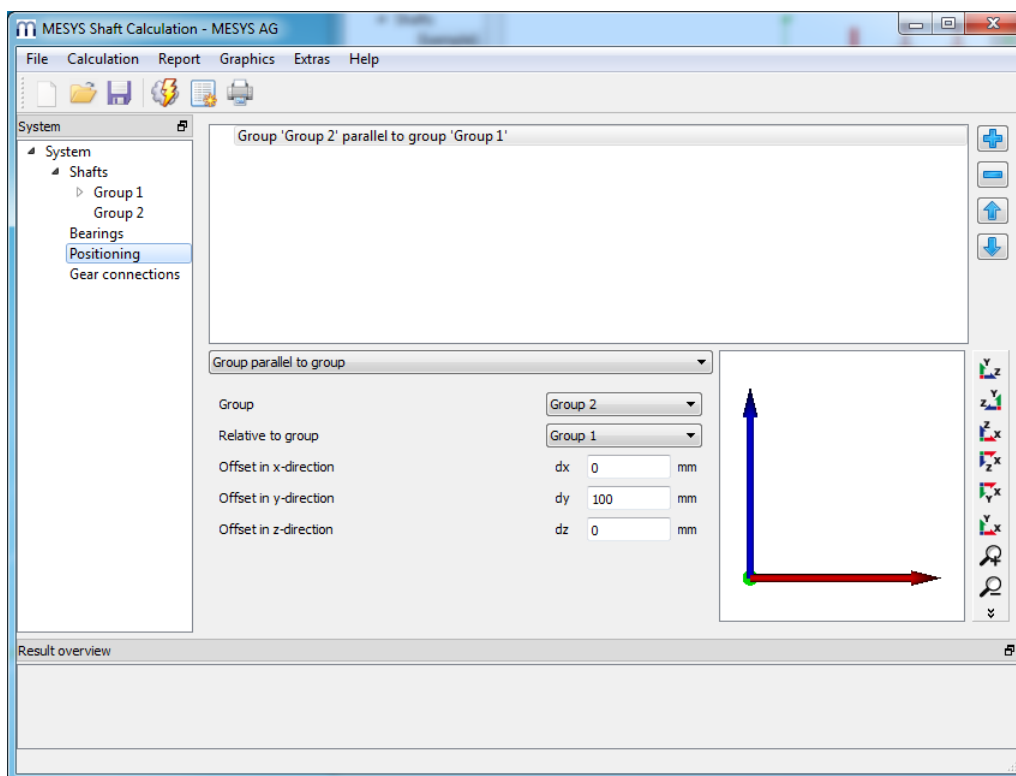
1. Standardgruppe: Die Standardgruppe kann eine beliebige Position haben und kann Untergruppen enthalten. Wellen in verschiedenen Gruppen können nicht durch Lager verbunden werden.
2. Koaxiale Gruppe: Die koaxiale Gruppe kann nur in axialer Richtung relativ zu ihrer übergeordneten Gruppe positioniert werden. Wellen in verschiedenen koaxialen Gruppen können durch Wälzlager oder andere Lager verbunden werden.

- Planetengruppe: Eine Planetengruppe wird benötigt, um Planetenstufen zu definieren. Neben der Position kann auch die Anzahl Planeten festgelegt werden. Die Wellen einer Planetengruppe drehen sich um einen Planetenträger. Die durch diese Rotation entstehenden Zentrifugalkräfte werden berücksichtigt. Bei Lagern und anderen Randbedingungen in Planetengruppen wird das Ergebnis für jeden Planeten in den Resultaten angezeigt.

#### 2.1.4 Positionierung

Werden mehrere Gruppen verwendet, wird im Systembaum ein zusätzlicher Eintrag für die Positionierung angezeigt.

Auf der Seite "Positionierung" können Bedingungen für Gruppenpositionen definiert werden. Neue Bedingungen werden mit der -Schaltfläche hinzugefügt, sie können mit den Pfeilen sortiert werden. Die Bedingungen werden einmal pro Berechnung ausgewertet, daher kann die Reihenfolge wichtig sein.




Es stehen verschiedene Bedingungen zur Verfügung:

- Gruppe parallel zu Gruppe: Geben Sie einen Versatz zwischen zwei Gruppen an.
- Gruppe aufgrund Zahnradpaar: Die ausgewählte Gruppe wird entsprechend dem ausgewählten Zahnradpaar positioniert. Es muss ein zusätzlicher Winkel angegeben werden, Null ist für einen Achsabstand auf der y-Achse.

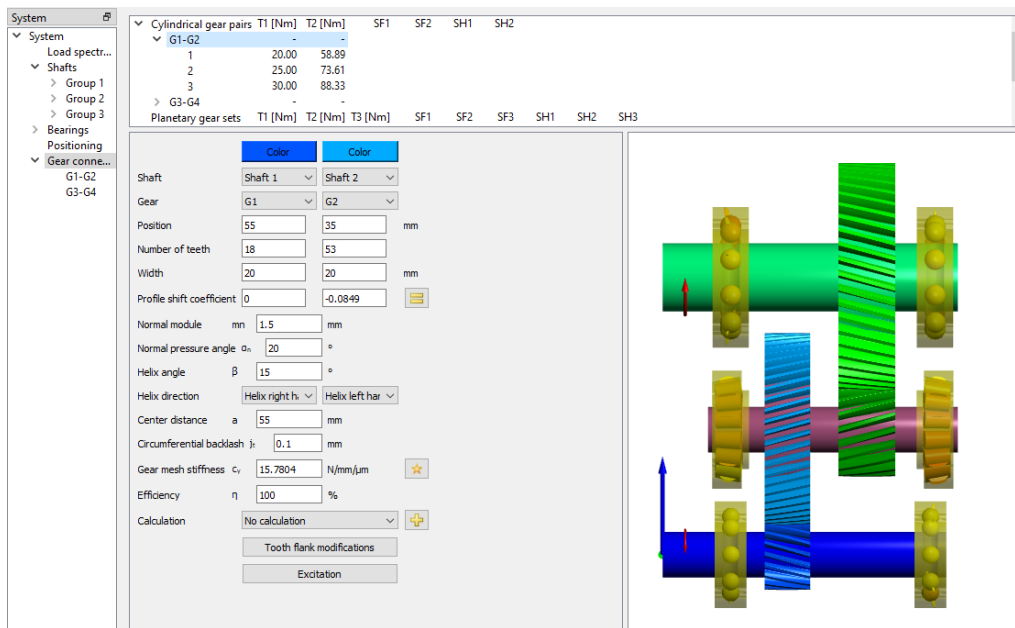
Ein axialer Versatz kann eingegeben werden, wenn die Zentren der Zahnräder nicht axial fluchten sollen.

- Gruppe aufgrund zweier Zahnradpaare: Eine Gruppe wird entsprechend den Achsabständen zweier Zahnradpaare positioniert. Die axiale Position wird durch das erste Zahnradpaar bestimmt.
- Gruppe aufgrund Kegelradpaar: Eine Gruppe wird nach den Geometriedaten eines Kegelrads positioniert. Der Kontaktwinkel für die Bezugsgruppe kann definiert werden.
- Welle gemäß Zahnradpaar: Bei dieser Bedingung wird eine Welle axial verschoben, so dass die Zentren der Zahnräder fluchten. Ein axialer Versatz kann optional eingegeben werden.
- Zahnrad aufgrund Zahnradpaar: Mit dieser Bedingung wird ein Zahnrad axial verschoben, so dass es mit seinem Gegenrad fluchtet. Auch hier kann optional ein axialer Versatz eingegeben werden.
- Gruppe aufgrund Schneckenradpaar: Die gewählte Gruppe wird entsprechend dem gewählten Schneckenradpaar positioniert. Es muss ein zusätzlicher Winkel angegeben werden, Null steht für einen Achsabstand auf der y-Achse. Axial zur Schnecke kann ein Versatz eingegeben werden.

### 2.1.5 Zahnradverbindungen

Wenn mehrere Gruppen definiert sind, wird eine Seite für Zahnradverbindungen angezeigt. Zahnradverbindungen können mit der -Schaltfläche hinzugefügt werden. Die Wellen und Zahnräder, die in Kontakt stehen, können definiert werden und die Grunddaten für das Zahnradpaar werden angezeigt. Die Daten für die Zahnräder können in diesem Fenster zusätzlich zu den Eingaben an der einzelnen Welle modifiziert werden, aber über die Verbindung können die Daten für beide Zahnräder gleichzeitig geändert werden.





Das Drehmoment jedes Zahnradpaares wird in der oberen Liste angezeigt; die Sicherheitsfaktoren werden angezeigt, wenn eine Verbindung zu einem Zahnradberechnungsprogramm eingerichtet ist.

Mit einem Klick auf die Punkte für die Zahnradpaare im Systembaum links kann das Zahnradberechnungsprogramm gestartet werden, um Details für das Zahnradpaar zu definieren. Die Wellenberechnung gibt die grundlegende Zahnradgeometrie ( $z$ ,  $b$ ,  $x$ ,  $m_n$ ,  $\alpha_n$ ,  $\beta$ ,  $x$ ,  $a$ ) und die Belastung an die Zahnrad-Berechnung weiter; sie liest die gleichen Geometriedaten und die Sicherheitsfaktoren zurück. Die Farben der Zahnräder können durch Anklicken der im Bild gezeigten Schaltfläche "Farbe" geändert werden.

Wenn ein Zahnrad in einer Verbindung berücksichtigt wird, wird seine Drehmoment-Eingabe im entsprechenden Eingabefenster unter der Seite 'Belastung' versteckt.

### 2.1.5.1 Stirnradpaare

Für Stirnradpaare ermöglicht eine Auslegungsschaltfläche die Auswahl der Eingriffssteifigkeit nach ISO 6336-1. Es kann entweder  $c_{\gamma\alpha}$  oder  $c_{\gamma\beta}$  gewählt werden. Für die Berechnung der Eingriffssteifigkeit wird angenommen, dass die Faktoren  $C_B$  und  $C_R$  gleich eins sind.

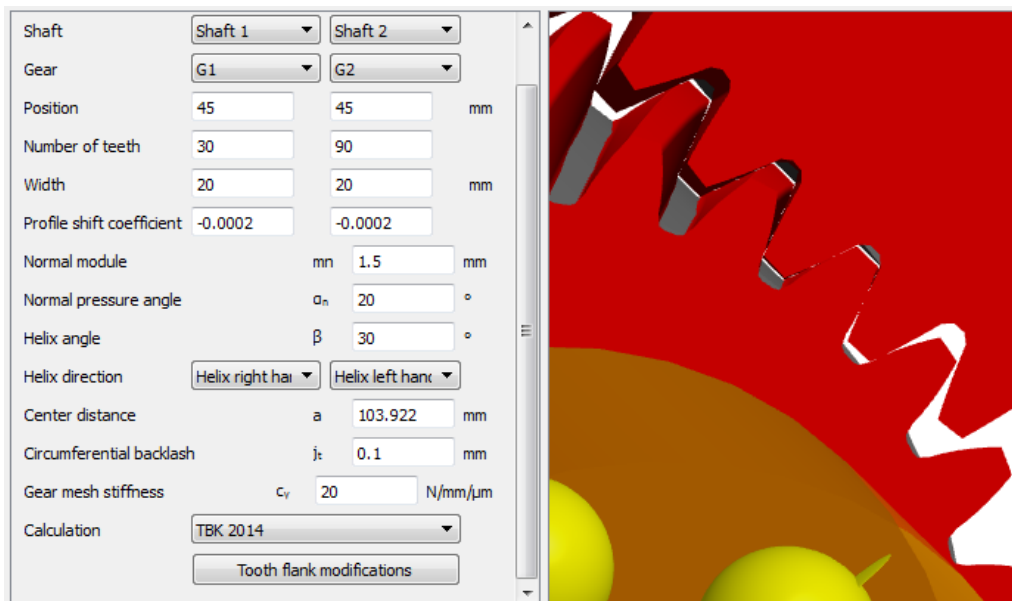
Mit dem  $+$ -Button hinter der Auswahl des Berechnungsprogramms kann ein Breitenlastfaktor an das Zahnradberechnungsprogramm übergeben werden. Der Breitenlastkoeffizient wird wie folgt berechnet:

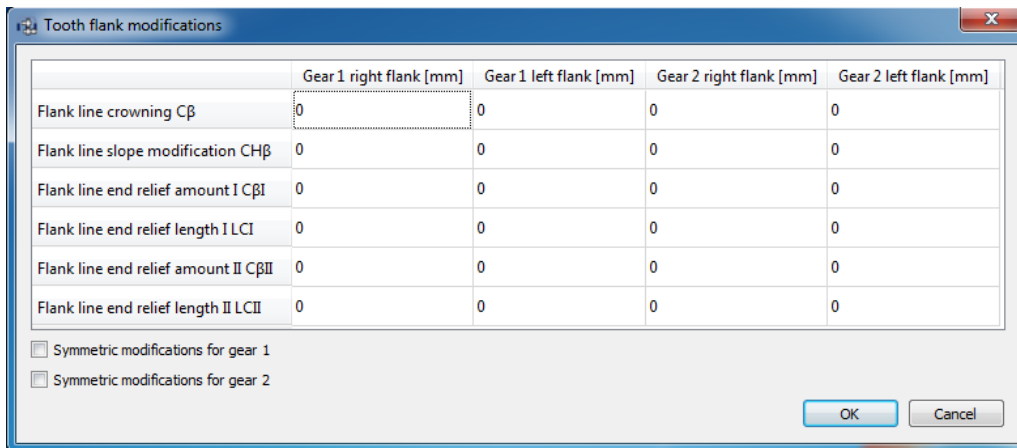
$$K_{H\beta} = \max(K_{H\beta,min}; K_{H\beta,add} + \frac{w_{max}}{w_{avg}}; \frac{w_{max, fma}}{w_{avg}})$$

Wenn ein Wert für  $f_{ma}$  definiert ist, wird er für die Berechnung der maximalen Linienlast nur auf der Grundlage der Eingriffssteifigkeit bei konstanten Kippwinkeln verwendet.

### 2.1.5.1.1 Flankenlinien-Modifikationen

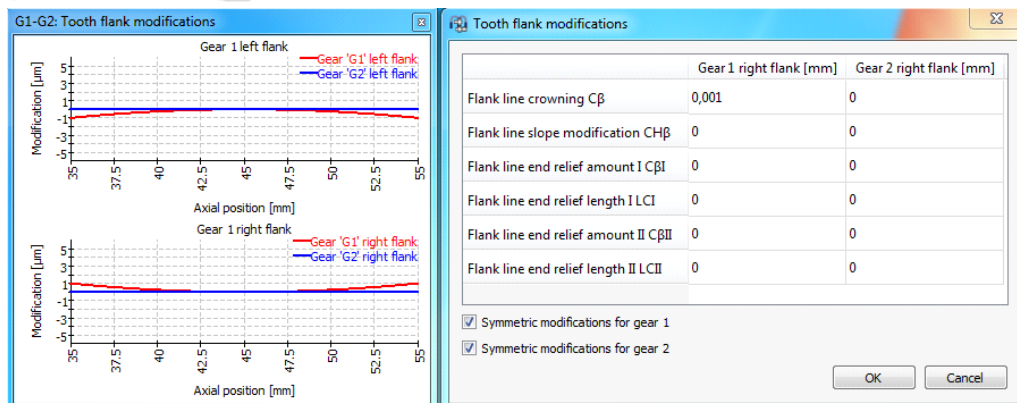
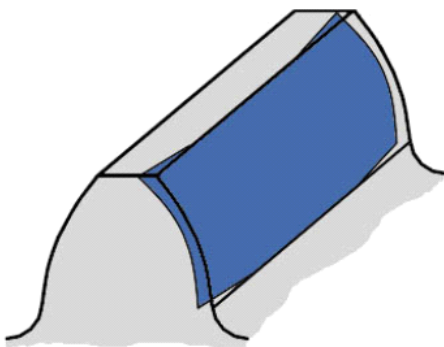
Mit dem Ziel, einen optimalen Zahnflankenkontakt zu gewährleisten, können die Zähne von Zahnradpaaren basierend auf drei verschiedenen Ansätzen gemäß der Norm (ISO 21771:2007, September 2007) über eine Flankenlinien-Balligkeit, Flankenlinien-Winkelmodifikation und Flankenlinien-Endrücknahme korrigiert werden. Wenn Sie auf der Seite "Zahnradverbindungen" auf "Flankenlinien-Modifikationen" klicken, öffnet sich ein Pop-up-Fenster, in dem der Anwender die entsprechenden geometrischen Daten zu diesen Ansätzen eingeben kann. Für jedes Zahnrad ist es möglich, entweder symmetrische oder unsymmetrische Modifikationen vorzunehmen, indem die verfügbaren Haken am unteren Rand gesetzt bzw. gelöscht werden. Bei Aktivierung einer unsymmetrischen Flanken-Modifikation wird die entsprechende Datenspalte im Fenster hinzugefügt.





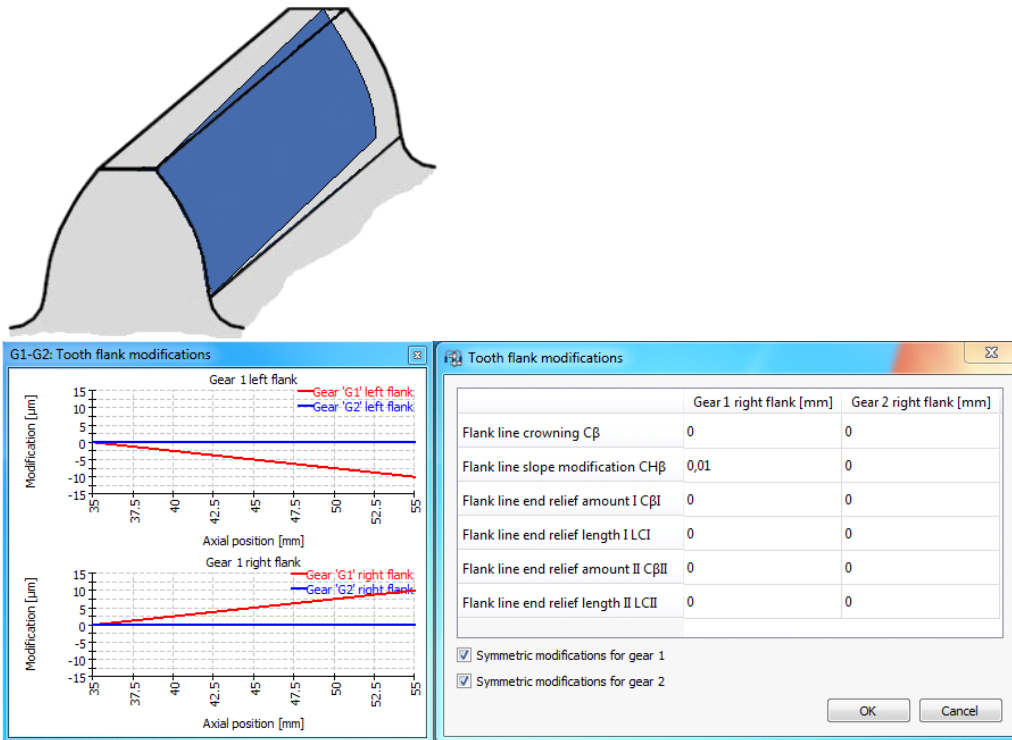
### 2.1.5.1.1 Flankenlinien-Balligkeit

Sie besteht aus einer Rücknahme, die auf einem Kreisbogen basiert, der die Mitte der Zahnbreite tangiert. Der Betrag der Rücknahme, der vom Ende des Zahns aus gemessen wird, muss angegeben werden.



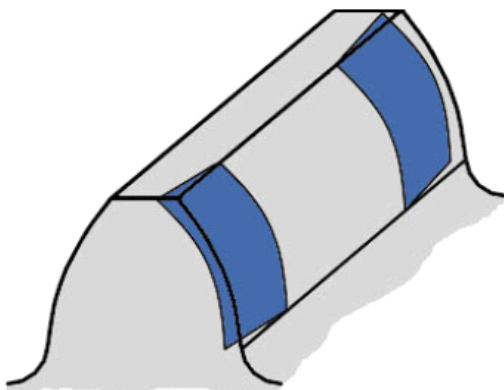
## 2.1.5.1.1.2 Flankenlinien-Winkelmodifikation

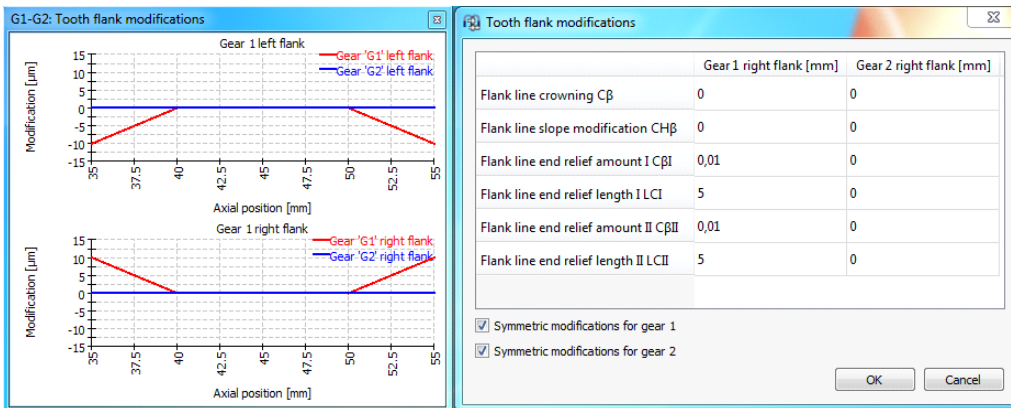
Sie besteht aus einer zunehmenden linearen Rücknahme über die gesamte Breite des Zahns. Daher muss die Steigung der Rücknahme von einem Ende zum anderen angegeben werden.



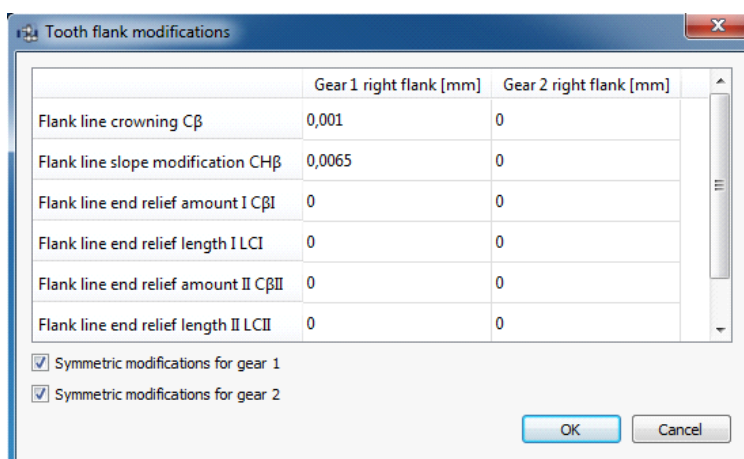
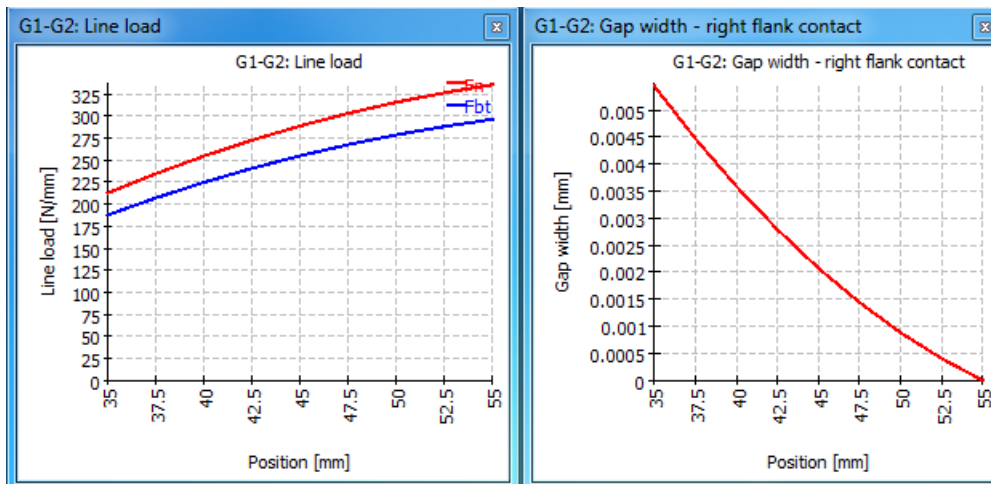
## 2.1.5.1.1.3 Flankenlinien-Endrücknahme

Sie besteht aus einer zunehmenden linearen Rücknahme ab einem bestimmten Punkt bis zum Ende der Flankenlinie. Der Rücknahmebetrag und die Länge, die von beiden Enden des Zahns aus gemessen werden, müssen angegeben werden.

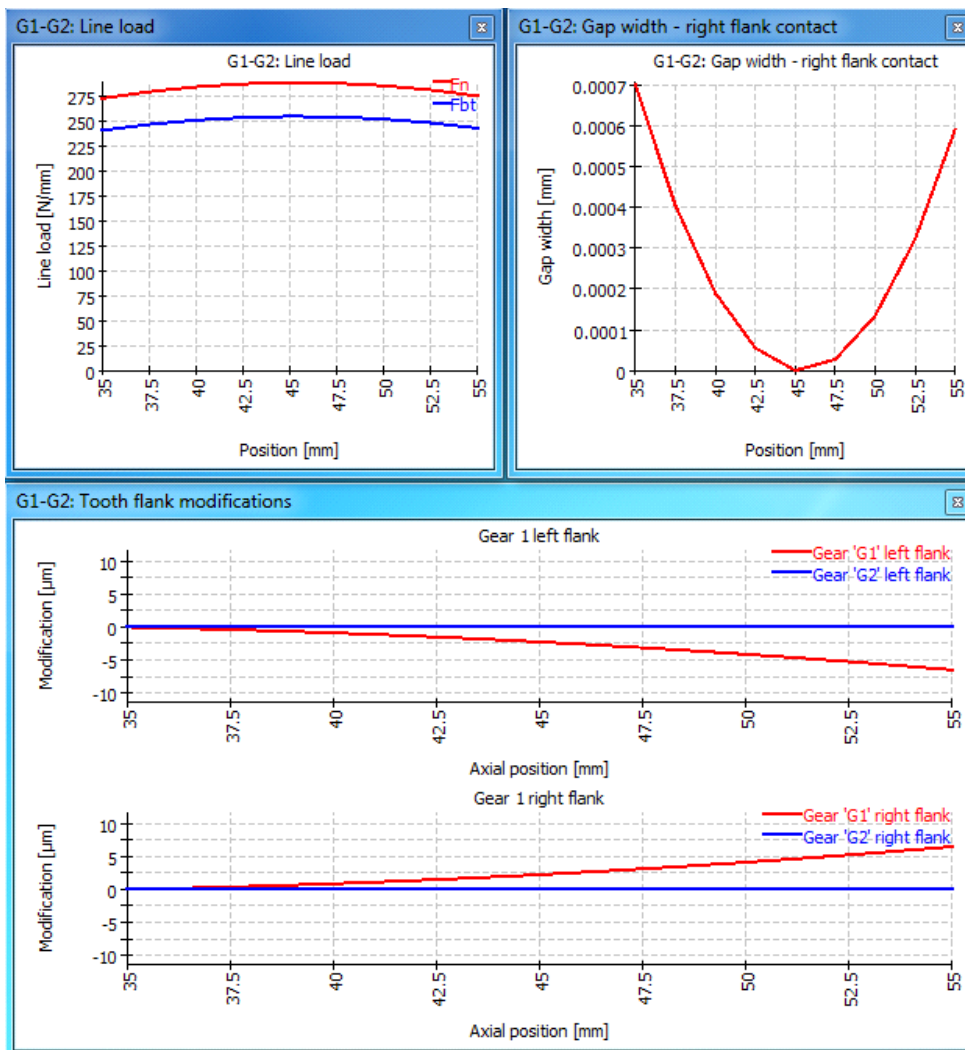




Alles in allem kann der Anwender die Grafiken zur Linienlast und Spaltweite als Orientierungshilfe nutzen, um einen Vorschlag für die Flankenkorrektur zu erstellen. Wenn wir zum Beispiel von einer solchen Bedingung für den Zahneingriff ausgehen:



Und wir wenden eine Kombination aus Flankenlinien-Balligkeit und Flankenlinien-Winkelmodifikation an, so hilft dies erheblich, eine homogene Linienlast zu erhalten, wie in den folgenden Bildern gezeigt:



### 2.1.5.1.2 Anregungen

Für Stirnradpaare können drei Typen von Anregungen definiert werden:

- Eine Zahneingriffsanregung wird auf der Eingriffslinie definiert. Teilungsfehler führen zu Anregungen, die auf den Zahneingriffsfrequenzen basieren. Höhere Ordnungen können über die Eingabe von Harmonischen definiert werden.
- Es kann eine Anregung basierend auf Rundheitsfehlern des Zahnrads 1 definiert werden. Hier wird eine Variation des Radius verwendet. Die Basisfrequenz ist die Drehzahl des Zahnrads.
- Eine Anregung basierend auf Rundheitsfehlern des Zahnrads 2 kann wie für Zahnrad 1 definiert werden.

Die Anregungen werden bei der Berechnung der Harmonischen Antwort berücksichtigt. Sie haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse der quasistatischen Berechnung und beeinflussen nicht die Sicherheitsfaktoren für Zahnräder.

Excitation - G1-G2

Mesh excitation

|   | h | phase [°] | Δpt [mm] |
|---|---|-----------|----------|
| 1 | 1 | 0         | 0.005    |

Gear 1 excitation

|   | h | phase [°] | Δr [mm] |
|---|---|-----------|---------|
| 1 | 1 | 0         | 0.005   |

Gear 2 excitation

|  | h | phase [°] | Δr [mm] |
|--|---|-----------|---------|
|--|---|-----------|---------|

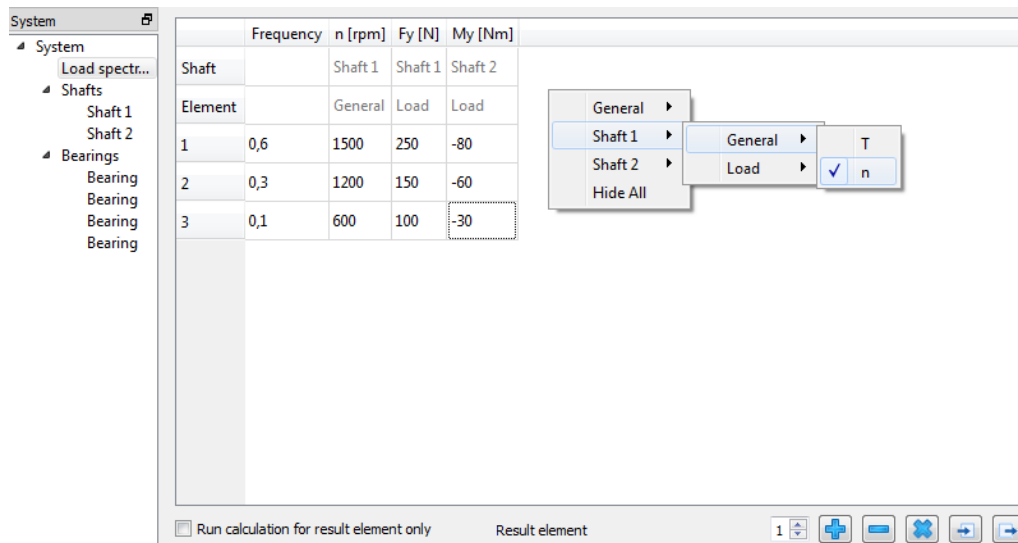
OK Cancel

### 2.1.5.2 Planetenstufen

Planetenradsätze können durch Auswahl des Paares 'Sonne-Planet' und des Paares 'Planet-Ring' definiert werden. Diese Einstellung wird nur verwendet, um die Zahnradparameter und -lasten an ein Zahnradberechnungsprogramm zu übergeben. Ohne ein externes Zahnradberechnungsprogramm ist es ausreichend, nur die Zahnradpaare zu definieren.

### 2.1.6 Berechnung mit Lastkollektiv

Wenn das Flag für die Berechnung mit Lastkollektiv auf der Seite 'System' gesetzt ist, wird im Systembaum ein zusätzlicher Eintrag mit dem Titel Lastkollektiv angezeigt.



Standardmäßig ist die Tabelle leer. Es wird nur die Spaltenüberschrift für die Lastfrequenz angezeigt. Durch einen Rechts-Klick irgendwo im Fenster können verschiedene Berechnungsparameter für die Lastfälle optional als Spaltenüberschriften hinzugefügt werden. Diese Parameter sind als "Allgemein" und "Last" klassifiziert. Die Zeilen in der Tabelle können mit der -Schaltfläche hinzugefügt und auch gelöscht werden, indem man sie markiert und die -Schaltfläche betätigt. Diese Zeilen werden "Element" genannt und werden als Lastfall berücksichtigt, in den die Werte (Eingaben), die den Parametern der Berechnung entsprechen, eingegeben werden können. Die -Schaltfläche löscht alle Eingaben in der Tabelle, auch die Elemente (Zeilen).

Sie können jede Spalte ausblenden, indem Sie mit der rechten Maustaste auf die Kopfzeile klicken und "Verstecken" wählen. Für alle Lastkomponenten, die nicht in der Tabelle angezeigt werden, wird der Standardwert verwendet.

Mit Hilfe der -Schaltfläche wird das Lastkollektiv aus einer Datei eingelesen. Die Spalten in der Datei müssen in der gleichen Reihenfolge und Einheit wie in der Tabelle stehen. Ebenso kann eine erstellte Lastkollektiv-Tabelle mit der entsprechenden -Schaltfläche exportiert werden.

Die Standard Grafiken für die Verformung werden für das ausgewählte "Resultierende Element" angezeigt. Für dieses "Resultierende Element" werden auch die Eigenfrequenzen berechnet.

### 2.1.6.1 Berechnung für nur ein Lastkollektiv-Element

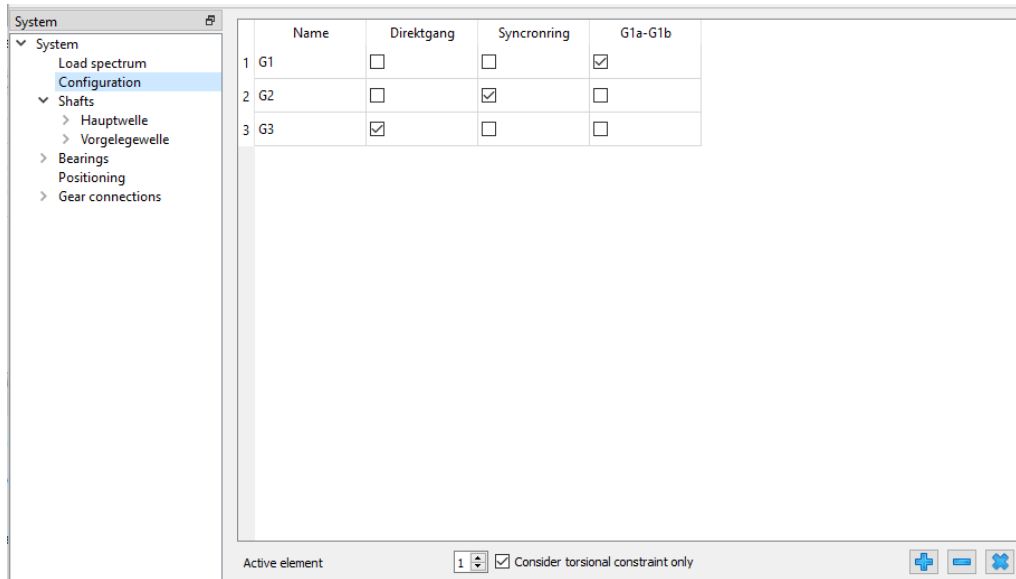
Es ist möglich, die Berechnung nur für ein Element (Lastfall) durchzuführen, wenn der Anwender das Flag 'Berechnung nur für gewähltes Element durchführen' setzt. Der gewünschte Lastfall wird entweder über die Pfeile des kleinen Kästchens neben der -Schaltfläche oder durch direkte Eingabe der Nummer des Elements ausgewählt. Die Grafiken werden nur für das ausgewählte Element angezeigt.




Dies ermöglicht es, die Lastkollektiv-Berechnung als Eingabeoberfläche für unabhängige Lastfälle zu verwenden, die unabhängig voneinander berechnet werden.

## 2.1.7 Konfigurationen

Konfigurationen können auf der ersten Eingabeseite unter Einstellungen aktiviert werden, wenn mehrere Gruppen definiert sind.



Mit der rechten Maustaste können zusätzliche Spalten in die Ansicht eingefügt werden. Verfügbar sind Zahnradverbindungen, Kupplungen, allgemeine Randbedingungen, Stirnradverbindungen und zylindrische Randbedingungen. Die Bedingungen sind nur verfügbar, wenn die Torsion in der Bedingung festgehalten wird.

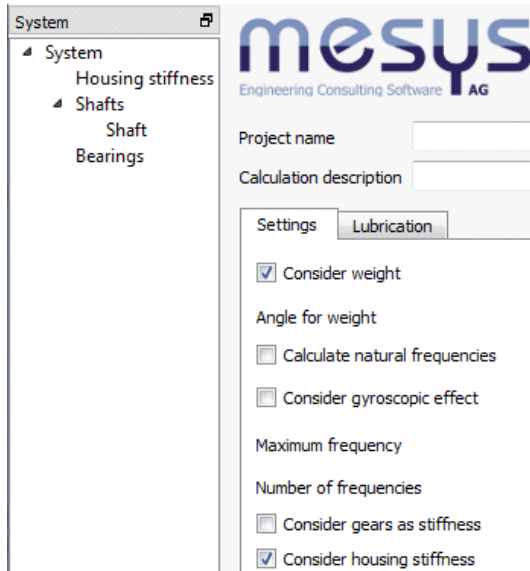
Mit der -Schaltfläche können Zeilen hinzugefügt werden und mit dem Kontrollkästchen können die aktiven Elemente für jede Konfiguration ausgewählt werden.

Wenn die Option "Nur Torsionsfreiheitsgrad berücksichtigen" aktiv ist, wird durch das Löschen der Flags für die Randbedingungen nur der Torsionsfreiheitsgrad der allgemeinen Randbedingungen deaktiviert, Randbedingungen in allen anderen Richtungen sind davon nicht betroffen. Wenn die Option nicht aktiv ist, werden die Randbedingungen für alle Richtungen deaktiviert.



Die aktive Konfiguration kann am unteren Rand des Fensters oder innerhalb eines Lastkollektivs ausgewählt werden.

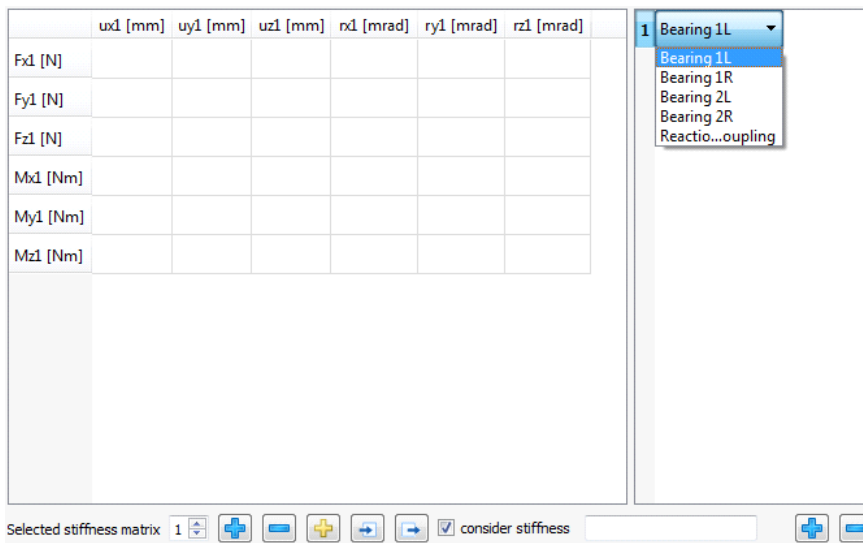
### 2.1.8 Gehäuse-Steifigkeitsmatrix

Es kann eine symmetrische Steifigkeitsmatrix zwischen den Randbedingungen (nur die mit dem Gehäuse verbundenen) und dem Gehäuse definiert werden.



Um diese Option zu nutzen, muss auf der Registerkarte 'Einstellungen' das entsprechende Flag 'Gehäusesteifigkeit berücksichtigen' aktiviert werden, das bei der Auswahl von 'System' im Softwarebaum angezeigt wird.

Mit der -Schaltfläche, die sich unter der Matrix befindet, kann ein beliebiger weiterer Typ von Steifigkeitsmatrix erstellt werden, der mit einer Nummer referenziert wird, die im Feld 'Gewählte Steifigkeitsmatrix' angezeigt wird. Eine oder alle dieser erstellten Matrizen können jederzeit für die Berechnung ausgeschlossen werden, indem das Kennzeichen 'Steifigkeit berücksichtigen' gesetzt wird. Auf diese Weise können alle Matrixdaten beibehalten werden, auch wenn sie nicht für die Analyse verwendet werden. Falls wir doch eine der Matrizen löschen wollen, kann die -Schaltfläche dafür verwendet werden. Über das Eingabefeld können die Matrizen benannt werden und ihre Namen werden im Protokoll angezeigt.

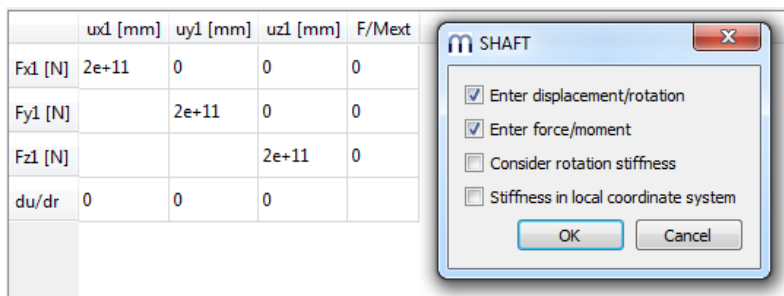


Durch einmaliges Anklicken der **+**-Schaltfläche in der rechten unteren Ecke wird ein neues nummeriertes Element im Fenster darüber aufgelistet und eine Matrix in einem größeren Fenster dargestellt. Mit einem Doppelklick auf dieses Element wird eine Dropdown-Liste angezeigt, aus der wir die zu berücksichtigende Randbedingung auswählen können. Indem wir diesen Vorgang wiederholen, können wir weitere vorhandene Lager oder Stützen in die Liste aufnehmen, so dass ihre entsprechenden Zeilen und Spalten der Steifigkeitsmatrix angezeigt und berücksichtigt werden.

|         | ux1 [mm] | uy1 [mm] | uz1 [mm] | ux2 [mm] | uy2 [mm] | uz2 [mm] |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Fx1 [N] | 2e+11    | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Fy1 [N] |          | 2e+11    | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Fz1 [N] |          |          | 2e+11    | 0        | 0        | 0        |
| Fx2 [N] |          |          |          | 1.5e+11  | 0        | 0        |
| Fy2 [N] |          |          |          |          | 1.5e+11  | 0        |
| Fz2 [N] |          |          |          |          |          | 1.5e+11  |

Alle Werte für die Steifigkeit können manuell durch Doppelklick auf die Zellen eingegeben werden oder auch als Matrix geladen werden, die manchmal aus einer Finite-Elemente-Analyse stammt, indem man die Import-Schaltfläche **↔** benutzt. Ebenso kann eine erstellte Matrix mit der entsprechenden Export-Schaltfläche **↔** exportiert werden.

Wenn wir die **+**-Schaltfläche verwenden, ermöglicht ein Pop-up-Fenster die Aktivierung von vier zusätzlichen Optionen. Wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist, können wir z.B. die Berücksichtigung der Steifigkeit der Rotation weglassen und die Möglichkeit aktivieren, für den Verbindungspunkt in jeder gewünschten Richtung eine Kraft oder ein Moment mit "Kraft/Moment vorgeben" und auch eine bestimmte Verschiebung oder Rotation mit "Verschiebung vorgeben" zu definieren.



Die Verwendung der letzten Option erlaubt es, die Steifigkeit in dem lokalen Koordinaten-System des Verbindungspunktes anstelle des globalen Koordinaten-Systems zu berücksichtigen.

### 2.1.9 3D-elastische Bauteile

Das Kontextmenü unter "Wellen" oder unter Gruppen ermöglicht das Einfügen von "3D-elastischen Bauteilen als Welle" oder "3D-elastischen Bauteilen als Gehäuse". Ein neues Bauteil wird dann im Wellen-/Gruppenbaum angezeigt.

Die 3D-elastischen Bauteile kombinieren das FEA-Balkenmodell, das für die üblichen Wellen verwendet wird, mit 3D-Volumennetzen. Die Steifigkeit der 3D-Volumenkörper wird auf eine Steifigkeitsmatrix reduziert, die dann im Solver für das Balkenmodell berücksichtigt wird. Bei der ersten Verwendung des 3D-elastischen Bauteils wird die reduzierte Steifigkeitsmatrix erzeugt, was je nach Größe des Netzes eine Weile dauern kann. Danach wird die reduzierte Steifigkeit mit der Datei gespeichert und muss nur dann neu generiert werden, wenn Material, Netz oder Auswahlen für Flächen geändert werden.

Die 3D-elastischen Bauteile werden als Steifigkeit und optional durch modale Reduktion berücksichtigt. Die Masse wird ohne modale Reduktion nicht berücksichtigt. Wärmeausdehnung und Gewicht werden berücksichtigt. Ein "3D-elastische Bauteile als Welle" muss die x-Achse als Rotationsachse haben und es kann eine Rotationsdrehzahl definiert werden. Ein "3D-elastische Bauteile als Gehäuse" kann nicht rotieren und sollte im Raum fest sein.

Ist die Option "Verschiebungen berechnen" für die 3D-elastischen Bauteile gewählt, wird bei der initialen Berechnung der Steifigkeit das Verschiebungsfeld der Fläche für jeden angeschlossenen Freiheitsgrad berechnet. Dies erhöht die anfängliche Berechnungszeit und die Dateigröße, ermöglicht aber die nachträgliche Visualisierung der deformierten Form. Dasselbe gilt für die Option "Eigenformen berechnen"; auch diese dient nur der Visualisierung.

Falls die Modalanalyse unterstützt wird, müssen das Verschiebungsfeld und die Eigenformen berechnet werden. Daher haben die Optionen "Verschiebungen

berechnen" und "Eigenformen berechnen" keinen Einfluss auf die benötigte Zeit für die Reduktion. Sie wirken sich lediglich auf die erforderliche Dateigröße aus.

Wenn die Option "quadratische Elemente für Vernetzung verwenden" aktiviert ist, werden quadratische Formfunktionen anstelle von linearen Formfunktionen verwendet. Ein Hexaeder mit acht Knoten wird dann zu einem Hexaeder mit 27 Knoten. Mit zunehmender Anzahl Knoten steigen auch die Reduktionszeit und der Speicherbedarf. Allgemein gilt, dass ein Netz zweiter Ordnung genauer ist. Es ist besser, eine größere Netzgröße und quadratische Elemente für Vernetzung zu verwenden als ein feines lineares Netz.

Beim Geometrieimport oder der parameterischen Erzeugung ist teilweise eine Option "Quadratische Elemente erzeugen" verfügbar. Wenn diese Option gewählt wird, dann wird ein Oberflächennetz mit quadratischen Elementen erzeugt. Dies braucht etwa den vierfachen Speicherbedarf des linearen Netzes, führt aber zu einer besseren Approximation der Geometrie, wenn "quadratische Elemente für Vernetzung verwenden" aktiv ist. Die Option beim Import hat nur einen Einfluss auf das Oberflächennetz, während die Option "quadratische Elemente für Vernetzung verwenden" unter "Allgemein" den Typ des 3D-Netzes bestimmt.

Ausgewählte Flächen werden auf einen Knoten reduziert (oder elastisches Lager, Zahnrad oder Kontakt) und können mit einem Stützelement verbunden werden. Die folgenden Optionen sind verfügbar:

- Es kann ein bestehendes Lager ausgewählt werden. Dieses Lager wird dann mit dem 3D-elastischen Bauteil anstelle der starren Umgebung verbunden.
- Wie für Wellen kann eine neue Randbedingung definiert werden. Bisher wird nur eine Teilmenge der verfügbaren Typen in der Wellenberechnung unterstützt. Mit ihr kann ein importiertes Gehäuse über eine Steifigkeit abgestützt werden.
- Am reduzierten Knoten kann eine Kraft hinzugefügt werden
- Es kann eine Welle ausgewählt werden. Dies führt zu einer Verbindung mit der Welle in allen sechs Freiheitsgraden. Es ist dasselbe wie das Hinzufügen eines Schweisspunktes an der Welle und die Verbindung mit dem 3D-elastischen Bauteil. Eine Welle kann für die Verbindungstypen 'Starr', 'Mittelwert' und 'Elastischer Kontakt' ausgewählt werden. Im Fall des 'elastischen Kontaktes' bleibt die Fläche zylindrisch für jede axiale Position, kann sich aber über axiale Position verformen.
- "Steifigkeit berechnen" berechnet Steifigkeitswerte für die gewählte Fläche. Eine statische Kondensation wird für diesen Zentralknoten ausgeführt.

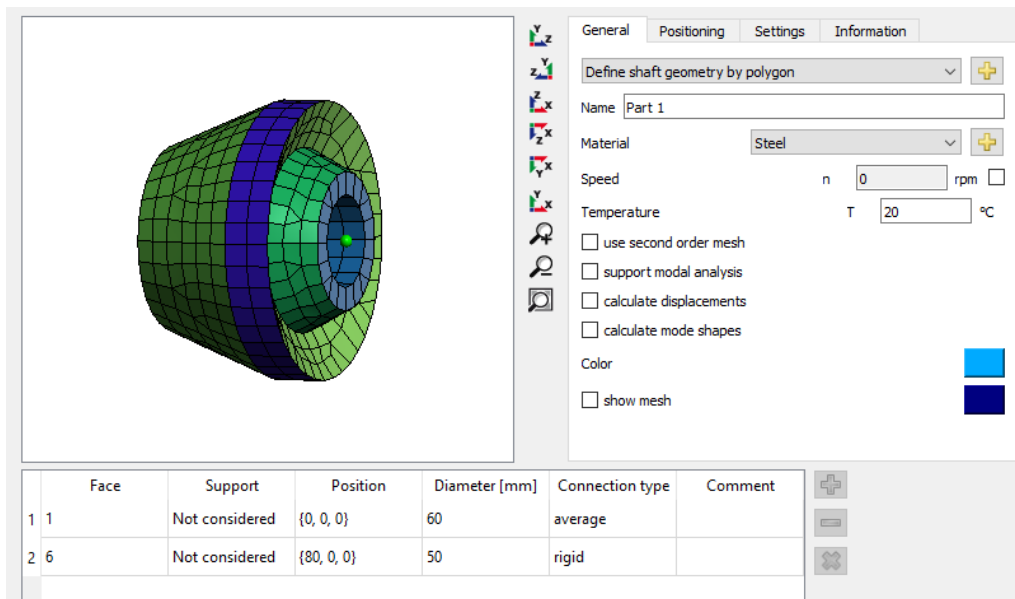
- "Als Fest eingespannt" ist für "3D-elastische Bauteile als Gehäuse" verfügbar. Dieser Knoten wird mit der starren Umgebung verbunden.


Für die Reduzierung einer Fläche stehen fünf Optionen als Verbindungstyp zur Verfügung:

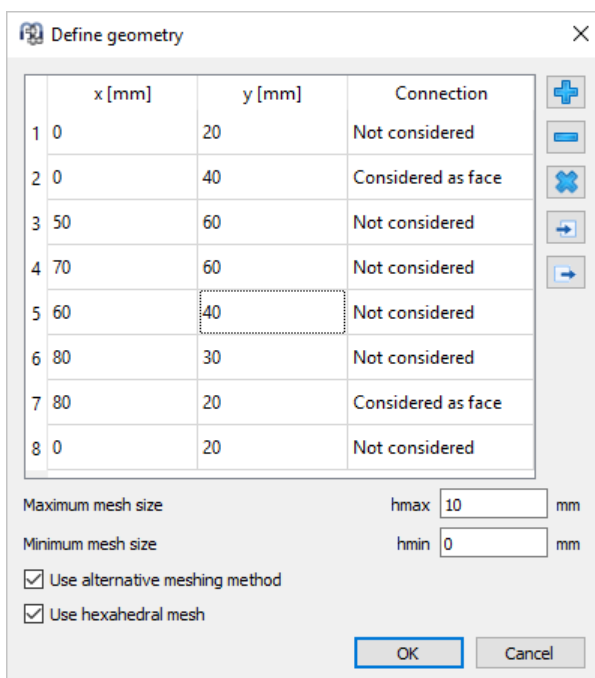
- Mittelwert: Die Reaktionskraft wird auf alle Knoten der Fläche verteilt und es wird ein Mittelwert der Verschiebung der Fläche verwendet. Mit dieser Option wird das Bauteil nicht versteift.
- Starr: Es wird eine starre Verbindung des reduzierten Knotens mit allen Knoten der Fläche hinzugefügt. Dadurch wird das Bauteil versteift.
- elastisches Lager: Diese Option darf nur mit einem Wälzlager verbunden werden und berücksichtigt die elastischen Verformungen des Bauteils in der Lastverteilung des Lagers. Eine Lizenz für die Wälzlagerberechnung einschließlich der Ringverformungen ist erforderlich. Derzeit ist ein elastischer Außenring nur bei axial festen Lagern zulässig.
- elastisches Zahnrad: Diese Option darf bisher nur mit einem Stirnrad verbunden werden und berücksichtigt elastische Verformungen eines Zahnradkörpers. Hierfür ist die Option für Wellensysteme erforderlich.
- elastischer Kontakt: Diese Option darf nur mit einem Schweißpunkt und einer zylindrischen Randbedingung für die Verbindung von Flächen in zwei Bauteilen verwendet werden, die beide als elastischer Kontakt reduziert sind. Die Abmessungen der beiden Kontaktflächen müssen identisch sein. Zusätzlich ist die Verbindung mit einer Welle möglich.

#### 2.1.9.1 3D-elastisches Bauteil als Welle

Ein 3D-elastisches Bauteil als Welle ist ein rotierendes Bauteil mit einer Achse, das mit anderen Wellen verbunden werden kann. Derzeit können achsensymmetrische Bauteile, die durch ein Polygon oder einen STEP-Import definiert sind, berücksichtigt werden.



Über die -Schaltfläche hinter "Wellengeometrie über Polygon definieren" öffnet sich ein Dialog, um die Geometrie über ein Polygon zu definieren. Es sollte im Uhrzeigersinn definiert werden. "x" ist die axiale Koordinate, "y" der Radius. Optionale Verbindungen zu normalen Wellen können als "Als Fläche berücksichtigt" oder "Als Kante berücksichtigt" definiert werden. Entweder werden alle Punkte auf einer Fläche oder nur Punkte auf einer Kante mit einem Wellen-Lager-Element verbunden.



Außerdem kann in diesem Dialog die Netzgröße festgelegt werden.

Weitere Einstellungen sind der Werkstoff, die Rotationsgeschwindigkeit, die Option, ein Netz zweiter Ordnung (quadratisch) zu wählen und die Option, ob die

Verschiebungen berechnet werden sollen. Die Verwendung eines quadratischen Netzes wird für eine bessere Genauigkeit empfohlen. Die Berechnung von Verschiebungen erhöht die Berechnungszeit und würde nur die deformierte Form in der 3D-Ansicht anzeigen.

Unter "Positionierung" kann die axiale Position definiert werden.

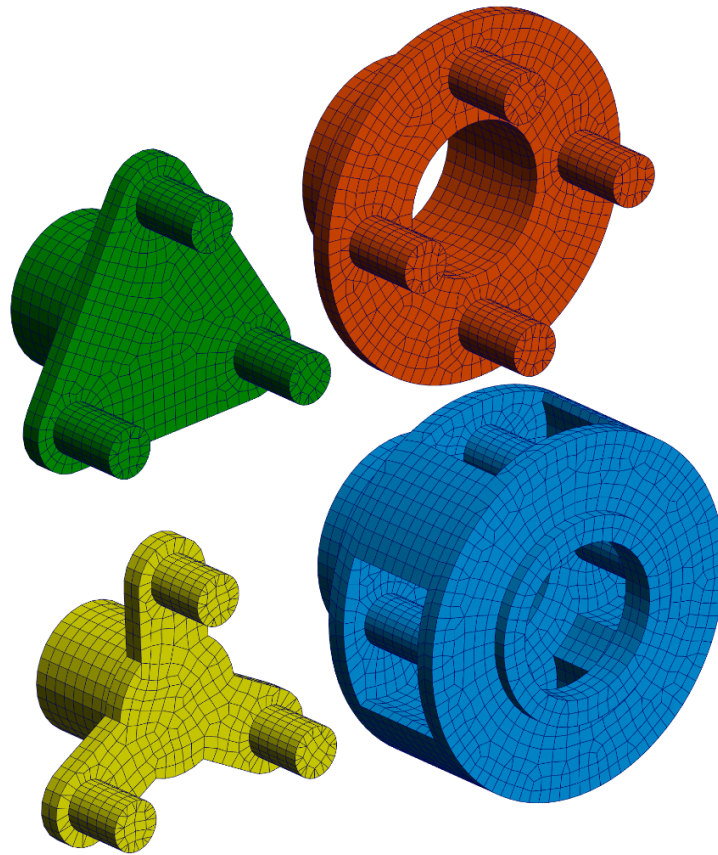
In der Tabelle der Hauptansicht sind unter "Lager" die Lagerelemente der Wellen auszuwählen. Der Verbindungstyp "starr" erzwingt eine starre Verbindung der ausgewählten Fläche/Kante mit dem Knoten der Welle. Der Verbindungstyp "Mittelwert" erzwingt eine gemittelte Anbindung an den Knoten, was zu einer geringeren Versteifung des 3D-elastischen Bauteils führt.

Im Falle eines STEP-Imports können Flächen durch Doppelklick in der 3D-Ansicht ausgewählt werden. Flächen können verschmolzen werden, indem man zwei Flächen auswählt, sie in der Tabelle markiert und im Kontextmenü (rechte Maustaste) "Flächen zusammenfassen" wählt. Es können nur benachbarte Flächen zusammengeführt werden. Bei einer importierten Welle muss die x-Achse die Rotationsachse sein. Unter Positionierung kann die Orientierung durch Auswahl von "Dauerhafte Koordinatentransformation" geändert werden. Befinden sich Flächen innerhalb des Bauteils, kann über das Kontextmenü in der 3D-Ansicht ein Clipping der Stirnflächen aktiviert werden. Mit der Alt-Taste und der linken Maustaste kann die Clipping-Ebene verschoben werden.

### 2.1.9.2 3D-elastische Planetenträger

Im Falle einer 3D-elastischen Welle können auch Planetenträger definiert werden. Entweder als STEP-Datei importiert oder als parametrischer Planetenträger. Für einen parametrischen Planetenträger sind die folgenden Grundformen verfügbar:

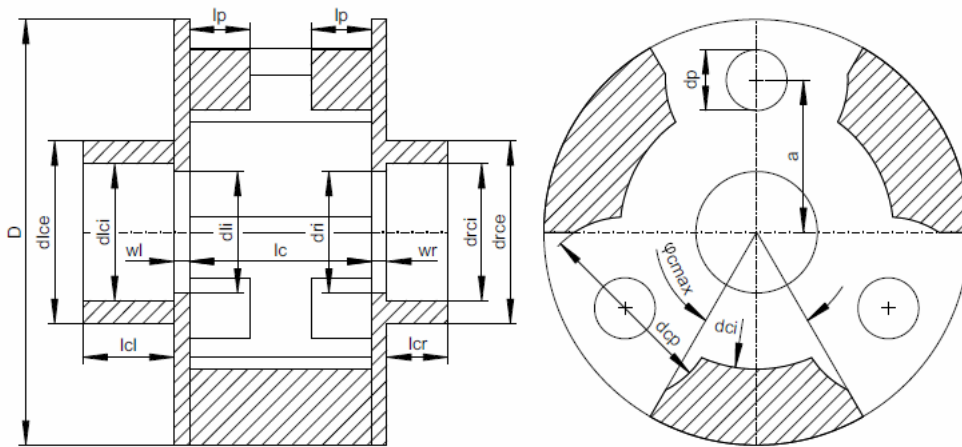




Bei einem importierten Planetenträger muss die Rotationsachse die x-Achse sein. Auf der Seite "Positionierung" kann eine dauerhafte Koordinatentransformation verwendet werden, um die importierte Orientierung auf die x-Achse als Rotationsachse zu ändern.

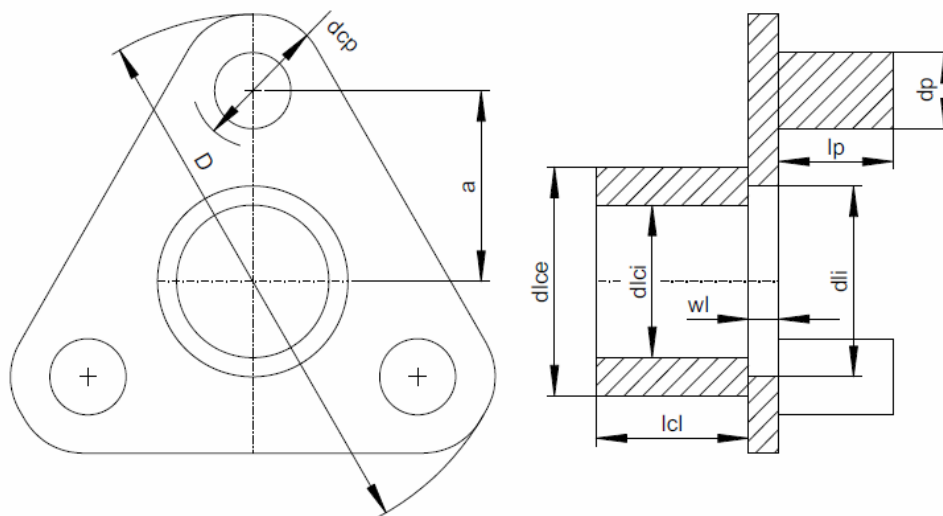
#### 2.1.9.2.1 Parametrischer kreisförmiger Planetenträger

Ein parametrischer kreisförmiger Planetenträger kann entweder einseitig oder zweiseitig definiert werden. Die Geometrie ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



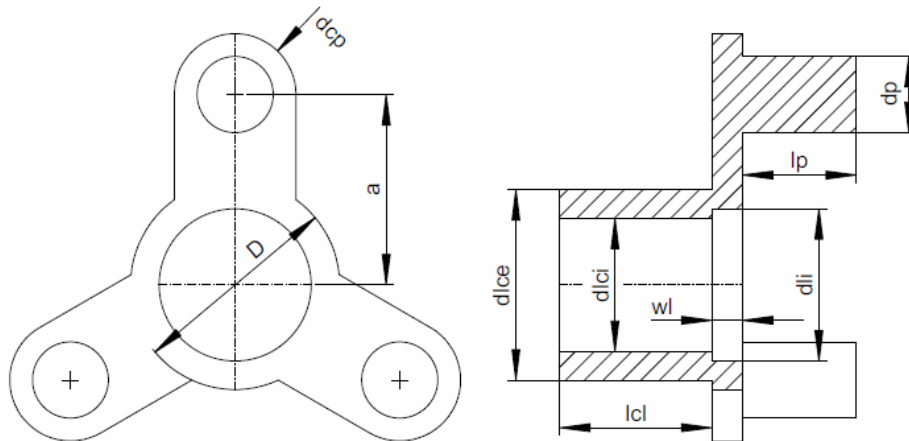
**2.1.9.2.2 Parametrischer polygonaler Planetenträger**

Die Geometrie des polygonalen parametrischen Trägers ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



**2.1.9.2.3 Parametrischer Planetenträger in Sternform**

Die Geometrie des parametrischen Sternenträgers ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



### 2.1.9.3 3D-elastisches Bauteil als Gehäuse

Ein 3D-elastisches Bauteil als Gehäuse kann mit Wellen in verschiedenen Gruppen verbunden werden, es rotiert nicht und mindestens eine Fläche muss fest eingespannt sein. Derzeit kann es nur aus der CAD-Geometrie als STEP-Datei oder als Nastran-Netz importiert werden.

The screenshot shows a 3D mesh of a housing with two shaft holes. To the right is a settings panel for 'Import CAD geometry' with the following options:

- Name: Part 1
- Material: Steel
- Temperature: T 20 °C
- use second order mesh
- support modal analysis
- calculate displacements
- calculate mode shapes
- consider stiffness
- Color: [Blue swatch]
- show mesh

| Face | Support        | Position                        | Connection type | Comment                  |
|------|----------------|---------------------------------|-----------------|--------------------------|
| 1 6  | Set as fixed   | {0.00141155, 0.000495987, -2.5} | rigid           | Set bottom face as fixed |
| 2 38 | Not considered | {-39.9998, -33.5, 59.9998}      | rigid           |                          |
| 3 39 | Not considered | {-40.0005, 33.5, 60.0003}       | rigid           |                          |
| 4 40 | Not considered | {20.0015, -33.5, 60}            | rigid           |                          |
| 5 41 | Not considered | {20.0021, 33.5, 59.9993}        | rigid           |                          |

Über die -Schaltfläche hinter "CAD-Geometrie importieren" kann eine STEP-Datei ausgewählt werden. Eine Baugruppe mit verbundenen Bauteilen wird automatisch zusammengeklebt. Anschließend kann die gewünschte Netzgröße eingegeben

werden. Alternativ kann auch ein Nastran-Netz importiert werden; in diesem Fall bleibt nur das Oberflächennetz erhalten.

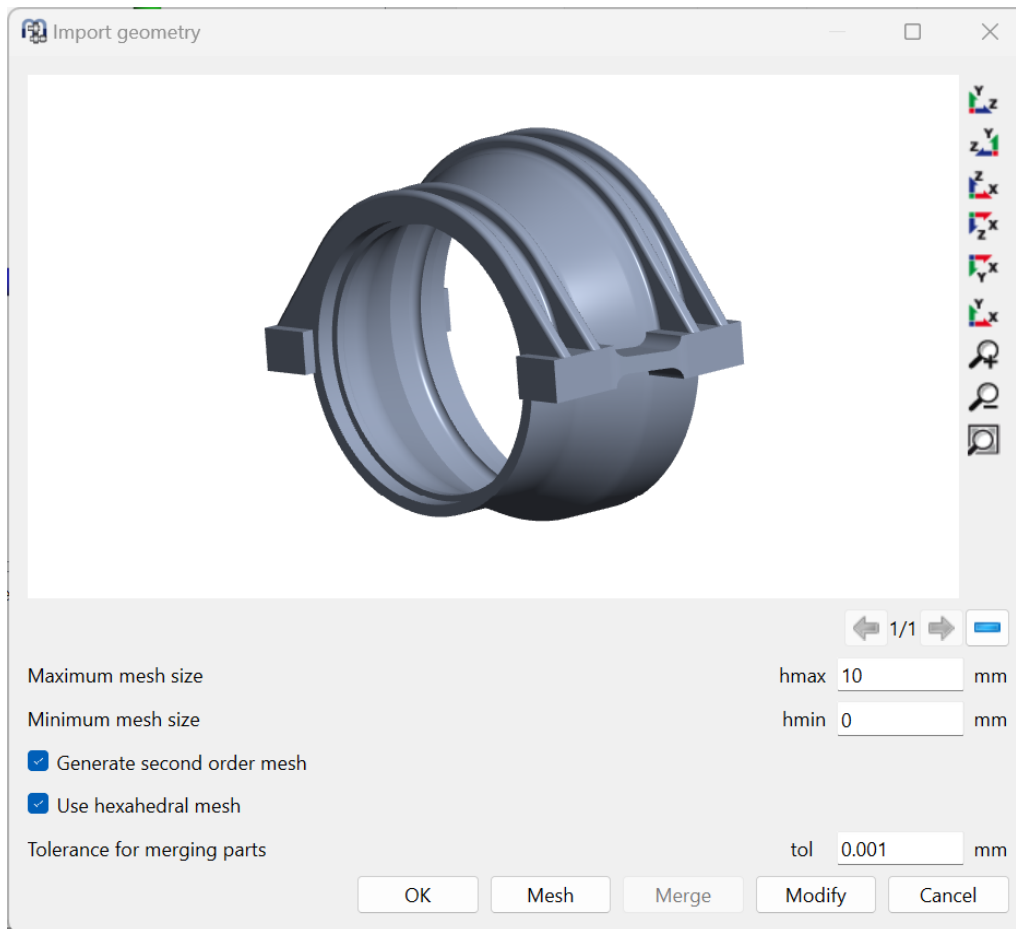
In der 3D-Ansicht für die Bauteile können nun mehrere Flächen durch Maus-Doppelklick auf eine Fläche ausgewählt werden. Die Flächen können dann mit einem Welle-Lager-Element verbunden oder "Fest eingespannt" werden. Wie oben kann eine starre Verbindung oder eine Verbindung über Mittelwert gewählt werden. Um zwei verbundene Flächen zusammenzufassen, markieren Sie beide Flächen in der Tabelle, drücken die rechte Maustaste und wählen "Flächen zusammenfassen". Befinden sich Flächen innerhalb des Bauteils, kann über das Kontextmenü in der 3D-Ansicht ein Clipping der Frontflächen aktiviert werden. Mit Alt-Taste und linker Maustaste kann die Clipping-Ebene verschoben werden.

Unter Einstellungen können wie bisher der Werkstoff und Optionen für ein Netz zweiter Ordnung (quadratisch) und für die Berechnung der Verschiebungen ausgewählt werden. Zusätzlich kann ein elastisches 3D-Gehäuse bei der Modalanalyse unterstützt werden; wenn "Eigenformen berechnen" ausgewählt ist, können auch die Eigenformen angezeigt werden. Unter "Positionierung" kann die Position und Rotation des 3D Bauteils definiert werden.

Das ausgewählte Lagerelement wird mit den Knoten der ausgewählten Flächen verbunden. Es wird eine starre Verbindung oder eine Verbindung über Mittelwert berücksichtigt, kein Kontakt und kein Spiel wird berücksichtigt.

#### **2.1.9.4 CAD-Geometrie importieren**

Beim Geometrie importieren aus CAD wird zunächst ein Vorschaudialog angezeigt:



Dieser Dialog zeigt die Anzahl Bauteile an, die in der Datei vorhanden sind, und ermöglicht das Löschen von Bauteilen und das Verschmelzen der verbleibenden Teile. Das Bauteil kann mit verschiedenen Einstellungen neu vernetzt werden, um die Qualität des Netzes zu beurteilen.

Mit "Modifizieren" können Kantenbrüche, Verrundungen und kleine Bohrungen aus der Geometrie entfernt werden, um das Modell zu vereinfachen. Dies kann die erforderliche Anzahl von Knoten und damit die Berechnungszeit reduzieren.

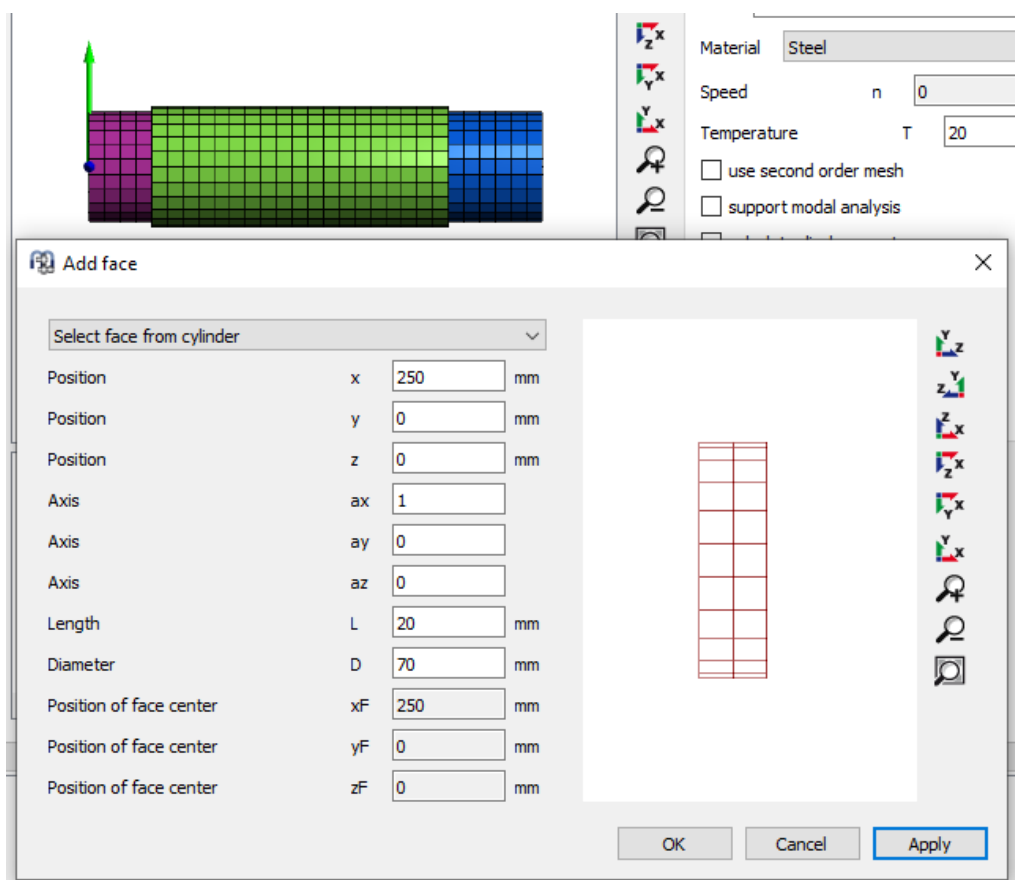
Nur das aktuell ausgewählte Bauteil wird vernetzt und importiert. Zum Verschmelzen von Bauteilen muss die Funktion "Verschmelzen" verwendet und eine angemessene Toleranz für das Verschmelzen eingestellt werden. Nach dem Vernetzen wird die Anzahl der Knoten der Oberfläche im Fenster angezeigt, um eine Vorstellung von der Komplexität des Netzes zu bekommen.

Wenn die Option "Quadratische Elemente erzeugen" gesetzt ist, wird ein Oberflächennetz mit quadratischen Elementen erzeugt und gespeichert. Die Einstellung "Hexaedernetz verwenden" führt dazu, dass das Oberflächennetz hauptsächlich aus Quadern statt aus Dreiecken besteht.

### 2.1.9.5 Flächen auf importierter Geometrie auswählen

Nach dem Importieren einer STEP-Datei oder eines Netzes können mehrere Flächen durch einen Doppelklick mit der Maus auf eine Fläche ausgewählt werden. Um zwei Flächen zusammenzufassen, wählen Sie beide Flächen in der Tabelle aus, drücken Sie die rechte Maustaste und wählen Sie "Flächen zusammenfassen". Befinden sich Flächen innerhalb des Bauteils, kann über das Kontextmenü in der 3D-Ansicht ein Clipping der Frontflächen aktiviert werden. Mit der Alt-Taste und der linken Maustaste kann die Clipping-Ebene verschoben werden.

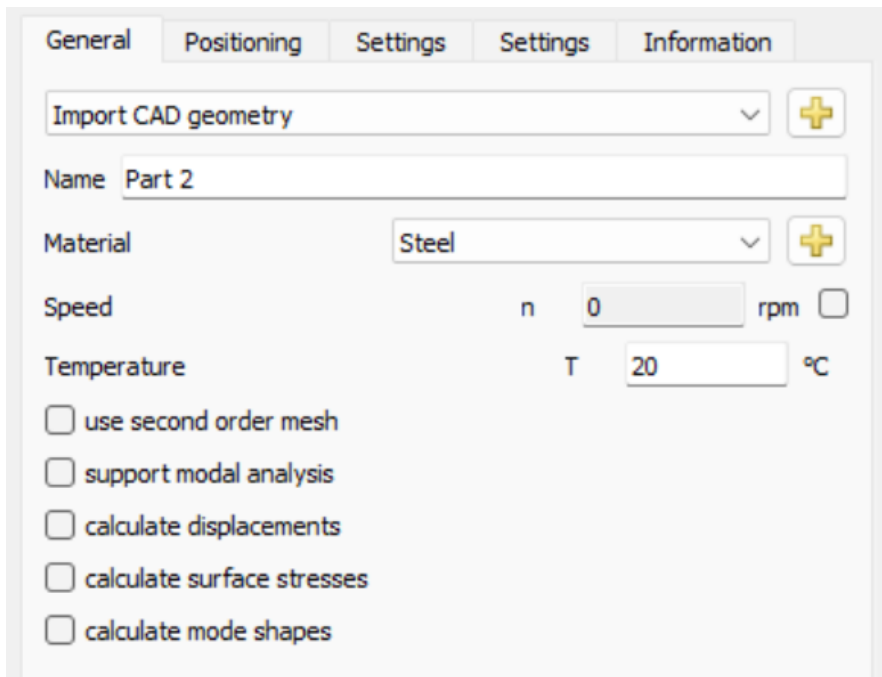
Neue Flächen können über das Kontextmenü der Tabelle und die Auswahl "Fläche zufügen" definiert werden. Basiert auf einem Zylinder, einem Lager oder einer Box kann eine neue Fläche ausgewählt werden:



Definieren Sie die Position des Mittelpunkts des Zylinders sowie dessen Durchmesser und Länge. Ein Klick auf "Übernehmen" wählt alle Elemente im Bereich aus und zeigt die neuen Elemente in rot an. Vorhandene ausgewählte Flächen werden als Vernetzung in schwarz angezeigt. Für einen Kasten müssen anstelle von Durchmesser und Länge die Abstände  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  in 3 Richtungen definiert werden. Für ein Lager werden Position, Durchmesser und Längen automatisch festgelegt. Dies ermöglicht das Hinzufügen von Flächen zu einem importierten Bauteil, ohne einen neuen Import durchzuführen.

### 2.1.9.6 Einstellungen

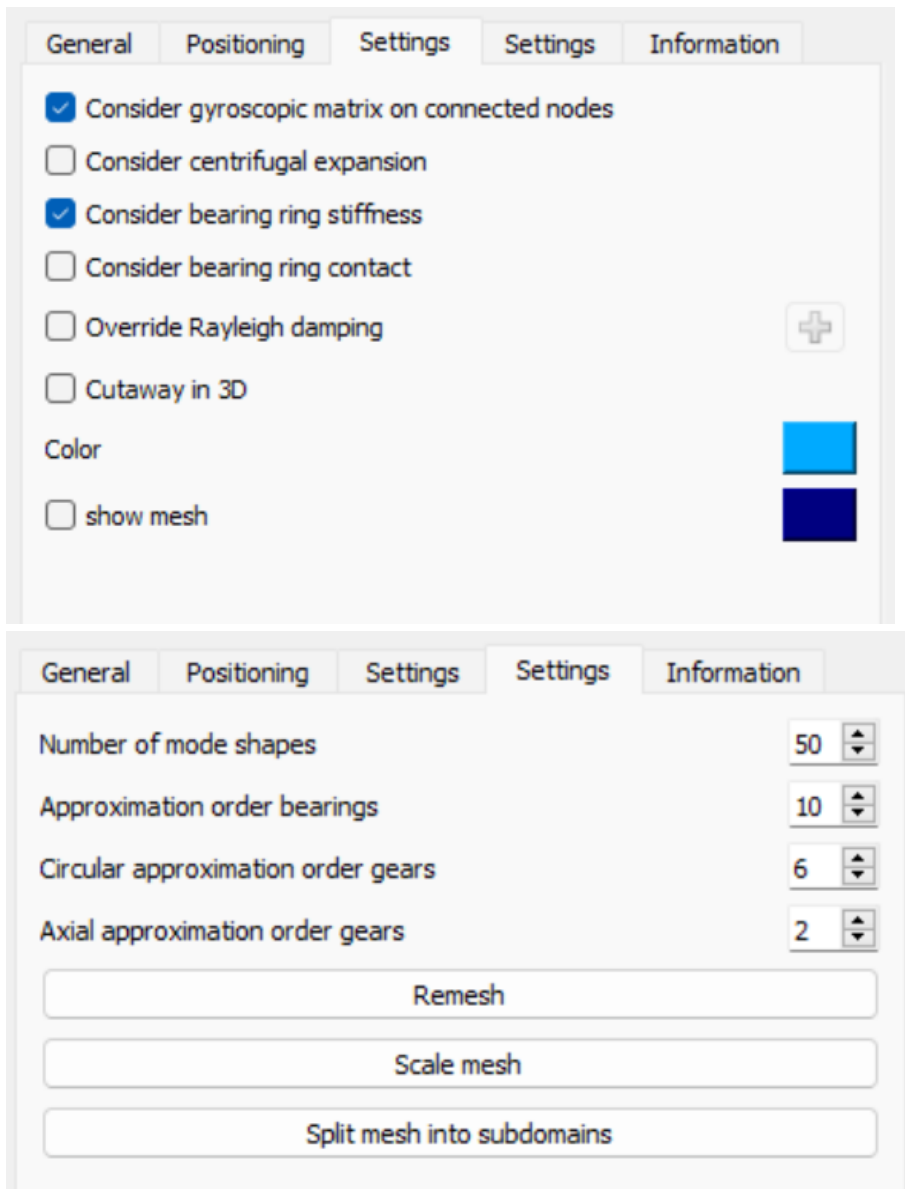
Für die 3D-elastischen Bauteile gibt es einige Einstellungen.



The screenshot shows a settings dialog with the following fields and options:

- General | Positioning | Settings | Settings | Information
- Import CAD geometry (dropdown menu) +
- Name: Part 2
- Material: Steel (dropdown menu) +
- Speed: n 0 rpm
- Temperature: T 20 °C
- use second order mesh
- support modal analysis
- calculate displacements
- calculate surface stresses
- calculate mode shapes

Auf der Seite "Allgemein" kann der Werkstoff, die Drehzahl und die Temperatur festgelegt werden. Eine Änderung des Werkstoffs erfordert eine neue Reduzierung des Bauteils.



Es gibt zwei Seiten für Einstellungen. Alle Einstellungen auf der ersten Seite erfordern keine neue Reduktion und alle Einstellungen auf der zweiten Seite erfordern eine neue Reduktion.

Es kann die Farbe für das Bauteil und das Netz definiert werden, die in den Standard-3D-Geometrie-Ansichten verwendet wird.

Die Reduktion der 3D-elastischen Bauteile führt nur zu Massen- und Steifigkeitsmatrizen. Es wird keine gyroskopische Matrix berücksichtigt. Näherungsweise kann die polare Trägheit als gyroskopische Matrix auf den verbundenen reduzierten Knoten auf der x-Achse betrachtet werden. Die polare Trägheit wird gleichmäßig auf alle verfügbaren Knoten verteilt, wenn die Option "Kreiseffekt über verknüpfte Knoten berücksichtigen" gesetzt ist.



Die Option "Fliehkraft berücksichtigen" fügt dem Bauteil den Effekt der Fliehkraftausdehnung hinzu. Diese Option ist nur für 3D-elastische Wellen aktiv.

Die Option "Steifigkeit der Lagerringe berücksichtigen" fügt die Steifigkeit der Lagerringe zu elastischen Lagern hinzu. Wenn der Ring bereits in dem 3D-elastischen Bauteil enthalten ist, sollte diese Option deaktiviert werden. Mit "Lagerringkontakt berücksichtigen" wird ein Kontaktmodell zwischen Lagerring und Bauteil hinzugefügt. Dann wird bei der Berechnung der Passung nicht direkt ein Betriebsspiel des Lagers festgelegt, sondern die Passung wird durch Ausdehnung oder Kompression der elastischen Bauteile beeinflusst. Wenn die Steifigkeit des Bauteils nicht gleichförmig ist, kommt es bereits nach der Montage zu einer Verformung des Lagerrings.

Die Option "Rayleigh Dämpfung überschreiben" erlaubt es, für das 3D-elastische Bauteil eine andere Rayleigh Dämpfung zu definieren als für das globale System.

Die Aktivierung der Option "Schnittdarstellung in 3D" führt zu einer Schnittdarstellung in der 3D-Ansicht für das System, wie sie auch für Wellen verfügbar ist.

Auf der zweiten Seite "Einstellungen" kann die Anzahl der für die Modalreduktion verwendeten Eigenformen festgelegt werden. Ein größerer Wert erhöht die Genauigkeit, benötigt aber mehr Speicher und Zeit für die Reduktion. Normalerweise sollte ein Wert größer 20 verwendet werden. Die maximale Frequenz wird auf der Seite "Information" angegeben. Diese Frequenz sollte größer sein als die maximale Frequenz, die für das System von Interesse ist.

Hier kann eine Approximationsordnung für elastische Lagerringe und elastische Zahnräder definiert werden. Die Ordnung der Approximation über Breite Zahnräder von 2 bedeutet, dass für Querverformungen eine Parabel verwendet wird. Ein Faktor von 1 würde nur eine Gerade verwenden. Bei Zahnrädern mit einer großen Breite können größere Ordnungen als 2 sinnvoll sein. Die Ordnung der Approximation kann über das Kontextmenü in der Tabelle für Flächen überschrieben werden.

Die Schaltfläche "Neu vernetzen" ermöglicht es, das Bauteil neu zu vernetzen. Entweder um die Netzgröße oder den Typ hexaedrisch/tetraedrisch zu ändern. Beachten Sie, dass es sich hierbei um ein Neu vernetzen des vorherigen Netzes handelt, im Allgemeinen wäre es besser, die CAD-Datei neu zu importieren, falls die Netzgröße geändert wird. "Netz skalieren" ermöglicht die Anwendung eines Skalierungsfaktors auf das Netz. Dies kann helfen, wenn das Einheitensystem des Imports nicht korrekt war. "In Teilbereiche unterteilen" erlaubt es, das Netz in Teilbereiche zu unterteilen, basierend auf der Auswahl eines Zylinders oder eines Quaders, für jeden Teilbereich können dann unterschiedliche Werkstoffeigenschaften ausgewählt werden.

### 2.1.9.6.1 Details für Lagerspiel bei elastischen Lagerringen

Als Deformation für den Lagerring werden die Verformungen der ausgewählten Fläche für einen Lagerkontakt verwendet. Um eine doppelte Berücksichtigung von thermischen Ausdehnungen zu vermeiden, wird die auf dem Nenndurchmesser basierende thermische Ausdehnung von der Lagerverformung subtrahiert. Für die thermische Ausdehnung wird der in der Berechnung des Lagers definierte Werkstoff der Welle/des Gehäuses und die Temperatur verwendet.

Die Fliehkraftausdehnung kann zweimal berücksichtigt werden. Einmal in der Deformation des Bauteils, falls dort aktiviert, und einmal im Betriebsspielberechnung des Lagers, falls Passung berücksichtigt wird. Verwenden Sie das Kontaktmodell für Lagerringe, um dies zu vermeiden oder deaktivieren Sie die Fliehkraftausdehnung am Bauteil.

Wenn der Lagerring als zusätzliche Steifigkeit berücksichtigt wird und kein Kontaktmodell verwendet wird, wird der Wärmeausdehnungskoeffizient des Bauteils anstelle des Koeffizienten des Lagerrings verwendet. Dies geschieht, um zusätzliche Verformungen zu vermeiden. Die thermische Ausdehnung wird von der Deformation des Lagers subtrahiert. Das Kontaktmodell sollte verwendet werden, um die Passung in das FEA-Modell einzubeziehen.

Bei Verwendung des Kontaktmodells werden die Ringverformungen, die bei der Berechnung des Betriebsspiels in der Lagerberechnung berücksichtigt werden, von der elastischen Verformung des FEA-Modells subtrahiert. Daher wird die Passung nicht doppelt berücksichtigt. Die Fliehkraftdehnung sollte am 3D-elastischen Bauteil aktiviert werden, wenn dies relevant ist. Für den Fall, dass das Lager weder Innen- noch Außenring hat, werden auch die in der Lagerberechnung berechneten Spieländerungen von den FEA-Verformungen abgezogen, um eine doppelte Berücksichtigung zu vermeiden.

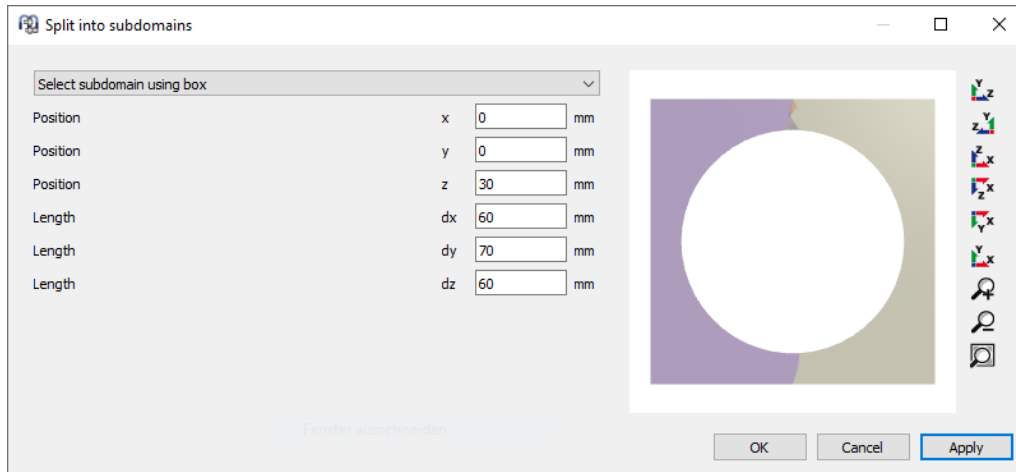
Die Diagramme für die Verformungen der Fläche zeigen immer die Verformungen des Bauteils ohne die genannten Korrekturen. Die Verformungen der Lagerringe zeigen einen reduzierten Wert, korrigiert um den Einfluss von Temperatur und Passungen.

Wenn Temperatureinflüsse berücksichtigt werden, empfiehlt es sich, den Lagerringkontakt für die 3D-elastischen Bauteile zu berücksichtigen.


### 2.1.9.6.2 Netz in Teilbereiche unterteilen

Mit "Netz in Teilbereiche unterteilen" unter Einstellungen kann das Netz in Teilbereiche unterteilt werden, basierend auf der Auswahl eines Zylinders oder einer Box. Für jede Unterdomäne können dann unterschiedliche Werkstoffeigenschaften definiert werden. Bei dieser Option gehen alle ausgewählten Flächen verloren.

Mit Hilfe einer Box oder Zylinders können Elemente des aktuellen Netzes ausgewählt und einem neuen Teilbereich zugewiesen werden. Derzeit ist es nicht möglich, Subdomänen direkt wieder zu verbinden, aber es könnte durch die Auswahl einer Box, die alle Elemente enthält, geschehen.



## 2.2 Berechnung von Eigenfrequenzen und harmonischen Antworten

Optional können Eigenfrequenzen und harmonische Antworten mit der Software berechnet werden. Dazu muss die Einstellung [Eigenfrequenzen](#)  berechnen aktiviert werden.

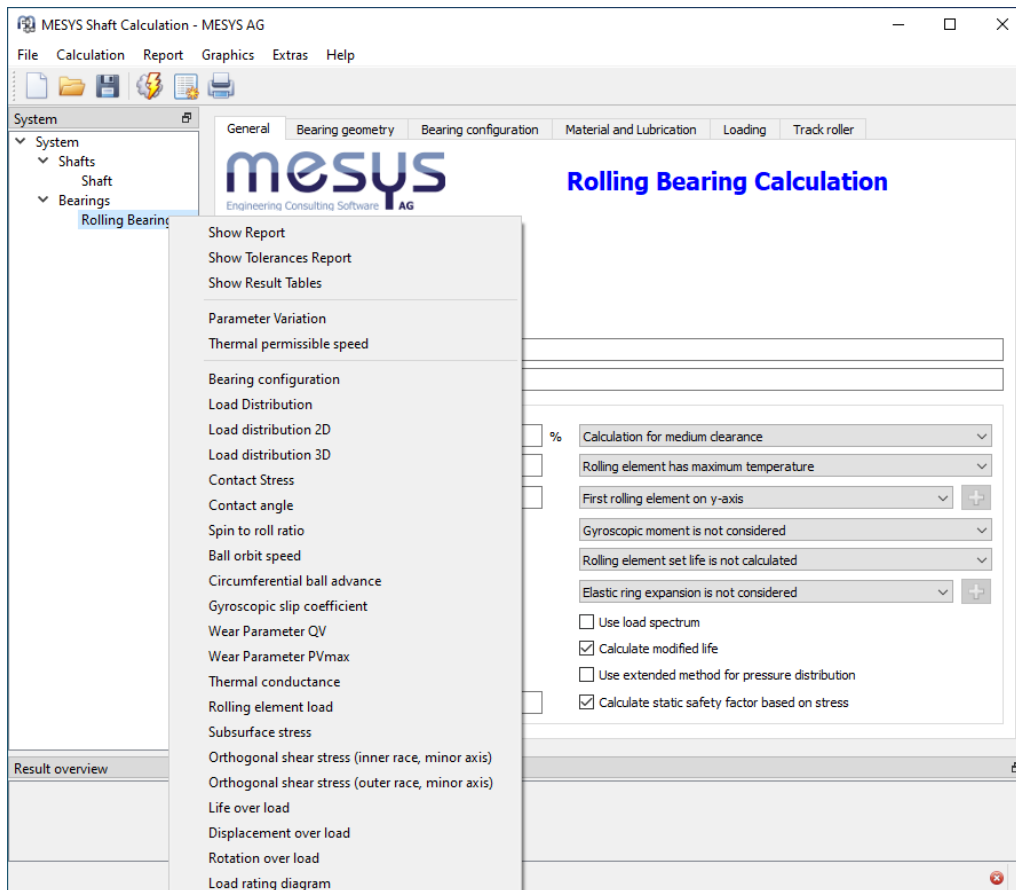
Zunächst wird das nichtlineare statische Gleichgewicht berechnet. Dann werden die Eigenfrequenzen und die harmonische Antwort anhand der linearen Bewegungsgleichungen mit den tangentialen Steifigkeitsmatrizen aus dem statischen Gleichgewicht berechnet. Daher sind die Ergebnisse nur für kleine Amplituden um die statische Lösung gültig.

Die Eigenfrequenzen werden unter Verwendung der gegebenen Rotationsgeschwindigkeit berechnet. Die kritischen Frequenzen sind die Schnittpunkte zwischen Wellendrehzahl und Eigenfrequenz bei dieser Wellendrehzahl. Die kritischen Frequenzen werden in einem speziellen Protokoll angezeigt oder sind im Campbell Diagramm zu finden.

Im Menü Berechnungen ist eine zusätzliche Berechnung des Frequenzgangs verfügbar. Dazu müssen eine oder mehrere dynamische Kräfte auf einer Welle definiert werden und die Berechnung der Eigenfrequenzen muss aktiv sein. Es ist möglich, eine dynamische Kraft zu definieren und ihre Frequenz über einen bestimmten Bereich zu variieren. Ergebnisse für Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Kräfte sind für Dokumentationspunkte oder Lager verfügbar.

## 2.3 Schnittstelle zur Wälzlager-Berechnung

Die Dialoge der [MESYS Wälzlagerberechnung](#)<sup>166</sup> sind vollständig in die Wellenberechnung integriert.

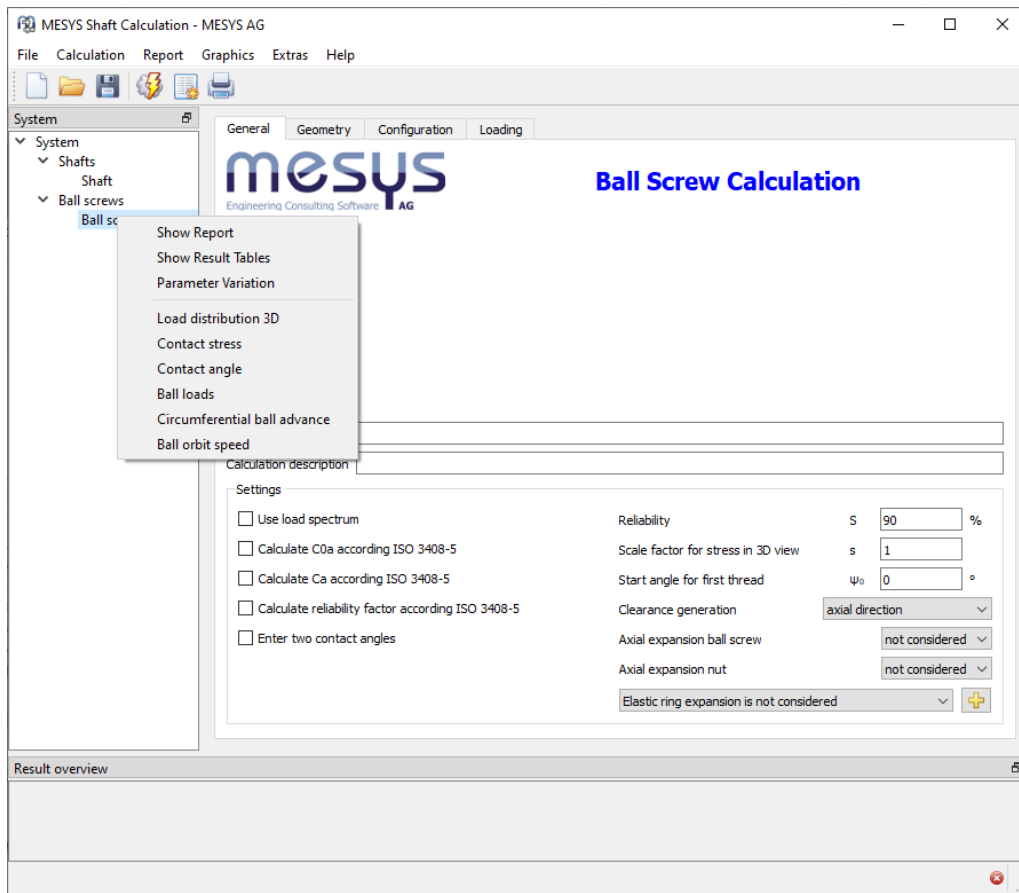


Während die Lagerberechnung geöffnet ist, werden die Funktionen für Dateioperationen, Berechnung und Protokollerstellung nur für die Lagerberechnung verwendet. Es wird also nur das Lager berechnet und Sie erhalten in der Resultateübersicht Ergebnisse für das Lager. Es besteht jedoch die Möglichkeit, mit der Tastenkombination CTRL+F5 die gesamte Welle zu berechnen, während die Lagerberechnung in Betrieb ist.

Grafiken und das Protokoll Toleranzen lassen sich über die rechte Maustaste im Systembaum öffnen. Grafiken sind auch über das Menü für Grafiken verfügbar. Es können Grafiken von verschiedenen Lagern gleichzeitig angezeigt werden.

## 2.4 Schnittstelle zur Berechnung für Kugelgewindetriebe

Alle Dialoge der [Kugelgewindetrieb-Berechnung](#)<sup>266</sup> sind wie bei der Wälzlagerberechnung vollständig in die Wellenberechnung integriert.

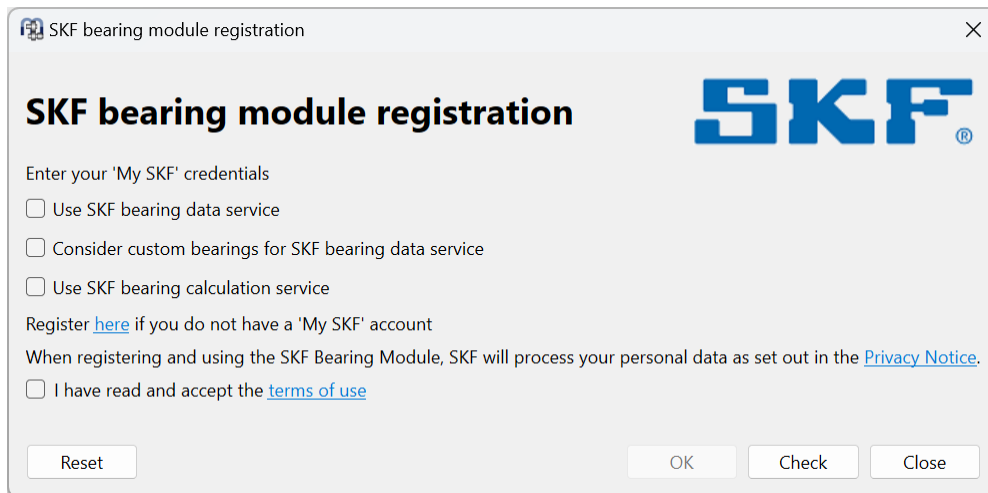


Während die Berechnung für Kugelgewindetriebe geöffnet ist, werden die Funktionen für Dateioperationen, Berechnung und Protokollerstellung nur für die Berechnung der Kugelgewindetriebe verwendet. Es wird also nur die Kugelgewindetriebe berechnet und Sie erhalten in der Resultateübersicht Ergebnisse für die Kugelgewindetriebe. Es besteht jedoch die Möglichkeit, mit der Tastenkombination STRG+F5 die gesamte Wellenberechnung durchzuführen, während die Berechnung für Kugelgewindetriebe verwendet wird.

Grafiken und können über die rechte Maustaste im Systembaum geöffnet werden. Grafiken sind auch im Menü für Grafiken verfügbar. Es können Grafiken von verschiedenen Kugelgewindetrieben gleichzeitig angezeigt werden.

## 2.5 Schnittstelle zum SKF-Lagermodul

Im Menü "Extras" können die Zugangsdaten für das SKF Lagermodul eingegeben werden:



SKF bearing module registration

## SKF bearing module registration

Enter your 'My SKF' credentials

Use SKF bearing data service

Consider custom bearings for SKF bearing data service

Use SKF bearing calculation service

Register [here](#) if you do not have a 'My SKF' account

When registering and using the SKF Bearing Module, SKF will process your personal data as set out in the [Privacy Notice](#).

I have read and accept the [terms of use](#)

Reset OK Check Close

Nach dem Akzeptieren der Nutzungsbedingungen und dem Anklicken der "Prüfen"-Schaltfläche wird ein Anmeldedialog im Webbrowser angezeigt. Falls keine Zugangsdaten für das SKF Lagermodul vorhanden sind, registrieren Sie sich zunächst für den Service. Nach erfolgreicher Anmeldung wird im Fenster "Zugriff gewährt" angezeigt. Mit "Zurücksetzen" wird der Dienst deaktiviert und es werden keine weiteren Anfragen an den SKF Server gesendet.

Es stehen zwei Dienste zur Verfügung:

- Der SKF Lagerberechnungsservice ist für alle registrierten Benutzer verfügbar. Wenn er aktiviert ist, werden in der Ergebnisübersicht zwei zusätzliche Spalten für die SKF Lagerlebensdauer angezeigt und dem Protokoll wird eine Tabelle mit SKF Ergebnissen beigefügt. Die Erweiterte Lebensdauer von SKF kann sich von der Lebensdauer nach ISO 281 unterscheiden, da aSKF anders berechnet wird als aISO.
- Der SKF Lagerdatenservice ermöglicht es, detaillierte Lagerdaten mit Innengeometrie vom SKF Server abzurufen. Für die Nutzung dieses Dienstes sind zusätzliche Berechtigungen von SKF erforderlich. Bitte kontaktieren Sie Ihren SKF Anwendungssupport bezüglich dieses Services. Der Lagerdatenservice ist zunächst nur für Hochgenauigkeitslager verfügbar und wird später erweitert werden. Unterstützt werden zunächst folgende Lagertypen: Schrägkugellager, ein- und zweireihige Radial-Zylinderrollenlager und begrenzt auf Hochgenauigkeitslager. Die SKF Datenbank innerhalb der Installation enthält nur eine approximierte Innengeometrie. Mit diesem Service wird die detaillierte Innengeometrie von SKF in den Hauptspeicher geladen und geht nach dem Beenden der Software wieder verloren. Wenn die Innengeometrie verfügbar ist, wird das Lager in der Lagerdatenbank fett gedruckt und im 2D-Welleneditor in einer anderen Farbe dargestellt. Diese Farben können unter [Anzeigeeinstellungen](#)<sup>75</sup> in der Wellenberechnung ausgewählt werden. Ist die Option "Kundenspezifische Lager für SKF Lagerdatenservice berücksichtigen" aktiv, versucht die Software auch Daten der Innengeometrie für Lager in der kundenspezifischen Lagerdatenbank

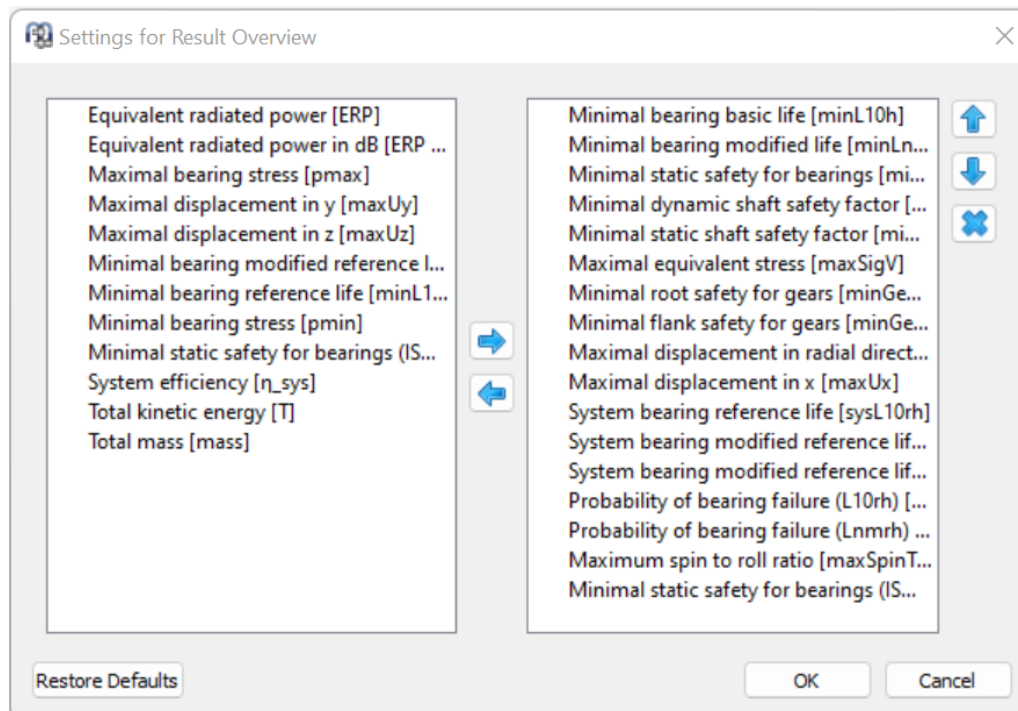
zu erhalten, wenn diese auf approximierete Lagergeometrie eingestellt sind und der Herstellername mit "SKF" beginnt.

## 2.6 Resultate

Resultate sind in verschiedenen Ausgaben verfügbar. Es gibt die Standard-Ergebnisübersicht am unteren Rand der Benutzeroberfläche, eine Übersicht der Lagerkräfte und Eigenfrequenzen, mehrere Grafiken und das Protokoll.

### 2.6.1 Resultateübersicht

Die Resultateübersicht am unteren Rand des Fensters zeigt die minimale Lagerlebensdauer, die minimale statische Sicherheit Wälzlager und die maximale Verformung der Welle. Die Resultateübersicht kann unter Extras->Resultateübersicht konfiguriert werden.

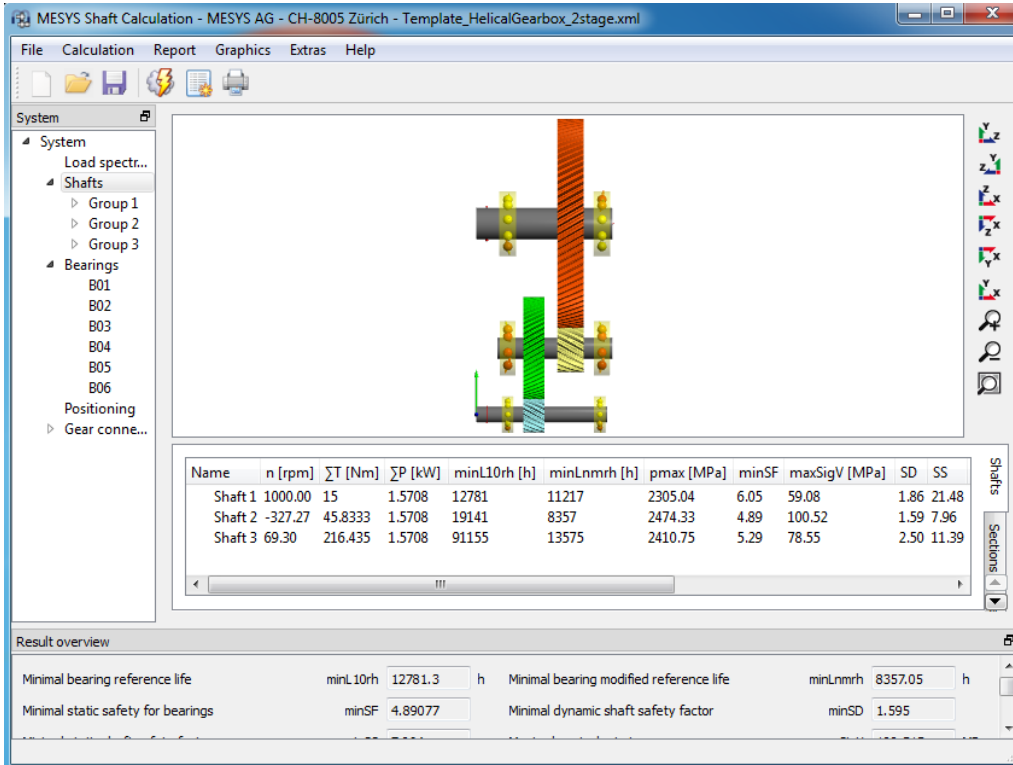


Die Liste links zeigt alle verfügbaren Einträge für die Resultateübersicht an. Mit den Pfeilen können die ausgewählten Einträge in die rechte Liste verschoben werden, die für die Resultateübersicht verwendet wird. Die Reihenfolge der ausgewählten Ergebnisse kann mit den Auf-/Abwärtspfeilen rechts geändert werden. Beachten Sie, dass in der Resultateübersicht tatsächlich nur gültige Resultate-Werte angezeigt werden. Sie sehen also weniger Werte als in den Einstellungen ausgewählt.

Die Einstellungen der Resultateübersicht werden in den Benutzereinstellungen gespeichert, nicht in der Datei der Berechnung. Sie sind also für verschiedene Berechnungen gleich.

## 2.6.2 Ergebnistabellen

Mehrere Ergebnistabellen sind verfügbar, wenn die Seiten "Wellen", "Lager" oder eine Gruppe ausgewählt werden.



### 2.6.2.1 Tabelle für Wellen

Eine Tabelle für Wellen zeigt Ergebnisse für jede Welle an:

| Name | n [rpm] | $\Sigma T$ [Nm] | $\Sigma P$ [kW] | minL10rh [h] | minLnmrh [h] | pmax [MPa] | minSF | maxSigV [MPa] | SD   | SS    | maxUr [mm] | mass [kg] | Jxx [kg mm <sup>2</sup> ] | Jyy [kg mm <sup>2</sup> ] | Jzz [kg mm <sup>2</sup> ] |
|------|---------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|------------|-------|---------------|------|-------|------------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| S1   | 1000.00 | 100             | 10.472          | 3330         | 5121         | 2678.03    | 3.86  | 41.06         | 3.94 | 8.28  | 0.0380     | 1.38      | 196.17                    | 4204.48                   | 4204.48                   |
| S2   | -395.35 | 252.941         | 10.472          | 2757         | 1931         | 2920.93    | 2.97  | 23.86         | 3.96 | 11.92 | 0.0506     | 3.09      | 1025.99                   | 8636.34                   | 8636.34                   |
| S3   | 149.35  | 669.55          | 10.472          | 5764         | 1685         | 2849.53    | 3.20  | 52.04         | 3.88 | 5.53  | 0.0334     | 4.06      | 1707.99                   | 12817.2                   | 12817.2                   |

Verfügbare Ergebnisse sind:

- 'n': Drehzahl der Welle
- ' $\Sigma T$ ': Summe aller Drehmomente mit demselben Vorzeichen
- ' $\Sigma P$ ': Summe aller Eingaben von Leistungen mit gleichem Vorzeichen
- 'minL10rh': minimale Lebensdauer L10rh nach [ISO 16281](#)<sup>351</sup> für alle Lager auf dieser Welle. Alternativ wird L10h gemäß [ISO 281](#)<sup>350</sup> angegeben.
- 'minL10rh': minimale modifizierte Referenzlebensdauer Lnmrh nach [ISO 16281](#)<sup>351</sup> für alle Lager auf dieser Welle. Alternativ wird Lnmh gemäß [ISO 281](#)<sup>350</sup> angezeigt.



- 'pmax': Maximale Pressung für die Lager
- 'minS0eff': minimaler statischer Sicherheitsfaktor nach [ISO 17956](#) <sup>351</sup> für alle Lager auf dieser Welle
- 'maxSigV': Maximale Vergleichsspannung in dieser Welle
- 'SD': Sicherheit gegen Ermüdung nach [DIN 743](#) <sup>350</sup> für diese Welle
- 'SS': Statischer Sicherheitsfaktor nach [DIN 743](#) <sup>350</sup> für diese Welle
- 'maxUr': maximale radiale Verschiebung der Welle
- 'Masse': Masse dieser Welle
- 'Jxx, Jyy, Jzz': Trägheitsmomente der Welle

### 2.6.2.2 Tabelle für Querschnitte

Die Tabelle für Querschnitte enthält Details für jeden Querschnitt für jede Welle. Der Typ der Kerbwirkung ist angegeben, Sicherheitsfaktoren für Festigkeit, Kräfte, Momente und Verschiebungen:

| Name | Type             | x [mm] | SD    | SS    | Fx [kN] | Fy [kN] | Fz [kN] | Mx [Nm] | My [Nm] | Mz [Nm] | ux [mm] | uy [mm] | uz [mm] | rx [°] | ry [°] | rz [°] |
|------|------------------|--------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| √ S1 |                  |        | 3.94  | 8.28  |         |         |         |         |         |         |         |         |         |        |        |        |
| A    | Shoulder         | 38     | 5.35  | 8.28  | 0.000   | -1.034  | -2.826  | -100.00 | -22.57  | 8.22    | 0.0048  | -0.0107 | -0.0282 | 1.20   | 0.01   | -0.00  |
| B    | Shoulder         | 172    | 27.83 | 87.42 | 0.000   | 0.403   | 1.095   | 0.00    | -8.74   | 3.20    | 0.0048  | -0.0063 | -0.0165 | 1.18   | -0.02  | 0.01   |
| C    | Interference fit | 55     | 4.47  | 10.46 | 0.000   | -1.033  | -2.826  | -100.00 | -70.61  | 25.78   | 0.0048  | -0.0122 | -0.0324 | 1.19   | 0.01   | -0.00  |
| D    | Interference fit | 95     | 3.94  | 12.44 | 0.000   | 0.361   | 0.995   | -2.57   | -93.09  | 34.06   | 0.0048  | -0.0132 | -0.0351 | 1.18   | -0.00  | 0.00   |

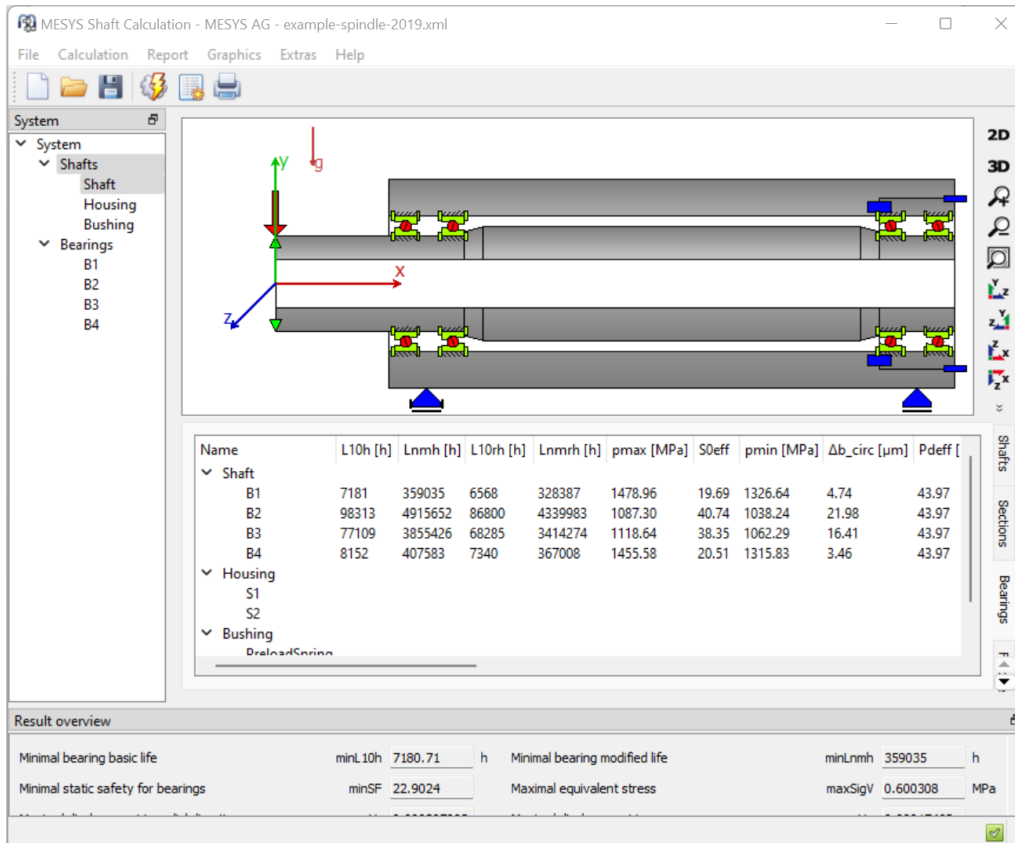
Verfügbare Ergebnisse sind:

- 'SD': Sicherheit gegen Ermüdung nach DIN 743 für diesen Querschnitt
- 'SS': Statischer Sicherheitsfaktor nach DIN 743 für diesen Querschnitt
- 'Fx, Fy, Fz': Kräfte im Querschnitt der Welle. Bei Flächen von elastischen Bauteilen wirkt die Kraft auf das Bauteil.
- 'Mx, My, Mz': Momente im Querschnitt der Welle. Bei Flächen von elastischen Bauteilen wirkt die Kraft auf das Bauteil.
- 'ux, uy, uz': Axial- und Radialverschiebung für diese Position
- 'rx, ry, rz': Torsions- und Kippwinkel für diese Position
- 'cxx, cyy, czz': Steifigkeit des auf diesen Punkt reduzierten Systems. Der Kehrwert der Hauptdiagonalen der Nachgiebigkeitsmatrix wird angezeigt
- 'crx, cry, crz': auf diesen Punkt reduzierte Steifigkeit des Systems in Rotation. Der Kehrwert der Hauptdiagonalen der Nachgiebigkeitsmatrix wird angezeigt

### 2.6.2.3 Tabelle für Lager

Eine Tabelle für Lager zeigt die Lebensdauer und Belastung von Lagern und Randbedingungen. Die Vorzeichenkonvention für die Belastungen ist, dass die Kraft von der Welle zum Lager angegeben wird.

Für Wälzlager werden neben Kräften und Momenten auch die Lebensdauer und der Pressung angegeben. Mit der rechten Maustaste können zusätzliche Ergebnisse wie Betriebsspiel oder Bohr- zu Roll-Verhältnis angezeigt werden.



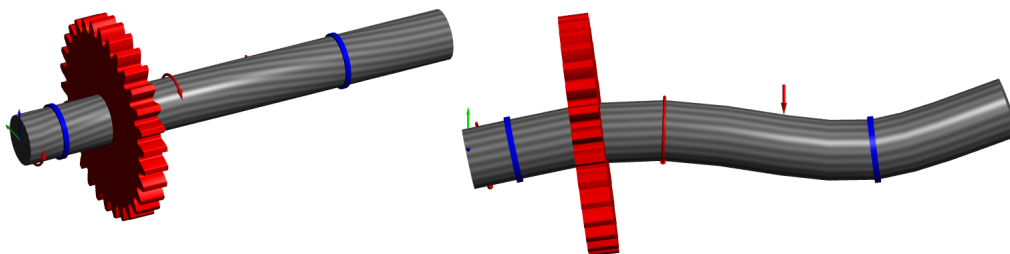
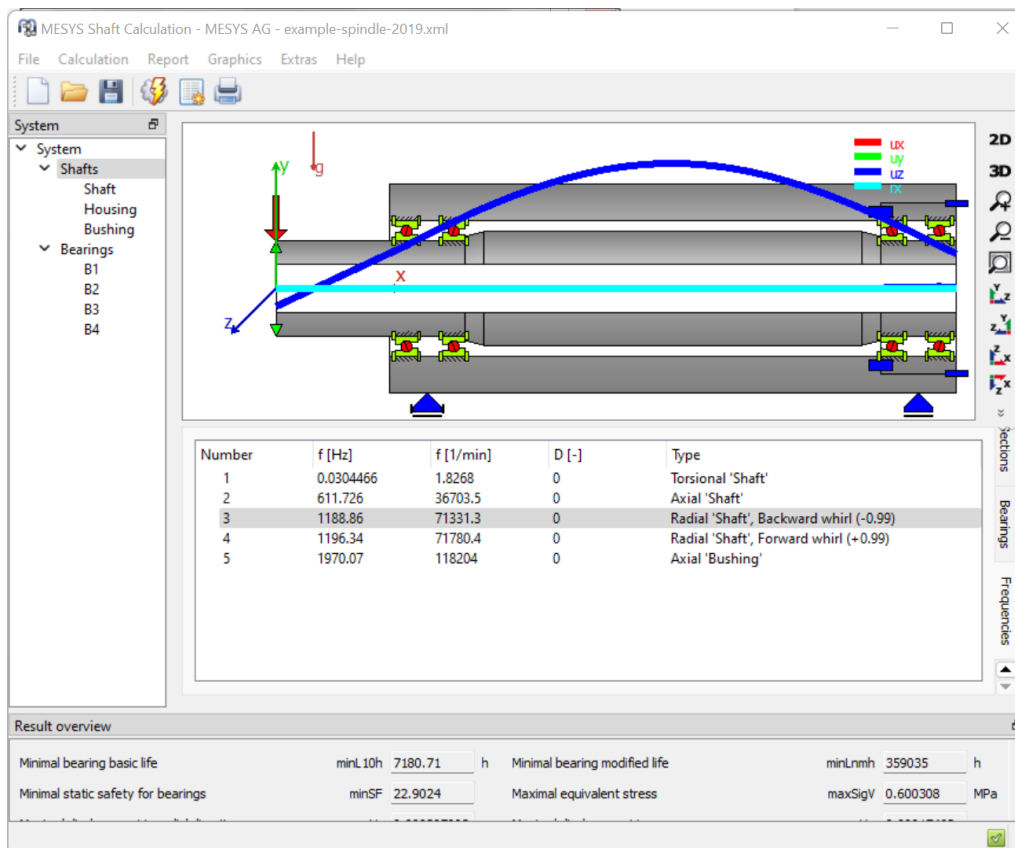
Verfügbare Ergebnisse sind:

- 'L10h': nominelle Lebensdauer nach [ISO 281](#)<sup>350</sup>
- 'Lnmh': Modifizierte Lebensdauer nach [ISO 281](#)<sup>350</sup>
- 'L10rh': nominelle Referenzlebensdauer nach [ISO 16281](#)<sup>351</sup>
- 'Lnmrh': modifizierte Referenzlebensdauer nach [ISO 16281](#)<sup>351</sup>
- 'pmax': maximale Kontaktspannung des Lagers
- 'S0eff': statischer Sicherheitsfaktor nach [ISO 17956](#)<sup>351</sup> basierend auf der Lastverteilung innerhalb des Lagers

- 'pmin': minimale Kontaktspannung des Lagers. Bei einem Wert größer Null werden alle Wälzkörper belastet.
- ' $\omega_{\text{spin}}/\omega_{\text{roll}}$ ': Bohr- zu Roll-Verhältnis für Kugellager
- ' $\Delta b_{\text{circ}}$ ': Kugelvorn-/nachlauf für Kugellager
- ' $\Delta T$ ': Temperaturerhöhung gemäß [DIN 732](#)<sup>350</sup> für dieses Lager
- ' $n_t$ ': maximal zulässige Drehzahl nach [DIN 732](#)<sup>350</sup>
- ' $\kappa$ ': Viskositätsverhältnis für dieses Lager. Es sollte normalerweise zwischen 1 und 4 liegen.
- ' $p_{\text{eff}}$ ': Effektives Radialspiel des Lagers unter Betriebsbedingungen
- ' $p_{\text{aeff}}$ ': Effektives axiales Lagerspiel des Lagers unter Betriebsbedingungen
- ' $\alpha_{\text{eff}}$ ': Effektiver freier Druckwinkel für Kugellager
- ' $\Delta\alpha$ ': Variation des Druckwinkels zwischen Innen- und Außenring bei Kugellagern. Dieser Wert sollte nach manchen Herstellerangaben kleiner  $15^\circ$  sein.
- ' $p_{\text{FitShaft}}$ ': Flächenpressung im Presssitz zwischen Welle und Innenring. Dieser sollte normalerweise größer als Null sein.
- ' $e_{LR_i}, e_{LR_e}$ ': Ausdehnung der Kontaktellipse für Kugellager. Werte unter 100% bedeuten Abschneidung.
- ' $F_x, F_y, F_z, F_r$ ': Lagerkräfte,  $F_r$  ist die Radialkraft. Die Kraft wirkt auf das Lager.
- ' $M_x, M_y, M_z, M_r$ ': Momente,  $M_r$  ist das Kippmoment. Das Kippmoment wirkt auf das Lager.
- ' $u_x, u_y, u_z, u_r$ ': Relativverschiebungen des Wellenknotens zum zweiten Knoten (oder Gehäuse),  $u_r$  ist die radiale Verschiebung
- ' $r_x, r_y, r_z, r_r$ ': relative Rotation des Wellenknotens gegenüber dem zweiten Knoten (oder Gehäuse),  $r_r$  ist der resultierende Kippwinkel

#### 2.6.2.4 Tabelle für Frequenzen

In der Übersicht können auch die Eigenfrequenzen angezeigt werden. Wird eine Frequenz ausgewählt, wird die entsprechende Eigenform in der Grafik dargestellt. In der 2D-Ansicht werden drei Verschiebungen und der Torsionswinkel dargestellt. In der 3D-Ansicht werden die Eigenformen animiert dargestellt.



Verfügbare Ergebnisse sind:

- 'f': Frequenz in Hz und pro Minute
- 'D': Dämpfungsmass der Eigenform, falls eine Dämpfung definiert ist
- 'Typ': Versucht, den Typ der Eigenform basierend auf der kinetischen Energie der Eigenformen zu klassifizieren. Es wird ein numerischer Wert für die Richtung des Orbits angegeben. +1 ist ein kreisförmiger Gleichlauf, 0 ist ein linearer Orbit und -1 ist ein kreisförmiger Gegenlauf.

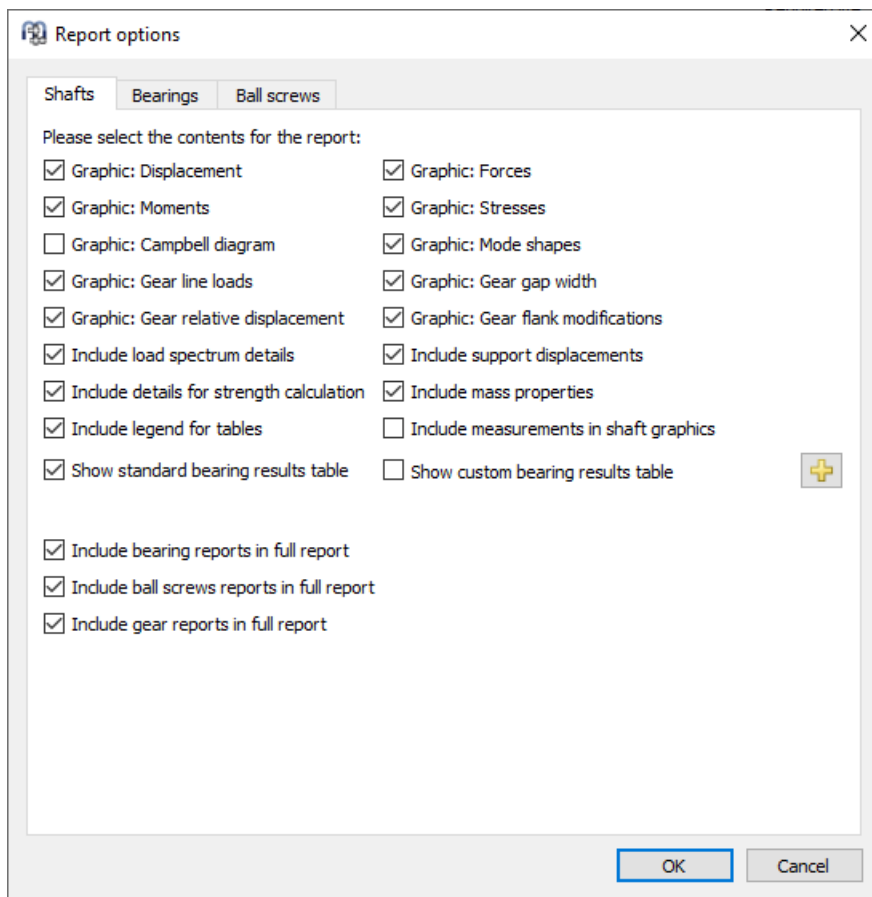
### 2.6.3 Protokoll

Mit der Schaltfläche in der Symbolleiste oder mit "Protokoll"->"Protokoll anzeigen" wird ein Protokoll für die Wellenberechnung erstellt, das nur einen Überblick über die Resultate für die Lagerberechnung gibt. Es gibt auch "Protokoll"-

>"Gesamtreport", der einen vollständiges Protokoll mit den Ergebnissen der Wellenberechnung und den vollständigen Protokollen der Lagerberechnungen erzeugt.

### 2.6.3.1 Optionen für das Protokoll

Mit "Protokoll"->"Protokoll Optionen" kann der Inhalt des Protokolls konfiguriert werden.



Es steht eine Seite für die Ausgaben der Wellenberechnung, eine Seite für die Lagerberechnung und eine Seite für die Berechnung für Kugelgewindetriebe zur Verfügung. Die Einstellungen für Lager und Kugelgewindetriebe werden an die entsprechenden Berechnungen weitergegeben. Die Legende für Parameter der Tabellen kann im Protokoll angezeigt werden. Benutzerdefinierte Tabellen für Ergebnisse für Lager können konfiguriert werden, wenn die Lizenz für die Wälzlagerberechnung verfügbar ist.

#### 2.6.4 Resultatetabellen

Im Menü "Protokoll"->"Resultattabellen" ist es möglich, die Ergebnisdaten in Form von Tabellen auszugeben, die in verschiedenen Dateiformaten erzeugt werden können, wie zuvor unter "Konfiguration mit INI-Datei" erläutert.

Resultatetabellen mit Detailergebnissen für Lager und Kugelgewindetriebe können mit einem Rechtsklick auf das Lager oder die Kugelgewindespindel im Systembaum geöffnet werden.

#### 2.6.5 Benutzerdefinierte Protokollvorlagen

Benutzerdefinierte Protokollvorlagen können im Unterverzeichnis "templates/shaft" hinzugefügt werden. Basierend auf diesen Vorlagen können Protokolle durch Auswahl der Protokollvorlage unter "Protokoll"->"Protokollvorlagen" erstellt werden.

Die Protokollvorlagen sind Word-Dateien mit DOCVARIABLE-Feldern. Diese Felder werden bei der Erstellung des Protokolls ausgefüllt.

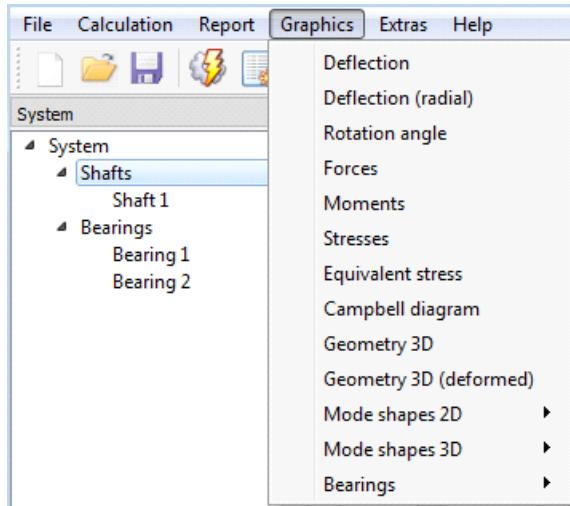
Mögliche Felder sind:

- DOCVARIABLE VAR Name [Einheit]: die Variable mit der Bezeichnung 'Name' wird gedruckt. Optional kann eine Einheit in Klammern angegeben werden, zum Beispiel [mm]. Zusätzlich kann ein Formales hinzugefügt werden wie %6.3g oder %6.3f, wobei 'f' immer eine Festpunktausgabe und 'g' eine Exponentialausgabe für große Zahlen erzeugt.
- DOCVARIABLE VARU name [unit]: die Variable mit der Bezeichnung 'name' plus die Einheit werden ausgegeben. Optional kann eine Einheit in Klammern angegeben werden, zum Beispiel [mm].
- DOCVARIABLE TABLE tablename: Es wird eine Tabelle eingefügt.
- DOCVARIABLE GRAPHIC graphicName width=130 height=70: Es wird eine Grafik eingefügt. Optional können Höhe und Breite in Millimetern angegeben werden.

Bezüglich der Details zu Variablennamen, Tabellennamen und Grafiknamen wenden Sie sich bitte an [support@mesys.ch](mailto:support@mesys.ch) für zusätzliche Dokumentation.

## 2.6.6 Grafiken

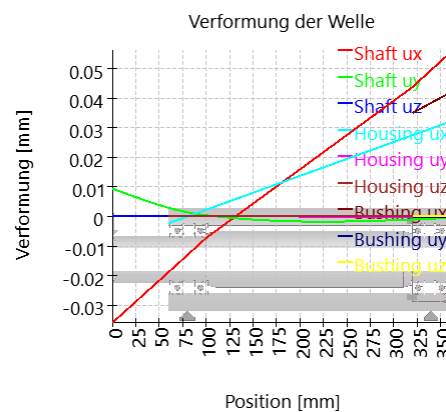
Mehrere Ergebnisse können als Grafiken dargestellt werden. Die meisten Grafiken werden auch an das Protokoll angehängt, so dass eine vollständige Dokumentation in einem Dokument vorliegt.



Für alle Diagramme stehen mit der rechten Maustaste Diagramm Optionen zur Verfügung. Es ist möglich, das Koordinatensystem und die Einheiten zu ändern. Auch das Exportieren und Drucken ist über das Kontextmenü möglich.

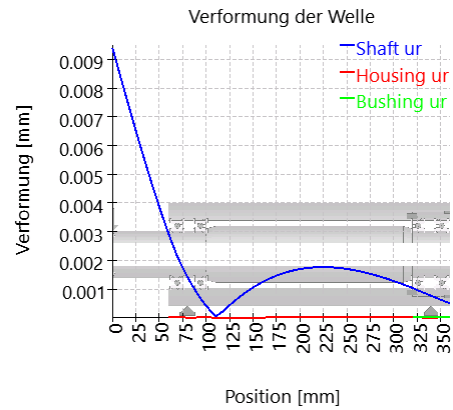
### 2.6.6.1 Verformung der Welle

Die Verformung der Wellen wird für die drei Verschiebungskoordinaten für jede Welle dargestellt.



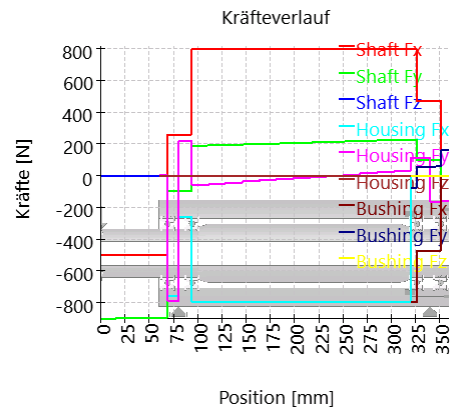
## 2.6.6.2 Verformung der Welle (radial)

Die Tabelle der radialen Verformung zeigt den absoluten Wert der gesamten radialen Verformung der Wellen an.



## 2.6.6.3 Kräfteverlauf der Welle

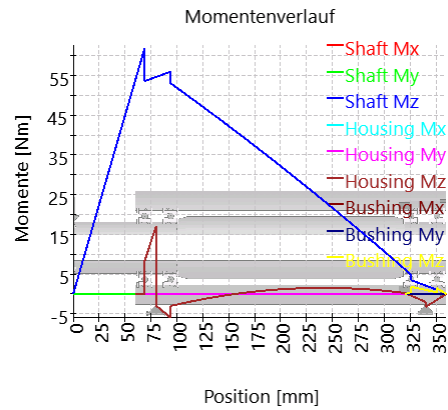
Für jede Welle sind die drei Kraftkomponenten dargestellt.





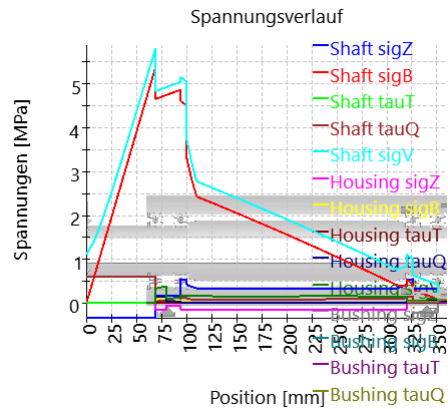
## 2.6.6.4 Momentenverlauf der Welle

Für jede Welle sind die beiden Momente im Biegeverlauf und das Drehmoment angegeben.



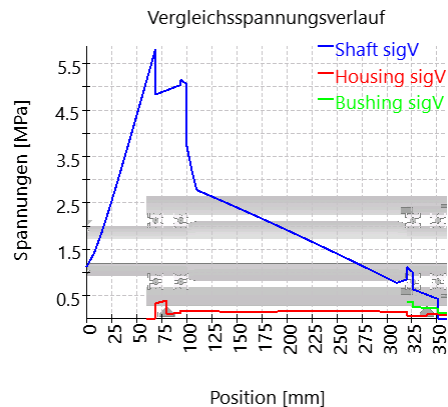
## 2.6.6.5 Spannungsverläufe der Wellen

Die Spannungskomponenten werden für alle Wellen angezeigt. "sigZ" ist die Zugspannung, "sigB" ist die Biegespannung, "tauT" ist die Torsionsschubspannung, "tauQ" ist die Querschubspannung, "sigV" ist die Vergleichsspannung.



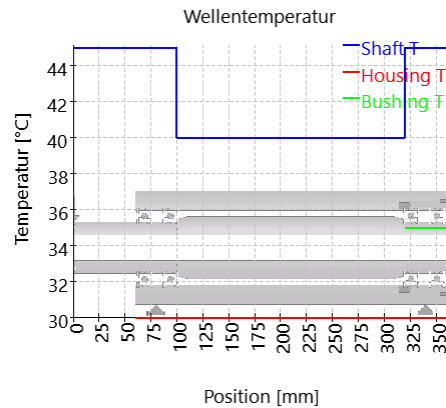
## 2.6.6.6 Vergleichsspannung der Wellen

Dieses Diagramm zeigt die Vergleichsspannung für alle Wellen.



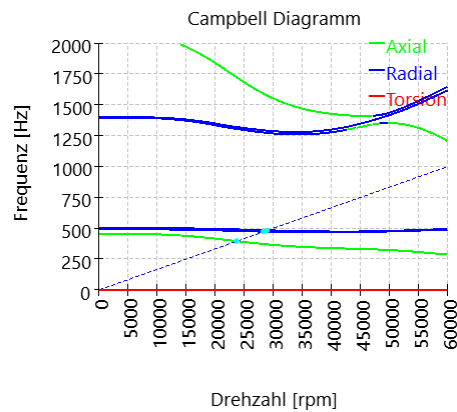
## 2.6.6.7 Wellentemperatur

Die Temperatur für jede Welle ist in diesem Diagramm dargestellt. Eine andere Temperatur für jeden Abschnitt der Welle kann nach Aktivierung von [Temperatur pro Element berücksichtigen](#) <sup>107</sup> definiert werden.



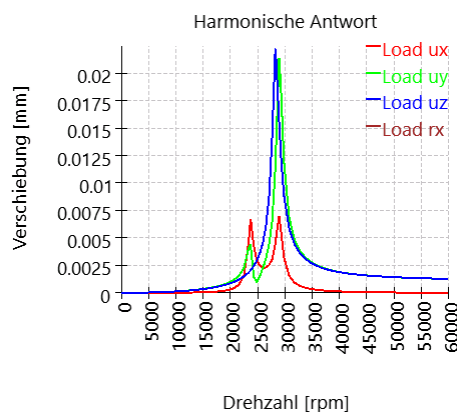
## 2.6.6.8 Campbell Diagram

Das Campbell Diagramm zeigt die Änderung der Eigenfrequenzen über die Drehzahl der Welle. Bei dieser Berechnung wird die Drehzahl aller Wellen mit dem gleichen Faktor multipliziert. Die Drehzahl der Wellen wird mit gestrichelten Linien dargestellt. Diese Berechnung erfolgt immer unter Berücksichtigung des Kreiseffekts.



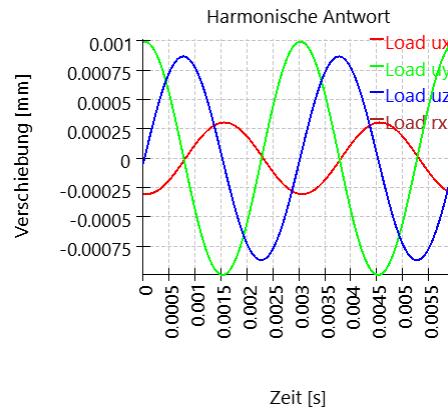
## 2.6.6.9 Harmonische Antwort über Drehzahl

Die Harmonische Antwort über Drehzahl kann dargestellt werden. Die Berechnung wird zusammen mit dem Campbell Diagramm durchgeführt. Es sind Diagramme für Kräfte an allen Lagern und Diagramme für Verschiebungen an Positionen von Lasten und Querschnitten vom Typ "Dokumentationspunkt" verfügbar.



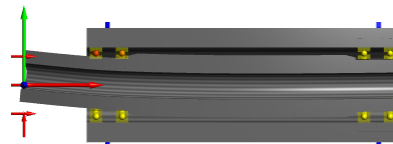
### 2.6.6.10 Harmonische Antwort über Zeit

Die Harmonische Antwort über Zeit zeigt die Veränderung der Reaktionskräfte und Verschiebungen über Zeit. Diese Berechnung erfolgt für die aktuelle Rotations-Drehzahl.



### 2.6.6.11 Harmonische Antwort 3D

Harmonische Antwort 3D zeigt die dynamischen Verschiebungen über Zeit als 3D-Ansicht.

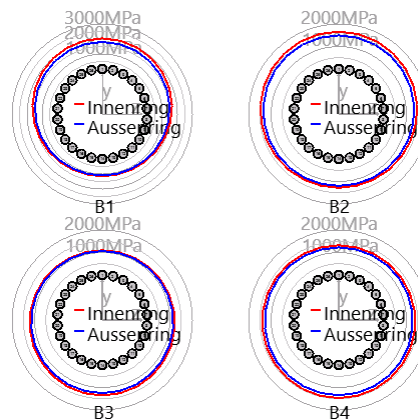


### 2.6.6.12 Diagramme zur Lageranalyse

Darüber hinaus gibt es mehrere Diagramme für die Lageranalyse. Bitte prüfen Sie die Dokumentation der Lageranalyse für Details. Siehe [Ergebnis-Grafiken für Lager](#).

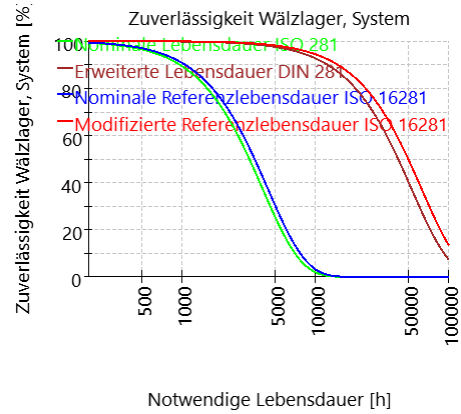
### 2.6.6.13 Wälzlager-Übersichten

Für die Lager stehen mehrere Grafiken als Übersichtsgrafiken zur Verfügung, die für jedes Lager das gleiche Diagramm zeigen. So kann man sich schnell einen Überblick über das Verhalten aller Lager verschaffen.



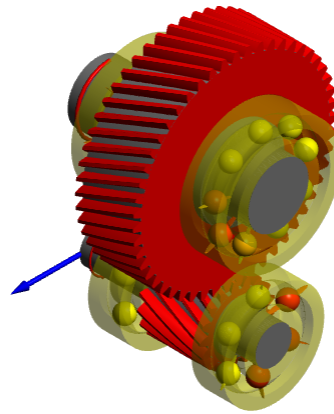
### 2.6.6.14 Zuverlässigkeit Wälzlager, System

Die Zuverlässigkeit des Systems unter Berücksichtigung aller Lager wird in einem Diagramm dargestellt. Die Zuverlässigkeit wird für die vier verschiedenen Ergebnisse für die Lagerlebensdauer dargestellt.



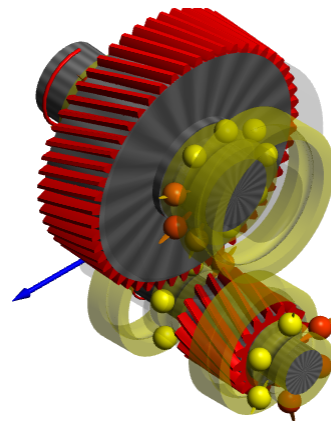
### 2.6.6.15 Geometrie 3D

Die 3D Geometrie kann ohne Deformationen oder mit überhöhten Deformationen dargestellt werden. Das Diagramm ist für die gesamten Systeme und für jede Gruppe verfügbar.



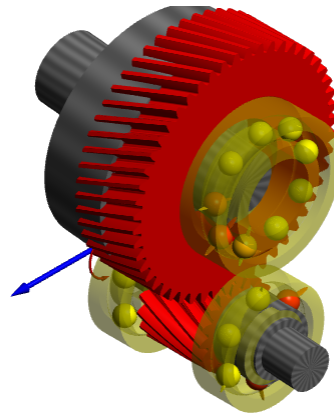
### 2.6.6.16 Geometrie 3D mit Verformung

This Diagramm zeigt die 3D-Geometrie einer Gruppe oder des Systems mit überhöhten Verformungen.



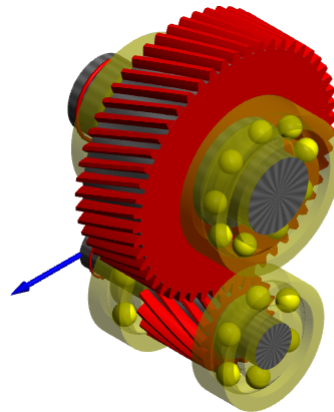
### 2.6.6.17 Geometrie 3D (animierte Verformung)

Dieses Diagramm zeigt eine Animation der 3D-Geometrie einer Gruppe oder des Systems mit überhöhten Verformungen.



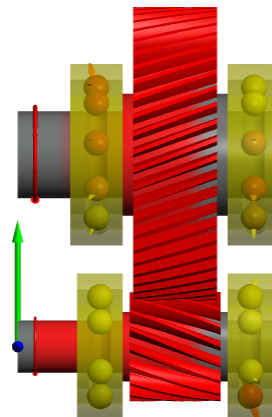
### 2.6.6.18 Geometrie 3D (animiert)

Dieses Diagramm zeigt die 3D-Geometrie des Systems mit animierten Rotationen. Es wird hauptsächlich zur Überprüfung der Drehrichtung von Getrieben verwendet.



### 2.6.6.19 Geometrie 3D (Leistungsfluss)

Der Leistungsfluss von Übertragungssystemen kann in der 3D Grafik dargestellt werden.

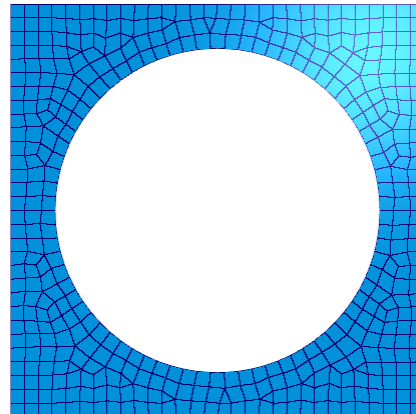


### 2.6.6.20 3D-elastische Bauteile

Für die Ergebnisse von 3D-elastischen Teilen stehen mehrere Diagramme zur Verfügung.

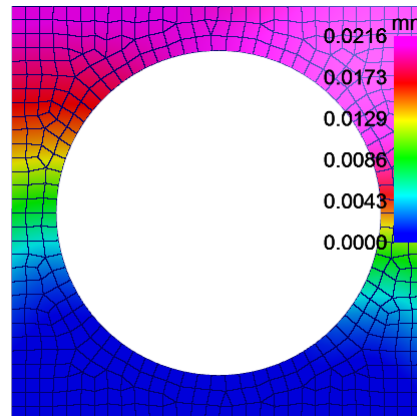
## 2.6.6.20.1 Geometrie

Dieses Diagramm zeigt die 3D-Geometrie eines 3D-elastischen Bauteils.



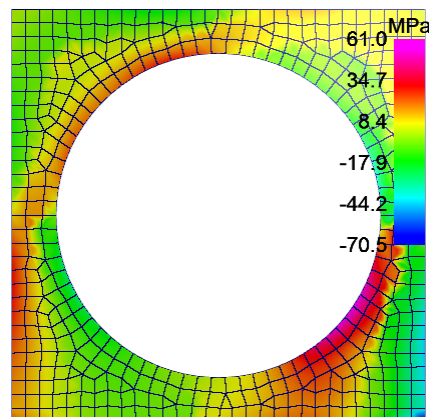
## 2.6.6.20.2 Geometrie 3D mit Verformung

Die 3D-Geometrie der 3D-elastischen Bauteile wird mit Verformungen als Farbskala dargestellt. Die Grafik ist auch mit Verformungskomponenten in X-, Y-, Z-Richtung oder normal zur Oberfläche verfügbar.



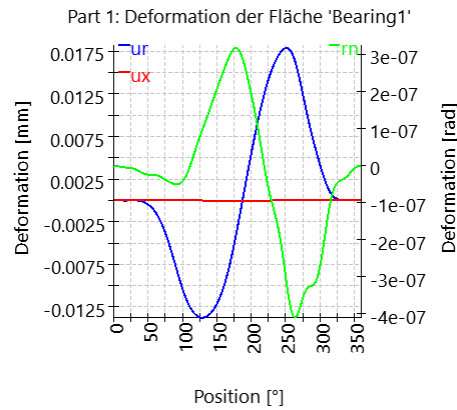
## 2.6.6.20.3 Spannungen

Wenn die Oberflächenspannungsfelder während der Kondensation berechnet wurden, stehen mehrere Spannungsdiagramme zur Verfügung: Vergleichsspannung, vorzeichenbehaftete Vergleichsspannung, Spannungen in X-, Y-, Z-Richtung und normal zur Oberfläche sowie die maximale und minimale Hauptspannung.



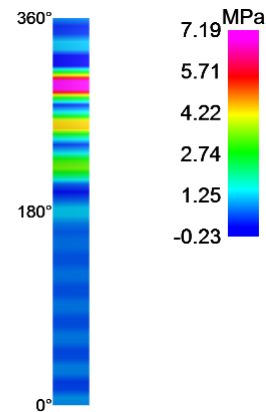
### 2.6.6.20.4 Verformung von Wälzlagerflächen

Die Verformung von elastischen Lagerflächen kann in einem Diagramm dargestellt werden. Die radiale und axiale Verformung und der Kippwinkel werden über die Winkellage in einem lokalen Koordinatensystem für die Fläche dargestellt. In diesem Diagramm sind die Starrkörperverschiebungen enthalten, während sie in dem in der Lagerberechnung vorhandenen Verformungsdiagramm abgezogen werden.



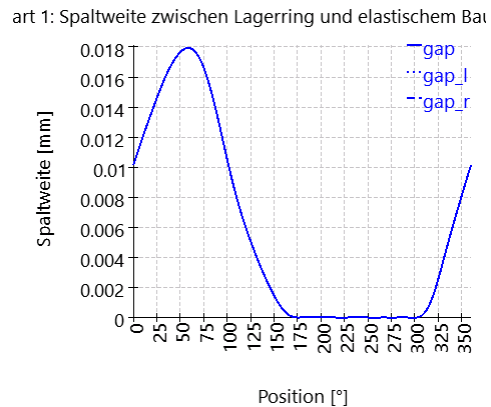
### 2.6.6.20.5 Kontaktspannungen von Lagerflächen

Eine ungefähre Spannung für den Kontakt in der Lagerfläche ist in dieser Grafik dargestellt. Zur Beurteilung eines möglichen Spalts sollte stattdessen das Diagramm für den Spalt verwendet werden.



### 2.6.6.20.6 Spaltweite für Wälzlagerflächen

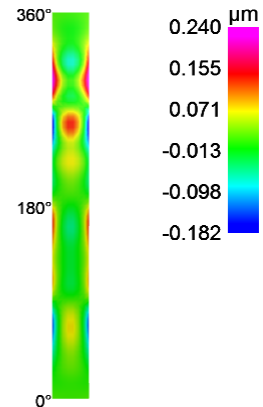
Dieses Diagramm zeigt die Spaltweite zwischen dem Lagerring und der Fläche des 3D-elastischen Bauteile. Damit kann überprüft werden, ob ein Spalt zwischen dem Lagerring und dem elastischen Teil vorhanden ist.



**2.6.6.20.7 Abweichung der Normalverschiebung für Wälzlägerflächen**

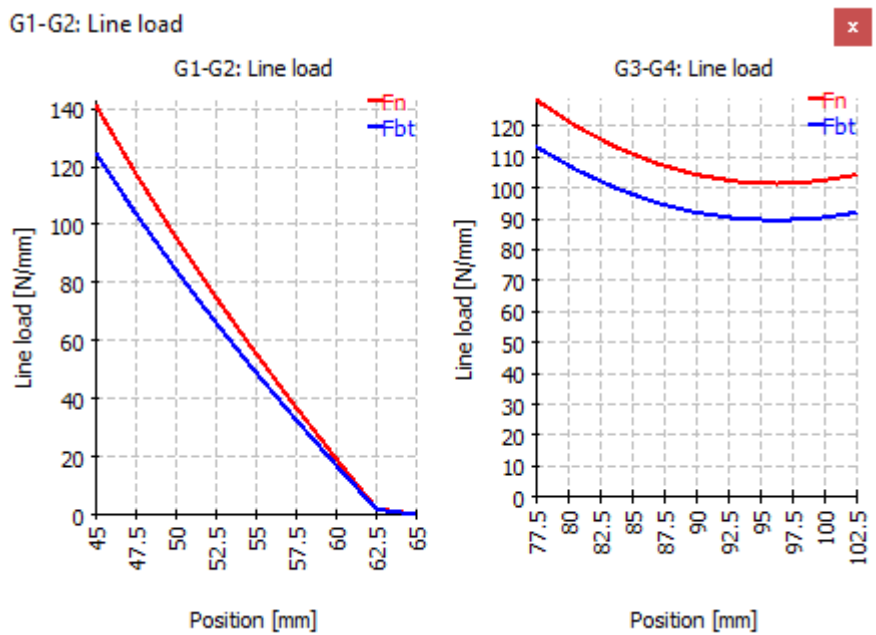
Diese Grafik zeigt die Abweichung zwischen der für den Lagerkontakt verwendeten Fourier-Approximation und den Knotenverschiebungen. Die Grafik ist nur verfügbar, wenn das Verschiebungsfeld berechnet wird.

Normalerweise sollte der Fehler viel kleiner als ein Mikrometer sein. Wenn der Fehler zu groß erscheint, könnte die Approximationsordnung in den Einstellungen des 3D-elastischen Teils erhöht werden.



**2.6.6.21 Verbindungs-Übersichten**

Als Übersichtsgrafiken stehen mehrere Grafiken für Verbindungen zur Verfügung, die für jede Verbindung das gleiche Diagramm zeigen. So kann man sich schnell einen Überblick über das Verhalten aller Verbindungen verschaffen.

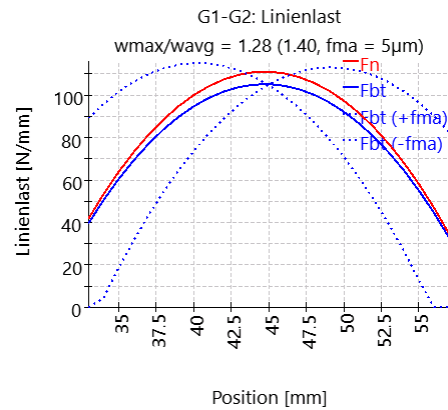


**2.6.6.22 Verbindungen**



## 2.6.6.22.1 Linienlast

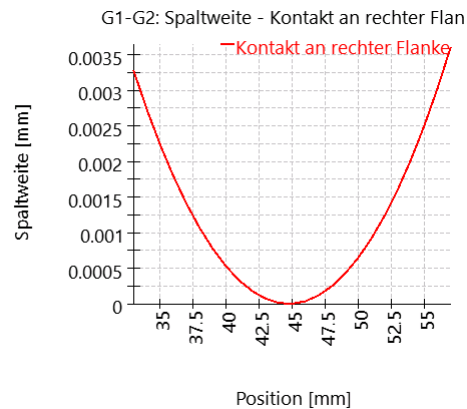
Die Linienlast eines Zahnradpaars kann in einem Diagramm dargestellt werden. Für dieses Diagramm sollten entweder die Zahnräder als Steifigkeit unter Einstellungen betrachtet werden oder der Wellendurchmesser muss groß genug sein, um die Steifigkeit des Zahnradkörpers zu berücksichtigen. Dieses Diagramm ist auch für alle Lastkollektiv-Ergebnisse in einem einzigen Diagramm verfügbar. Damit kann der ungünstigste Fall innerhalb eines Lastkollektivs schnell überprüft werden.



Wird in den Grafikoptionen ein Verzahnungsabweichung 'fma' definiert, wird die Linienlast auch für diese Variationen unter der Annahme konstanter Zahnradbelastung und Kippwinkel ausgewertet.

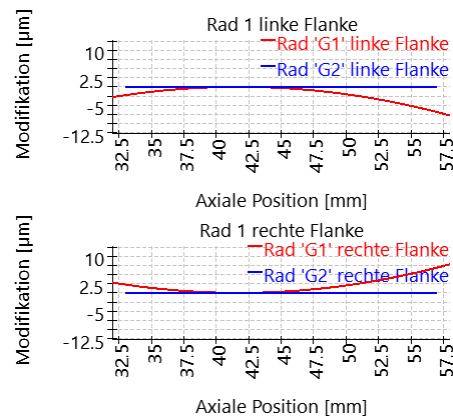
## 2.6.6.22.2 Spaltweite

Das Diagramm der Spaltbreite eines Zahnradpaares kann für einen Vorschlag von Flankenlinienkorrekturen verwendet werden.



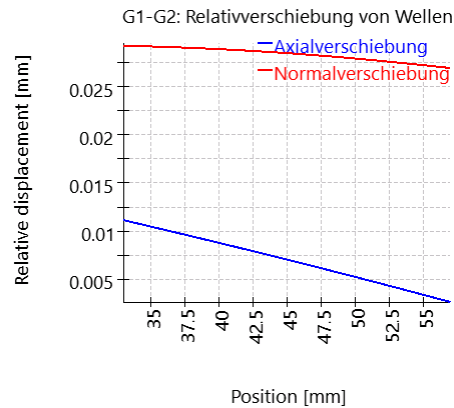
## 2.6.6.22.3 Flankenlinien-Modifikationen

Sie zeigt die resultierende Profilierung der Zahnflanke nach den Korrekturen, die vorgenommen wurden, um einen optimalen Zahnkontakt zu erreichen. So stellt die x-Achse die Zahnbreite in mm und die y-Achse die geometrische Veränderung in µm dar, die die Flanke erfahren hat.



## 2.6.6.22.4 Relativverschiebungen

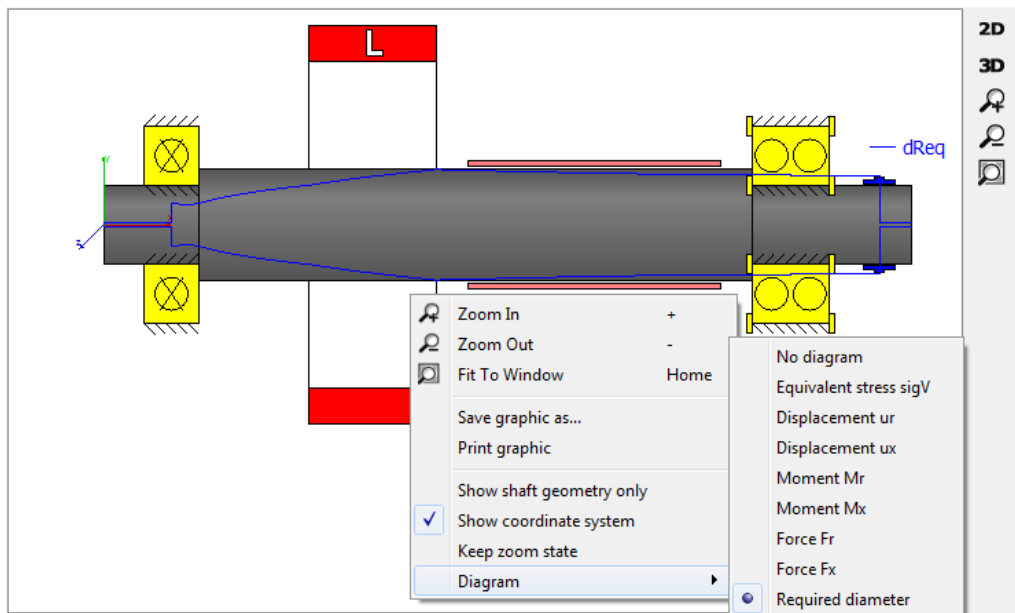
Für jedes Stirnradpaar wird ein Diagramm zur Relativverschiebung von Wellen dargestellt. Es zeigt die Relativverschiebung von beiden Wellen über die Breite der Zahnräder. Die Axialverschiebung ist eine Veränderung des Achsabstands, die Normalverschiebung eine Verschiebung senkrecht zur Ebene der beiden Wellen.



Das Diagramm hilft, die erforderlichen Modifikationen oder Änderungen bzw. das Spiel zu verstehen.

## 2.6.7 Bereich Grafiken

Wenn Sie im 2D-Modus mit der rechten Maustaste auf den Hauptgrafikbereich klicken, bietet ein Kontextmenü mit der Bezeichnung 'Diagramm' die Möglichkeit, einige wellenbezogene Diagramme über die aktuelle Geometrie der Welle zu legen.



Ein zusätzliches Diagramm mit der Bezeichnung 'Notwendiger Durchmesser' kann der 2D-Geometrie der Welle überlagert werden. Es gibt einen Anhaltspunkt dafür, wie groß der Durchmesser sein sollte, um einen maximalen Wert für die Vergleichsspannung nicht zu überschreiten (siehe Abbildung oben), der auf der Registerkarte 'Einstellungen für Darstellung' definiert ist.

## 2.6.8 CAD Export

Im Menü Grafiken->CAD können mehrere Grafiken ausgewählt werden. Bei der Wellenberechnung sind dies Wellengeometrie oder Wellengeometrie mit

vereinfachten oder detaillierten Lagern und Kräften. Diese Grafiken können als STEP exportiert werden. Diese STEP-Dateien sind nicht für die Fertigung zu verwenden, da nicht alle Geometriedetails in der Software vorhanden sind und Vereinfachungen vorgenommen werden.

Der Export kann als Ausgangspunkt für die Geometrieerzeugung oder für Vergleiche verwendet werden.



# MESYS Wälzlagerberechnung

### 3 MESYS Wälzlagerberechnung

Diese Wälzlagerberechnung (Version 06/2024) berechnet die Lastverteilung, die Referenzlebensdauer und die Erweiterte Referenzlebensdauer nach [ISO 16281](#) <sup>351</sup> (DIN 26281) für die folgenden Lagerarten:

- Radial-Rillenkugellager
- Zweireihige Rillenkugellager
- Axialrillenkugellager
- Radial-Schräggugellager
- Axial-Schräggugellager
- Zweireihige radiale Schräggugellager
- Zweireihige Axial-Schräggugellager
- Einreihige Pendelkugellager
- Zweireihige Pendelkugellager
- Vierpunkt-Kugellager als Radiallager
- Vierpunkt-Kugellager als Axiallager
- Dreipunktlager mit geteiltem Innenring
- Dreipunktlager mit geteiltem Außenring
- Duplex Kugellager
- Radial-Zylinderrollenlager
- Zweireihige Radial-Zylinderrollenlager
- Axial-Zylinderrollenlager
- Axial-Zylinderrollenlager (zweireihig)
- Tonnenlager
- Toroidallager
- Nadellager
- Kegelrollenlager
- Zweireihige Kegelrollenlager

- Axial-Kegelrollenlager
- Radial-Pendelrollenlager
- Radiales halbes Pendelrollenlager
- Axial-Pendelrollenlager
- Kreuzrollenlager als Radiallager
- Kreuzrollenlager als Axiallager
- Schrägrollenlager als Radiallager
- Schrägrollenlager als Axiallager

In Zukunft werden weitere Typen von Lagern hinzukommen.

Die Innengeometrie der Lager kann von der Software approximiert oder vom Anwender vorgegeben werden. Das Betriebsspiel kann vorgegeben werden. Der Einfluss von Presssitzten, Temperatur und Fliehkräften auf das Spiel kann berücksichtigt werden. Fliehkräfte und gyroskopische Momente auf die Wälzkörper können nur für Kugellager berücksichtigt werden.

In Erweiterung von ISO/TS 16281 kann der Einfluss der reduzierten Werkstoffhärte gemäß NREL-Richtlinie DG03 berücksichtigt werden. Dazu gehört auch das Prüfen der Einhärtetiefe.

Die Schmierfilmdicke kann von der Software berechnet werden. Dies geschieht in Anlehnung an Harris: Rolling bearing analysis.

Die Belastung kann als Kraft/Moment oder Verschiebung/Rotation unabhängig für jeden der fünf Freiheitsgrade angegeben werden. Lagersätze können durch Verwendung einer Konfiguration mit mehreren Reihen definiert werden. Dies kann für Spindeln oder mehrreihige Zylinderrollenlager verwendet werden.

Die folgenden Ergebnisse können dem Protokoll entnommen werden:

- Referenz-Lebensdauer nach [ISO 16281](#)<sup>[351]</sup>
- Modifizierte Referenzlebensdauer nach [ISO 16281](#)<sup>[351]</sup>
- Basislebensdauer und Erweiterte Lebensdauer nach [ISO 281](#)<sup>[350]</sup> zum Vergleich
- Lastverteilung zwischen Wälzkörpern
- Reaktionskräfte/Momente und Verschiebungen/Rotationen
- Pressungsverteilung für jeden Kontakt

- Erforderliche Höhe des Absatzes für Kontaktellipsen in Kugellagern
- Statischer Sicherheitsfaktor
- Maximale Schubspannungsverläufe und Spannungen an der Grenzfläche zwischen Gehäuse und Kern
- Lastabhängiges Reibmoment für Kugellager basierend auf der Coulomb-Reibung
- Spieländerung aufgrund von Passungen und Temperatur
- Verschleisskenngrößen wie PV und QV für Kugellager

Zusätzlich zum Protokoll werden die Ergebnisse in mehreren Grafiken dargestellt. Sowohl das Protokoll als auch die Benutzeroberfläche sind in metrischen oder US-Einheiten verfügbar. Unterstützte Sprachen für Benutzeroberfläche und Protokoll sind Englisch, Deutsch, Französisch, Spanisch, Italienisch, Chinesisch, Japanisch und Koreanisch.

Parametervariationen können über Bereiche für mehrere Parameter vorgenommen werden. Die Ergebnisse der Parametervariationen werden in Form von Tabellen oder Grafiken dargestellt. Es werden Vorschläge für verschiedene Eingaben gemacht und Umrechnungen wie Axialspiel in Radialspiel sind möglich.

Elastische Deformationen des Außenrings können mit einer Erweiterung der Basissoftware berücksichtigt werden. Die Belastung kann an mehreren Punkten in radialer, axialer oder tangentialer Richtung angegeben werden und die Lebensdauer und Lastverteilung werden mit einem verformten Außenring berechnet. Die Hauptanwendung dieser Funktion ist für Laufrollen, aber auch Verformungen in einem Planetengetriebe als Außenring können berücksichtigt werden. Der elastische Aussenring kann bei folgenden Lagertypen berücksichtigt werden: Rillenkugellager, Radial-Schräggugellager, Vierpunkt-Kugellager, Dreipunkt-Kugellager, Radial-Zylinderrollenlager und zweireihige Kegelrollenlager. Mehrreihige Lager können mit Lagerkonfigurationen berücksichtigt werden.

## 3.1 Eingabeparameter

---

Die Parameter für die Eingaben werden auf fünf Registerkarten angezeigt.

### 3.1.1 Allgemein

Auf der ersten Eingabeseite können neben einer Projektbezeichnung verschiedene Einstellungen vorgenommen werden.



General Bearing geometry Bearing configuration Material and Lubrication Loading Track roller

**mesys**  
Engineering Consulting Software AG

**Rolling Bearing Calculation**

Calculation of load distribution and reference life for rolling bearings considering ISO/TS 16281 and NREL/TP-500-42362

Project name

Calculation description

Settings

Reliability S  %

Limit for aISO aISOMax

Friction coefficient  $\mu$    +

Calculate lubricant film thickness

Consider centrifugal force

Consider shaft and housing temperature  +

Oscillating bearing  Use load spectrum

Calculate required hardness depth  Calculate modified life

Use fatigue strength for hardness depth  Use extended method for pressure distribution

Required subsurface safety Ssmi   Calculate static safety factor based on stress

### 3.1.1.1 Projektname und Beschreibung der Berechnung

Der Projektname und die Beschreibung der Berechnung sind lediglich Eingaben, die im Protokollkopf angezeigt werden. Sie können verwendet werden, um Informationen über den Zweck der Berechnung zur Dokumentation einzugeben.

### 3.1.1.2 Zuverlässigkeit

Als Standard wird die Lagerlebensdauer für eine Zuverlässigkeit von 90% berechnet. Die gewünschte Zuverlässigkeit kann hier mit den Grenzwerten 90% und <100% geändert werden. Der Lebensdauerbeiwert für Zuverlässigkeit  $a_1$  wird entsprechend dieser Eingabe unter Verwendung der Drei-Parameter-Weibull-Beziehung berechnet, wie in der Formel in [ISO/TR 1281-2](#)<sup>[350]</sup> angegeben. Die Tabelle in [ISO 281](#)<sup>[350]</sup> wird ebenfalls nach dieser Formel berechnet und hat sich zu früheren Versionen der Norm geändert.

### 3.1.1.3 Grenze für aISO

Der Lebensdauerbeiwert für die Systembetrachtung  $a_{ISO}$  berücksichtigt die Schmierungseigenschaften und die Ermüdungsgrenzbelastung des Lagers und wird mit der Lebensdauer  $L_{10r}$  multipliziert, um die modifizierte Referenzlebensdauer zu erhalten. Nach [ISO 281](#)<sup>[350]</sup> ist dieser Faktor auf einen maximalen Wert von 50 begrenzt. In einigen Fällen, z. B. bei Windkraftanlagen, ist ein geringerer maximaler Grenzwert von 3,8 erforderlich.

Die maximale Grenze für den  $a_{ISO}$  Faktor kann hier festgelegt werden. Die Eingabe ist nur eine obere Grenze für den  $a_{ISO}$  Faktor, der nach (ISO 281, 2007) berechnet wird.

#### 3.1.1.4 Reibwert

Der Reibwert dient zur Berechnung des Reibungsmoments des Lagers unter Annahme von Coulomb-Reibung in den Kontakten. In der aktuellen Version ist er nur für Kugellager verfügbar. Das Reibmoment berücksichtigt nur den lastabhängigen Teil der Reibung; der lastfreie Teil wird nicht berücksichtigt.

Ein Vorschlag von (Harris, et al., 2007) sieht einen Wert von 0,1 für den Reibwert vor.

#### 3.1.1.5 Schmierfilmdicke berechnen

Die Berechnung der erweiterten Lebensdauer erfordert ein Viskositätsverhältnis  $\kappa$ . Dieses Verhältnis wird aus der Schmierstoffviskosität und einer Referenzviskosität  $\nu_1$  berechnet oder kann aus dem Schmierfilmparameter  $\Lambda$  berechnet werden als  $\kappa = \Lambda^{1.3}$  gemäß (ISO 281, 2007) und (ISO/TR 1281-2, 2008).

Da das Viskositätsverhältnis unter Verwendung von Standardeinstellungen für Oberflächenrauigkeit, Belastung, Druck-Viskositäts-Koeffizient des Öls und geometrischen Eigenschaften berechnet wird, werden bei der Verwendung der Schmierfilmdicke mehr Parameter des tatsächlichen Lagers berücksichtigt. Für die Definition der Referenzviskosität  $\nu_1$  siehe die Herleitung in (Baalman, 1994) oder (Heemskerk, 1980).

Wenn diese Einstellung aktiviert ist, wird die Schmierfilmdicke nach (Harris, et al., 2007) berechnet. Für Kugellager wird die minimale Filmdicke nach Gleichung 4.60 (Harris, et al., 2007) von Hamrock und Dowson berechnet. Für Rollenlager wird die Gleichung 4.57 (Harris, et al., 2007) nach Dowson und Higginson verwendet. Die gleichen Formeln werden für die Berechnung von  $\Lambda$  in (ISO/TR 1281-2, 2008) verwendet. Die Software verwendet die minimale Schmierfilmdicke für die Berechnung von  $\Lambda$ , im Gegensatz zu (Heemskerk, 1980), der die zentrale Schmierfilmdicke verwendet.

Zusätzlich wird ab Version 08-2016 eine thermische Korrektur angewendet. Der thermische Korrekturfaktor wird nach (Koch, 1996) unter Verwendung der Formel 4.62 von Wilson und Murch berechnet. In der Literatur werden unterschiedliche Korrekturfaktoren angegeben, siehe (Baly, 2005) oder (Gohar, 2001). Als Temperatur wird die Eingabe für die Temperatur des Schmierstoffs verwendet. Bei hohen Drehzahlen reduziert der thermische Korrekturfaktor die Schmierfilmdicke.

Diese Berechnungen erfordern die Eingabe von Oberflächenrauheit, Dichte des Öls und Druck-Viskositäts-Koeffizient des Öls. Für Kugellager wird dann die minimale Filmdicke für alle Kontakte verwendet. Für Rollenlager wird die minimale Filmdicke

für jeden Abschnitt berechnet und für die Berechnung des Lebensdauerbeiwerts für die Systembetrachtung  $a_{ISO}$  dieses Abschnitts verwendet.

### 3.1.1.6 Fliehkraft berücksichtigen

In dieser Version der Software kann die Fliehkraft für Kugellager und radiale Zylinderrollenlager berücksichtigt werden. Sie wird in Zukunft auch für andere Rollenlager ergänzt.

Die Fliehkräfte erhöhen die Belastung am Aussenring, verringern aber die Belastung am Innenring. Dies führt zu unterschiedlichen Druckwinkeln am Innen- und Aussenring und zu einem erhöhten Bohr- zu Roll-Verhältnis.

### 3.1.1.7 Temperaturgradient in Passungen berücksichtigen

Ist diese Option aktiviert, stehen zusätzlich zu den Innen- und Außenringtemperaturen auch die Wellen- und Gehäusetemperaturen als Eingaben zur Verfügung. Diese Option sollte nur aktiviert werden, wenn ein Temperaturgradient zwischen Welle und Innenring oder zwischen Außenring und Gehäuse berücksichtigt werden soll.

Wenn diese Option aktiviert ist, müssen alle vier Temperaturen definiert werden, insbesondere wenn sie von der Wellenberechnung verwendet werden. Die Wellentemperatur in der Wellenberechnung legt die Wellentemperatur für das Lager fest, aber die Temperatur des Innenrings muss noch vom Anwender definiert werden.

### 3.1.1.8 Oszillierendes Lager

Einige Lager rotieren nicht vollständig, sondern oszillieren. In diesem Fall ist die effektive Anzahl Lastwechsel kleiner als bei einem rotierenden Lager, was von der Software berücksichtigt werden kann. Die Berechnung erfolgt nach (Harris, et al., 2009), die auf (Harris, et al., 2007) basiert.

Dabei müssen ein Oszillationswinkel und eine Oszillationsgeschwindigkeit (Schwingungen pro Minute) angegeben werden. Der Oszillationswinkel ist definiert als der Winkel zwischen den beiden Endpunkten der Schwingung, also das Doppelte der Amplitude.

Die Rotationsgeschwindigkeiten  $n_i$  und  $n_e$  werden für die Berechnung der Fliehkräfte und der Schmierfilmdicke verwendet, die Oszillationsgeschwindigkeit  $f_{osc}$  für die Berechnung der Lebensdauer in h. Für die zur Berechnung des Schmierfaktors verwendete Geschwindigkeit schlägt (Houpert, 1999)  $n = f_{osc} \cdot \theta_{osc} / 180^\circ$  vor. Die Drehzahl muss vom Anwender eingegeben werden.

Bei  $\theta_{osc} < \theta_{crit}/2$  kann Passungsrost auftreten; das Lager sollte von Zeit zu Zeit um einen größeren Winkel rotiert werden, um den Schmierstoff neu zu verteilen. In diesem Fall wird eine Warnung angezeigt.

### 3.1.1.9 Erforderliche Einhärtetiefe berechnen

Die Härtetiefe ist eine Eingabe für Werkstoffdaten. Soll sie von der Software berechnet werden oder ist sie z.B. für durchgehärtete Lager uninteressant, dann setzen Sie dieses Flag.

Wenn das Flag nicht gesetzt ist, wird geprüft, ob die Härtetiefe groß genug ist.

### 3.1.1.10 Erforderliche Einhärtetiefe aus Dauerfestigkeit

Wenn dieses Flag gesetzt ist, wird die Härtetiefe anhand der Dauerfestigkeit des Kerns berechnet. Wenn es nicht gesetzt ist, wird die Streckgrenze verwendet.

Wenn die Berechnung mit einer maximalen Last erfolgt, kann die Streckgrenze verwendet werden. Wird die Berechnung mit der äquivalenten Last durchgeführt, wird die Dauerfestigkeit empfohlen.

### 3.1.1.11 Erforderliche Sicherheit für Einhärtetiefe

Für die Schubspannungen unter der Oberfläche kann eine erforderliche Sicherheit für Einhärtetiefe gegen bleibende Verformung definiert werden. Er wird für die Berechnung der erforderlichen Einhärtetiefe verwendet.

### 3.1.1.12 Toleranzlage für Lagerspiel

Sie können wählen, welches Spiel bei der Berechnung berücksichtigt werden soll. Für Passungen und Lagerspiel wird eine Reihe von Toleranzen angegeben. Für die Berechnung kann entweder der minimale, minimal erwartete, mittlere, maximal erwartete oder der maximale Wert des Spiels verwendet werden. Für andere Anforderungen kann eine Benutzereingabe für die Position im Toleranzfeld zwischen 0 (minimales Spiel) und 1 (maximales Spiel) definiert werden oder das Betriebsspiel kann direkt als Zahlenwert angegeben werden.


Die Berechnung der wahrscheinlichen Werte erfolgt unter der Annahme einer Normalverteilung innerhalb des Toleranzfeldes und einer Unabhängigkeit der Toleranzen für Innenringpassung, Außenringpassung und Lagerspiel. Außerdem wird Linearität angenommen, was nicht zutrifft, wenn sich eine Passung innerhalb des Toleranzfeldes von Übermaß auf Spiel ändert. Zum Vergleich könnten wahrscheinliche Werte unter Verwendung der [statistischen Parametervariation](#) <sup>44</sup> berechnet werden.

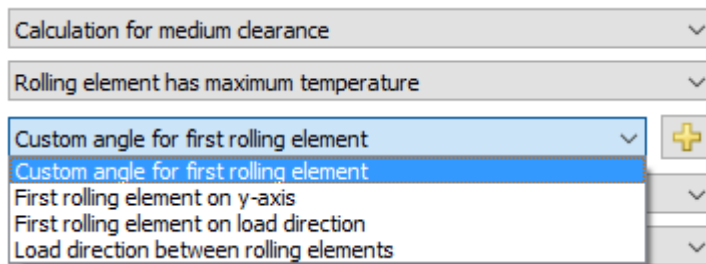
### 3.1.1.13 Temperatur des Wälzkörpers

Als Standard ist die Temperatur des Wälzkörpers für die Berechnung des Betriebsspiels auf die maximale Temperatur des Innen- und Außenringes eingestellt. Diese Standardeinstellung kann entweder auf die Temperatur des Innen- oder Außenrings geändert werden oder es kann eine eigene Eingabe gewählt werden, die auf der Seite "Belastung" zusammen mit den Temperaturen des Innen- und Außenrings angezeigt wird.

Wenn die Wärme durch das Lager erzeugt wird, ist die maximale Temperatur eine sinnvolle Wahl. Wenn die Wärme durch andere Wärmequellen erzeugt wird, könnte die mittlere Temperatur eine bessere Wahl sein.

### 3.1.1.14 Position für ersten Wälzkörper

Da die Umfangsposition der Wälzkörper innerhalb des Lagers die Ergebnisse beeinflussen kann, gibt es die Möglichkeit, die Position für den ersten Wälzkörper über den Winkel zu definieren. Ist ein benutzerdefinierter Winkel gewünscht, so kann dieser über die -Schaltfläche eingegeben werden.



Die Auswahl "Erster Wälzkörper in Lastrichtung" verwendet die radiale Verschiebung zur Definition des Winkels. Bei reiner Momentenbelastung wird der Winkel auf Null gesetzt. Diese Einstellungen führen in den meisten Fällen zur maximalen Spannung des Kontaktes und zur geringsten Lebensdauer.

Die Auswahl "Lastrichtung zwischen Wälzkörpern" verwendet die radiale Verschiebung zur Definition des Winkels und addiert die Hälfte des Teilung. Für reine Kippmomente wird der Winkel auf Null gesetzt.

Für die Berechnung von Stützrollen mit elastischem Außenring ist die Option noch nicht verfügbar.

### 3.1.1.15 Optionen für Kreismoment

Bei unterschiedlichen Richtungen der Kräfte am inneren und äußeren Ringkontakt wirkt sich das gyroskopische Moment auf die Kugel auf die Lastverteilung aus. Bei Hochgeschwindigkeits-Kugellagern wird häufig von einer "Führung des Außenrings" ausgegangen, was bedeutet, dass die Bohrgeschwindigkeit am Außenringkontakt gleich Null ist. Die verfügbaren Optionen sind:

- "Kreiselmoment wird nicht berücksichtigt": Dies ist das gleiche Verhalten wie bei älteren Versionen der Software. Es wird kein gyroskopisches Moment berücksichtigt und die Bohrgeschwindigkeiten werden durch Coulomb-Reibung berechnet.
- "Das Kreiselmoment basiert auf der Führung des Aussenrings": Der Rotationsvektor der Kugel wird unter der Annahme berechnet, dass die Bohrgeschwindigkeit am Außenring Null ist. Das gyroskopische Moment verursacht nur eine Reibungskraft am Aussenring-Kontakt.
- "Basiert auf der Führung des Außenrings, verteilte Kräfte": Der Rotationsvektor der Kugel wird unter der Annahme berechnet, dass die Bohrgeschwindigkeit am Außenring Null ist. Das gyroskopische Moment verursacht eine Reibungskraft am inneren und äußeren Laufringkontakt. Die Reibungskräfte an jedem Kontakt sind proportional zur Normalkraft.
- "Das Kreiselmoment basiert auf der Führung des Innenrings": Der Vektor der Rotation der Kugel wird unter der Annahme berechnet, dass die Bohrgeschwindigkeit am Innenring Null ist. Das gyroskopische Moment verursacht nur eine Reibungskraft am Innenring-Kontakt.
- "Basiert auf der Führung des Innenrings, verteilte Kräfte": Der Vektor der Rotation der Kugel wird unter der Annahme berechnet, dass die Bohrgeschwindigkeit am Innenring Null ist. Das gyroskopische Moment verursacht eine Reibung am Innen- und Außenring. Die Reibungskräfte an jedem Kontakt sind proportional zur Normalkraft.
- "Das Kreiselmoment basiert auf einer gemischten Führung: Abhängig von der Belastung für jede Kugel wird der Rotationsvektor der Kugel auf der Grundlage der Annahme einer Innen- oder Außenringführung berechnet. Das gyroskopische Moment verursacht eine Reibung am Kontakt zwischen Innen- und Außenring. Die Kräfte der Reibung an jedem Kontakt sind proportional zur Normalkraft.
- "Kreiselmoment basiert auf Reibung": Bei jeder Iteration für das Kugelgleichgewicht werden die auf der Coulombschen Reibung basierenden Kräfte in den Kontaktellipsen berechnet. Der Rotationsvektor der Kugel basiert auf dieser Berechnung. Die resultierenden gyroskopischen Momente werden auf beide Kontakte proportional zu den normalen Belastungen verteilt. Diese Optionen führen zu einer wesentlich längeren Berechnungszeit und können zu Konvergenzproblemen führen, wenn nicht alle Kugeln belastet sind.

Bei Kugeln mit hoher Drehzahl wird in der Regel von einer "Führung des Außenrings" ausgegangen, was die Auswahl auf nur zwei Optionen beschränkt. Bei

niedrigen Drehzahlen hat der Kreisel meist nur einen sehr geringen Einfluss und kann vernachlässigt werden.

Bei Dreipunktlagern und Vierpunktlagern können die Optionen basierend auf Außenring-, Innenring- oder gemischter Steuerung nur bei Zweipunktkontakt verwendet werden. Bei mehr Kontaktpunkten wird das gyroskopische Moment auf Null gesetzt und eine Warnung angezeigt.

### 3.1.1.16 Lebensdauer für Wälzkörper

Bei der Berechnung der Lagerlebensdauer wird normalerweise nur die Ermüdungslebensdauer der Lagerringe berücksichtigt.

Die Lebensdauer für Wälzkörper kann optional berechnet werden. Die Berechnung der Lebensdauer der Wälzkörper erfolgt analog zu (ISO/TS 16281, 2008) wie von (Correns, 2015) beschrieben. Für die Kombination der Lebensdauer für einzelne Wälzkörper zur Lebensdauer des Wälzkörpersatzes kommen zwei Möglichkeiten für den Weibull-Exponenten in Betracht, entweder  $e=10/9$  für Kugellager und  $e=9/8$  für Wälzlager wie in (ISO/TS 16281, 2008) und (ISO/TR 1281-1, 2008), oder  $e=1,5$  wie in (ISO/TR 1281-2, 2008) Abschnitt 4.2.1 für den Zuverlässigkeitsfaktor  $a_1$ . Dies ist ein Unterschied zu (Correns, 2015), wo ein Exponent von  $e=10/3$  für Kugellager und  $e=9/2$  für Rollenlager verwendet wird, ohne eine Begründung für diese Exponenten zu geben.

Wenn diese Option aktiviert ist, wird die übliche Lebensdauer der Lager nicht verändert, sondern nur die Lebensdauer des Wälzkörpersatzes `L10r_RESet` zusätzlich berechnet.

### 3.1.1.17 Elastische Aufweitung der Ringe

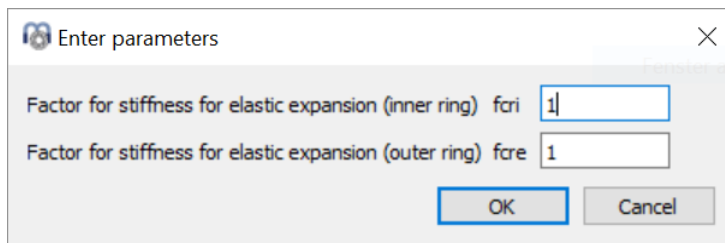
Standardmäßig wird nur die Elastizität des Kontakts zwischen Wälzkörper und Lauftring berücksichtigt. Wenn z.B. ein Schrägkugellager mit Spiel zwischen Außenring und Gehäuse unter axialer Vorspannung steht, kann sich der Außenring radial ausdehnen. Dadurch wird die Vorspannung reduziert.

In der aktuellen Version gibt es zwei Möglichkeiten zur Berücksichtigung der elastischen Aufweitung von Lagerringen. Beide Möglichkeiten basieren auf der Annahme eines dickwandigen Rings wie bei der Berechnung von Presssitzen.

Entweder wird die minimale oder die mittlere Radialkraft in der Lastverteilung in eine konstante radiale Pressung umgerechnet, die dann wie bei einer Berechnung für Presssitze berücksichtigt wird. Beide Ringe Innen-/Außenring und Welle/Gehäuse werden bei der Berechnung der Passung berücksichtigt. Dieser Berechnungsansatz ist nur gültig, wenn die Schwankung der Radialkräfte gering ist. Daher sollte die Axialkraft normalerweise größer sein als die Radialkraft.

Der Ringdurchmesser wird standardmäßig mit  $D_{pw} \pm D_w$  angenommen, so dass eine Versteifungswirkung der Absätze nicht berücksichtigt wird. Mit dem  $+$ -Knopf hinter dem [Lagertyp](#)<sup>178</sup> kann stattdessen die Verwendung einer äquivalenten Querschnittsfläche aktiviert werden. Dann wird der Ringdurchmesser so definiert, dass die Querschnittsfläche der Querschnittsfläche des Lagerrings entspricht. Beide Optionen für den Ringdurchmesser können mit Hilfe der Grafik "Radiale Aufweitung der Laufbahnen" mit den Ergebnissen der FEA verglichen werden.

Ein zusätzlicher Faktor für die Steifigkeit des Innen- und Außenrings kann über die  $+$ -Schaltfläche hinter dem Auswahlfeld definiert werden. Dieser Faktor wird auf die Fläche angewendet, die für die Umrechnung der Kraft der Wälzkörper in einen Druck verwendet wird:  $p = F / (f_{cr} \cdot A)$ .



Die elastische Aufweitung der Ringe wird auf Null gesetzt, falls Verformungen aus der Wellenberechnung berücksichtigt werden, da die Aufweitung der Ringe nicht doppelt berücksichtigt werden sollte.

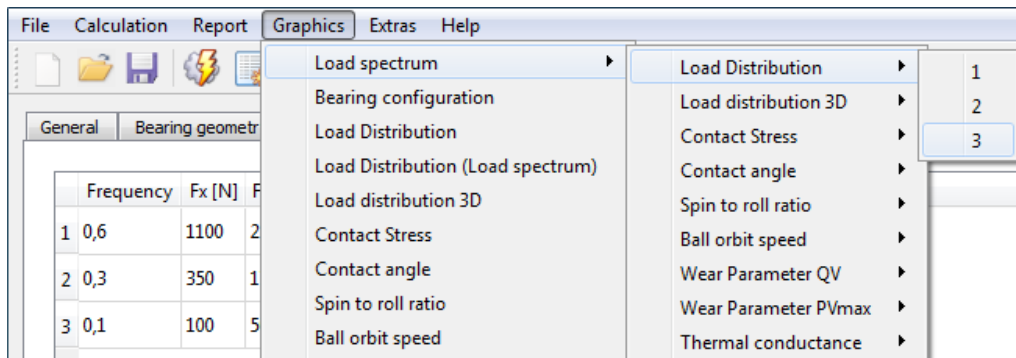
### 3.1.1.18 Lastkollektiv verwenden

Anstelle eines Einzellastfalls kann ein Lastkollektiv verwendet werden. Diese Option kann hier aktiviert werden. Für jeden Lastfall wird eine vollständige Berechnung mit allen Faktoren durchgeführt. Die resultierende Lebensdauer wird anhand der

Lebensdauer der einzelnen Elemente wie folgt berechnet: 
$$L_{10rh} = 1 / \sum \frac{h_i}{L_{10rh,i}}$$

Ergebnisgrafiken werden im Protokoll nur für das ausgewählte Resultatelement des Lastkollektivs angezeigt. Die Ergebnisgrafiken, die einer beliebigen Nummer (Lastfall) des Lastkollektivs entsprechen, können jedoch unter dem Menü 'Grafiken' -> 'Lastkollektiv' angezeigt werden, wie in diesem Bild zu sehen ist:





Alle anderen Grafiken, die unter dem Menüpunkt 'Grafiken' verfügbar sind, gelten nur für das ausgewählte Element.

Zusätzlich werden unter 'Grafiken'->'Lastverteilung (Lastkollektiv)' alle Lastverteilungsfälle gleichzeitig in das Diagramm eingeblendet. Dies ist auch bei den Grafiken für die Rollen möglich.

Bitte beachten Sie, dass bei einer Berechnung für einen einzelnen Lastfall mehr Zwischenergebnisse im Protokoll ausgegeben werden.

#### 3.1.1.19 Erweiterte Lebensdauer berechnen

Wenn dieses Flag gesetzt ist, wird die erweiterte Lebensdauer berechnet. Sie können das Flag löschen, wenn keine Informationen über die Schmierung bekannt sind oder die Schmierung bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden soll.

#### 3.1.1.20 Erweiterte Methode für Pressungsberechnung verwenden

In (ISO/TS 16281, 2008) wird ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung der Kantenspannungen in Wälzlagern verwendet und eine erweiterte Methode gemäß anderer Literatur empfohlen. Wenn diese Option gesetzt ist, wird die Druckverteilung nach (de Mul, et al., 1986) berechnet, was die neueste Literatur in den Vorschlägen der Norm ist.

Diese erweiterte Methode ist für alle unterstützten Rollenlager verfügbar.

#### 3.1.1.21 Statischen Sicherheitsfaktor über Pressung berechnen

Wenn diese Option eingestellt ist, wird die statische Sicherheit SF auf der Basis der maximalen Kontaktspannungen berechnet. Für Kugellager wird  $SF = \left(\frac{p_{perm}}{p_{max}}\right)^3$

verwendet, bei Rollenlagern  $SF = \left(\frac{p_{perm}}{p_{max}}\right)^2$  verwendet, so dass der

Sicherheitsfaktor proportional zur Belastung ist. Die zulässige Pressung basiert auf (ISO 76, 2006).

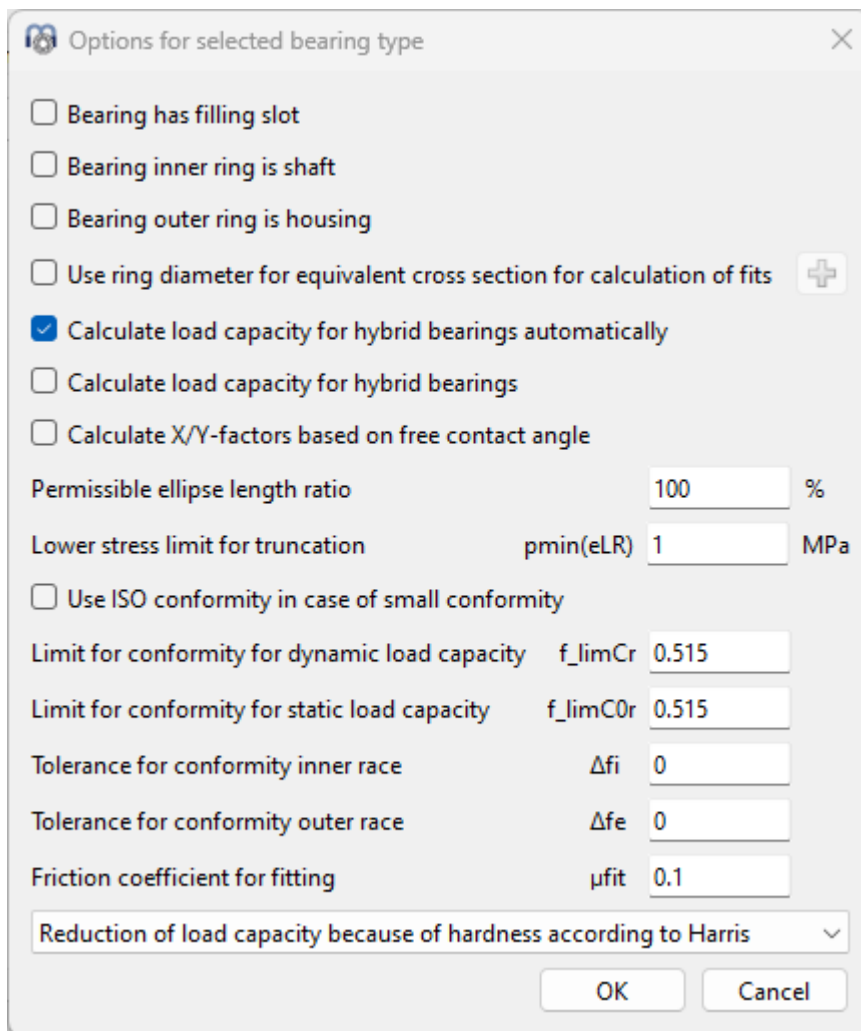
Ist die Option nicht gesetzt, wird der statische Sicherheitsfaktor auf Basis der maximalen Wälzkörperbelastung und Qmax in (ISO/TR 10657, 1991) berechnet.

Für Kugellager zeigen beide Optionen in der Regel die gleichen Ergebnisse, aber für Wälzlager werden die Kantenspannungen nur berücksichtigt, wenn der statische Sicherheitsfaktor auf Spannungen basiert.

### 3.1.2 Wälzlagergeometrie

#### 3.1.2.1 Lagertypen

Verschiedene Typen von Kugel- und Rollenlagern können mit der Software berechnet werden. Neben der Berechnung eines einzelnen Lagers kann mit "Lagerkonfiguration" auch eine Konfiguration von mehreren Reihen definiert werden.



Options for selected bearing type

- Bearing has filling slot
- Bearing inner ring is shaft
- Bearing outer ring is housing
- Use ring diameter for equivalent cross section for calculation of fits +
- Calculate load capacity for hybrid bearings automatically
- Calculate load capacity for hybrid bearings
- Calculate X/Y-factors based on free contact angle

Permissible ellipse length ratio  %

Lower stress limit for truncation  $p_{min}(eLR)$   MPa

- Use ISO conformity in case of small conformity

Limit for conformity for dynamic load capacity  $f_{limCr}$

Limit for conformity for static load capacity  $f_{limC0r}$

Tolerance for conformity inner race  $\Delta f_i$


Tolerance for conformity outer race  $\Delta f_e$

Friction coefficient for fitting  $\mu_{fit}$

Reduction of load capacity because of hardness according to Harris v

OK Cancel

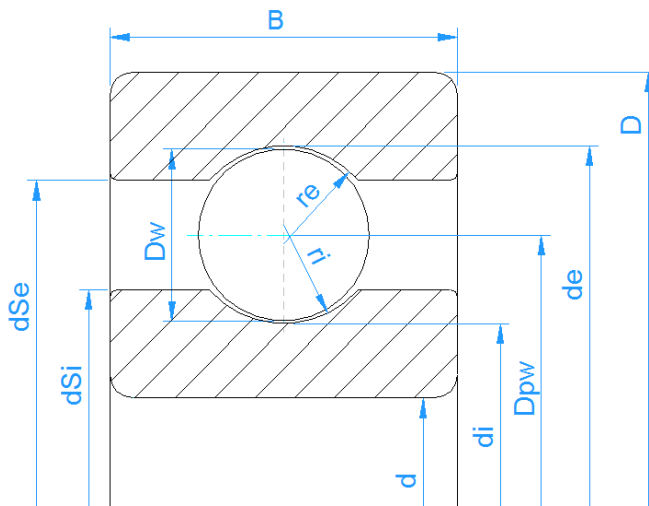
Über die +-Schaltfläche hinter dem Lagertyp können einige Optionen für den ausgewählten Wälzlagertyp definiert werden.

- Für alle Lager kann gewählt werden, dass Innenring und Welle bzw. Lagerausenring und Gehäuse identisch sind. Dies wirkt sich auf die Eingabe des Werkstoffs und die Eingabe von Toleranzen aus.
- Die Option "Ringdurchmesser für die Berechnung des Presssitzes aus äquivalentem Querschnitt verwenden" führt zu einer größeren Ringdicke von Innen- und Außenring für die Berechnung von Passungen. Beide Varianten können mit der Grafik "Radiale Aufweitung der Laufbahnen" verglichen werden. Mit der -Schaltfläche hinter der Option können die Durchmesser der Ringe übersteuert werden.
- Wenn die Option "Tragzahlen für Hybridlager automatisch berechnen" aktiv ist, wird die nächste Option für Hybridlager automatisch aktiviert ( $E_r \geq 300 \text{ GPa}$ ,  $E_i$ ,  $E_e < 260 \text{ GPa}$ )
- Die Option "Tragzahlen für Hybridlager berechnen" verwendet (ISO 20056-1, 2017) und (ISO 20056-2, 2017) zur Berechnung der Tragzahlen, was zu einer erhöhten statischen Tragfähigkeit aufgrund höherer zulässiger Spannungen führt. Das Elastizitätsmodul der Wälzkörper muss für die erhöhte statisch zulässige Spannung größer als  $300 \text{ GPa}$  sein.
- Wenn die Option "X/Y-Faktoren basierend auf dem freien Druckwinkel berechnen" aktiviert ist, wird der effektive freie Druckwinkel zur Berechnung der X/Y-Faktoren in ISO 281 anstelle des Nenndruckwinkels verwendet. Dies betrifft hauptsächlich Rillenkugellager, bei denen sich der freie Druckwinkel mit dem Lagerspiel vergrößert.
- Bei Kugellagern wirkt sich das "Zulässige Längenverhältnis Druckellipse" auf eine Warnung vor Abschneiden der Druckellipse und eine Ausgabe für eine zulässige Axialkraft im Protokoll aus.
- Bei Kugellagern ignoriert die "Minimale Pressung für die Ausdehnung der Druckellipse" die Warnung betreffend Abschneiden der Druckellipse für alle Kontakte, deren Kontaktspannung unter diesem Grenzwert liegt.
- Bei Kugeln wird mit der Option "ISO Schmiegunen im Falle kleiner Konformität verwenden"  $f_i = f_e = 0,52$  für die Berechnung der Tragzahlen verwendet, wenn  $f_i < 0,52$  und  $f_e < 0,53$  für Radial-Kugellager und  $f_i = f_e = 0,535$ , wenn  $f_i < 0,54$  und  $f_e < 0,54$ . Dies sind die Grenzen, bei denen die tabellierten Werte für  $f_c$  in ISO 281 verwendet werden dürfen.
- Für Kugellager kann ein Grenzwert für die Konformität definiert werden, der bei der Berechnung der Tragfähigkeit verwendet wird. Die Tragfähigkeit wird aus dem maximalen Wert des vorgegebenen Grenzwertes und der Eingabe der tatsächlichen Geometrie berechnet. Diese Eingabe ist nur verfügbar, wenn die obige Option bezüglich der ISO Konformität nicht aktiviert ist.

- Für Rillenkugellager kann eine Toleranz für die Konformität definiert werden. Dies führt zu zusätzlichen Ausgaben im Protokoll [Toleranzen](#)<sup>[249]</sup>.
- Wird ein Reibwert für Montage definiert, wird im Toleranz-Protokoll eine axiale Montagekraft angezeigt.
- Die Minderung der Tragfähigkeiten aufgrund der Härte kann nach Harris oder Schaeffler berechnet werden. Die Option nach Schaeffler führt zu größeren Tragfähigkeiten bei sehr geringer Härte.

In der aktuellen Version werden die folgenden Typen von Lagern unterstützt:

### 3.1.2.1.1 Radial-Rillenkugellager



Rillenkugellager sind preiswerte Standardlager. Es können sowohl Radial- als auch Axialkräfte übertragen werden. Der nominelle Druckwinkel beträgt  $0^\circ$ , der sich bei axialer Belastung in Abhängigkeit vom Radialspiel im Lager vergrößert. Der freie Druckwinkel  $\alpha_0$  ist im Protokoll und in der Resultateübersicht angegeben.

Die Geometrie wird mit der Anzahl und dem Durchmesser der Kugeln, dem Teilkreisdurchmesser, der Konformität von Innen- und Aussenring und dem diametralen Lagerspiel beschrieben. Die Anzahl der Kugeln im Lager ist begrenzt, um das Lager montieren zu können.

Die Konformität ist der Eingangsparameter, der den Radius der Laufringe definiert. ( $r_i = f_i \cdot D_w$ ,  $r_e = f_e \cdot D_e$ )

Üblicherweise beträgt die Konformität  $f_i = f_e = 0,52$  für Rillenkugellager.

Das diametrale Lagerspiel ist definiert als  $P_d = d_e - d_i - 2 \cdot D_w$ .

Options for selected bearing type

Bearing has filling slot

Bearing inner ring is shaft

Bearing outer ring is housing

Use ring diameter for equivalent cross section for calculation of fits +

Calculate load capacity for hybrid bearings automatically

Calculate load capacity for hybrid bearings

Calculate X/Y-factors based on free contact angle

Permissible ellipse length ratio  %

Lower stress limit for truncation  $p_{min}(eLR)$   MPa

Use ISO conformity in case of small conformity

Limit for conformity for dynamic load capacity  $f_{limCr}$

Limit for conformity for static load capacity  $f_{limC0r}$

Tolerance for conformity inner race  $\Delta f_i$

Tolerance for conformity outer race  $\Delta f_e$

Friction coefficient for fitting  $\mu_{fit}$

Reduction of load capacity because of hardness according to Harris v

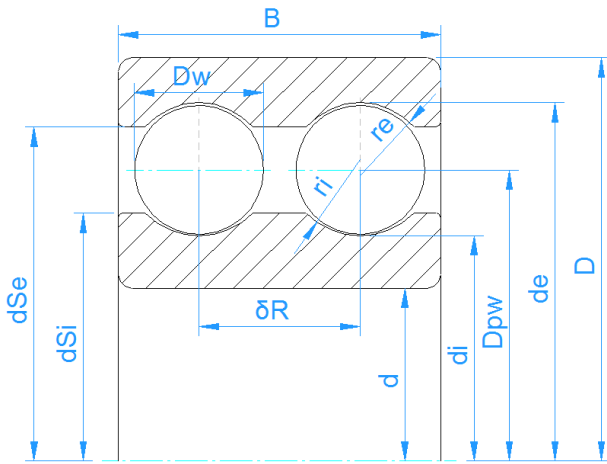
OK Cancel

Die +-Schaltfläche hinter der Lagerauswahl bietet je nach Typ des Lagers noch einige andere Einstellungen. Bei Rillenkugellagern kann ausgewählt werden, ob ein Lager mit Füllnut verwendet wird, das die Berechnung der Last mit dem Faktor  $b_m$  in (ISO 281, 2007) beeinflusst.

Das zulässige Längenverhältnis Druckellipse steuert die Warnung vor dem Abschneiden der Kontaktellipse. Ein Wert unter 100 % würde ein gewisses Maß an Abschneidung zulassen, ein Wert über 100 % fügt einen zusätzlichen Abstand hinzu. Dieser zulässige Wert wird auch für die Berechnung der im Protokoll angegebenen zulässigen Axialkraft-Grenze verwendet.

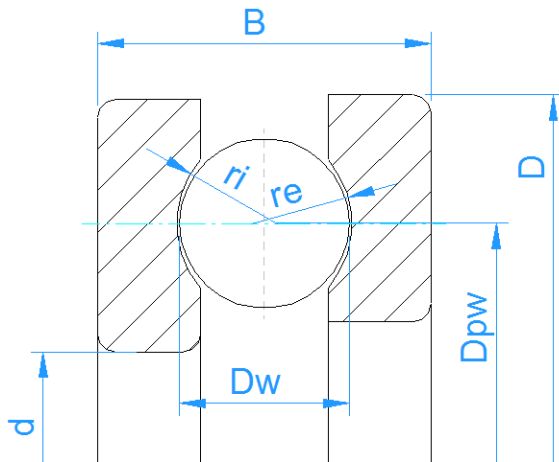
### 3.1.2.1.2 Zweireihige Rillenkugellager

Für zweireihige Rillenkugellager muss zusätzlich zu den Parametern des einreihigen Rillenkugellagers ein Abstand der Lagerreihen ' $\delta R$ ' definiert werden.

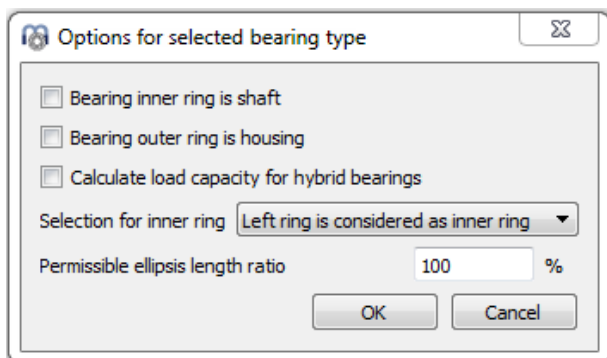


3.1.2.1.3 Axialrillenkugellager

Bei Axialrillenkugellagern beträgt der Nenndruckwinkel  $90^\circ$ . Die Standardkonformität ist  $f_i = f_e = 0,535$ .



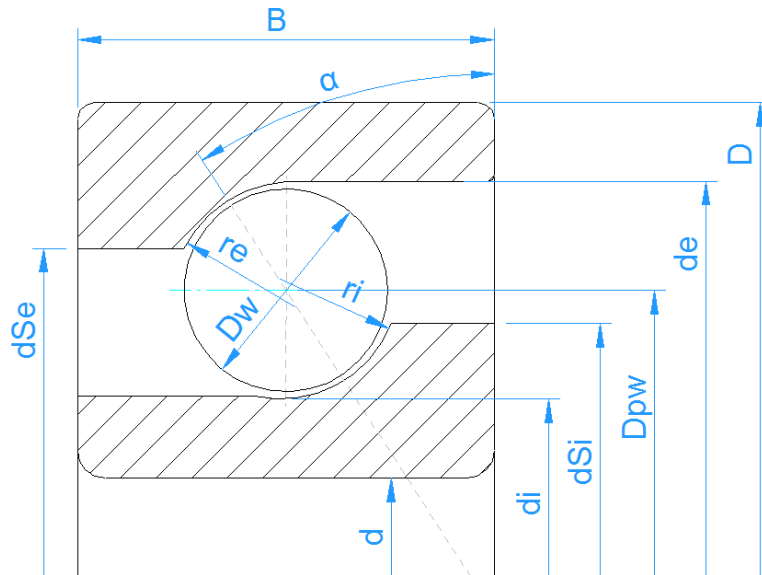
Im Dialog der Lagertyp-Optionen kann festgelegt werden, ob die linke oder die rechte Wellenscheibe als Innenring betrachtet werden soll. Damit ändert sich auch das Vorzeichen der Axialkraft, die für den Innenring angegeben wird.



Für Axialrillenkugellager werden keine Toleranzen berücksichtigt.

### 3.1.2.1.4 Radial-Schrägkugellager

Das Schrägkugellager ähnelt dem Rillenkugellager, aber der Druckwinkel ist größer. Standardlager haben Druckwinkel von 15°, 25° oder 40°.



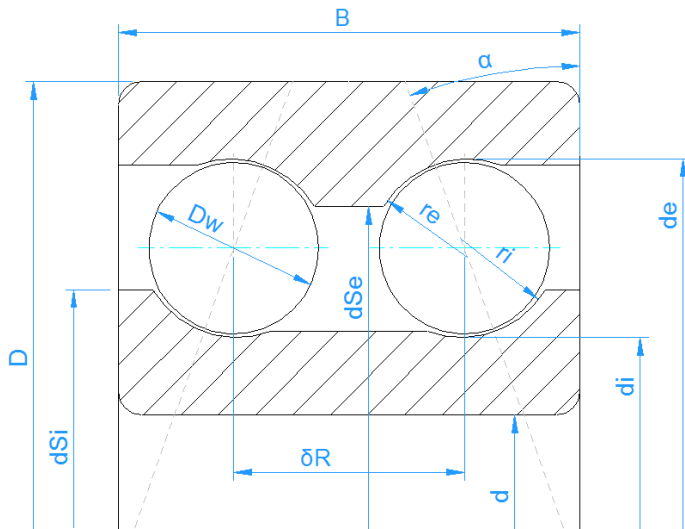
Zweireihige Schrägkugellager können entweder mit einem einreihigen Lager und einer Konfiguration aus zwei Lagern oder direkt mit einem zweireihigen Schrägkugellager definiert werden. Dies ermöglicht die Eingabe des Radialspiels des zweireihigen Lagers. In beiden Fällen wird der Lebensdauerbeiwert  $a_{ISO}$  für beide Reihen separat berechnet.


Die Richtung des Druckwinkels kann über die **+**-Schaltfläche hinter dem Druckwinkel festgelegt werden. Zusätzlich ist die Eingabe der Richtung des Kontakts in den Optionen für den Lagertyp verfügbar.

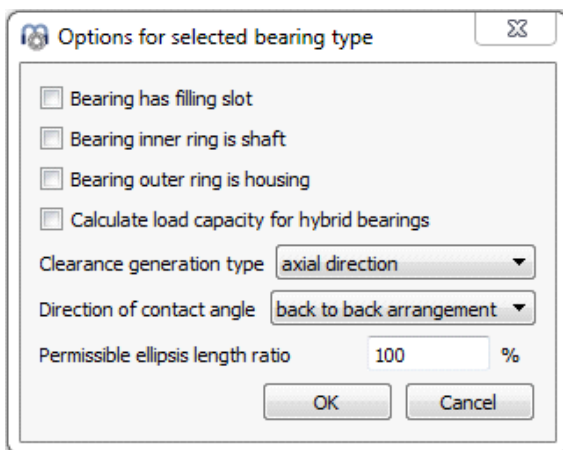
Die **=**-Schaltfläche für das Axialspiel ermöglicht die Berechnung des Axialspiels bei gegebener Vorspannung oder bei gegebenem Radialspiel bei zweireihigen Schrägkugellagern.

### 3.1.2.1.5 Zweireihige Radial-Schrägkugellager

Für zweireihige Schrägkugellager kann die Konfiguration von Druckwinkeln im Optionsdialog festgelegt werden.



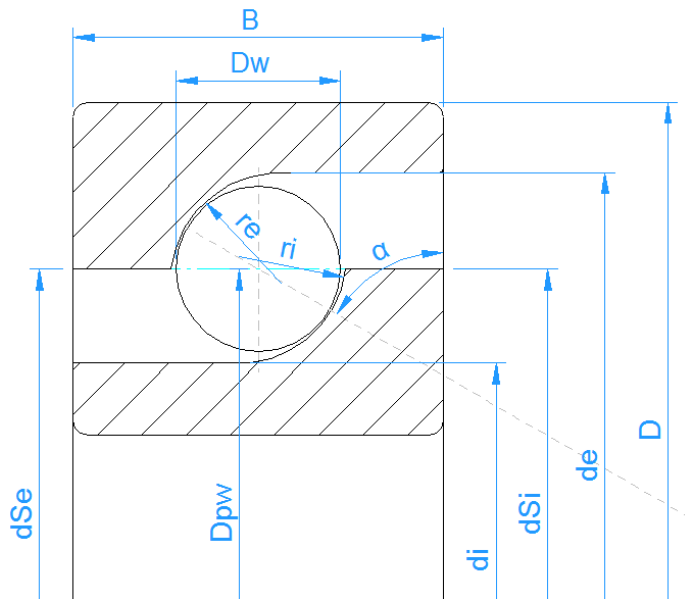
Die -Schaltfläche für das Axialspiel ermöglicht die Berechnung des Axialspiels bei gegebener Vorspannung oder bei gegebenem Radialspiel. Das Spiel kann auf drei verschiedene Arten erzeugt werden. Siehe unter Vierpunktlager weiter unten.



Zusätzlich zu den Eingaben für das einreihige Schrägkugellager muss auch der Abstand der Lagerreihen eingegeben werden.



3.1.2.1.6 Axial-Schrägkugellager

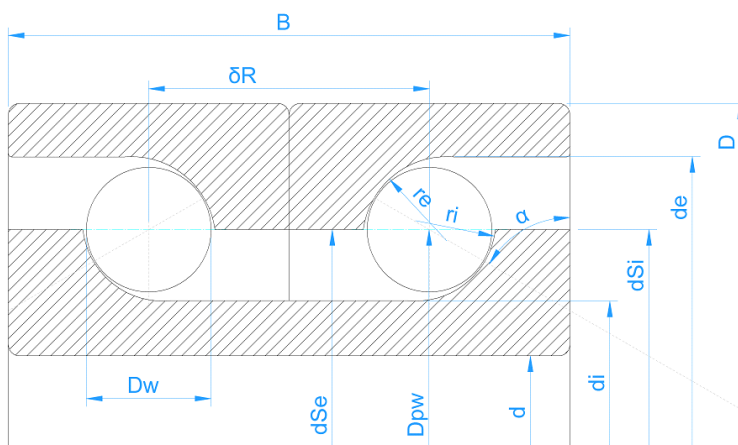


Die Beschreibung der Geometrie für Axial-Schrägkugellager ist die gleiche wie für Radial-Schrägkugellager. Der einzige Unterschied in der Geometrie ist ein Wert von 0,535 für die Konformität, anstelle von 0,52 bei Radiallagern.

Die Ergebnisse für die Lastverteilung sind bei der Auswahl von Axial- oder Radial-Schrägkugellagern die gleichen, aber für Axiallager werden bei der Berechnung der Tragfähigkeit zusätzliche Reduktionsfaktoren berücksichtigt. Daher ist die resultierende Lebensdauer geringer, wenn das Lager als Axiallager berechnet wird.

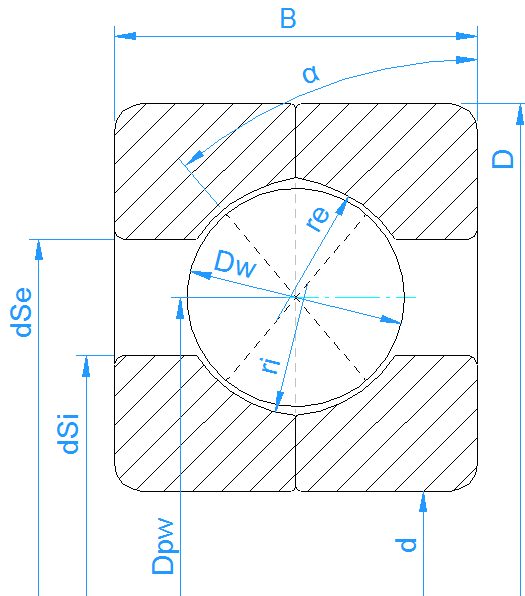
Standard Axial-Schrägkugellager haben einen Druckwinkel von  $60^\circ$ .

3.1.2.1.7 Zweireihiges axiales Schrägkugellager



Wie bei den Radiallagern können zweireihige Axial-Schrägkugellager entweder mit einem einreihigen Lager und einer Konfiguration aus zwei Lagern oder direkt als zweireihige Schrägkugellager definiert werden.

### 3.1.2.1.8 Vierpunktlager als Radiallager



Dies kann für Standard-QJ-Lager mit einem Druckwinkel von  $35^\circ$  zum Kontakt verwendet werden. Die Tragzahlen für ein Vierpunktlager werden wie ein zweireihiges Lager berechnet, wie es in Lagerkatalogen üblich ist. Die Ergebnisse werden für beide Reihen protokolliert. Bei zwei Kontaktpunkten gibt es einen Kontakt am inneren Ring der einen Reihe und am äußeren Ring der anderen Reihe. Alle möglichen vier Kontakte werden bei der Berechnung der Lebensdauer berücksichtigt.

Mit der **+**-Schaltfläche hinter dem Lagertyp kann eine "Füllnut" definiert werden und die Methode zur Spielerzeugung wird für das Lager generiert. Es gibt drei Möglichkeiten, das Spiel in der Software zu erzeugen:

1. Die Krümmungsmittelpunkte werden in axialer Richtung verschoben. Dies führt zu einem verringerten Druckwinkel bei radialer Last. Dies entspricht einem Vierpunktlager, das als Schrägkugellager betrachtet wird.
2. Die Krümmungsmittelpunkte werden in radialer Richtung verschoben. Dies führt zu einem vergrößerten Druckwinkel bei Axialkraft.
3. Die Krümmungsmittelpunkte werden entlang des Nenndruckwinkels verschoben.

Options for selected bearing type ✕

Bearing has filling slot

Bearing inner ring is shaft

Bearing outer ring is housing

Calculate load capacity for hybrid bearings

Clearance generation type axial direction ▼

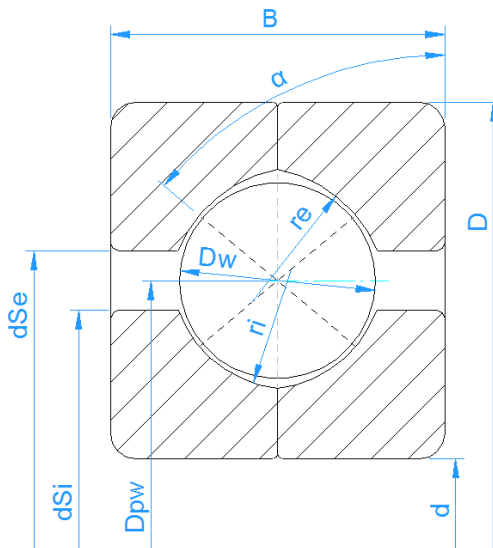
Permissible ellipse length ratio 100 %

Limit for conformity for dynamic load capacity  $f_{limCr}$  0.515

Limit for conformity for static load capacity  $f_{limC0r}$  0.515

### 3.1.2.1.9 Vierpunktlager als Axiallager

Diese Auswahl kann für Drehverbindungen verwendet werden, wie in (Harris, et al., 2009) beschrieben. Aufgrund zusätzlicher Reduktionsfaktoren für Axial-Kugellager wird die berechnete Lebensdauer kleiner sein als bei der Betrachtung als Radiallager. Die Lastverteilung ist die gleiche wie bei einem Vierpunktlager, das als Radiallager betrachtet wird.



### 3.1.2.1.10 Dreipunktlager

In Frage kommen Dreipunktlager mit geteiltem Innenring oder geteiltem Außenring. Der geteilte Ring hat zwei Radien wie bei einem Vierpunktlager und der zweite Ring hat einen vollen Radius. Daher kann es zwei oder drei Kontaktpunkte geben.

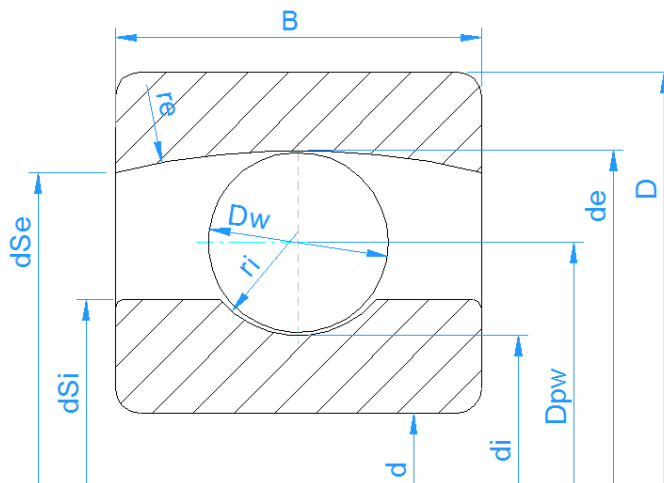
Im Gegensatz zu den anderen Lagertypen ist die Eingabe für den Druckwinkel der Druckwinkel am geteilten Ring bei Radialkontakt. Das Eingabefeld wird daher als Scheibenwinkel dargestellt. Der Druckwinkel im Betrieb ist abhängig von der Radialluft. Das Radialspiel kann aus dem erforderlichen freien Kontaktwinkel berechnet werden.

Der freie Druckwinkel wird auf der Basis eines Zweipunktkontaktes berechnet. Ist der resultierende freie Druckwinkel kleiner als der Scheibenwinkel, kommt es bei geringer Axialkraft zu einem Dreipunktkontakt.

Die Tragfähigkeit wird auf der Grundlage eines einreihigen radialen Schrägkugellagers unter Verwendung des freien Druckwinkels berechnet. Da der freie Druckwinkel verwendet wird, ist die Tragfähigkeit vom Nennspiel abhängig.

### 3.1.2.1.11 Pendelkugellager (einreihig)

Pendelkugellager können als ein- oder zweireihige Lager gewählt werden. Ein einreihiges Lager hat einen Druckwinkel von Null.



### 3.1.2.1.12 Pendelkugellager (zweireihig)

Bei zweireihigen Lagern wird der Abstand der Reihen durch den Druckwinkel bestimmt. Der Abstand der Lagerreihen beträgt dann

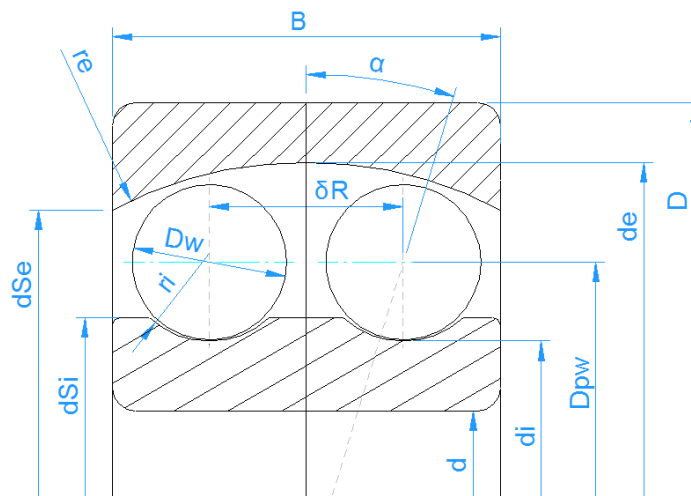
$$\delta_R = D_{pw} \cdot \tan \alpha$$

Für sphärische Kugellager ist die Konformität des Aussenrings definiert als

$$f_e = \frac{r_e}{D_{pw} / \cos \alpha + D_w}$$

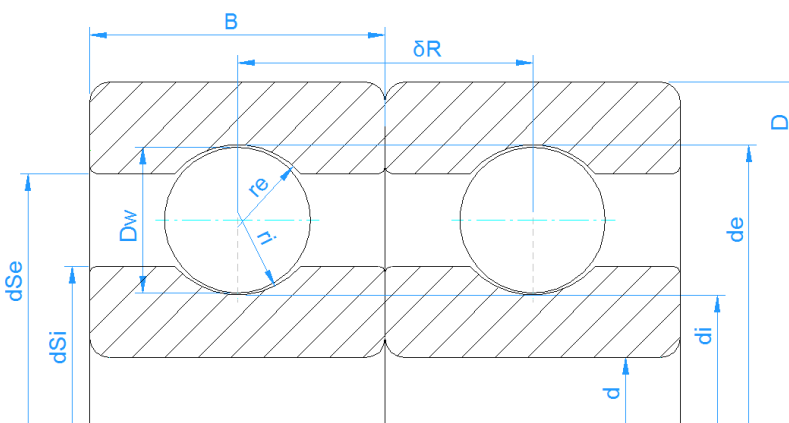
Es ist also das Verhältnis von Radius und Durchmesser des Aussenrings, das standardmässig 0,5 beträgt.

Der Durchmesser des Absatzes des Außenrings wird automatisch durch die Breite und den Radius des Außenrings begrenzt. Es kann aber auch ein größerer Wert als Grenzwert vom Anwender eingegeben werden. Der Lebensdauerbeiwert  $a_{ISO}$  wird für beide Reihen getrennt berechnet.




### 3.1.2.1.13 Duplex Lager

Zwei Rillenkugellager können durch Auswahl von "Duplex Lager" als ein Satz berechnet werden. Dasselbe könnte man auch mit einem einzelnen Rillenkugellager und einer Konfiguration aus zwei Lagern machen, aber die Eingabe ist flexibler, wenn man "Duplex Lager" verwendet.

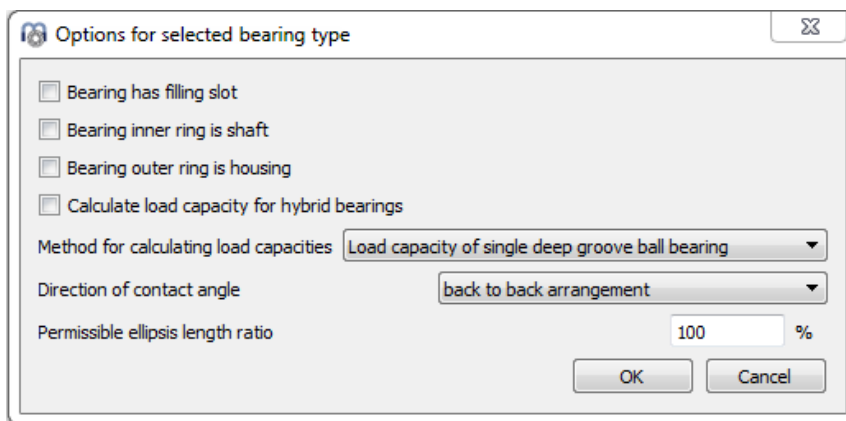


Die Geometriedaten werden für ein einzelnes Rillenkugellager definiert, zusätzlich ist der Abstand der beiden Lagerreihen ein Eingabewert. Die Eingabe des diametralen Lagerspiels bezieht sich nur auf das einzelne Lager.

Das Spiel der Konfiguration kann dann durch einen axialen Versatz  $\delta_{cc}$  zwischen Innen- und Außenring eines jeden Lagers verändert werden. Mit Hilfe der -Schaltfläche kann der Versatz aus einem gegebenen Axialspiel, Radialspiel oder einer Vorspannkraft für die Lagerkonfiguration berechnet werden.

Der freie Druckwinkel des Lagers  $\alpha_0$  und  $\alpha_{0eff}$  wird im Protokoll und in der Resultateübersicht angezeigt.

Die Optionen für das Lager ermöglichen die Auswahl einer O- oder X-Anordnung. Dies hat einen Einfluss auf die Lastverteilung bei Momentenbelastungen oder einem gekippten Lager.



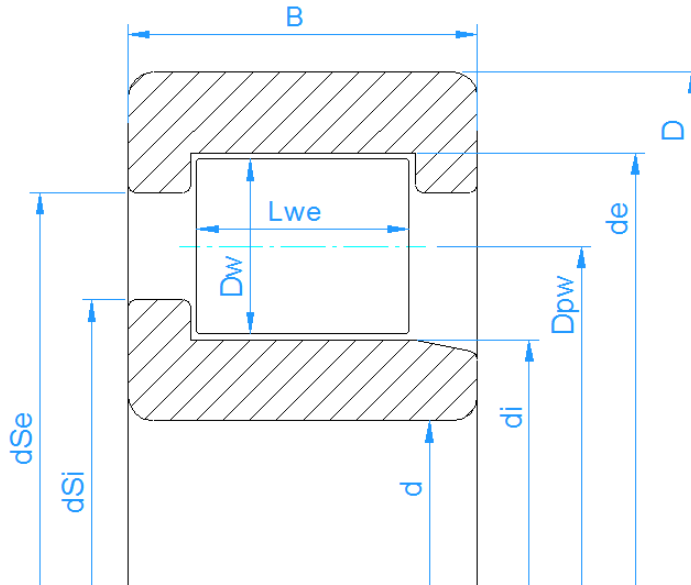
Es gibt vier Optionen für die Berechnung der Tragfähigkeiten:

1. *Tragzahlen für ein einzelnes Rillenkugellager:* Die Eingaben beziehen sich nur auf ein einzelnes Lager. Dies sind die Werte, die in der Dokumentation des einzelnen Lagers angegeben sind. In diesem Fall werden die Tragfähigkeiten des Paares als  $C_{sys}$  im Protokoll angezeigt.
2. *Tragzahlen eines gepaarten Rillenkugellagers:* Hier erfolgt die Berechnung anhand der Tragfähigkeiten für zwei gepaarte Rillenkugellager mit den Faktoren  $2^{0.7}$  für dynamische und 2 für statische Tragzahlen.
3. *Tragzahlen für zweireihige Rillenkugellager:* Hier werden die Tragfähigkeiten mit den Faktoren für ein zweireihiges Lager berechnet. Die dynamische Tragzahl ist kleiner als im zweiten Fall.
4. *Tragzahlen für zweireihige Schrägkugellager:* Hier wird die Tragfähigkeit anhand des freien Druckwinkels der Lager berechnet.

Wenn thermische Effekte berücksichtigt werden, wird der axiale Versatz  $\delta_{cc}$  bei der Berechnung modifiziert, um die unterschiedliche axiale Dehnung von Innen- und Außenring zu berücksichtigen. Die Ergebnisse sind die gleichen wie bei der

Verwendung eines einzelnen Rillenkugellagers mit einer Konfiguration aus zwei Lagern.

### 3.1.2.1.14 Radial-Zylinderrollenlager

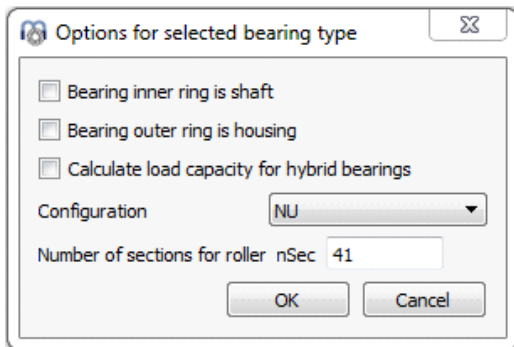


Das Radial-Zylinderrollenlager ist ein Lager mit hoher Lastaufnahme für Radialkräfte, das jedoch keine hohen Axialkräfte oder Fluchtungsfehler zwischen Innen- und Außenring aufnimmt.

Zusätzlich zu den Parametern, die für Kugellager verwendet werden, ist die effektive Länge der Rolle  $L_{we}$  ein erforderlicher Eingabeparameter. Die effektive Länge ist etwas kleiner als die Länge der Rolle wegen der Radien am Ende der Rolle. Der Druckwinkel zum Kontakt ist bei Zylinderrollenlagern immer Null.

Als Standard wird die Profilierung der Rolle wie in ISO/TS 16281 definiert betrachtet. Wenn die erweiterte Berechnung für die Pressungsverteilung gewählt wird, ist eine Eingabe des Profils für Laufbahnen und Rolle über die  $\oplus$ -Schaltfläche hinter der effektiven Rollenlänge möglich. Es stehen mehrere Optionen zur Verfügung, darunter das Einlesen des Profils aus einer Datei.

Die Axialkraft wird wie in (Harris, et al., 2007) gezeigt berücksichtigt. Die Axialkraft bringt ein Kippmoment auf die Rolle und es kommt zu einer unsymmetrischen Lastverteilung auf den Laufbahnen. Die axialen Kräfte werden auf halber Höhe der Schultern berücksichtigt. Wenn für die Höhe des Absatzes 20% eingegeben wird, wirkt die Axialkraft bei 10% des Durchmessers der Rolle.



Der Typ des Zylinderrollenlagers NU, NJ, NUP ... kann im Optionsdialog des Lagers ausgewählt werden.

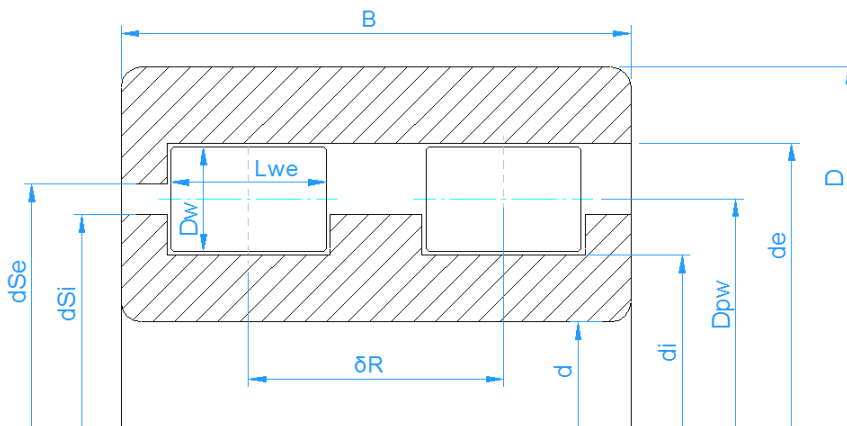
Für Zylinderrollenlager, die Axialkräfte aufnehmen, kann ein Radial- und Axialspiel angegeben werden. Es ist wichtig, einen Wert für das Axialspiel einzugeben, wenn Kippbewegungen auftreten. Beim Typ NUP hat das Axialspiel einen Einfluss auf das Reaktionsmoment. Der Y-Faktor für die Berechnung der Lebensdauer ISO 281 ist in der Norm nicht angegeben, ein Wert von  $Y=0,6$  mit  $e=0,2$  wird wie in einigen Lagerkatalogen verwendet.

Beim Typ NUP wird das Axialspiel wie bei Rillenkugellagern zwischen der linken und rechten Position der Ringe gemessen. Bei gerichteten Lagern wie NJ wird das Axialspiel zwischen der Referenzposition und einer Seite gemessen, wie bei Schrägkugellagern oder Kegelrollenlagern.

Für Typen, die keine Axialkräfte aufnehmen, wie NU, muss die Axialverschiebung 'ux' anstelle von 'Fx' als Eingabe gewählt werden.

Die Anzahl der Abschnitte für die Berechnung der Lastverteilung kann auch in den Lageroptionen geändert werden. Das Minimum sind 31 Abschnitte. Ein größerer Wert reduziert die Kantenspannungen durch die Näherungsfunktion in ISO/TS 16281, wenn die erweiterte Methode zur Pressungsverteilung nicht aktiv ist.

### 3.1.2.1.15 Radial-Zylinderrollenlager (zweireihig)



Zusätzlich zu den Eingaben für ein einreihiges Lager muss der Abstand zur Rollenmitte festgelegt werden. Im Allgemeinen erhält man die gleichen Ergebnisse

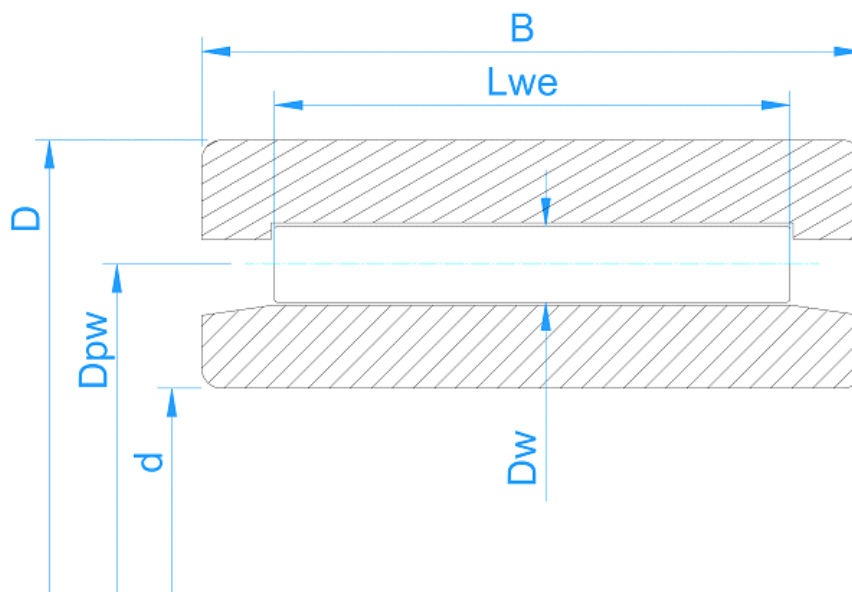


wie bei einem einreihigen Lager mit einer zweireihigen Lagerkonfiguration; die Ergebnisse unterscheiden sich jedoch, wenn die Konfiguration unterschiedliche Positionen der Schultern bei axialer Belastung aufweist. Ein weiterer Unterschied besteht in der Tragfähigkeit, die für das zweireihige Lager angegeben wird.

Die verschiedenen Typen von Lagern können auch im Optionsdialog ausgewählt werden.

Der Y-Faktor für die Berechnung der Lebensdauer ISO 281 ist in der Norm nicht angegeben, es wird ein Wert von  $Y=0,6$  mit  $e=0,2$  verwendet, wie in einigen Lagerkatalogen.

### 3.1.2.1.16 Nadellager



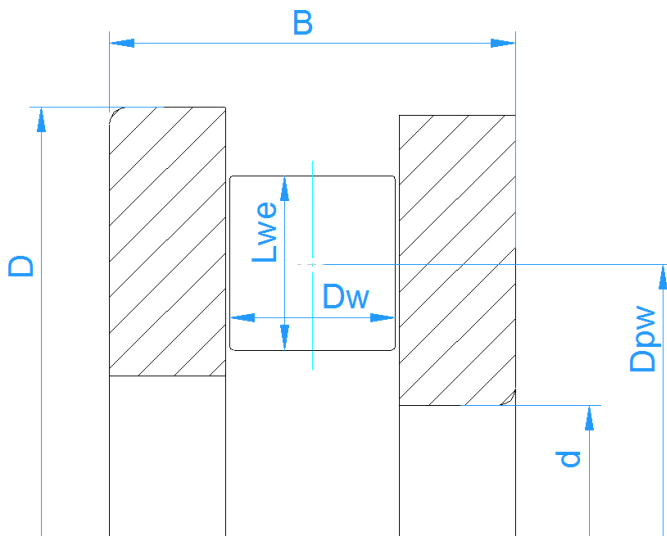
Nadellager können auch über die Auswahl 'Zylinderrollenlager' berechnet werden. Der Typ 'Nadellager' wurde nur hinzugefügt, damit die Typen in der Datenbank getrennt werden können.

Nadellager nehmen keine Axialkräfte auf. Deshalb muss als Eingabe 'ux' statt 'Fx' gewählt werden. Das Axialspiel ist nicht als Eingabe verfügbar.

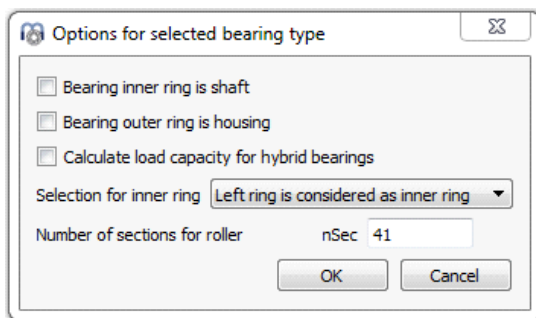
Bei Nadellagern mit Hülse sollte der  $b_m$ -Faktor für die Dynamische Tragzahl auf 1,0 statt auf 1,1 bei gedrehten Lagerringen gesetzt werden. Der Typ kann unter Optionen für den Lagertyp über die  $+$ -Schaltfläche hinter dem Lagertyp ausgewählt werden.

### 3.1.2.1.17 Axial-Zylinderrollenlager

Axial-Zylinderrollenlager haben einen Druckwinkel von  $90^\circ$ . Sie lassen nur axiale Kräfte und Biegemomente zu. Radialkräfte können nicht genutzt werden. Deshalb muss anstelle von  $F_y, F_z$   $u_y, u_z$  eingegeben werden.



Im Optionsdialog (+-Schaltfläche hinter dem Typ des Lagers) kann festgelegt werden, ob die linke oder die rechte Wellenscheibe als Innenring gilt, auf den die Belastung wirkt. Die Standardeinstellung "Wellenscheibe als Innenring ist links" führt dazu, dass eine positive Axialkraft eingegeben werden muss.



Ein Axialspiel kann eingegeben werden; es wirkt sich nur als Versatz zur Axialverschiebung aus.

Für Axial-Zylinderrollenlager werden keine Toleranzen berücksichtigt.

### 3.1.2.1.18 Axial-Zylinderrollenlager (zweireihig)

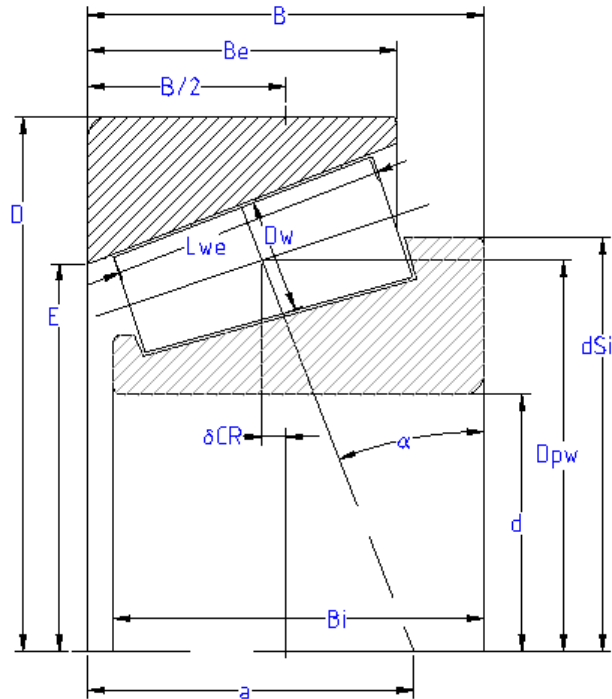
Wie einreihige Axial-Zylinderrollenlager haben auch die zweireihigen Lager einen Druckwinkel von  $90^\circ$ . Sie lassen nur axiale Kräfte und Biegemomente zu. Radialkräfte können nicht genutzt werden. Deshalb muss anstelle von  $F_y$ ,  $F_z$   $u_y$ ,  $u_z$  eingegeben werden.

Für  $D_{pw}$  muss der mittlere Durchmesser angegeben werden. Die lokalen Tragfähigkeiten werden auf der Basis von  $D_{pw} + L_w$  und  $D_{pw} - L_w$  berechnet. Beide Reihen haben die gleichen Wälzkörpergeometrien.

### 3.1.2.1.19 Radial-Kegelrollenlager

Bei Kegelrollenlagern wird anstelle einer Zylinderrolle eine Kegelrolle verwendet. Der Durchmesser des Wälzkörpers wird für die Mitte der Rolle angegeben und auch

die Teilung  $D_{pw}$  wird für die Mitte der Rollen definiert. Das Spiel ist als Axialspiel definiert.

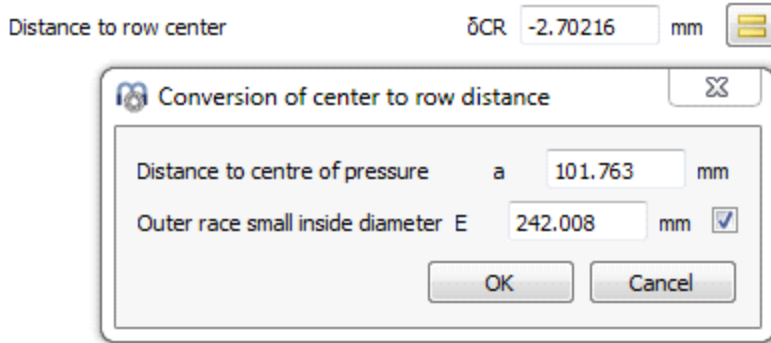



Der Druckwinkel sollte die Richtung der Last sein. Deshalb muss für den Druckwinkel der Winkel des Aussenringes angegeben werden. Die Winkel für die Rolle und den Konus werden dann so berechnet, dass sich alle Kone in einem Punkt schneiden.

Wenn die Axialkraft zu klein ist, kann es zu einem Berechnungsfehler kommen, da das Lager auseinanderfällt. Sie müssen eine ausreichend große Axialkraft eingeben oder stattdessen eine Axialverschiebung vorgeben.

Die Richtung des Druckwinkels kann über die  $\oplus$ -Schaltfläche hinter Druckwinkel oder Lagertyp festgelegt werden.

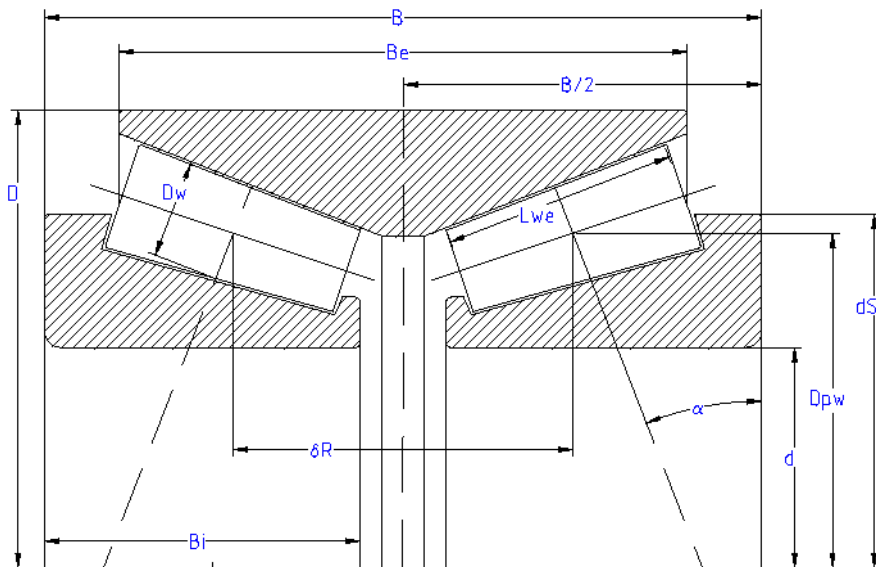
Der Durchmesser der Schulter des Innenrings kann definiert werden. Die Kraft wird in der mittleren Höhe des Absatzes angenommen.



Der Abstand zwischen Lagermitte und Rollenmitte ' $\delta_{CR}$ ' kann auf zwei verschiedene Arten über die -Schaltfläche definiert werden. Er kann entweder aus dem Abstand zum Druckmittelpunkt 'a' oder aus dem kleinen Innendurchmesser des Aussenringes 'E' umgerechnet werden, indem das entsprechende Flag gesetzt wird. Beachten Sie, dass die Vorgabe von 'E' wiederum ' $D_{pw}$ ' entsprechend ihrer geometrischen Beziehungen modifiziert.

### 3.1.2.1.20 Radial-Kegelrollenlager (zweireihig)

Wie bei anderen zweireihigen Lagertypen kann die Anordnung der Druckwinkel im Optionsdialog festgelegt werden. Im Gegensatz zum einreihigen Radial-Kegelrollenlager muss der Abstand der Lagerreihen, gemessen von der Mitte der entsprechenden Rollen, eingegeben werden. Es werden die gleichen Ergebnisse berechnet wie bei einem einreihigen Lager mit einer Lagerkonfiguration von zwei Reihen. Der einzige Unterschied sind die Tragzahlen, die für das zweireihige Lager angegeben werden. Wie bei den anderen Lagertypen kann das Spiel auch als Radialspiel definiert werden.



### 3.1.2.1.21 Axial-Kegelrollenlager

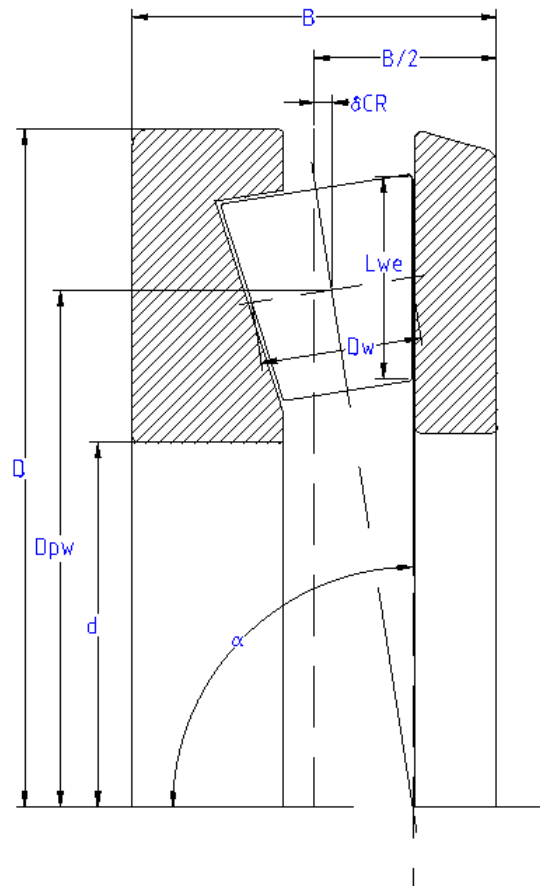
Die Eingaben, die ein Axial-Kegelrollenlager definieren, sind etwas einfacher als für den radialen Fall der Kegelrollenlager, da der Abstand zwischen Lagermitte und Rollenmitte ' $\delta_{CR}$ ' direkt vom Anwender eingegeben wird. Das Spiel wird auch als Axialspiel bezeichnet. Wie auf dem Bild zu sehen ist, kann ein Druckwinkel von  $90^\circ$  bis  $0^\circ$  eingestellt werden, er sollte aber immer zwischen  $90^\circ$  und  $45^\circ$  liegen, um als Axiallager zu gelten.

Da keine Radialkräfte aufgenommen werden können, müssen die radialen Verschiebungen ' $u_y$ ' und ' $u_z$ ' unter Belastung auf Null gesetzt werden.

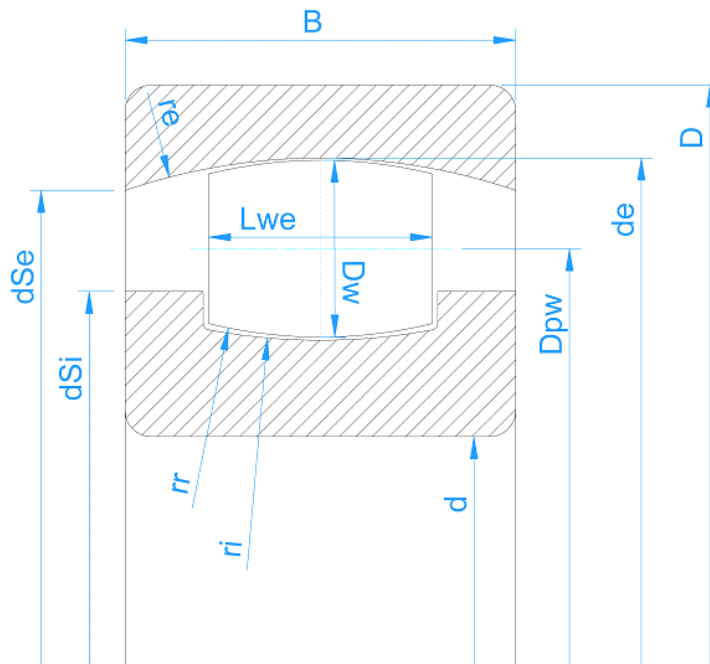
Die Richtung des Druckwinkels kann über die  $\oplus$ -Schaltfläche hinter dem Kontaktwinkel oder dem Lagertyp festgelegt werden.

Die Höhe des Schulter des inneren Durchmessers kann über den Faktor ' $f_{Si}$ ' (%) in Prozent des Durchmessers der Rolle definiert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Kraft in der mittleren Höhe der Schulter angreift.

Für Axial-Kegelrollenlager werden keine Toleranzen berücksichtigt.



### 3.1.2.1.22 Tonnenlager



Tonnenrollenlager sind einreihige Pendelrollenlager. Wie bei zweireihigen Pendelrollenlagern ist der Außenring eine Kugel und das Lager nimmt keine Momentenbelastung auf. Daher muss anstelle der Momentenbelastung der Kippwinkel definiert werden.

Der Radius von Innenring, Außenring und Rolle kann als Verhältnis zum Nenndurchmesser des Außenrings angegeben werden:  $d_e = D_{pw} + D_w$ . Standard Parameter sind:  $f_e = 0.5$ ;  $f_i = 0.5$ ;  $f_r = 0.485$ . Wird der Radius für den Außenring anders gewählt, kann sich das Lager nicht mehr frei rotieren.

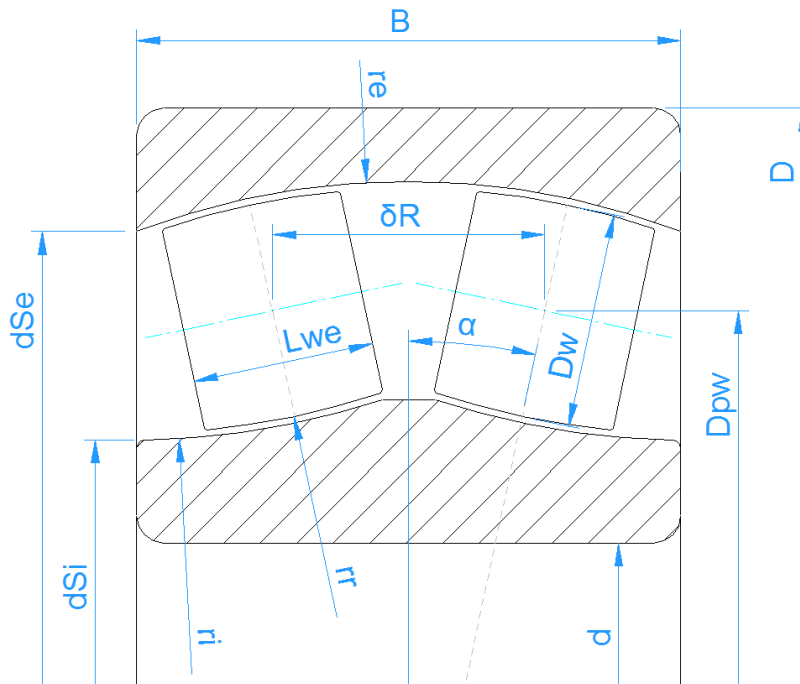
Die dynamische Tragzahl wird mit  $b_m=1$  berechnet, da dies in den Katalogdaten der großen Hersteller der Fall zu sein scheint.

### 3.1.2.1.23 Toroidallager

Toroidallager haben einen Außenringradius, der größer ist als der einer Kugel. Sie haben keine Absätze, daher kann die Rolle axial schwimmen.

Der Radius des Innenrings, des Außenrings und der Rolle kann im Verhältnis zum Nenndurchmesser des Außenrings angegeben werden:  $d_e = D_{pw} + D_w$ . Die Berechnung der dynamischen Tragzahl erfolgt mit  $b_m=1,15$  wie bei Pendelrollenlagern, da dies in den Katalogen der großen Hersteller der Fall zu sein scheint.

### 3.1.2.1.24 Pendelrollenlager



Da der Außenring eines Pendelrollenlagers eine Kugel ist, nimmt das Lager keine Momentlasten auf. Daher muss der Kippwinkel anstelle einer Momentbelastung definiert werden. Der Abstand der beiden Lagerreihen wird durch die Teilung des Teilkegelwinkels und den Teilkreisdurchmesser bestimmt. Im Gegensatz zu den anderen Lagertypen gilt das nominale diametrale Lagerspiel nur für den Innenring.

Der Radius des Innenrings, des Aussenrings und der Rolle kann im Verhältnis zum Nenndurchmesser des Aussenrings angegeben werden:  $d_e = D_{pw} / \cos(\alpha) + D_w$   
Standard Parameter sind:  $f_e = 0,5$ ;  $f_i = 0,5$ ;  $f_r = 0,485$ . Wenn der Radius für den Aussenring anders gewählt wird, kann das Lager nicht mehr frei kippen.

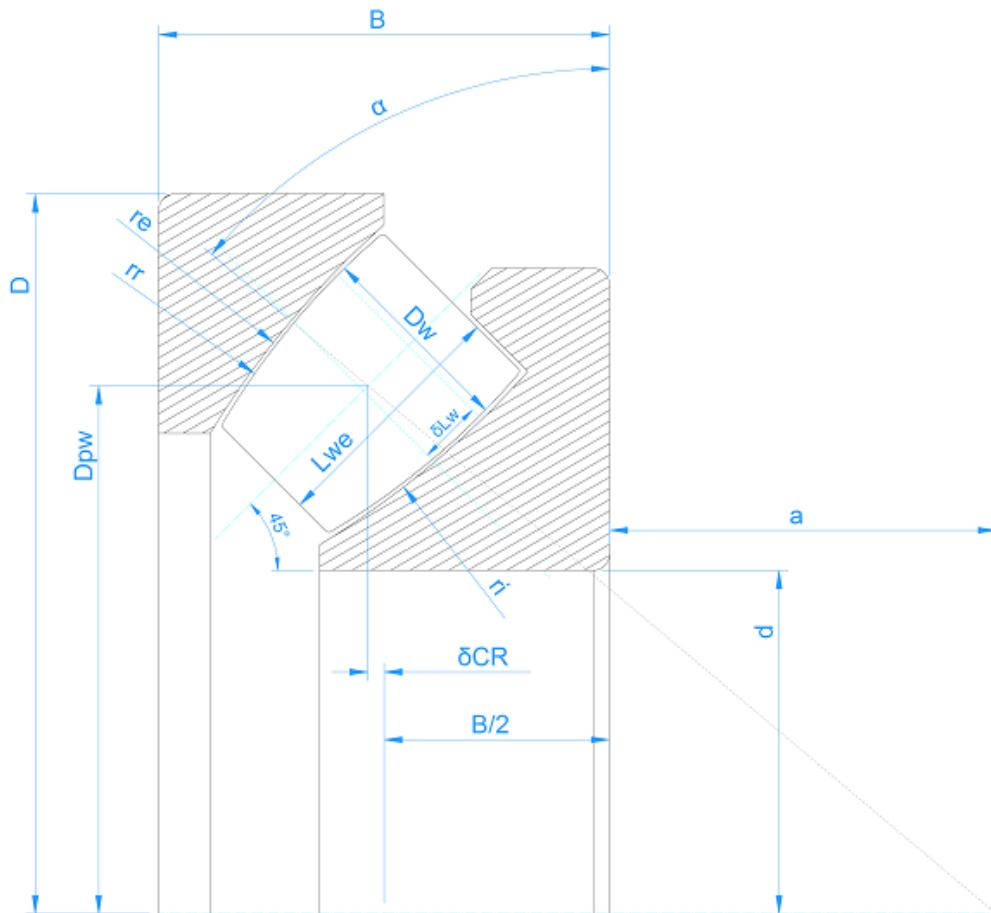
### 3.1.2.1.25 Halbes radiales Pendelrollenlager

Dies ist ein halbes Pendelrollenlager mit nur einer Reihe. Es kann für die Montage von asymmetrischen Pendelrollenlagern mit Hilfe der Wellenberechnung verwendet werden.


Wie bei Pendelrollenlagern kann der Radius des Innenrings, des Außenrings und der Rolle als Verhältnis zum Nenndurchmesser des Außenrings angegeben werden:  
 $d_e = D_{pw} / \cos(\alpha) + D_w$  Standard Parameter sind:  $f_e = 0,5$ ;  $f_i = 0,5$ ;  $f_r = 0,485$ . Wenn der Radius für den Aussenring anders gewählt wird, kann das Lager nicht mehr frei kippen.

Der [Abstand](#) <sup>217</sup> zur Rollenmitte definiert die axiale Position der Rolle. Er sollte so definiert sein, dass der Krümmungsmittelpunkt auf einer Seite des Lagers liegt. Der Abstand zum Druckmittelpunkt 'a' sollte gleich der Lagerbreite sein.

3.1.2.1.26 Axial-Pendelrollenlager



Der Teilkreisdurchmesser  $D_{pw}$  ist als Schnittpunkt des Teilkegelwinkels  $\alpha$  und der Achse der Rolle definiert. Übliche Werte für den Druckwinkel sind  $45^\circ$  bis  $50^\circ$ .

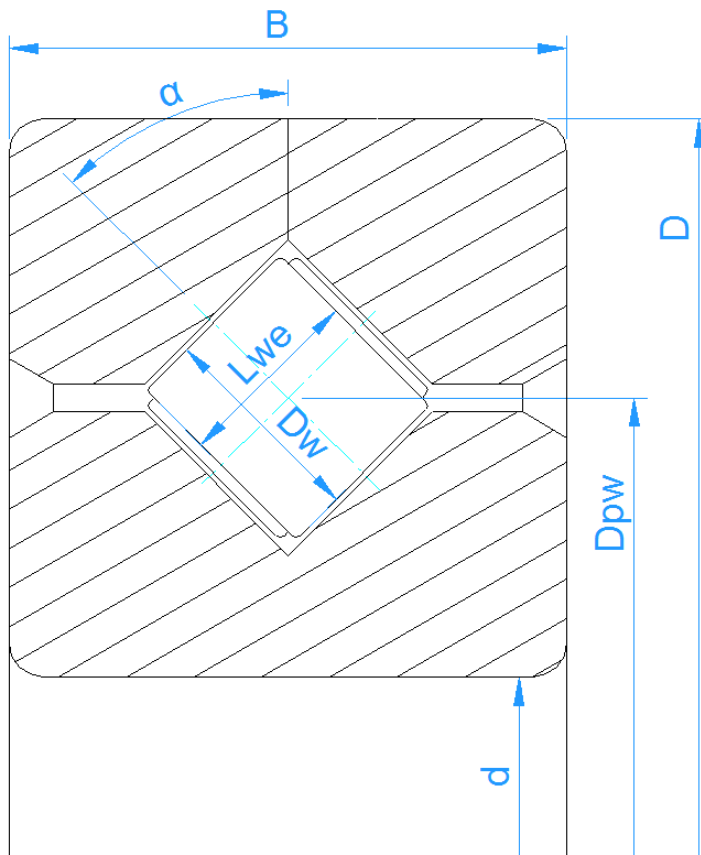
Die Radien von Innenring und Rolle werden wie bei den Radial-Pendelrollenlagern durch die Faktoren  $f_i$  und  $f_r$  definiert. Sie sind definiert als  $r_i = f_i \cdot (2 \cdot r_e)$  und  $r_r = f_r \cdot (2 \cdot r_e)$ . Standardwerte sind  $f_i = 0,5$  und  $f_r = 0,485$ . Werden die drei Radien  $r_i$ ,  $r_e$ ,  $r_r$  über die -Schaltfläche hinter  $f_i$ ,  $f_r$  eingegeben, so werden die Faktoren  $f_i$ ,  $f_r$  und der Teilkreisdurchmesser  $D_{pw}$  berechnet.

Die Unsymmetrie der Rolle wird durch  $\delta L$  als Versatz zwischen Position der Rolle und Position des maximalen Durchmessers  $D_w$  der Rolle definiert. Es gibt eine Auslegungsschaltfläche, mit der  $\delta L$  so berechnet werden kann, dass der Kontaktpunkt in der Mitte der Rolle liegt.

Die Tragzahlen werden anhand des Durchmessers des Wälzkörpers  $D_w$  am Kontaktpunkt berechnet. Die Pressungsverteilung Rollen wird immer von innen nach außen und nicht von links nach rechts dargestellt.



### 3.1.2.1.27 Kreuzrollenlager



Kreuzrollenlager haben einen Druckwinkel von  $45^\circ$ . Sie können als Radial- oder Axiallager gewählt werden. Unterschiede sind die Berechnung der Tragzahlen und die Eingabe des Spiels als Radial- oder Axialspiel.

Die Anzahl der Rollen muss für eine Reihe eingegeben werden; sie entspricht also der Hälfte der gesamten Anzahl der Rollen. Die Länge der Rolle muss kleiner als ihr Durchmesser sein.

### 3.1.2.1.28 Schrägrollenlager

Schrägrollenlager ähneln den Kreuzrollenlagern, jedoch sind alle Rollen in einer Richtung orientiert. Daher entfällt die Beschränkung der Rollenlänge und der Druckwinkel steht als Eingabe zur Verfügung.

### 3.1.2.2 Approximation der Wälzlagergeometrie

Wenn die Wälzlagerinnengeometrie nicht verfügbar ist, kann sie von der Software approximiert werden. Es stehen vier Möglichkeiten zur Verfügung:

#### Nur Eingabe der Aussengeometrie

In diesem Fall wird nur die äußere Geometrie des Lagers mit Innendurchmesser  $d$ , Außendurchmesser  $D$  und Breite  $B$  definiert. Zusätzlich müssen der Kontaktwinkel und das Spiel festgelegt werden.

Die Anzahl und Größe der Wälzkörper wird von der Software approximiert. Mit dieser inneren Geometrie werden dann die Tragzahlen berechnet. Dies führt nicht zu genauen Ergebnissen, da die reale Wälzlagergeometrie nicht verwendet wird. Dennoch lassen sich Einflüsse von Momenten und anderen Parametern erkennen.

### **Eingabe der Aussengeometrie und der Tragzahlen**

In diesem Fall wird die innere Geometrie wie zuvor approximiert, aber die Tragzahlen werden vom Anwender bereitgestellt. Die Tragzahlen sind normalerweise in Lagerkatalogen verfügbar.

### **Eingabe der Innengeometrie**

Mit dieser Auswahl müssen Sie alle Maße für die Innengeometrie eingeben. Die Tragzahlen werden nach den Normen berechnet.

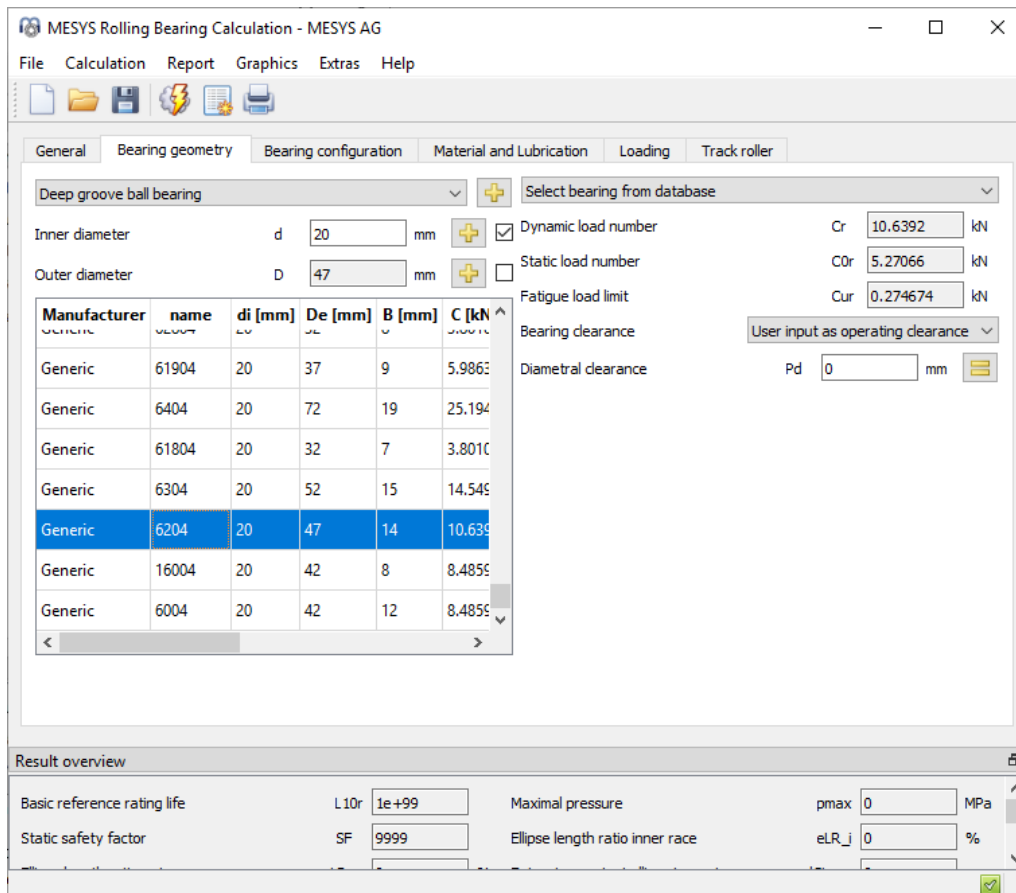
### **Eingabe der Innengeometrie und der Tragzahlen**

Da die Lagerhersteller häufig größere Tragzahlen verwenden als die nach den Normen berechneten, ist es möglich, beides einzugeben: die Innengeometrie und die Tragzahlen. Die Tragzahlen werden dann für die Berechnung der Lebensdauer verwendet.

### **Lager aus Datenbank wählen**

Anstatt die Wälzlagergeometrie durch den Anwender einzugeben, kann diese aus einer Datenbank gewählt werden.

Innen- und Außendurchmesser können optional definiert werden. Dies schränkt die Anzahl der in der Liste angezeigten Lager ein. Durch Anklicken der Titel der Spalten können die Daten entsprechend dieser Spalte ausgewählt werden.



Ein Doppelklick auf eine Zeile liest die Lagerdaten ein und aktualisiert die Werte, die aus der Datenbank gelesen werden.

Die Daten der Innengeometrie der in der Datenbank enthaltenen Lager sind aus den Außenmaßen approximiert. Weitere Datenbanken von Lagerherstellern sind verfügbar. Katalogdaten mit approximierter innerer Geometrie sind von Schaeffler und SKF erhältlich und sind in der Installation enthalten. Verschlüsselte Lagerdatenbanken einschließlich der inneren Geometrie sind von HQW/Barden, CSC, GMN und IBC und anderen Herstellern erhältlich. Die Datenbanken von HQW/Barden und CSC sind in der Installation enthalten, für weitere Datenbanken wenden Sie sich bitte an den Lagerhersteller.

Lager mit approximierter Wälzlagerinnengeometrie und Lager mit der Herstellereinstellung "Generic" sind mit Standardschrift dargestellt, kundenspezifische Lager und Datenbanken mit Informationen zur Innengeometrie sind fett gedruckt.

### 3.1.2.3 Tragzahlen

Abhängig von der Einstellung für die Approximation der Wälzlagergeometrie können die Tragzahlen eine Ein- oder eine Ausgabe sein. Werden sie vom Anwender vorgegeben, so werden sie wegen der Oberflächenhärte des Werkstoffs

nicht verändert. Die Oberflächenhärte wird nur berücksichtigt, wenn die Werte von der Software berechnet werden.

### 3.1.2.3.1 Dynamische Tragzahl

Die dynamische Tragzahl wird für die Berechnung der Lebensdauer der Lager verwendet. Sie wird berechnet nach (ISO 281, 2007) mit dem Faktor  $f_c$  nach (ISO/TR 1281-1, 2008). Der Faktor  $b_m$  kann bei Füllnutlagern über den Optionsdialog für den Lagertyp (+-Schaltfläche hinter Lagertyp) beeinflusst werden. Wird im Optionsdialog die Option für Hybridlager gewählt, wird die dynamische Tragzahl nach (ISO 20056-1, 2017) berechnet, was zu größerem  $b_m$  und kleinerem  $f_c$ , aber unveränderter Tragzahl im Vergleich zu Stahllagern führt.

Die dynamische Tragzahl kann durch einen bei den Werkstoffeigenschaften verfügbaren Modifikationsfaktor beeinflusst werden.

### 3.1.2.3.2 Statische Tragzahl

Die statische Tragzahl wird nach (ISO 76, 2006) und (ISO/TR 10657, 1991) berechnet. Sie dient nur der Dokumentation und wird nur dann bei der Berechnung des statischen Sicherheitsfaktors verwendet, wenn die statische Sicherheit nicht auf Basis von Spannungen berechnet wird (siehe Einstellungen "Statischen Sicherheitsfaktor über Spannungen berechnen"). Sie wird auch in einem Fall für die Berechnung von Stützrollen verwendet, siehe diesen Abschnitt für Details.

Wenn die Option für Hybridlager im Lageroptionen-Dialog ausgewählt ist, wird die statische Tragzahl nach (ISO 20056-2, 2017) berechnet, was zu größeren statischen Tragzahlen bei Siliziumnitrid-Wälzkörpern mit Elastizitätsmodulen größer als 300GPa führt. Beachten Sie, dass (ISO 20056-2, 2017) auch höhere Werte für Empfehlungen von statischen Sicherheitsfaktoren verwendet.

Die statische Tragzahl basiert auf einer zulässigen Spannung, die bei Eingaben für Werkstoffdaten geändert werden kann.

Bei Lagern mit niedriger Drehzahl sind teilweise höhere Belastungen zulässig. So lässt (ISO 1002, 1983) für nicht rotierende Kugellager eine Radialkraft von mehr als dem Fünffachen der statischen Tragzahl zu.

### 3.1.2.3.3 Ermüdungsgrenzbelastung

Die Ermüdungsgrenzbelastung wird nach (ISO 281, 2007) Abschnitt B.3.2.1.2 für Kugellager und nach Abschnitt B.3.2.1.3 für Rollenlager berechnet. Für Rollenlager wird die Standardberechnung nach ISO/TS 16281 verwendet, nicht die Erweiterte Methode für Pressungsberechnung.


Die Ermüdungsgrenzbelastung basiert auf der Dauerfestigkeit von 1500MPa und wird für die Berechnung der Erweiterten Lebensdauer verwendet. Die Dauerfestigkeit kann durch Eingaben in die Werkstoffdaten modifiziert werden.



#### 3.1.2.4 Innendurchmesser, Aussendurchmesser und Breite

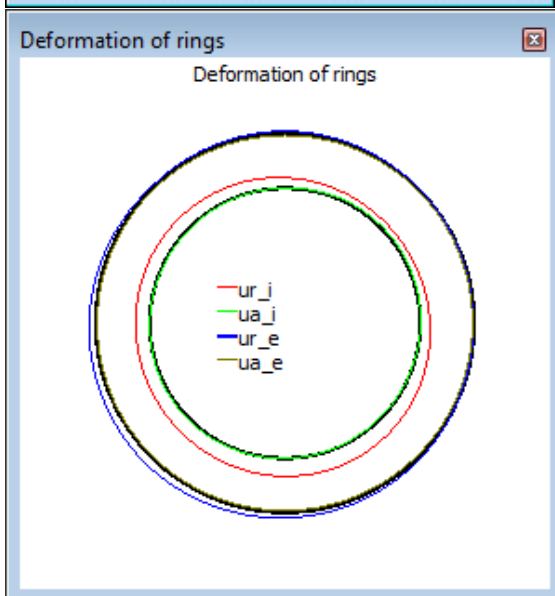
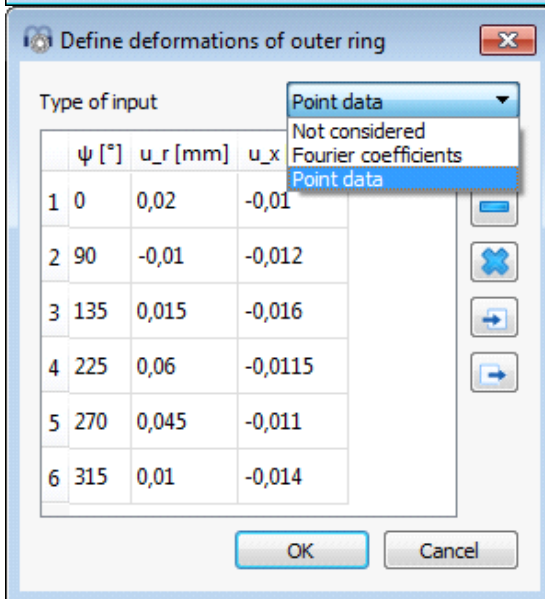
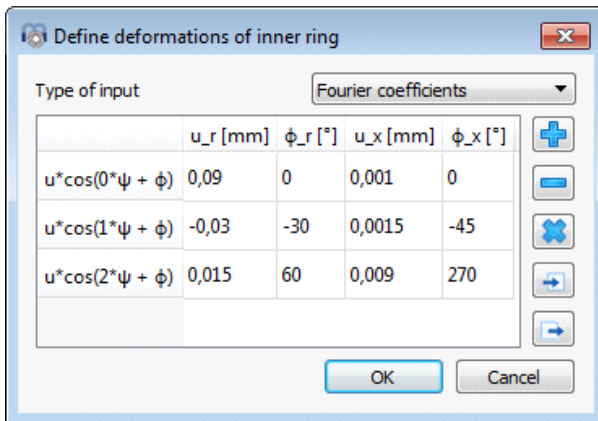
Innendurchmesser, Aussendurchmesser und Breite werden nur zur Dokumentation und zur Approximation der Innengeometrie benötigt. Sie werden nur für die Berechnung des Betriebsspiels nach der Montage verwendet.

Wenn die Innengeometrie angegeben wird und keine Betriebsspielberechnung nötig ist, können diese Werte auf Null gesetzt werden.



#### 3.1.2.5 Verformungen der Lagerringe

Sind die Verformungen von Außen- und Innenring z.B. durch FE-Analysen bekannt, können sie durch Anklicken der -Schaltfläche hinter den beiden Durchmesser-Eingabefeldern in die Software eingegeben werden, um deren Einfluss auf die Lagerlebensdauer und die Pressungsverteilung zu bewerten. Die Verformungen verändern im Rahmen der Berechnung der Lastverteilung das lokale Lagerspiel für jeden Wälzkörper. Der Bezugspunkt für diese Verformungen liegt in der Mitte des Lagers am nominalen Innen- und Außendurchmesser.

|                |   |                                  |    |                                                                                     |
|----------------|---|----------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Inner diameter | d | <input type="text" value="100"/> | mm |  |
| Outer diameter | D | <input type="text" value="140"/> | mm |  |



Es gibt zwei Möglichkeiten. Zum Einen können mit der Option 'Punktdaten' beliebig viele Verformungspunkte in die Datentabelle eingefügt werden. Jeder Punkt wird durch seinen Winkel am Umfang positioniert und sowohl die axiale als auch die

radiale Deformation können definiert werden. Beachten Sie, dass die Verformungen entlang der Ringe zwischen den definierten Punkten linear interpoliert werden. Andererseits gibt es die Möglichkeit, eine approximative Deformationskurve mit Hilfe von Fourierkoeffizienten zu definieren, wie in der Abbildung oben dargestellt. Zusätzlich kann eine ganze Tabelle aus einer CSV-Datei über die -Schaltfläche importiert werden und jede erstellte Tabelle kann über die -Schaltfläche in eine Datei exportiert werden.

Bei Wellenberechnungen mit 3D-elastischen Bauteilen kann eine Wellenverformung in die Lagerberechnung übernommen werden. In diesem Fall wird ein Kontrollkästchen "Verformungen der Welle berücksichtigen" angezeigt. Wenn dieses Kontrollkästchen gelöscht wird, werden die Verformungen der Welle entfernt und nicht mehr berücksichtigt. Wenn die Lager im Rahmen der Wellenberechnung verwendet werden, ermöglicht dieser Dialog auch die Angabe einer Spaltweite zwischen Lagerring und Welle bzw. Gehäuse. Die Definition für die Verformung wird für den Lagerring und die Spaltweite für den Kontakt zwischen Lagerring und Welle/Gehäuse verwendet.


Diese Verformungen und Deformationen, die aus der Wellenberechnung übernommen werden, werden in den Ausgaben für das Lagerspiel oder das Protokoll der Toleranz nicht berücksichtigt. Sie wirken sich nur auf die Berechnung der Lastverteilung und der Lebensdauer aus.

In der aktuellen Version kann die Definition der Verformung des Aussenringes nicht zusammen mit der Berechnung von Stützrollen mit elastischem Außenring verwendet werden.

### 3.1.2.6 Anzahl Wälzkörper

Die Anzahl der Wälzkörper muss angegeben werden. Die minimale Anzahl ist drei, die maximale Anzahl hängt vom Durchmesser der Teilung des Lagers ab. Es wird eine Warnung angezeigt, wenn sich die Wälzkörper überschneiden, der Abstand zwischen den Wälzkörpern ist in der Resultateübersicht und im Protokoll verfügbar.

Bei Kreuzrollenlagern ist dies die Anzahl der Rollen für eine Reihe.

Mit der -Schaltfläche kann die Anzahl der Wälzkörper automatisch auf Basis eines maximalen Füllwinkels und eines minimalen Abstands zwischen den Wälzkörpern berechnet werden. Bei Rillenkugellagern würde der Füllwinkel 180-200° betragen, der minimale Abstand kann auf den Anforderungen an den Käfig basieren.

Enter parameters

Enter number of rolling elements

Maximum fill angle  $\psi_{REmax}$  300 °


Minimum distance between rolling elements  $\delta_{REmin}$  1 mm

OK Cancel

Diese Option ist hauptsächlich dafür gedacht, die Variation des Durchmessers der Wälzkörper in der Parametervariation mit einer automatischen Einstellung der Anzahl Wälzkörper zu ermöglichen.

### 3.1.2.7 Durchmesser Wälzkörper

Hier wird der Durchmesser der Wälzkörper angegeben. Bei Kegelrollenlagern wird der Durchmesser in der Mitte der Rolle verwendet.

Mit der -Schaltfläche können die Anzahl der Wälzkörper, der Durchmesser der Rolle und der Druckwinkel aus den vorgegebenen Schadensfrequenzen berechnet werden. Dies kann verwendet werden, wenn Schadensfrequenzen für ein Lager angegeben sind und Geometriedaten fehlen.

Calculate Z, Dw from frequencies

Speed of inner ring  $n_i$  1000 rpm

Speed of outer ring  $n_e$  0 rpm

Pitch diameter  $D_{pw}$  33.5 mm

Damage frequency for inner race  $f_{ip}$  107.388 1/s

Damage frequency for outer race  $f_{ep}$  75.9456 1/s

Damage frequency for rolling element  $f_{rp}$  72.2548 1/s

---

Number of rolling elements  $Z$  11

Roller diameter  $D_w$  7.5 mm

Nominal contact angle  $\alpha$  39.9995 °

OK Calculate Cancel

### 3.1.2.8 Teilkreis-Durchmesser

Der Teilkreisdurchmesser ist der Durchmesser der Mittelpunkte von Wälzkörpern, wenn sie zu beiden Laufbahnen gleich viel Spiel haben. Die Durchmesser von Innen- und Außenring werden mit diesem Wert, dem Durchmesser des Wälzkörpers, dem Druckwinkel und dem Spiel berechnet.



Normalerweise wird der Mittelwert des inneren und äußeren Durchmessers des Lagers genommen, aber er kann auch anders sein. Zum Beispiel gilt er nicht für ein Nadellager ohne Innenring. Der Mittelwert kann über die ★-Schaltfläche hinter dem Eingang ausgewählt werden.

### 3.1.2.9 Druckwinkel

Der Druckwinkel muss für Schrägkugellager, Vierpunktkugellager, Pendelkugellager, Kegelrollenlager und Pendelrollenlager angegeben werden. Für Kegelrollenlager wird der Winkel am Aussenring verwendet, da dies die Richtung der Kraft ist. Mit der + -Schaltfläche kann die Richtung des Druckwinkels gewählt werden.

Bei zweireihigen Schrägkugellagern hat die O-Anordnung die größere Breite zwischen den Druckpunkten, während bei der X-Konfiguration die Druckmittelpunkte näher zusammen liegen.

Bei Dreipunktlagern wird diese Eingabe für den Scheibenwinkel des geteilten Rings verwendet. Die = -Schaltfläche ermöglicht die Berechnung des Scheibenwinkels bei vorgegebener Scheibenbreite. Der resultierende Druckwinkel für axialen Kontakt ist als freier Druckwinkel in den Ergebnissen verfügbar.


### 3.1.2.10 Konformität des Innen- und Aussenringes


Die Konformität ist das Verhältnis zwischen dem Krümmungsradius eines Lagerringes und dem Kugeldurchmesser. Aus geometrischen Gründen muss der Wert größer als 0,5 sein. Die Werte, die für die Berechnung der Tabellen in ISO 281 verwendet werden, sind  $f_i=f_e=0.52$  für Radialkugellager und  $f_i=f_e=0.535$  für Axialkugellager, wie in (ISO/TR 1281-1, 2008) angegeben.

Nach (ISO/TS 16281, 2008) sind die üblichen Werte  $f_i=0.52$  und  $f_e=0.53$  für Radialkugellager und  $f_i=f_e=0.54$  für Axialkugellager. (ISO 76, 2006) verwendet ebenfalls  $f_i=f_e=0.54$  für Axialkugellager.

Für Pendelrollen- oder Tonnenlager sollten Werte von  $f_i=f_e=0.5$  verwendet werden. Hier wird der Durchmesser des Aussenrings  $d_e$  als Referenz verwendet.

Nach (ISO 281, 2007) und (ISO 76, 2006) verringert eine größere Konformität die Tragfähigkeit und daher ist eine Reduzierung von  $f_c$  erforderlich, aber eine kleinere Konformität "erhöht nicht unbedingt die Tragfähigkeit". Daher erlaubt die Software die Eingabe eines Grenzwertes für die Konformität, der für die Berechnung der Tragzahlen verwendet wird. Siehe die + -Schaltfläche hinter dem Typ des Lagers für Kugellager.

Für Pendelkugellager wird der Durchmesser des Aussenrings  $d_e$  als Referenz für  $f_e$  verwendet. Daher sollte  $f_e=0.5$  als Standard verwendet werden. Mit der -Schaltfläche können die Radien eingegeben und optional der Teilkreisdurchmesser  $D_{pw}$  so angepasst werden, dass der Aussenring eine Kugel mit  $f_e=0.5$  ist.

Mit der -Schaltfläche hinter dem Eingabefeld kann die Konformität aus einem vorgegebenen Radius berechnet werden. Achten Sie darauf, dass Sie vorher den richtigen Durchmesser der Rolle und der Teilung eingegeben haben.

### 3.1.2.11 Konformität der Rolle

Bei Pendelrollenlagern oder Tonnenlagern hat die Konformität der Rolle einen üblichen Wert von  $f_r=0.485$ . Der Durchmesser des Aussenrings  $d_e$  wird als Referenz verwendet, also  $r = f_r \cdot d_e$ .


### 3.1.2.12 Abstand der Lagerreihen

Bei zweireihigen Lagern wird der Abstand der Lagerreihen in der Benutzeroberfläche angezeigt. Es handelt sich um den axialen Abstand zwischen den Mittelpunkten der Kugeln. Bei zweireihigen Schrägkugellagern ist er eine Eingabe, bei den anderen Lagertypen ist er eine Ausgabe, da der Abstand durch Teilung des Durchmessers und Druckwinkel berechnet wird. Der Abstand der Lagerreihen ist

$$\delta_R = D_{pw} \cdot \tan \alpha$$

### 3.1.2.13 Effektive Rollenlänge

Die effektive Rollenlänge ist die Länge der Rolle, die belastet werden kann. Ein Radius am Ende der Rolle muss abgezogen werden, um die effektive Länge zu erhalten. Bei Kegelrollenlagern ist die Länge am Rollenkegel definiert, bei allen anderen Lagertypen ist es die Länge auf der Achse.

Wenn die Erweiterte Methode für Pressungsberechnung für die Druckverteilung auf der Seite 'Allgemein' ausgewählt ist, kann das Rollenprofil mit der -Schaltfläche definiert werden.

#### 3.1.2.13.1 Definieren von Rollenprofilen

Es können Profile für Innenring, Außenring und Rolle definiert werden.

Define roller profiles

Difference between effective and total roller length  $\Delta L_w$  2 mm

Number of roller sections used nSec 41

Roller

Type of profile Standard profile according ISO/TS 16281

Profile definition over effective roller length

Inner race

Type of profile Tangential crowning

Profile definition over total roller length

Profile pr 5  $\mu\text{m}$

Unmodified cylindrical part Lwu 80 %

Outer race

Type of profile User defined

Profile definition over total roller length

Profile pr 5  $\mu\text{m}$

OK Cancel

Als allgemeine Eingaben kann die Differenz zwischen effektiver und gesamter Rollenlänge definiert werden. Da sie die Steifigkeit der Rolle erhöht, hat sie einen Einfluss auf die Berechnung.

Eine andere Profildefinitionslänge  $L_{wd}$  kann für für Rolle, Innenring und Außenring gewählt werden. Es kann entweder die effektive Rollenlänge  $L_{we}$  oder die gesamte Rollenlänge  $L_w$  oder eine benutzerdefinierte Eingabe zwischen diesen beiden Grenzwerten verwendet werden ( $L_{we} \leq L_{wd} \leq L_w$ ). Unterschiedliche Längen für die Profildefinition können z. B. in Fällen verwendet werden, in denen die Länge der Rolle und der Aussenringlaufbahn grösser und die Länge des Innenringlaufbahn aufgrund von Einstichen kleiner ist.

Die Anzahl der Abschnitte für die Berechnung muss größer als 30 sein und eine ungerade Zahl sein. Die Berechnungsgenauigkeit und die Berechnungszeit nehmen mit einer größeren Anzahl von Abschnitten zu.

Für die Definition der Profilierung stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Standard-Profil nach ISO/TS 16281:  
Hierbei werden die Vorgaben der Norm verwendet, d.h. logarithmisches Profil der Rolle und keine Profilierung der Laufringe.

## 2. Logarithmisches Profil:

Der Betrag der Rücknahme kann definiert werden und ein zylindrischer Anteil, das nicht modifiziert werden soll. Es wird die folgende Formel verwendet:

$$P(x) = pr \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - \left\{ \frac{2|x| - L_{wu}}{L_{wd} - L_{wu}} \right\}^2} \right)$$

Für die Rolle wird über eine Schaltfläche die Standardrücknahme nach ISO/TS 16281 vorgegeben. Die Standard-Rücknahme von  $0,00035 \cdot D_w$  für kurze Zylinderrollenlager entspricht einer Kontaktspannung von 3000MPa.

## 3. Modifiziertes logarithmisches Profil:

Die Höhe der Rücknahme wird nach folgender Formel berechnet, die aus (Fujiwara, et al., 2010) abgeleitet ist:

$$P(x) = A \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - \left\{ 1 - e^{-\frac{pr}{A}} \right\} \left( \frac{2|x| - L_{wu}}{L_{wd} - L_{wu}} \right)^2} \right)$$

mit

$$A = 2D_w \cdot \left( \frac{p \cdot (1 - \nu^2)}{E} \right)^2$$

Die maximale Rücknahme ist nicht unendlich an der Kante der Rolle wie bei der logarithmischen Profilierung nach ISO/TS 16281, sondern begrenzt auf den Maximalwert von  $pr$ .

Bei der Verwendung von  $p = 3000\text{MPa}$  und  $pr = \text{Unendlich}$  sind die Ergebnisse dieselben wie bei der logarithmischen Profilierung nach ISO/TS 16281 (Oberhalb).

Die Werkstoffdaten für dieses Profil werden immer von dem Kontakt Rolle/Innenring übernommen.

## 4. Tangentiale Balligkeit:

Zur Profilierung wird ein tangential zum Zylinder verlaufender Kreisbogen verwendet. Der Betrag der Rücknahme und ein Prozentsatz der unveränderten Zylinderlänge können festgelegt werden.

## 5. Balligkeit:

Zur Profilierung wird ein Kreisbogen mit axialer Positionierung in der Mitte der Rolle verwendet. Der Betrag der Rücknahme und ein Prozentsatz der unveränderten Länge des Zylinders sowie ein Übergangsradius können definiert werden.

## 6. Zwei tangentielle Radien:

Ein erstes zylindrisches Bauteil mit der Breite "Lwu" wird durch zwei tangentielle Radien verlängert. Die Breite für den ersten Radius wird als Prozentsatz "Lwr1" definiert. Eine Anforderung ist "Lwr1" > "Lwu". "Lwu" kann auf Null gesetzt werden, um nur zwei Radien zu haben.

## 7. Exponent

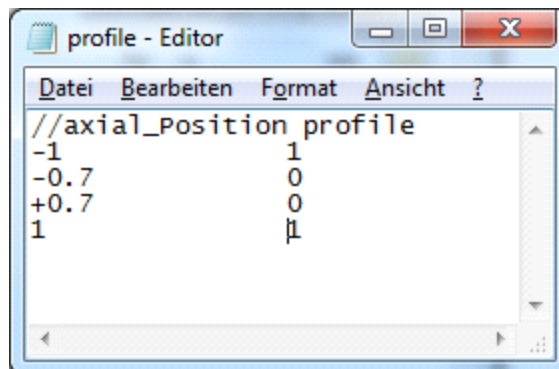
Es kann ein Exponent "e" und eine unveränderte Länge "Lwu" für die Profilierung angegeben werden. Der Exponent muss sein  $e \geq 2$ . Für die Profilierung wird die folgende Formel verwendet:

$$P(x) = pr \cdot \left( \frac{2|x| - L_{wu}}{L_{wd} - L_{wu}} \right)^e$$

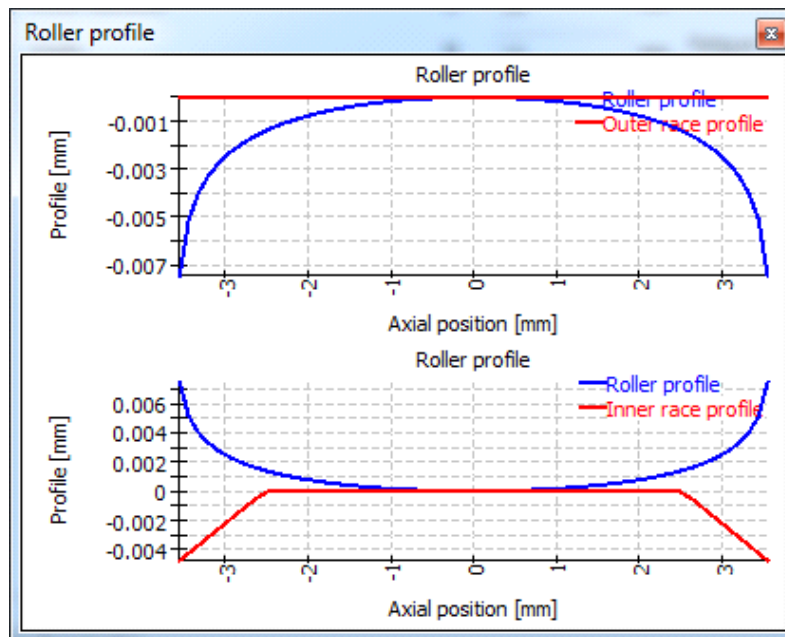
## 8. Datei einlesen:

Das Profil kann aus einer Datei gelesen werden. Die Daten müssen mit zwei Werten in jeder Zeile angegeben werden, einer axialen Position und der Rücknahme. Die axiale Position wird mit der Länge der Rolle und die Rücknahme mit der Eingabe für die Profilierung skaliert. So kann ein Bereich von -1 bis +1 für die Axiale Position und 0 bis 1 für die Rücknahme verwendet werden.

Eine sehr einfache Datei wird hier gezeigt. Sie wurde für die Profilierung des Innenrings auf der rechten Seite ausgewählt:



```
//axial_Position profile
-1 1
-0.7 0
+0.7 0
1 1
```



Das unsymmetrische Profil wird für die meisten Lager von links nach rechts verwendet. Bei Kegelrollenlagern und Axial-Pendelrollenlagern werden die Profile von links nach rechts verwendet, wenn die Richtung des Druckwinkels links ist. Bei Druckwinkel zum Kontakt nach rechts wird das Profil gespiegelt. Die Bedingungen für den Einbau haben also keinen Einfluss auf die Profilierung.

9. Datei ohne Skalierung lesen:

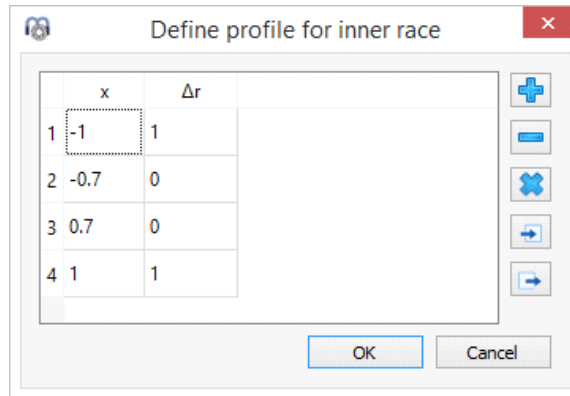
Wie bei der Option "Datei einlesen" werden die Daten aus einer Datei gelesen. Mit dieser Option wird keine Skalierung vorgenommen. Die axiale Ausdehnung muss von  $-Lwd/2$  bis  $+Lwd/2$  oder von 0 bis  $Lwd$  definiert werden. Die Profilierung ist in "mm" definiert und wird nicht mit skaliert.

10. Eigene Eingaben:

Anstatt eine Bezeichnung für die Datei zu definieren, können die Punkte für die Profilierung in einer Tabelle definiert werden. Auch hier gilt, wie oben, ein Bereich von -1 bis +1 für die axiale Position und ein Wert zwischen 0 und 1 für die Profilierung.

Die Tabelle im Diagramm rechts zeigt die gleichen Daten wie die Datei

oben.



#### 11. Benutzerdefinierte Formel:

Eine benutzerdefinierte Formel kann in der ECMAScript-Sprache definiert werden. Die Variable 'x' hat den Bereich  $-1 < x < +1$  und die Variablen 'Dw', 'Lwe', 'Lw', 'Lwd' sind definiert und in 'mm'. Das Ergebnis der Gleichung wird in 'mm' betrachtet und ein positiver Wert vergrößert den Abstand.

Beispiele sind "return 0.01\*x\*\*4;" oder "return -0.00035\*Dw\*Math.log(1-x\*x);" oder mit Bedingungen wie

```
if(x < -0.5) {
 return 0.01*(-0.5-x);
}
if(x > 0.5) {
 return 0.01*(x-0.5);
}
return 0;
```

Die Profilierungen können in den Grafiken zur Rollenprofilierung dargestellt werden.

#### 3.1.2.14 Versatz der Rollenmitte

Für Axial-Pendelrollenlager kann ein Versatz der Rollenmitte  $\delta L$  definiert werden. Es ist der Abstand zwischen der Rollenmitte und der Position des maximalen Durchmessers  $D_w$ .

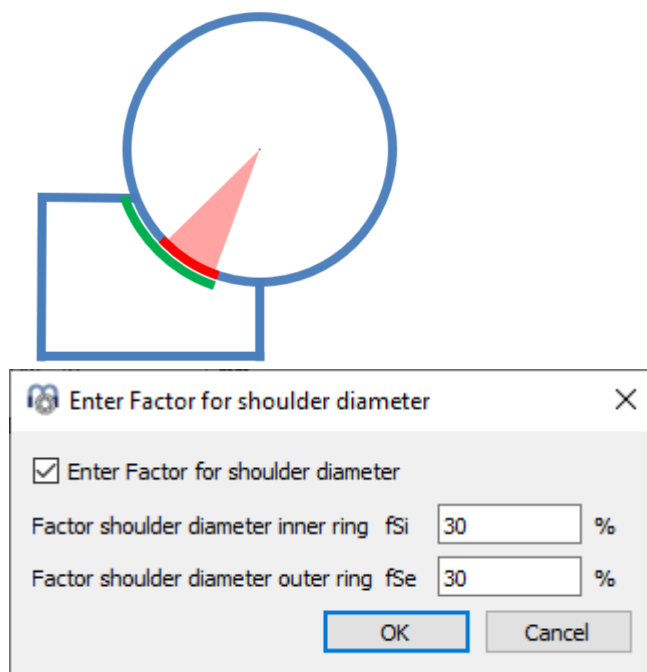
#### 3.1.2.15 Schulterhöhe von Innen- und Außenring

Für Kugellager und Radial-Zylinderrollenlager kann der Schulterdurchmesser des Innen- und Außenrings festgelegt werden. Für Kegelrollenlager kann die Schulter für den Innenring definiert werden. Wird der Wert Null eingegeben, wird er nicht berücksichtigt.

Der Schulterdurchmesser wird mit der maximalen Ausdehnung der Kontaktellipse verglichen. Es wird eine Warnung angezeigt, wenn die Ellipse über die Schulter hinausgehen würde. Die Hertzsche Pressung ist in diesem Fall nicht gültig.

Der erforderliche Durchmesser der Schulter wird im Protokoll zusammen mit einem Längenverhältnis  $eLR_i$ ,  $eLR_e$  angezeigt, das eine Sicherheit der Schulterlänge darstellt. Das Längenverhältnis ist definiert als die Länge vom unteren Ende der Kontaktellipse bis zur Schulter (grüne Linie in der Grafik) geteilt durch die Länge der Kontaktellipse  $2a$  (rote Linie in der Grafik). Der Wert sollte daher größer als 1 oder 100% sein.

Bei Pendelkugellagern wird der Schulterdurchmesser des Aussenrings automatisch durch den Radius des Aussenrings und die Lagerbreite begrenzt, wenn die Lagerbreite eingegeben wird.

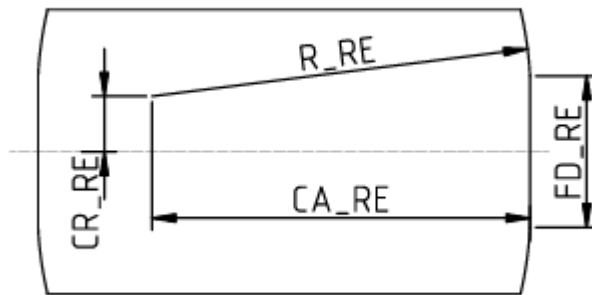


Statt mit einem absoluten Wert kann die Schulterhöhe auch mit einem Prozentsatz des Kugeldurchmessers definiert werden. Ein Faktor von 50% würde eine Schulter bis zum Teilkreisdurchmesser bedeuten, so dass der Faktor für die meisten Lagertypen zwischen 10% und 40% liegen sollte. Die Verwendung dieses Faktors ermöglicht eine Standard-Geometrie bei Änderung des Kugeldurchmessers oder der Teilung.

Bei Radial-Zylinderrollenlagern und Kegelrollenlagern wird davon ausgegangen, dass die Axialkraft auf der halben Höhe der Schulter wirkt. Es kann ein Öffnungswinkel für den Absatz definiert werden. Ein Wert von  $0^\circ$  bedeutet, dass die Kraft parallel zur Achse der Rolle wirkt.

Für radiale Zylinderrollenlager und Kegelrollenlager kann optional ein Rollenendradius definiert werden. In diesem Fall werden die Kontaktposition und die Kontaktspannung ausgewertet. Es wird eine Kontaktsteifigkeit verwendet, die auf dem Hertz'schen Punktkontakt basiert.





### 3.1.2.16 Abstand zur Rollenmitte

Diese Eingabe ist nur für Kegelrollenlager, halbe Radial-Pendelrollenlager und Axial-Pendelrollenlager verfügbar. Es ist der Abstand zwischen Rollenmitte und Lagermitte. Er kann aus dem Abstand zum Druckmittelpunkt 'a' berechnet werden, der in den Lagerkatalogen angegeben ist.



Für halbe Radial-Pendelrollenlager sollte der Abstand 'a' in der Regel gleich der Lagerbreite sein, so dass der Krümmungsmittelpunkt des Außenrings auf einer Seite eines Lagers liegt und zwei kombinierte Lager eine Kugel als Außenring haben.

### 3.1.2.17 Lagerspiel

Das Lagerspiel kann nach (ISO 5753, 2009) (C2...C5) für Rillenkugellager, Vierpunktlager, Pendelkugellager, Pendel- und Zylinderrollenlager automatisch eingestellt werden.

Zusätzlich gibt es die Einstellungen 'aus Datenbank', 'Eigene Eingabe als Betriebsspiel' und 'Eigene Eingabe':

- Wird 'Aus Datenbank' gewählt, werden die minimalen und maximalen Werte für das Lagerspiel aus der Lagerdatenbank übernommen. Eine Fehlermeldung wird angezeigt, wenn die Lagerdaten nicht aus der Datenbank gewählt werden. Es ist nicht notwendig, die Toleranzlage aus der Datenbank zu verwenden, es können auch die anderen Optionen für die Toleranzlage ausgewählt werden.
- Die Auswahl 'Eigene Eingabe als Betriebsspiel' bedeutet, dass keine Modifikation des Spiels durch die Software vorgenommen wird. Es werden weder Passungen noch Temperatur berücksichtigt. Dies ist die empfohlene Einstellung, wenn Sie das Spiel kennen, das Sie berücksichtigen wollen.
- Die Auswahl von 'Eigene Eingabe' ermöglicht die Eingabe des Lagerspiels vor dem Einbau. Einflüsse von Temperatur oder Übermaß werden zusätzlich berücksichtigt.

- Mit der Auswahl 'Eigene Eingabe als Bereich' kann das Spiel des Lagers vor dem Einbau als Bereich über die -Schaltfläche eingegeben werden. Temperatur- oder Passungs-Einflüsse werden zusätzlich berücksichtigt. Die Lastverteilung wird anhand des Lagerspiels entsprechend der Einstellung als minimaler, mittlerer oder maximaler Wert des Bereichs berechnet. Die -Schaltfläche im Dialog verwendet die minimale Spielposition für die Auslegung von 'Padmin' oder 'Pamin' und die maximale Spielposition für die Auslegung von 'Pdmax' oder 'Pamax'.

Für Radialschräggugellager kann eine Vorspannkraft in der Datenbank definiert werden. Dann sind zusätzliche Auswahlmöglichkeiten verfügbar: "Extra leichte Vorspannkraft", "Leichte Vorspannkraft", "Mittlere Vorspannkraft", "Schwere Vorspannkraft". Diese Einträge sind nur vorhanden, wenn Vorspannkraften in der Datenbank hinterlegt sind.


### 3.1.2.18 Diametrales Lagerspiel

Das diametrale Lagerspiel  $P_d$  wird für Rillenkugellager, Pendelkugellager, Zylinderrollenlager und Pendelrollenlager angegeben. Es ist der Abstand zwischen der oberen und der unteren Position, die der Innenring ohne Belastung in einem festen Außenring einnehmen kann. Bei einreihigen Lagern kann es berechnet werden als

$$P_d = d_e - d_i - 2 \cdot D_w$$

Für die Vorspannung kann ein negatives Spiel eingegeben werden.

Derselbe Wert wird manchmal auch als Radialspiel bezeichnet (im Gegensatz zum Axialspiel), aber das Maß ist immer noch eine Differenz der Durchmesser.

Eine -Schaltfläche ermöglicht die Eingabe eines Axialspiels anstelle eines diametralen Lagerspiels. Bei Rillenkugellagern kann das Spiel auch für einen bestimmten freien Druckwinkel berechnet werden.


### 3.1.2.19 Axialspiel

Das Axialspiel  $P_a$  wird für Schräggugellager, Vierpunktlager, Zylinderrollenlager und alle Axiallager angezeigt. Das Axialspiel ist die Differenz zwischen der möglichen Axialverschiebung in positiver und negativer Richtung für Vierpunktlager und Zylinderrollenlager.

Bei einreihigen Schrägrollenlagern oder Kegelrollenlagern ist es der axiale Abstand zwischen Innen- und Außenring, wenn die Lagerringe mit einer sehr geringen Axialkraft zusammen bewegt werden. In diesem Fall ist das Spiel also zwischen Mitte und einer Richtung und bei zweireihigen Schrägrollenlagern, Vierpunktlagern und Zylinderrollenlagern ist es der maximale Abstand zwischen linker und rechter Endposition.

Bei Zylinderrollenlagern sollte für das Axialspiel ein Wert größer als Null eingegeben werden, da das Lager in der Regel Axialspiel hat. Wenn die Berechnung mit Spiel Null durchgeführt wird, ergeben sich bei einem Kippwinkel des Lagers Axialkräfte auf die Rollen. Dies sollte bei einem Festlager der Fall sein, aber nicht bei einem Loslager. Daher sollte in beiden Fällen das richtige Spiel eingegeben werden.

| Parameter                                    | Value      | Unit | Radio Button                     |
|----------------------------------------------|------------|------|----------------------------------|
| Effective axial clearance Pa <sub>eff</sub>  | -0.0536463 | mm   | <input type="radio"/>            |
| Pretension force F <sub>p</sub>              | 120.495    | N    | <input checked="" type="radio"/> |
| Unmounted pretension force F <sub>pu</sub>   | 103.005    | N    | <input type="radio"/>            |
| Mounted pretension force F <sub>pm</sub>     | 1283.55    | N    | <input type="radio"/>            |
| Effective pretension force F <sub>pEff</sub> | 2401.43    | N    | <input type="radio"/>            |

Eine Vorspannung kann durch die Verwendung eines negativen Wertes für das Axialspiel Pa eingegeben werden. Eine -Schaltfläche ermöglicht die Eingabe des diametralen Lagerspiels anstelle des Axialspiels für bestimmte Lagertypen. Für Schrägrollenlager oder Kegelrollenlager kann das Axialspiel auch für eine bestimmte Vorspannkraft berechnet werden.




Bei Wälzlagern werden bei der Berechnung des Axialspiels aus der Vorspannkraft noch nicht die erweiterte Pressungsberechnung oder Profiländerungen berücksichtigt.

Abhängig vom Typ des Lagers stehen mehrere Möglichkeiten für die Vorspannkraft zur Verfügung. Die Berechnung mit "F<sub>p</sub>" verwendet die Nennmaße der Lager, die Berechnung mit "F<sub>pu</sub>" verwendet die Nennmaße zusammen mit einer unbegrenzten radialen elastischen Ausdehnung; diese Option kann für den Fall verwendet werden, dass ein unmontiertes Lager bei der Herstellung axial belastet wird. Die montierte Vorspannkraft "F<sub>pm</sub>" wird mit den Abmessungen nach der Montage berechnet, aber ohne Temperatur und Drehzahl. Die effektive Vorspannkraft "F<sub>pEff</sub>" wird mit den Abmessungen nach der Montage und unter Berücksichtigung von Temperatur und Drehzahl berechnet.

### 3.1.2.20 Toleranz des Lagers

Die Toleranz des Lagers kann nach ISO 492 (P0...P2) berücksichtigt werden. Nach der Festlegung der Toleranzklasse des Lagers erlauben die folgenden Eingaben die Definition der Passung zur Welle und zum Gehäuse.

Zusätzlich zu den Toleranzklassen sind einige spezielle Eingaben möglich:

- 'Nicht berücksichtigt': Bei Auswahl von 'Nicht berücksichtigt' wird der Presssitz für das Betriebsspiel nicht berücksichtigt, in diesem Fall wirkt sich nur die Temperatur auf das Betriebsspiel aus, Fliehkräfte werden nicht berücksichtigt.
- 'Nennmaß': Bei Auswahl von "Nennmass" werden die Toleranzen des Lagers als Null betrachtet. Dann kann der Presssitz nur mit den Eingaben für die Toleranzen zur Welle und zum Gehäuse definiert werden.
- 'Eigene Eingabe': Diese Option ermöglicht die Definition eines benutzerdefinierten Toleranzfeldes für den inneren und äußeren Lagerring über die -Schaltfläche.
- 'Übermass definieren': Die Auswahl von 'Übermass definieren' ermöglicht es, das Übermaß zwischen Welle/Innenring und zwischen Gehäuse/Außenring direkt zu definieren, ohne Toleranzen zu verwenden. Mit der -Schaltfläche hinter den Eingaben für das Übermaß kann ein erforderliches Übermaß für ein gegebenes Betriebsübermaß berechnet werden. Die Drehzahl kann für diese Berechnung überschrieben werden.
- 'Mehrlagigen Presssitz definieren': Mit dieser Option kann ein mehrlagiger Presssitz sowohl für den inneren als auch für den äußeren Ring definiert werden. Mit der -Schaltfläche können die Abschnitte definiert werden. Die Durchmesser und Werkstoffe für die Passungs-Berechnung sind in diesem Fall nicht mit der Wellenberechnung gekoppelt.

### 3.1.2.20.1 Mehrlagiger Presssitz

Ein mehrlagiger Presssitz kann sowohl für Innen- als auch für Außenringe definiert werden. Für den Presssitz am Innenring ist die Reihenfolge vom großen zum kleinen Durchmesser und für den Presssitz am Außenring ist die Reihenfolge vom kleinen zum großen Durchmesser. Die erste Lage ist immer in Kontakt mit dem Lagerring. Optional kann eine Toleranz für das Übermass definiert werden.

Define multi-layer interference fit

Inner ring fit, ordered from large to small diameter

|   | di [mm] | lwi_i [µm] | lwi_e [µm] | Material | E [MPa] |     |
|---|---------|------------|------------|----------|---------|-----|
| 1 | 0       | 5          | 10         | Steel    | 207000  | 0,3 |

Outer ring fit, ordered from small to large diameter

|   | De [mm] | lwe_i [µm] | lwe_e [µm] | Material | E [MPa] |     |
|---|---------|------------|------------|----------|---------|-----|
| 1 | 55      | -3         | 0          | Steel    | 207000  | 0,3 |
| 2 | 65      | 0          | 5          | Steel    | 207000  | 0,3 |


Consider tolerances

OK Cancel

Wenn die Wälzlagerberechnung aus der Wellenberechnung verwendet wird, ist zu beachten, dass die Durchmesser und Werkstoffe nicht mit den Informationen in der Wellenberechnung gekoppelt sind. Alle Lagen für jeden Ring haben die gleiche Temperatur.

### 3.1.2.21 Passung zur Welle/Gehäuse

Die Passung zwischen Innenring und Welle kann als Toleranz definiert werden (ISO 286-1, 2010). Sie kann zum Beispiel mit "k6" angegeben werden. Dasselbe ist für die Passung zwischen Außenring und Gehäuse möglich.

Über die -Schaltfläche neben dem Eingabefeld kann direkt ein numerischer Wert angegeben werden. Die Auswahl von "Eigene Eingabe" erlaubt die Eingabe beliebiger Toleranzen:

Tolerances for shaft

Own input for shaft tolerances

Upper allowance for shaft tolShaft\_e 0.04 mm

Lower allowance for shaft tolShaft\_j 0.004 mm

OK Cancel

### 3.1.2.22 Innendurchmesser der Welle/Außendurchmesser des Gehäuses

Bei einer Hohlwelle kann der Innendurchmesser der Welle angegeben werden. Dies hat Auswirkungen auf die Passungsberechnung.

Für das Gehäuse kann der Außendurchmesser angegeben werden. Wird eine Null eingegeben, so wird ein Wert von  $2 \cdot D$  in die Berechnung eingesetzt.

### 3.1.2.23 Oberflächenrauheit Welle und Gehäuse

Die Oberflächenrauheit der Welle und des Gehäuses wird nur für die Berechnung des Presssitzes herangezogen. Das wirksame Übermaß der Bauteile wird um  $0,4 \times R_z$  gemäß (DIN 7190-1, 2017) reduziert. In früheren Versionen wurde eine Reduktion von  $0,8 \times R_z$  wie in der vorherigen Version der Norm verwendet.

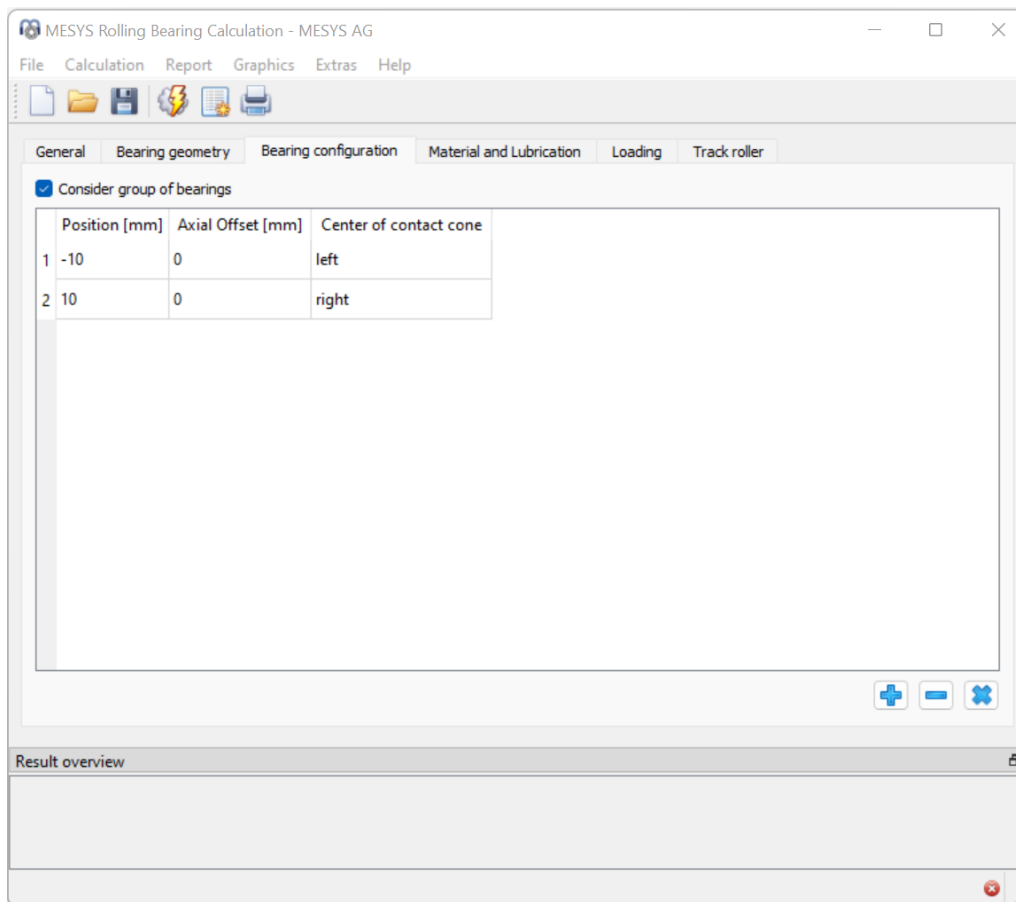
Genauer gesagt sollte für die Oberflächenrauheit der Welle die Summe der Rauheit von Welle und Innenring eingegeben werden. Ähnliches gilt für den Außenring. Da die Rauheit des Lagers in der Regel kleiner ist als die von Welle und Gehäuse, kann dies in den meisten Fällen vernachlässigt werden.




### 3.1.3 Lagerkonfiguration

Eine Gruppe von Lagern kann bei der Berechnung berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass die Lager mit einer starren Welle und einem Gehäuse verbunden sind. Die Lasten oder Verschiebungen werden für den Ursprung der Gruppe statt für jedes einzelne Lager angegeben.

Für jedes Lager kann eine relative Position eingegeben werden. Ein axialer Versatz ermöglicht die Definition von Vorspannungen im System. Der Versatz ist eine zusätzliche Verschiebung des Außenrings eines Lagers. Die Verschiebungen, Kräfte und Momente unter Belastung werden an der Referenzposition 0 angesetzt. In den meisten Fällen sollten die Positionen also symmetrisch um den Nullpunkt gewählt werden.

Bei Lagern mit einem Druckwinkel kann die Richtung des Druckwinkels angegeben werden. In der Abbildung ist eine O-Anordnung definiert.



Zusätzliche Lager können mit der -Schaltfläche hinzugefügt werden. Eine Zeile kann mit der -Schaltfläche gelöscht werden und die -Schaltfläche löscht alle Eingaben.

Die Möglichkeit von Lagergruppen erlaubt die Berechnung von 8-Punkt-Kugellagern als zwei Reihen von Vierpunktlagern; sie erlaubt Sätze von Schrägrollenlagern, gepaarte Kegelrollen oder Sätze von Zylinderrollenlagern, die in einem Planetengetriebe verwendet werden könnten.

Mit dem Kontextmenü (rechte Maustaste) in der Tabelle können mehrere Ergebnisse in der Tabelle angezeigt werden. So lässt sich schnell erkennen, wie sich die Belastung bzw. Lebensdauer auf die Lagerreihen verteilt.

### 3.1.4 Schmierstoff

Die Schmierung wirkt sich auf die erweiterte Lebensdauer aus. Eine große Schmierfilmdicke verhindert den direkten Kontakt zwischen Wälzkörper und Laufbahnen und kann daher die Lebensdauer erhöhen.

Einige Schmierstoffe können direkt aus der Liste ausgewählt werden. Es werden Mineralöle und synthetische Öle auf PAG-Basis angeboten. Für andere Ölsorten kann die "Eigene Eingabe" gewählt werden.

Lubrication

ISO VG 220 mineral oil Oil lubrication with on-line filter ISO4406 -/17/14 +

Viscosity at 40°C    nu40  mm<sup>2</sup>/s    Temperature    TOil  °C

Viscosity at 100°C    nu100  mm<sup>2</sup>/s    Oil density    ρ  kg/m<sup>3</sup>

contains effective EP additives    Pressure viscosity coefficient    α  1/MPa

### 3.1.4.1 Verunreinigungsbeiwert

Der Verunreinigungsbeiwert  $e_c$  wird für die Berechnung des Lebensdauerbeiwerts  $a_{ISO}$  verwendet. Er berücksichtigt die Reinheit des Schmierstoffs und kann nach ISO 281 Anhang A mit dem Viskositätsverhältnis, der Lagergröße und einer Auswahl der Reinheit des Schmierstoffs nach ISO 4406 berechnet werden. Die Auswahl nach ISO 4406 definiert, wie viele Partikel einer bestimmten Größe vorhanden sein dürfen. Die Auswahl für die Fett-Schmierung verwendet auch ISO 281 Anhang A, um den Verunreinigungsbeiwert  $e_c$  zu berechnen.

Zusätzlich kann eine Eigene Eingabe des Verunreinigungsbeiwertes gewählt und der Faktor über die +-Schaltfläche eingegeben werden. Der Verunreinigungsbeiwert  $e_c$  liegt im Bereich von 0,1 bis 1 und es können Richtwerte nach [ISO 281](#) <sup>350</sup> gewählt werden:

| Verunreinigungsgrad                                                                                                                                                       | eC                      |                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
|                                                                                                                                                                           | $D_{pw} < 100\text{mm}$ | $D_{pw} \geq 100\text{mm}$ |
| <b>Extreme Sauberkeit</b><br>Partikelgröße in der Größenordnung der Schmierfilmdicke, Laborbedingungen                                                                    | 1                       | 1                          |
| <b>Hohe Sauberkeit</b><br>Feinstfilterung der Ölzufuhr; typische Bedingungen bei einem gefetteten lebensdauer geschmierten Lager mit Dichtscheiben                        | 0,8 bis 0,6             | 0,9 bis 0,8                |
| <b>Normale Sauberkeit</b><br>Öl durch einen Feinfilter gefiltert; typische Bedingungen bei einem gefetteten lebensdauer geschmierten Lager mit Deckscheiben               | 0,6 bis 0,5             | 0,8 bis 0,6                |
| <b>Leichte Verunreinigung</b>                                                                                                                                             | 0,5 bis 0,3             | 0,6 bis 0,4                |
| <b>Typische Verunreinigung</b><br>Typische Bedingungen bei Lagern ohne fest eingebaute Abdichtung; grobe Filterung; Verschleißpartikel und Fremdpartikel aus der Umgebung | 0,3 bis 0,1             | 0,4 bis 0,2                |
| <b>Starke Verunreinigung</b><br>Lagerumgebung stark verunreinigt und Lageranordnung nicht angemessen abgedichtet                                                          | 0,1 bis 0               | 0,1 bis 0                  |
| <b>Sehr starke Verunreinigung</b>                                                                                                                                         | 0                       | 0                          |



Beachten Sie, dass bei kleinen Lagern die Werte für den Verunreinigungsbeiwert  $e_c$ , die nach ISO 281 Anhang A berechnet werden, viel niedriger sein können als in der Tabelle angegeben. In diesem Fall ist eine eigene Eingabe durch den Anwender vorzuziehen.

### 3.1.4.2 Kinematische Viskosität


Die kinematische Viskosität muss für zwei Temperaturen angegeben werden:  $\nu_{40}$  bei 40°C und  $\nu_{100}$  bei 100°C. Die tatsächliche Viskosität bei der gegebenen Temperatur wird dann anhand dieser Werte interpoliert.

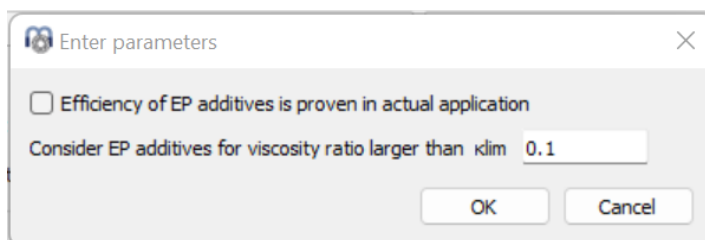
Ist nur eine kinematische Viskosität bei Betriebstemperatur angegeben, kann diese einfach in beide Eingaben eingegeben werden und wird somit in die Berechnung einbezogen.

Eine hohe Viskosität führt zu einem größeren Schmierstofffilm, aber der Wirkungsgrad wird verringert, wenn er zu groß ist.

### 3.1.4.3 EP-Additive

Wenn der Schmierstoff wirksame EP Additive enthält, kann der Lebensdauerbeiwert  $a_{ISO}$  mit  $\kappa=1$  berechnet werden, wenn  $\kappa < 1$  und  $eC \geq 0,2$  und  $\kappa \geq \kappa_{lim}$ .

Eine -Schaltfläche ermöglicht die Erhöhung von  $\kappa$  auch im Fall  $eC < 0,2$ , wenn die Option "Wirksamkeit der EP-Additive wurde in der Anwendung nachgewiesen" gesetzt ist. Für sehr kleine  $\kappa$  wird keine Erhöhung vorgenommen. Der Standard-Grenzwert ist auf  $\kappa_{lim}=0.1$  eingestellt, kann aber auf der Grundlage von Erfahrungswerten auf andere Werte geändert werden.



### 3.1.4.4 Schmierstofftemperatur

Die Schmierstofftemperatur wird nur für die Berechnung von Eigenschaften des Schmierstoffs wie der Betriebsviskosität verwendet. Sie hat keinen Einfluss auf das Spiel. Wird die Schmierstofftemperatur nicht als Eingabe gewählt, wird sie auf die Temperatur der Wälzkörper gesetzt, wie sie aus den Temperaturen der Ringe in Abhängigkeit von den Einstellungen oder wie auf der Seite "Belastung" angegeben berechnet wird.

### 3.1.4.5 Dichte des Öls

Die Dichte des Öls wird für die Berechnung der dynamischen Viskosität verwendet. Wenn ein Schmierstoff aus der Liste ausgewählt wird, wird die Dichte des Öls entsprechend der Schmierstofftemperatur modifiziert (Niemann, et al., 2005). Bei Auswahl von "Eigene Eingabe" wird der eingegebene Wert direkt für die Berechnung verwendet.

### 3.1.4.6 Druck-Viskositäts-Koeffizient


Der Druck-Viskositäts-Koeffizient  $\alpha$  wird für die Berechnung der Schmierfilmdicke verwendet. Wenn die Schmierfilmdicke nicht berechnet werden soll, können Sie einfach Null eingeben.

Nach [ISO/TR 1281-2](#) <sup>[350]</sup> kann der Druck-Viskositäts-Koeffizient  $\alpha$  durch die kinematische Viskosität  $\nu_0$  in  $\text{cm}^2/\text{s}$  berechnet werden als  $\alpha = 0.1122 \cdot \left(\frac{\nu_0}{10^4}\right)^{0.163}$

Zur Berechnung der Referenzviskosität  $\nu_1$  wurde ein Wert von  $\alpha = 0.0077 \cdot \nu^{0.204}$  unter Verwendung von  $\nu$  in  $\text{mm}^2/\text{s}$  und  $\alpha$  in  $\text{mm}^2/\text{N}$  nach [Baalmann](#) <sup>[352]</sup> verwendet.

In der Software wird der Vorschlag nach [AGMA 925](#) <sup>[352]</sup> verwendet, da verschiedene Öltypen berücksichtigt werden. Der Druck-Viskositäts-Koeffizient wird berechnet als  $\alpha = k \cdot \eta_M^s$  wobei  $\eta_M$  die dynamische Viskosität bei Betriebstemperatur ist. Die Faktoren  $k$  und  $s$  sind für verschiedene Typen von Schmierstoffen angegeben, wie in der folgenden Tabelle dargestellt:

| Typ des Öls                                          | k        | s      |
|------------------------------------------------------|----------|--------|
| Mineralöl                                            | 0.010471 | 0.1348 |
| PAO-basiertes synthetisches nicht-VI-verbessertes Öl | 0.010326 | 0.0507 |
| Synthetisches Öl auf PAG-Basis                       | 0.0047   | 0.1572 |

Diese Formel wird verwendet, wenn ein Schmierstoff aus der Liste ausgewählt wird. Wird 'Eigene Eingabe' gewählt, kann entweder die Formel nach (ISO/TR 1281-2, 2008) 11.8 oder nach (AGMA 925, 2003) oder eine direkte Eingabe über die -Schaltfläche neben dem Eingabefeld gewählt werden.

### 3.1.5 Werkstoff

Es können Werkstoffeigenschaften für Wälzkörper, Innen- und Außenring, Welle und Gehäuse definiert werden. Diese Daten werden für die Berechnung der Lastverteilung und des Übermasses zwischen Lager und Welle/Gehäuse verwendet. Auch Härte und Oberflächenrauheit können angegeben werden.

| Material                     |         |     |                              |         |     |
|------------------------------|---------|-----|------------------------------|---------|-----|
| Surface hardness inner race  | 58      | HRC | Surface Hardness outer race  | 58      | HRC |
| Core strength inner race     | Rm 1200 | MPa | Core strength outer race     | Rm 1200 | MPa |
| Hardness depth inner race    | hdi 0   | mm  | Hardness depth outer race    | hde 0   | mm  |
| Surface roughness inner race | Rq 0.4  | µm  | Surface roughness outer race | Rq 0.4  | µm  |
| Surface roughness roller     | Rq 0.4  | µm  | Material rolling element     | Steel   |     |
| Material inner race          | Steel   |     | Material outer race          | Steel   |     |
| Material shaft               | Steel   |     | Material housing             | Steel   |     |

### 3.1.5.1 Oberflächenhärte

Die Oberflächenhärte wird als Rockwell-Härte HRC angegeben. Ist die Oberflächenhärte kleiner als 58 HRC, wird eine Reduzierung der dynamischen und statischen Tragzahl berücksichtigt [Harris](#)<sup>[352]</sup>. Diese Reduzierung wird nur berücksichtigt, solange die Tragfähigkeit von der Software berechnet wird. Der Reduktionsfaktor für dynamische Tragzahl ist:

$$C' = C \left( \frac{HRC}{58} \right)^{3,6}$$

Ein Eingabewert für die Tragfähigkeit wird wegen des Härtewertes nicht verändert. Wenn in den Materialdaten ein Modifikationsfaktor für die dynamische Tragfähigkeit oder die zulässige Spannung für die statische Tragfähigkeit definiert ist, wird eine Minderung aufgrund der Härte nicht berücksichtigt.

Der statische Sicherheitsfaktor wird auch durch eine geringere Härte beeinflusst. Dies geschieht ebenfalls nach [Harris](#)<sup>[352]</sup> unter Verwendung des Faktors  $f_s$ :

$$f_s = 1.5 \left( \frac{HV}{800} \right)^2 \text{ (Kugellager) oder } f_s = 2 \left( \frac{HV}{800} \right)^2 \text{ (Rollenlager), mit } f_s \leq 1$$

Für diese Formel wird HV nach [Schlecht](#)<sup>[353]</sup> berechnet als  $HV = (223 \cdot HRC + 14500) / (100 - HRC)$ .

### 3.1.5.2 Kernfestigkeit des Innen- und Außenrings

Die Kernfestigkeit des Innen- und Außenrings und die entsprechende Härtetiefe werden für eine Prüfung der Einhärtetiefe verwendet. Die tatsächliche Schubspannung in der Härtetiefe wird mit der Scherfließspannung  $\tau_{yield}$  und der Dauerfestigkeit  $\tau_a$  verglichen, die nach [Harris](#)<sup>[352]</sup> aus dem Eingabewert der Festigkeit berechnet werden:

$$\tau_{yield} = 0.425 \cdot R_m; \tau_a = 0.6 \cdot \tau_{yield}$$


Wenn der Werkstoff durchgehärtet ist, kann die Software so eingestellt werden, dass die Härtetiefe automatisch berechnet wird. Dann treten keine Warnungen auf, sondern es wird lediglich eine größere Härtetiefe bei Lastzunahme berechnet.

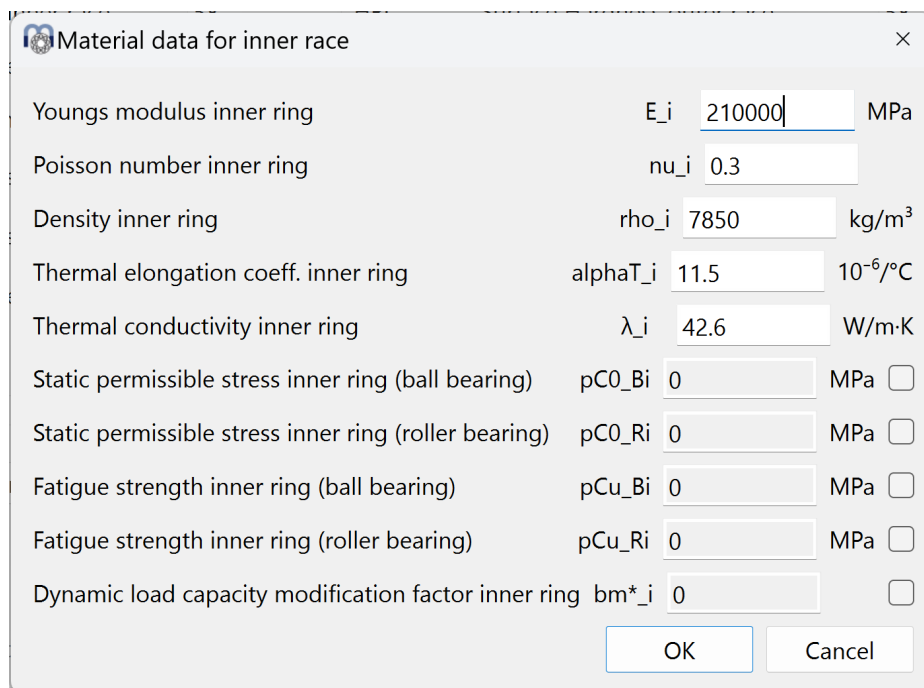
### 3.1.5.3 Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit  $R_q$  wird für die Berechnung der spezifischen Schmierfilmdicke  $\Lambda$  verwendet. Es handelt sich um einen quadratischen Mittelwert der Rauheit  $R_q$  oder  $R_{RMS}$ . Nach [Niemann](#)<sup>[353]</sup> ist eine Approximation gegeben als  $R_q \approx 1,25 \cdot Ra$ .

Nach [Baalmann](#)<sup>[352]</sup> ist eine Schätzung für eine übliche zusammengesetzte Rauheit gegeben durch  $R_q = 1.2 \cdot 10^{-5} \cdot D_{pw}^{0.55}$ . Diese Formel nach [Baalmann](#)<sup>[352]</sup> wird verwendet, wenn die Schaltfläche zur Auslegung neben dem Eingabefeld angeklickt wird.

### 3.1.5.4 Werkstoff für Lagerringe, Wälzkörper, Welle und Gehäuse

Der Werkstoff der Lagerringe, des Wälzkörpers, der Welle und des Gehäuses kann als Stahl oder Si3N4 gewählt werden. Die Liste wird aus der Datenbank entnommen und kann daher vom Anwender erweitert werden. Auch eine 'Eigene Eingabe' ist möglich und die Werkstoffdaten können über die -Schaltfläche definiert werden.



| Property                                              | Symbol         | Value  | Unit                 | Optional                 |
|-------------------------------------------------------|----------------|--------|----------------------|--------------------------|
| Youngs modulus inner ring                             | $E_i$          | 210000 | MPa                  |                          |
| Poisson number inner ring                             | $\nu_i$        | 0.3    |                      |                          |
| Density inner ring                                    | $\rho_i$       | 7850   | kg/m <sup>3</sup>    |                          |
| Thermal elongation coeff. inner ring                  | $\alpha_{T_i}$ | 11.5   | 10 <sup>-6</sup> /°C |                          |
| Thermal conductivity inner ring                       | $\lambda_i$    | 42.6   | W/m·K                |                          |
| Static permissible stress inner ring (ball bearing)   | $p_{CO\_Bi}$   | 0      | MPa                  | <input type="checkbox"/> |
| Static permissible stress inner ring (roller bearing) | $p_{CO\_Ri}$   | 0      | MPa                  | <input type="checkbox"/> |
| Fatigue strength inner ring (ball bearing)            | $p_{Cu\_Bi}$   | 0      | MPa                  | <input type="checkbox"/> |
| Fatigue strength inner ring (roller bearing)          | $p_{Cu\_Ri}$   | 0      | MPa                  | <input type="checkbox"/> |
| Dynamic load capacity modification factor inner ring  | $bm^*_i$       | 0      |                      | <input type="checkbox"/> |

Als Werkstoffdaten können der Elastizitätsmodul, die Querkontraktionszahl, die Dichte, der Thermische Ausdehnungskoeffizient und die Wärmeleitfähigkeit definiert werden. Mit diesen Daten werden das Betriebsspiel und die Lastverteilung innerhalb des Lagers berechnet. Die Wärmeleitfähigkeit wird zur Berechnung des Thermischen Widerstands für Kugellager nach [Nakajima](#)<sup>[353]</sup> verwendet.

Optional kann eine statisch zulässige Spannung definiert werden, die für die Berechnung der statischen Tragzahl und des statischen Sicherheitsfaktors verwendet wird. Der Standardwert beträgt 4000MPa für Rollenlager und 4200MPa

für Kugellager. Für Pendelkugellager wird die zulässige Spannung für den Außenring intern von der Software mit 4600/4200 multipliziert.

Die Dauerfestigkeit wird für die Berechnung der Ermüdungsgrenzbelastung  $C_u$  verwendet. Der Standardwert ist 1500MPa, er kann vom Anwender überschrieben werden.

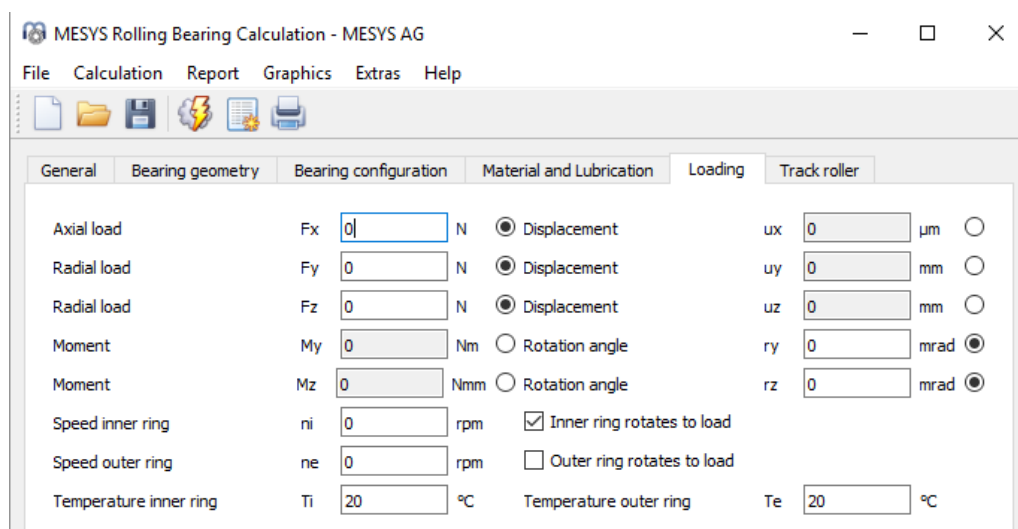
Die dynamische Tragzahl kann ebenfalls in Abhängigkeit von der Werkstoffauswahl modifiziert werden. Der  $b_m^*$ -Faktor wird mit der dynamischen Tragzahl nach [ISO 281](#) <sup>350</sup> multipliziert. Damit kann ein Materialeinfluss auf die dynamische Tragzahl berücksichtigt werden. Für den Innen- und Aussenring kann ein unterschiedlicher Wert verwendet werden. Der Wert des  $b_m^*$ -Faktors für den Wälzkörper wird nur für die Berechnung der Lebensdauer des Wälzkörpersatzes verwendet, er hat keinen Einfluss auf die dynamische Tragzahl des Lagers.

### 3.1.6 Belastung

Für jede Koordinatenrichtung können Sie auswählen, ob eine Kraft oder eine Verschiebung eingegeben werden soll. Soll z.B. bei der Berechnung eines Kegelrollenlagers nur die radiale Belastung berücksichtigt werden, so kann die Verschiebung in axialer Richtung auf Null gesetzt werden und es wird die Reaktionskraft in axialer Richtung berechnet.

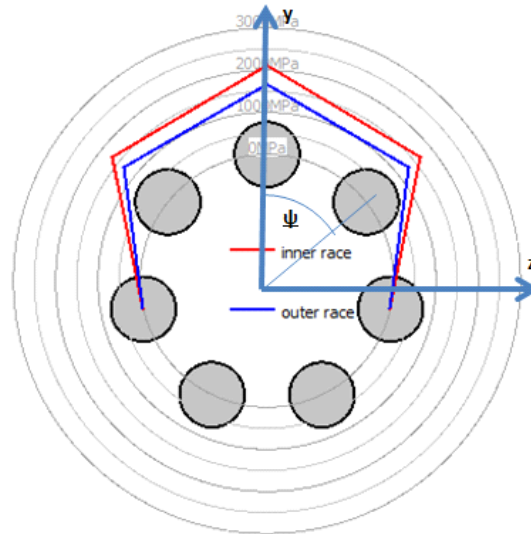
Eine Kippmoment-Belastung oder eine Rotation (Fluchtungsfehler) kann nur für zwei Richtungen eingegeben werden, da die Rotation um die Lagerachse nicht eingeschränkt ist.

Verwenden Sie die Optionsfelder, um die Elemente auszuwählen, die Sie eingeben möchten.



### 3.1.6.1 Koordinatensystem

Das Koordinatensystem ist mit  $x$  als axialer Richtung definiert. Die  $y$ -Achse zeigt nach oben zum ersten Wälzkörper und der Winkel  $\psi$  ist positiv um die  $x$ -Achse bzw. im Diagramm rechts im Uhrzeigersinn (mit Blick in Richtung der  $x$ -Achse). Am ersten Wälzkörper auf der  $y$ -Achse beginnt der Winkel mit Null. Momente sind positiv, wenn sie um die entsprechende Achse wirken.



Die Belastung wirkt auf den Innenring (anders bei Laufrollen mit elastischem Außenring), so dass eine positive Last in  $y$ -Richtung zu einer Belastung der Wälzkörper an der Oberseite führt, wie in den Grafiken rechts dargestellt.

### 3.1.6.2 Innenring rotiert zur Last

Die resultierende Lebensdauer ist etwas anders, wenn die Lastverteilung auf einem Lagerring stationär oder rotierend ist. Bei vielen Lagern rotiert der Innenring relativ zur Last und der Außenring rotiert nicht zur Last. Dies ist der Fall, wenn der Innenring mit einer rotierenden Welle verbunden ist und die Last stationär im Raum steht.

Welches ist die richtige Eingabe, wenn nur eine Axialkraft auftritt? In diesem Fall spielt die Eingabe keine Rolle, da die Ergebnisse für beide Einstellungen gleich sind, da alle Wälzkörper die gleiche Belastung haben.

### 3.1.6.3 Temperatur des Innenringes

Die Temperaturen des Innen- und Außenrings werden nur für die Berechnung des Übermaßes zwischen Welle und Innenring oder zwischen Gehäuse und Außenring verwendet. Sie beeinflussen das Betriebsspiel. Wahlweise können auch die Temperaturen der Welle und des Gehäuses eingegeben werden, um einen Temperaturgradienten zu berücksichtigen, siehe [Temperaturgradient in Passungen berücksichtigen](#) <sup>171</sup>.

Die Temperatur des Wälzkörpers wird standardmäßig mit dem Maximalwert der Ringtemperaturen angenommen. Dies kann unter Einstellungen geändert werden und optional ist auch eine manuelle Eingabe der Temperatur des Wälzkörpers möglich.

### 3.1.7 Lastkollektiv

Wenn auf der Registerkarte 'Allgemein' das Flag für die Berechnung mit Lastkollektiv gesetzt ist, wird statt mit einem einzelnen Lastfall mit einem Lastkollektiv gerechnet. Für jedes Element können die Last bzw. Verschiebung, die Rotation und die Temperaturen angegeben werden.

The screenshot shows the 'Loading' tab of the MESYS software. It features a table with 12 columns: Frequency, Fx [N], Fy [N], Fz [N], ry [°], rz [°], ni [rpm], ne [rpm], T\_i [°C], T\_e [°C], and TOil [°C]. There are three rows of data. A context menu is open over the table, listing options: 'enter Fx', 'enter Fy', 'enter Fz', 'enter My', and 'enter Mz'. Below the table, there are checkboxes for 'inner Ring rotates to load' (checked) and 'Outer ring rotates to load' (unchecked), and a 'Results for No' dropdown set to '1'. Navigation icons for adding, deleting, and clearing rows are also visible.

|   | Frequency | Fx [N] | Fy [N] | Fz [N] | ry [°] | rz [°] | ni [rpm] | ne [rpm] | T_i [°C] | T_e [°C] | TOil [°C] |
|---|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 1 | 0,5       | 15000  | 10000  | 0      | 0      | 0      | 1500     | 0        | 60       | 50       | 70        |
| 2 | 0,3       | 10000  | 8500   | 0      | 0,5    | 0      | 1000     | 0        | 65       | 60       | 70        |
| 3 | 0,2       | 12500  | 500    | 7000   | 0      | 0      | 350      | 0        | 60       | 50       | 70        |

Über das Kontextmenü, das sich durch Anklicken der rechten Maustaste öffnet, kann ausgewählt werden, welche Kräfte oder Momente als Eingabewerte verwendet werden sollen. Ist ein Wert nicht ausgewählt, kann die entsprechende Verschiebung/Rotation eingegeben werden. Wenn [Temperaturgradient in Passungen berücksichtigen](#) <sup>171</sup> aktiv ist, können zusätzlich Temperaturen für Wellen- und Gehäusetemperatur definiert werden. Die Schmierstofftemperatur wird nur angezeigt, wenn sie eine aktive Eingabe ist.

Mit der -Schaltfläche können Zeilen hinzugefügt werden, mit der -Schaltfläche kann eine markierte Zeile gelöscht werden. Die -Schaltfläche löscht alle Eingaben.

Mit der -Schaltfläche wird das Lastkollektiv aus einer Datei gelesen. Für die Datei müssen die aktuell angezeigten Spalten mit ihren Einheiten verwendet werden. Da die Daten aus der Datei zu den Eingaben hinzugefügt werden, müssen Sie die Eingaben zuerst löschen, um ein vollständiges Lastkollektiv zu definieren. Ebenso kann eine erstellte Lastkollektiv-Tabelle mit der entsprechenden -Schaltfläche exportiert werden.

Wie im Fall der Einzellast kann ausgewählt werden, ob der Ring relativ zur Last rotiert oder nicht. Ein nicht zur Last rotierender Ring wäre auf der sicheren Seite.

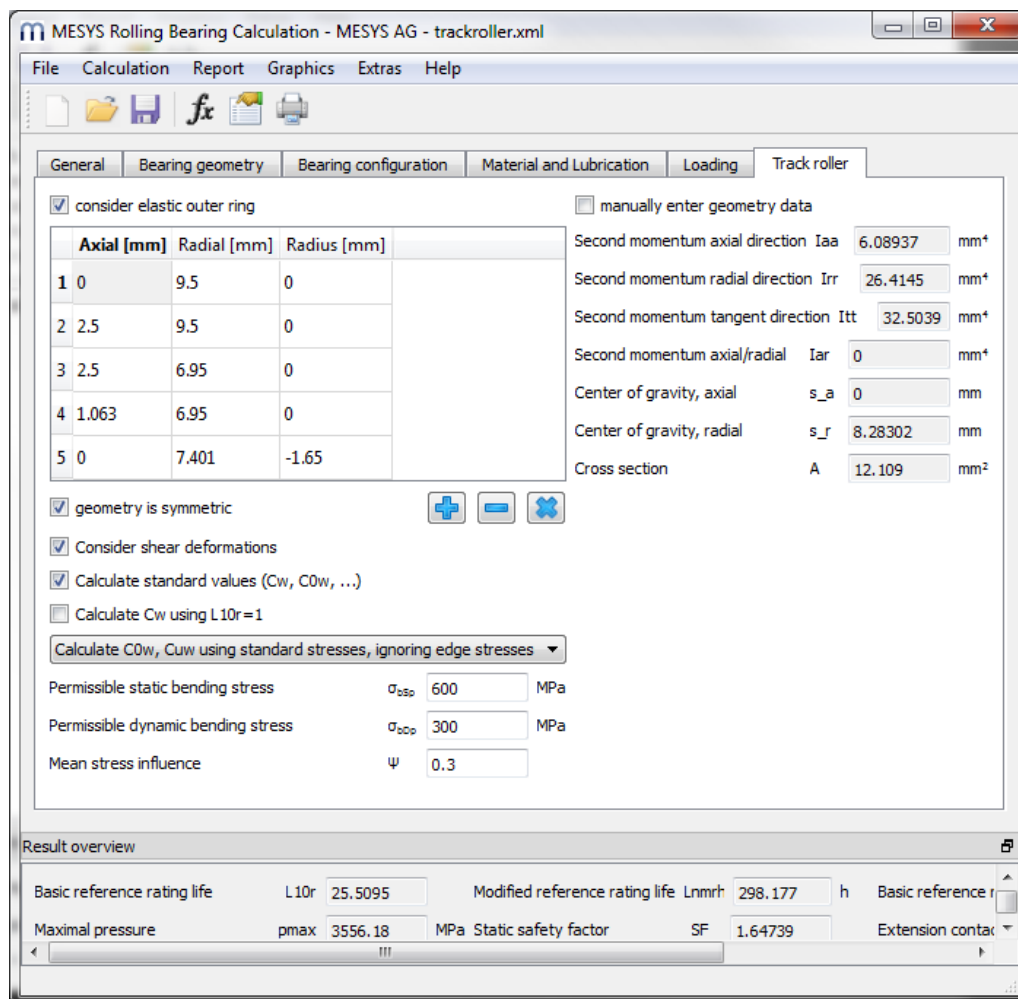
Die Lastverteilung wird für jeden Lastfall berechnet. Als Ergebnis wird die resultierende Lebensdauer für das gesamte Lastkollektiv angezeigt und die minimale

statische Sicherheit aller Elemente. Die Ergebnisgrafiken werden nur für das Element des Lastkollektivs angezeigt, das auf dieser Seite als Ergebnis ausgewählt wurde.

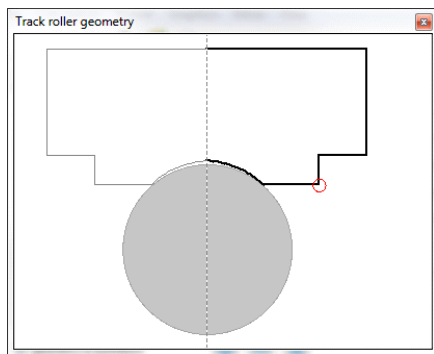
### 3.1.8 Stützrollen

Elastische Deformationen des Aussenringes können optional aktiviert werden. Dies ist eine Erweiterung der Basis-Wälzlagerberechnung.

Der Aussenring des Lagers wird durch ein Timoshenko Balkenelement modelliert. So werden Biegung, axiale Verformungen und Schubverformungen berücksichtigt. Der Schubkorrekturfaktor ist auf 1 festgesetzt. Die Berechnung sollte nur verwendet werden, wenn die Approximation als Balken sinnvoll erscheint. Der Balken berücksichtigt keine Verformungen innerhalb des Querschnitts, z.B. in axialer Richtung bei mehrreihigen Lagern.







### 3.1.8.1 Unterstützte Lagertypen

Die Berechnung mit elastischem Lageraußenring ist nur für einige Lagertypen möglich. Die Berechnung ist möglich für:

- Rillenkugellager
- Zweireihige Rillenkugellager
- Radial-Schräggkugellager
- Zweireihige Radial-Schräggkugellager
- Radial-Vierpunktlager
- Radial-Zylinderrollenlager
- Zweireihige Zylinderrollenlager
- Zweireihige Kegelrollenlager

Mehrreihige Lager können anhand der "Lagerkonfiguration" betrachtet werden.

### 3.1.8.2 Geometrie der Stützrollen

Die Stützrollengeometrie kann über mehrere Punkte definiert werden. Die Kontur beginnt an der axialen Position Null auf der Außenseite des Lagers und wird dann in Uhrzeigersinn-Richtung definiert.

In der dritten Spalte kann ein Radius definiert werden. Es wird ein Bogen vom letzten Punkt zum neuen Punkt erzeugt. Für eine konvexe Kontur verwenden Sie einen positiven Wert, für eine konkave Kontur einen negativen Wert. Ein Bogen im Uhrzeigersinn hat einen positiven Radius, ein Bogen gegen den Uhrzeigersinn einen negativen Radius.

Entweder wird eine vollständige Geometrie bis zum Startpunkt zurück definiert oder nur die halbe Geometrie für einen symmetrischen Außenring. In der Grafik für die symmetrische Stützrollengeometrie ist das gespiegelte Bauteil grau dargestellt.

### 3.1.8.3 Symmetrische Geometrie

Eine symmetrische Geometrie beginnt an der axialen Position Null des Außendurchmessers und endet an der axialen Position Null des Innendurchmessers.

Eine unsymmetrische Geometrie sollte an ihrem Startpunkt enden.

### 3.1.8.4 Schubverformungen berücksichtigen

Als Standard sollten Schubverformungen im elastischen Aussenring berücksichtigt werden. Da andere Software und ältere Literatur, siehe (Paland, 1968), nur Verformungen aufgrund von Biegung berücksichtigt, kann der Einfluss von Schubverformungen durch Löschen dieser Einstellung ignoriert werden. Die wirksamen Tragzahlen werden höher sein, da die Verformung des Aussenringes reduziert wird.

### 3.1.8.5 Berechnung von Standardwerten

Einige Standardwerte für Stützrollen können automatisch mit einer reinen Radialkraft an der axialen Position Null berechnet werden.

Aufgrund der elastischen Verformungen des Außenrings weisen Stützrollen eine andere Lastverteilung auf als starre Lager. Dies führt zu einer Verringerung der Lebensdauer, was in den Lagerkatalogen durch die Angabe reduzierter wirksamer Tragzahlen berücksichtigt wird.

Die wirksame dynamische Tragzahl  $C_w$  wird in Lagerkatalogen für Stützrollen angegeben. Es gibt zwei Möglichkeiten, diesen Wert zu berechnen. Unterhalb finden Sie dazu die Option 'Cw mit L10r=1 berechnen'. Auch für die wirksame statische Tragzahl gibt es zwei Möglichkeiten. Siehe Abschnitts 'Berechnungsoptionen für  $C_{0w}$  und  $C_{uw}$ '.

Die Berechnung der Tragzahlen erfolgt mit einer Radialkraft im Winkel von Null, die also direkt auf einen Wälzkörper wirkt.

Die statisch und dynamisch zulässigen Radialkräfte sind die Lasten, bei denen die zulässige Biegespannung erreicht wird. Siehe unten. Die zulässigen statischen und dynamischen Radialkräfte werden mit einer Radialkraft berechnet, die zwischen zwei Wälzkörpern wirkt. Dies ist der kritische Fall.

Bei einer Lagerkonfiguration werden die wirksamen Lasten und die zulässigen Radialkräfte für das gesamte Lager berechnet.

### 3.1.8.6 Cw mit L10r = 1 berechnen

Wie die dynamische Tragzahl in (ISO 281, 2007) definiert ist, sollte ein mit  $F_r = C$  belastetes Radiallager eine Lebensdauer  $L_{10} = 1$  (eine Million Lastwechsel) haben. Diese Definition wird für die Festlegung der wirksamen dynamischen Tragzahl verwendet, wenn die Option 'Cw mit L10r=1 berechnen' gesetzt ist. Die Software bestimmt iterativ die Radialkraft, die zu  $L_{10r} = 1$  führt, und dies wird als wirksame dynamische Tragzahl Cw angezeigt.

Für Lager mit einer geringen Anzahl von Wälzkörpern wird die Lebensdauer  $L_{10r} = 1$  für das mit  $F_r = C$  belastete starre Lager nicht erreicht. Der Grund dafür ist, dass (ISO 281, 2007) von einer Lastzone von  $180^\circ$  ausgeht, die nicht erreicht werden kann, wenn z.B. nur sechs Wälzkörper verwendet werden. Daher ist eine andere Definition für Cw verfügbar, wenn die Option nicht gesetzt ist. In diesem Fall wird Cw auf die Radialkraft definiert, die zur gleichen Lebensdauer führt wie ein starres Lager mit  $F_r = C$ .

Diese Option hat nur bei einer geringen Anzahl von Wälzkörpern einen Einfluss oder bei Lagern mit Spiel. Wenn die Option nicht gesetzt ist, führt eine Belastung mit Cw für das elastische Lager zur gleichen Lebensdauer wie eine Belastung mit C für das starre Lager.

### 3.1.8.7 Berechnungsoptionen für C0w und Cw

Es stehen mehrere Berechnungsoptionen für die wirksame statische Tragzahl zur Verfügung:

#### Berechnen von C0w, Cw auf Basis der Spannungen

Wenn die Option " $C_{0w}$ ,  $C_{uw}$  auf Basis der Spannungen berechnen" eingestellt ist, wird die effektive statische Tragzahl C0w als die Radialkraft definiert, die zu  $p_{\max} = 4200$  MPa (bzw. 4000 MPa für Rollenlager) führt. Die wirksame Ermüdungsgrenze wird ähnlich definiert, allerdings mit einer Spannung von 1500 MPa in diesem Fall.

#### C0w, Cw auf Basis der Spannungen berechnen, ohne Kantenspannungen

Bei Rollenlagern können bei hoher Belastung Kantenspannungen auftreten, die zu anderen Resultaten führen, als sie üblicherweise in Lagerkatalogen zu finden sind. Deshalb gibt es eine zweite Option für die Berechnung der effektiven statischen Tragzahl C0w.

Wenn diese Option gewählt wird, wird die Spannung in der Mitte der Rolle mit der zulässigen Spannung wie oben verglichen. Die Spannungen an den Kanten werden also nicht berücksichtigt.

Bei Kugellagern hat diese Option keinen Einfluss auf die Ergebnisse, nur bei Rollenlagern macht sie einen Unterschied.

#### **C0w, C<sub>uw</sub> auf Basis der Kräfte berechnen**

Wenn die Option gesetzt ist, wird C0w als die Radialkraft definiert, die zu der gleichen maximalen Wälzkörperbelastung führt wie ein mit  $F_r = C_0$  belastetes starres Lager. Auch für die Berechnung von  $C_{uw}$  wird der Vergleich der Wälzkörperbelastung anstelle der Spannung durchgeführt.

Wenn diese Option gewählt wird, hat das resultierende C0w die gleiche Bedeutung wie C0 für das starre Lager. Es kann nützlich sein, wenn die eigene Eingabe für die statische Tragzahl verwendet wird.

#### **3.1.8.8 Statisch zulässige Biegespannung**

Die zulässige statische Biegespannung dient zur Berechnung der zulässigen statischen Radialkraft und eines Sicherheitsfaktors für die Biegespannungen im Außenring. Die Spannung wird als Maximalwert der Biegespannung plus Zug/Druck im Außenring berechnet.

$$\sigma_{max} = \sigma_{b,max} + F_t/A$$

Falls nicht manuell definiert, wählt die Software automatisch den Punkt der eingegebenen Geometrie aus, der zur höchsten Spannung führt. Es werden nur Punkte in der Geometrieliste berücksichtigt, keine Zwischenwerte. Dies kann bei konvexen Radien einen Unterschied machen.

#### **3.1.8.9 Dynamisch zulässige Biegespannung**

Die zulässige dynamische Biegespannung dient zur Berechnung der zulässigen dynamischen Radialkraft und eines Sicherheitsfaktors für die Biegespannungsamplitude. Die Spannung wird an der Stelle berücksichtigt, an der die maximale Spannung auftritt.

$$\sigma_{max} = \sigma_{b,max} + F_t/A$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{b,min} + F_t/A$$

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$$

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$$

Der Eingabewert ist eine zulässige Wechsellastspannung, die um den Mittelspannungseinflussfaktor  $\psi$  reduziert wird. Der Sicherheitsfaktor wird berechnet als

$$S_{dyn} = \frac{\sigma_{bDperm} - \Psi \cdot \sigma_m}{\sigma_a}$$

Die zulässige dynamische Radialkraft wird so berechnet, dass ein Sicherheitsfaktor von 1 erreicht wird.

### 3.1.8.10 Mittelspannungseinflussfaktor

Der Mittelspannungseinflussfaktor berücksichtigt die mittlere Spannung zur Berechnung der zulässigen Amplitude der Biegespannung.

Der Mittelspannungseinflussfaktor kann berechnet werden als

$\Psi = \sigma_{bDperm} / (2 \cdot R_m - \sigma_{bDperm})$  unter Verwendung der Definition nach DIN 743.

### 3.1.8.11 Axiale Position für Belastung

Wenn eine asymmetrische Geometrie definiert ist, kann eine axiale Position für die Belastung festgelegt werden. Sie wird für die Berechnung von Standardwerten wie  $C_w$ ,  $C_{0w}$  ... verwendet.

Bei symmetrischer Geometrie wird die Last an der Position Null angesetzt.

### 3.1.8.12 Geometriedaten direkt eingeben

Es ist nicht zwingend erforderlich, die Querschnittsfläche mit Punktdaten einzugeben. Auch Querschnittsdaten können direkt eingegeben werden, nachdem sie z.B. von einem CAD-System berechnet wurden.

Werden die Querschnittsdaten manuell eingegeben, muss auch der kritische Punkt für die Berechnung der Biegespannungen manuell definiert werden. Leider ist dieser Punkt belastungsabhängig. Wenn man nur eine Radialkraft auf einen symmetrischen Querschnitt hat, ist das kein Problem, aber in anderen Fällen muss man vorsichtig sein.

### 3.1.8.13 Flächenträgheitsmomente

Die Flächenträgheitsmomente werden in Polarkoordinaten für die Querschnittsfläche angegeben. Sie werden relativ zum Schwerpunkt angegeben, nicht zum Ursprung des Koordinatensystems.

Die Flächenträgheitsmomente in axialer Richtung  $I_{aa}$  und in radialer Richtung  $I_{rr}$  sind in der Regel verfügbar. Für die tangentialen Richtung sollte das Torsionsmoment angegeben werden, aber da dies in der Regel nicht bekannt ist, kann das polare Moment  $I_{tt} = I_{aa} + I_{rr}$  als Ersatz verwendet werden. Dies ist nur für einen

kreisförmigen Querschnitt genau, aber die Last der Torsion ist nicht die Hauptbelastung für den äußeren Ring, so dass es akzeptabel sein sollte.

Das Deviationsmoment ist definiert als  $I_{ar} = + \iint a \cdot r \, dA$ . Je nach Literatur sind auch Definitionen mit negativem Vorzeichen üblich. Für symmetrische Querschnitte ist das Deviationsmoment gleich Null.

#### 3.1.8.14 Schwerpunkt

Der Schwerpunkt wird durch seine axiale und radiale Koordinate definiert. Bei symmetrischen Querschnitten ist die axiale Position gleich Null.

#### 3.1.8.15 Querschnittsfläche

Hier ist die Querschnittsfläche des äußeren Ringes einzugeben. Da bei der Berechnung Zug- und Schubverformungen berücksichtigt werden, hat dies einen Einfluss auf die Lastverteilung.

#### 3.1.8.16 Kritischer Punkt

Der kritische Punkt für die Berechnung der Biegespannung muss eingegeben werden, wenn die Geometriedaten manuell eingegeben werden. Die Biegespannung wird über diesen Punkt berechnet.

Achten Sie darauf, dass Sie den richtigen Wert für die gegebenen Bedingungen der Belastung eingeben. Der kritische Punkt ist in der Grafik der Stützrollengeometrie durch einen roten Kreis gekennzeichnet.

#### 3.1.8.17 Belastung der Stützrollen

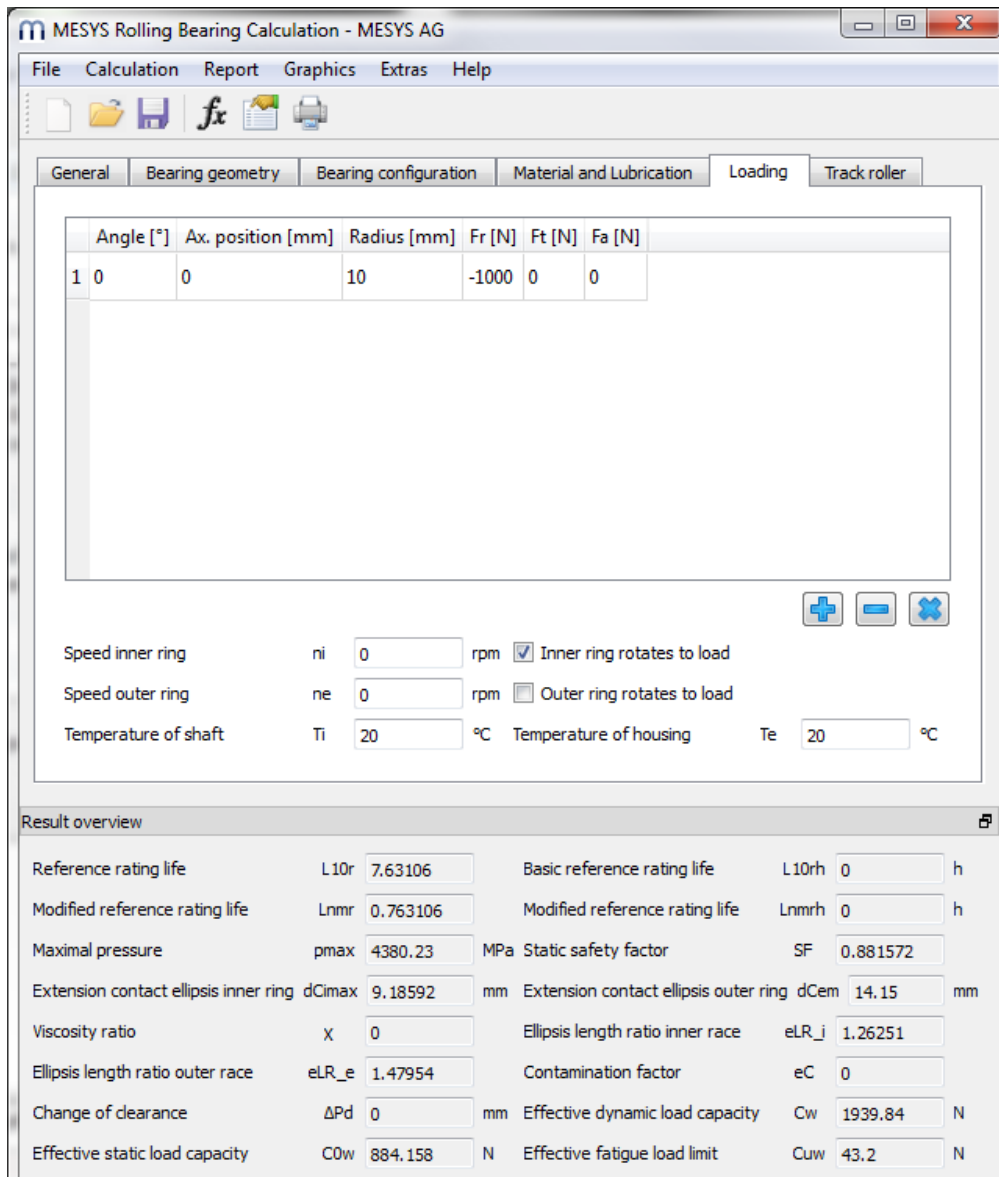
Bei einem elastischen Außenring wird die Eingabe der Belastung geändert. Anstelle der Belastung des Innenrings kann die Belastung des Außenrings an mehreren Punkten definiert werden. Verschiebungen oder Rotationen lassen sich nicht direkt definieren.

Ein Winkel, axiale und radiale Positionen definieren den Punkt, an dem die Last einwirkt. Die Last kann in axialer, radialer und tangentialer Richtung definiert werden. Da das Gesamtdrehmoment gleich Null sein muss, kann eine Eingabe der Tangentialkraft nur verwendet werden, wenn mehrere Lasten definiert sind.

Das Koordinatensystem ist ein Standard-Zylinderkoordinatensystem mit r-Richtung nach außen. Daher sollte  $F_r$  normalerweise als negativer Wert für den Druck eingegeben werden.

Die axiale Position kann verwendet werden, wenn man annimmt, dass die Radialkraft nicht zentrisch ist. Eine exzentrische Belastung führt zur Torsion des Außenrings.

Der erste Wälzkörper auf der y-Achse befindet sich in einem Winkel von Null. Die Ergebnisse werden anders ausfallen, wenn die Last auf der Position eines Wälzkörpers oder zwischen den Wälzkörpern aufgebracht wird. Beide Fälle sollten im Zweifelsfall berücksichtigt werden.



### 3.1.8.17.1 Lastkollektive für Stützrollen

Bei der Verwendung von Lastkollektiven für Stützrollen muss in einem ersten Schritt die Lage der Kräfte in der Belastungsseite definiert werden, ohne dass Lastkollektive aktiviert werden. Werden die Lastkollektive anschließend aktiviert, steht für jede Kraft eine Spalte als Eingabe zur Verfügung. Über das Kontextmenü (rechte Maustaste) können zusätzliche Spalten wie z.B. der Winkel eingefügt werden.

|   | Frequency | ni [rpm] | ne [rpm] | T_i [°C] | T_e [°C] | T_r [°C] | TOil [°C] | Fr_1 [N] | Ft_1 [N] | Fa_1 [N] |
|---|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.6       | 0        | 500      | 20       | 20       | 20       | 70        | -1000    | 0        | 0        |
| 2 | 0.4       | 0        | 200      | 20       | 20       | 20       | 70        | -500     | 0        | 0        |

inner Ring rotates to load     Outer ring rotates to load    Results for No 1

### 3.2 Thermisch zulässige Betriebsdrehzahl

Die thermische Bezugsdrehzahl nach (ISO 15312, 2018) und die thermisch zulässige Betriebsdrehzahl nach (DIN 732, 2010) werden von der Software berechnet. Die Berechnung kann separat unter dem Menü 'Berechnungen' -> 'Thermisch zulässige Betriebsdrehzahl' durchgeführt werden.



Thermal permissible speed
✕

---

Thermal reference speed

Factor for load independent losses  $f_{0r}$

Factor for load dependent losses  $f_{1r}$

Surface for heat transfer  $A_r$   mm<sup>2</sup>

Thermal transmission coefficient  $k_q$   W/m<sup>2</sup>·K

Thermal permissible speed

Method DIN 732

Factor for load independent losses  $f_0$

Factor for load dependent losses  $f_1$

Assume fixed temperature for lubricant

Temperature difference between bearing and surroundings  $\Delta\theta$   °C

Temperature difference of oil flow  $\Delta\theta_{Oil}$   °C

Oil volume flow  $V_{Oil}$   l/min

Thermal reference speed  $n_{tr}$   rpm

Thermal permissible speed  $n_t$   rpm

Calculate
Report
Close

Die meisten Parameter können vom Anwender überschrieben werden. Beachten Sie, dass die Berechnung nur nach der Norm erfolgt. Die äquivalente Last wird durch Axial- und Radialkraft berechnet, die Kippmomente werden nicht berücksichtigt. Auch das Spiel wird nicht berücksichtigt.

Für die thermisch zulässige Betriebsdrehzahl können zusätzlich zu DIN 732 die Reibmomente aus ISO/TR 14179-2 abgeleitet werden. Die ISO-Norm sieht unterschiedliche Faktoren für Fett- und Ölschmierung vor. Standardmäßig wird die Temperatur des Schmierstoffs, wie im Hauptfenster definiert, verwendet. Wird die Option "Feste Temperatur für den Schmierstoff annehmen" gelöscht, wird die Lagertemperatur für die Ölviskosität verwendet. Die Temperatur des Lagers ist die Temperatur der Umgebung des Lagers plus die Temperaturerhöhung für das Lager.

Wird eine Wälzlagergeometrie in der Norm nicht berücksichtigt, können die Eingabewerte für  $f_{0r}$ ,  $f_{1r}$  und  $f_1$  vom Anwender eingegeben werden und die Berechnung kann durchgeführt werden.

Bei Lagerkonfigurationen gelten die Werte für  $f_0$ ,  $f_1$  und  $A_r$  für ein einzelnes Lager. Der Schmierstoffvolumenfluss gilt für den Satz von Lagern. Derzeit werden nur Lagersätze mit Radiallagern unterstützt.

Die Ergebnisse für die Thermische Bezugsdrehzahl, für die Thermisch zulässige Betriebsdrehzahl und für die Reibmomente werden ebenfalls im Hauptprotokoll angezeigt.

### 3.3 Fettgebrauchsdauer

Die Fettgebrauchsdauer wird nach Schaeffler mit dem Mittelwert aus vorgegebenen Diagrammen berechnet. Der Faktor  $k_f$ , der den Lagertyp berücksichtigt, hat für einige Lagertypen eine Bandbreite. Er kann in der Software überschrieben werden. Der Faktor  $K_U$  kann für zusätzliche

Reduktionsfaktoren verwendet werden. Die Dauergrenztemperatur des Fettes ist fettabhängig. Es ist die Temperatur, bei der keine Verringerung der Fettgebrauchsdauer auftritt. Für viele Standard Fette liegt sie bei 80°C, der Standardwert in der Software ist 70°C, um konservativ zu sein. Die Software berücksichtigt den Faktor für Temperatur  $K_T$ , den Faktor für Belastung  $K_P$  und den Faktor für Oszillation  $K_R$ .

Für Hybridlager wird die Fettgebrauchsdauer um den Faktor 3,3 erhöht. Ein Hybridlager wird angenommen, wenn der Elastizitätsmodul des Wälzkörpers größer als 270 GPa ist. Anstelle der dynamisch äquivalenten Belastung  $P$  wird bei der Berechnung der Fettgebrauchsdauer die dynamisch äquivalente Referenz-Belastung  $P_{ref}$  verwendet. Dies ermöglicht es, auch die Vorspannung zu berücksichtigen. Die Fettgebrauchsdauer ist bei kleinen Drehzahlen auf 75'000h begrenzt, da eine Fettgebrauchsdauer von mehreren Jahren nicht zuverlässig ist.

Das Ergebnis für die Fettgebrauchsdauer ist nur ein Richtwert. In der Regel ist bei Fetten auch eine Drehzahlgrenze angegeben, die berücksichtigt werden muss und von der Software nicht geprüft wird.

### 3.4 Grenzlastdiagramm

Ein Grenzlastdiagramm kann im Menü 'Berechnungen' -> 'Grenzlastdiagramm' konfiguriert werden. Es ermöglicht die Darstellung von vier möglichen Diagrammen, in denen die Variablen der XY-Achsen miteinander verglichen werden ( $M_z$ - $F_x$ ,  $F_x$ - $M_z$ ,  $F_y$ - $F_x$ ,  $F_x$ - $F_y$ ), wobei fünf vom Anwender vordefinierte Werte konstant gehalten werden (siehe Bild). Diese Diagramme werden häufig für Drehverbindungen verwendet.

**Define load rating diagram** ×

Points per line

Tolerance  %

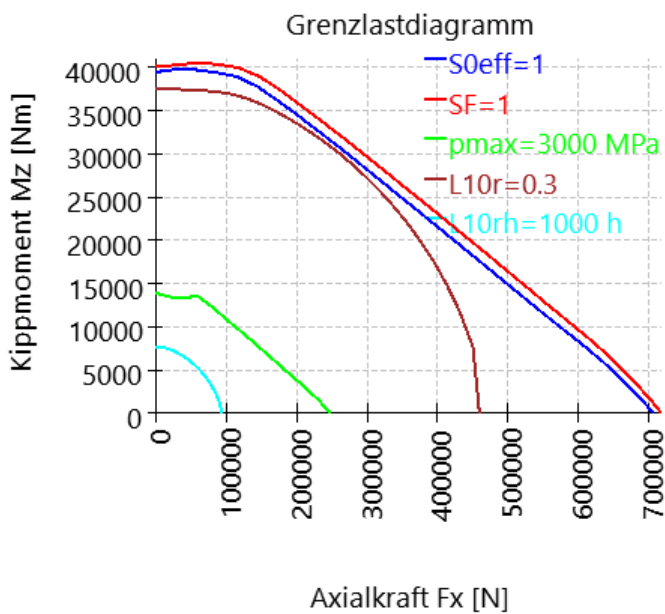
Calculate moment load  $M_z$  over axial load  $F_x$   
 Calculate axial load  $F_x$  over moment load  $M_z$   
 Calculate radial load  $F_y$  over axial load  $F_x$   
 Calculate axial load  $F_x$  over radial load  $F_y$

|   | Type                                           | Value |
|---|------------------------------------------------|-------|
| 1 | Static safety factor ( $S_{0eff}$ ) [-]        | 1     |
| 2 | Static safety factor (SF) [-]                  | 1     |
| 3 | Maximal pressure ( $p_{max}$ ) [MPa]           | 3000  |
| 4 | Basic reference rating life ( $L_{10r}$ ) [-]  | 0,3   |
| 5 | Basic reference rating life ( $L_{10rh}$ ) [h] | 1000  |

+
-
✕

Graphics
Close

In der folgenden Grafik ist ein Beispiel für ein Grenzlastdiagramm dargestellt, in dem das Kippmoment ( $M_z$ ) mit der Axialkraft ( $F_x$ ) für einen Sicherheitsfaktor von 1, eine maximale Pressung von 3000 MPa, 300.000 Zyklen und 50000 h verglichen wird.



Für jede axiale Last wird das Kippmoment erhöht, bis die gewählten Kriterien erreicht sind. Die Anzahl der für eine Linie verwendeten Punkte und eine Toleranz für die Berechnung können definiert werden.

### 3.5 Radlagerberechnung

Die Radlagerberechnung ermöglicht eine Berechnung für Radlager mit speziellen Eingaben für die Belastung. Die Belastung wird durch Eingaben für die Achslast als Masse ' $m_a$ ', einen Radradius ' $r_w$ ' und einen Versatz von Lastposition zu Lagermitte ' $\delta_x$ ' definiert.

Der Standardzyklus wird durch einen Radialkraftfaktor ' $f_r$ ', einen Axialkraftfaktor ' $f_a$ ', eine Rotationsgeschwindigkeit ' $n$ ' und die Anzahl der Umdrehungen definiert. Wenn das Rad mit dem Innenring verbunden ist, sind die Kräfte im Lastkollektiv wie folgt definiert:

$$F_x = f_a \cdot m_a \cdot (9.81/2)$$

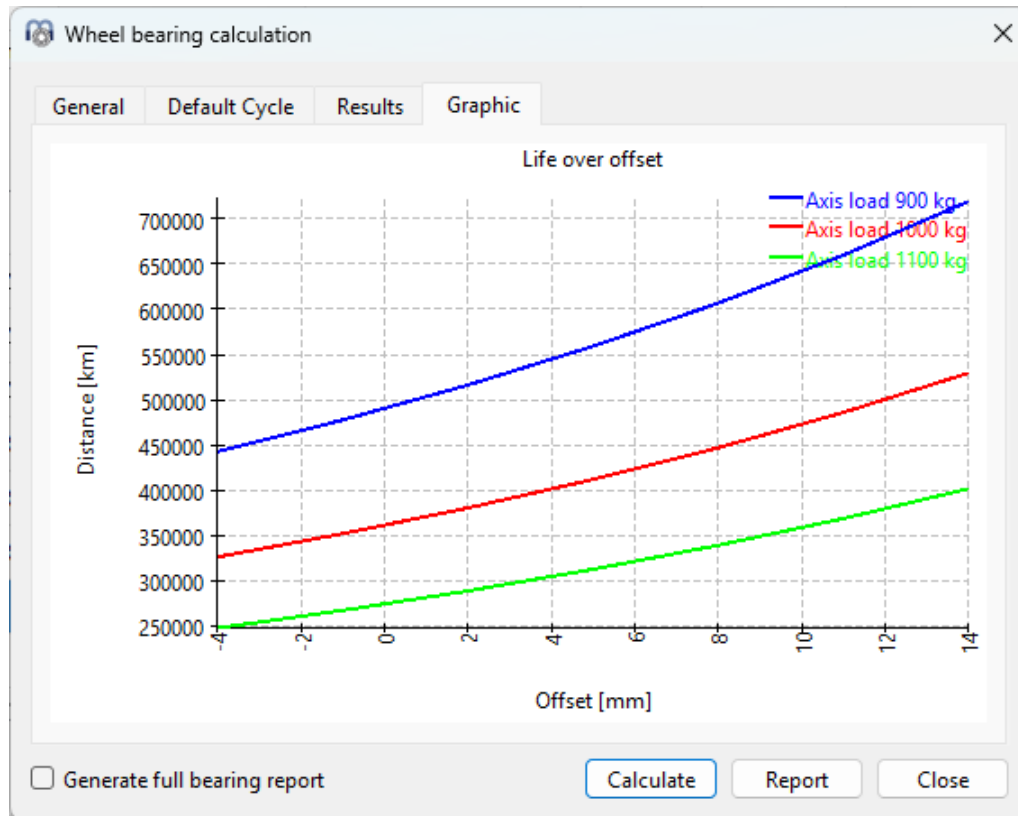
$$F_y = f_r \cdot m_a \cdot (9.81/2)$$

$$M_z = 0.001 \cdot (-F_y \cdot \delta_x + F_x \cdot r_w)$$

Wenn das Rad mit dem Außenring verbunden ist, wird das umgekehrte Vorzeichen verwendet.

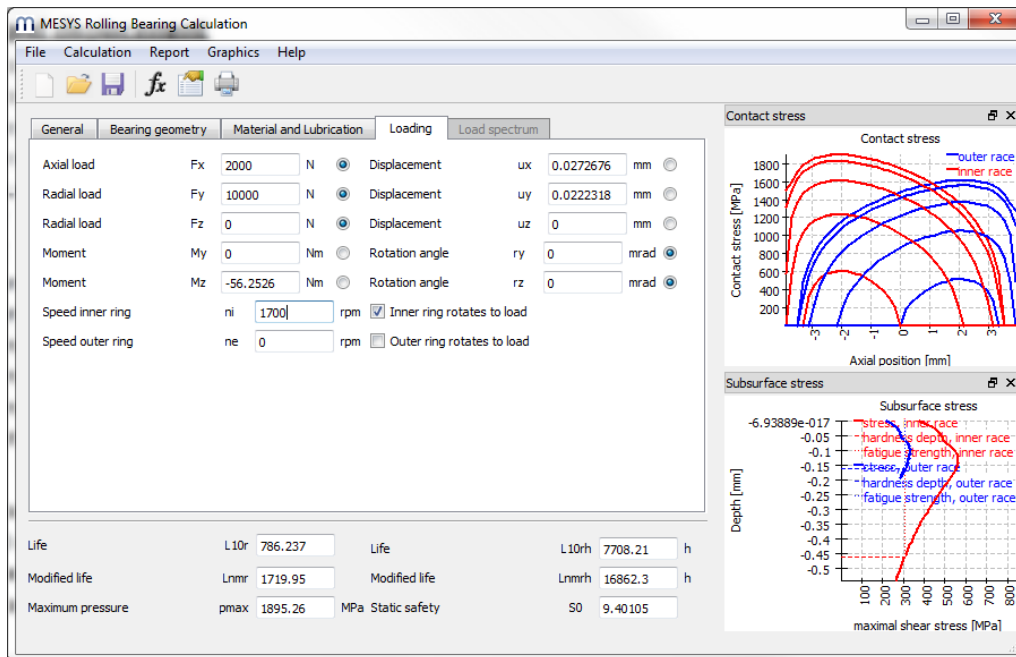
Der Lebensdauerfaktor  $f_L$  ist definiert als  $f_L = (L_{10rh}/500)^{1/p}$ . Es handelt sich also um einen Sicherheitsfaktor, der proportional zur Belastung ist und 1,0 für 500h beträgt.

Eine Grafik zeigt eine Variation des axialen Versatzes und der drei Achslasten, um die Empfindlichkeit der Ergebnisse zu verdeutlichen:



### 3.6 Resultate

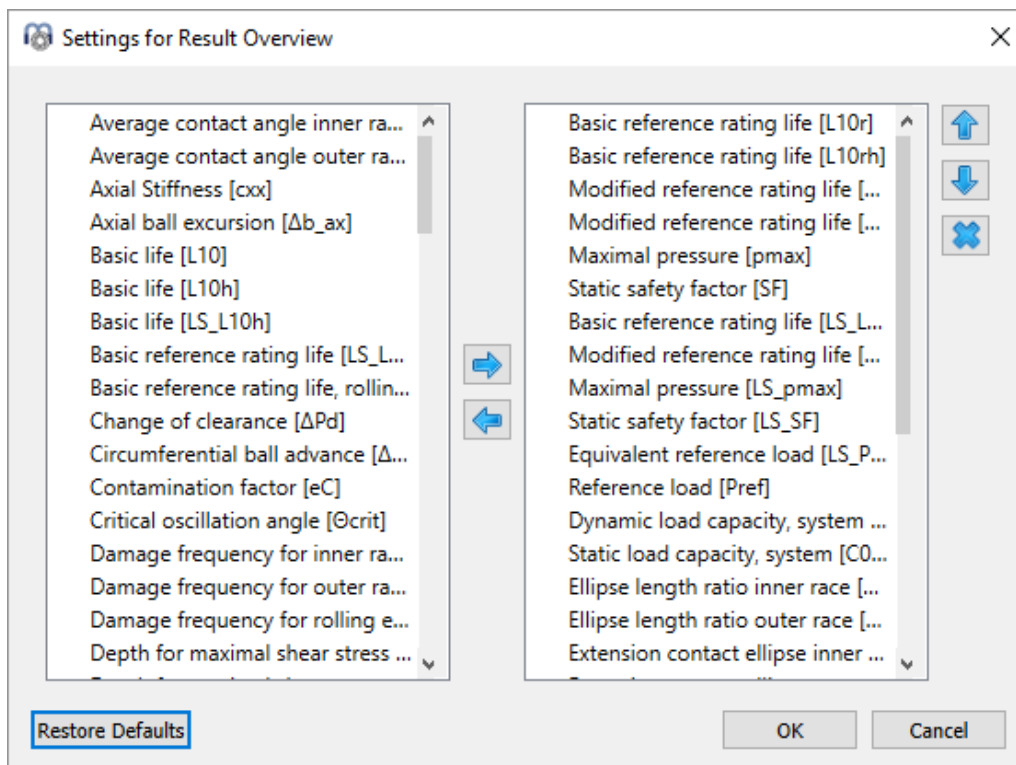
Die Ergebnisse werden in Form einer kleinen Resultateübersicht direkt in der Software, eines PDF-Protokolls, eines Protokolls Toleranzen und separater Grafikfenster bereitgestellt. Grafik-Fenster können an die Hauptprogrammoberfläche angedockt werden und werden bei jeder Berechnung automatisch aktualisiert.



### 3.6.1 Resultateübersicht

Die Resultateübersicht zeigt die Referenzlebensdauer  $L_{10r}$  in  $10^6$  Umdrehungen und die Referenzlebensdauer  $L_{10rh}$  in Stunden. Die modifizierte Referenzlebensdauer  $L_{nmr}$  unter Berücksichtigung von Zuverlässigkeit und Schmierung ist ebenfalls in  $10^6$  Rotationen und in Stunden angegeben. Die maximale Pressung und die statische Sicherheit geben Auskunft über die maximale Belastung.

Die Resultateübersicht kann unter Extras->Resultateübersicht konfiguriert werden.



Die Liste links zeigt alle verfügbaren Einträge für die Resultateübersicht an. Mit den Pfeilen können die ausgewählten Einträge in die rechte Liste verschoben werden, die für die Resultateübersicht verwendet wird. Die Reihenfolge der ausgewählten Ergebnisse kann mit den Auf-/Abwärtspfeilen rechts geändert werden. Beachten Sie, dass in der Resultateübersicht tatsächlich nur gültige Resultate-Werte angezeigt werden. Sie sehen also weniger Werte als in den Einstellungen ausgewählt.

Die Einstellungen der Resultateübersicht werden in den Benutzereinstellungen gespeichert, nicht in der Datei der Berechnung. Sie sind also für verschiedene Berechnungen gleich.

### 3.6.2 Hauptprotokoll der Ergebnisse

Das Textprotokoll wird im PDF-Format bereitgestellt. Ein Beispielprotokoll ist als separates Dokument verfügbar. Die Ergebnisse werden in den Abschnitten 'Wälzlagerinnengeometrie', 'Kräfte und Verschiebungen', 'Lebensdauer', 'Untergrundspannungen' und 'Schädigungsfrequenzen' dargestellt.

Report options

Please select the contents for the report:

- Graphic: Load distribution
- Graphic: Contact stress
- Graphic: Spin to roll ratio
- Graphic: Wear Parameter PVmax
- Graphic: Thermal conductance
- Graphic: Rolling element load
- Graphic: Subsurface stress
- Graphic: Rotation over load
- Graphic: Load rating diagram
- Graphic: Track roller bending moment
- Graphic: Track roller forces
- Include subsurface stresses
- Include wear parameters
- Include data for inner geometry
- Include thermal permissible speed
- Include probable tolerances in tolerance table
- Include legend for tables
- Calculate stiffness matrix for load spectra
- Color in 3D view based on contact stress
- Graphic: Load distribution 2D
- Graphic: Contact angle
- Graphic: Ball advance
- Graphic: Wear Parameter QV
- Graphic: Roller profile
- Graphic: Displacement over load
- Graphic: Life over load
- Graphic: Track roller geometry
- Graphic: Track roller bending stress
- Graphic: Track roller displacement
- Include damage frequencies
- Include rolling element load tables
- Include basic life L10
- Include tolerance table
- Include load spectrum details
- Include section results in result tables

Contact stress for scaling:  MPa

OK Cancel

Im Menü "Protokoll->Optionen" kann der Inhalt des Protokolls konfiguriert werden. Die einzubeziehenden Grafiken können ausgewählt werden und einige Querschnitte des Protokolls können verworfen werden, wenn sie nicht von Interesse sind. Die Legende für alle Parameter der Tabelle kann im Protokoll angezeigt werden.

### 3.6.2.1 Speichern des Hauptberichts

Das Hauptprotokoll kann über das Menü "Protokoll->Speichern als" in verschiedenen Formaten gespeichert werden. Er kann als PDF, DOC, DOCX, XLSX oder ODT (Open Office) Format gespeichert werden.

### 3.6.2.2 Protokoll-Logo anpassen

Standardmäßig wird oben auf dem Protokoll ein MESYS Logo angezeigt. Dies kann angepasst werden, indem ein Logo in der Datei "mesys.ini" definiert wird. Das Logo sollte in einer Größe erstellt werden, dass es in die Kopftabelle passt. Die DPI-Einstellung im Logo wird berücksichtigt, so dass auch ein hochauflösendes Bild verwendet werden kann. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, eine eigene Vorlage der unterstützten Dateiformate (DOC, DOCX und ODT) zu erstellen und



daraus das Protokoll zu generieren, wodurch die Möglichkeit besteht, das Logo anzupassen.

### 3.6.3 Protokoll Toleranzen

Im Menü "Protokoll->Toleranzen" kann ein spezielles Protokoll für Toleranzen erstellt werden. Während im Hauptbericht die Toleranzen für den gewählten Berechnungsfall enthalten sind, zeigt das zusätzliche Protokoll die Toleranzen und die Flächenpressung für das maximale, mittlere und minimale Spiel. Wenn unter Optionen ausgewählt, sind auch die minimal erwarteten und maximal erwarteten Abmasse enthalten.

### 3.6.4 Benutzerdefinierte Protokollvorlagen

Benutzerdefinierte Protokollvorlagen können im Unterverzeichnis "templates/rbc" hinzugefügt werden. Basiert auf diesen Vorlagen können Berichte durch Auswahl der Protokollvorlage unter "Protokoll->Protokollvorlagen" erstellt werden.

Die Protokollvorlagen sind Word-Dateien mit DOCVARIABLE-Feldern. Diese Felder werden bei der Erstellung des Protokolls ausgefüllt.

Mögliche Felder sind:

- DOCVARIABLE VAR Name [Einheit]: Die Variable mit der Bezeichnung 'Name' wird gedruckt. Optional kann eine Einheit in Klammern angegeben werden, zum Beispiel [mm]. Zusätzlich könnte ein Format wie %6.3g oder %6.3f hinzugefügt werden, wobei 'f' immer eine Festpunktausgabe und 'g' eine Exponentialausgabe für große Zahlen erzeugt.
- DOCVARIABLE VARU name [Einheit]: die Variable mit der Bezeichnung 'name' plus die Einheit werden ausgegeben. Optional kann eine Einheit in Klammern angegeben werden, zum Beispiel [mm].
- DOCVARIABLE TABLE tablename: Es wird eine Tabelle eingefügt.
- DOCVARIABLE GRAPHIC graphicName width=130 height=70: Es wird eine Grafik eingefügt. Optional können Höhe und Breite in Millimetern angegeben werden.

Bezüglich der Details zu Variablennamen, Tabellennamen und Grafikenamen wenden Sie sich bitte an [support@mesys.ch](mailto:support@mesys.ch) für zusätzliche Dokumentation.

### 3.6.5 Grafiken

Mehrere Ergebnisse können als Grafiken dargestellt werden. Alle Grafiken werden auch an das Protokoll angehängt, so dass eine vollständige Dokumentation in einem Dokument vorliegt.

Über das Kontextmenü (rechte Maustaste) in einem Grafik-Fenster kann die Grafik als Datei exportiert oder gedruckt werden. Bei Diagrammen lassen sich mit den "Diagramm Optionen" die Einheiten und der Achsenbereich anpassen.

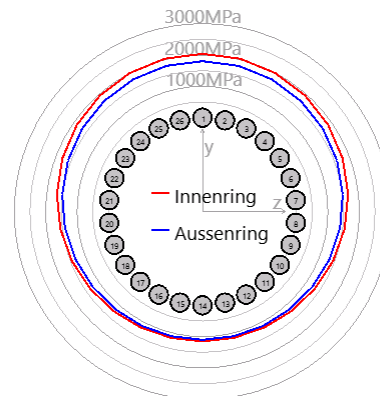
#### 3.6.5.1 Lagerkonfiguration

Die Lagerkonfiguration zeigt die Lagerreihen und deren Position. Sie wird hauptsächlich zusammen mit der Lagerkonfiguration verwendet. Um dieses Bild zu erzeugen, müssen der innere und der äußere Durchmesser des Lagers definiert werden.



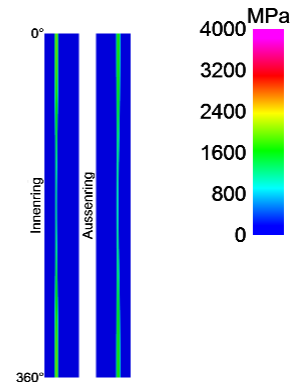
#### 3.6.5.2 Lastverteilung

In diesem Diagramm ist die Kontaktspannung für den Innen- und Außenringkontakt dargestellt. Die dicken Linien sind für die Hertz'sche Kontaktspannung ohne Berücksichtigung der Druckellipsenabschneidung. Im Falle einer Abschneidung bei Kugellagern ist eine zusätzliche Spannung für den abgeschnittenen Kontakt als gestrichelte Linien nach [Frantz und Leveille](#)<sup>352</sup> dargestellt.



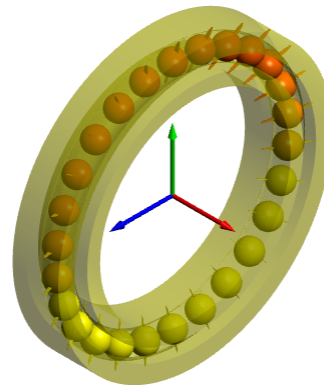
### 3.6.5.3 Lastverteilung 2D

Die Lastverteilung 2D zeigt die Pressungsverteilung auf Innen- und Aussenring als Farbstreifen an. Die maximale Spannung für die Skala kann unter Protokoll Optionen definiert werden. Die Grafik ist sowohl für einen einzelnen Lastfall als auch für das gesamte Lastkollektiv verfügbar. Dieses Diagramm vermittelt auch einen Eindruck von der Veränderung des Druckwinkels.



### 3.6.5.4 Lastverteilung 3D

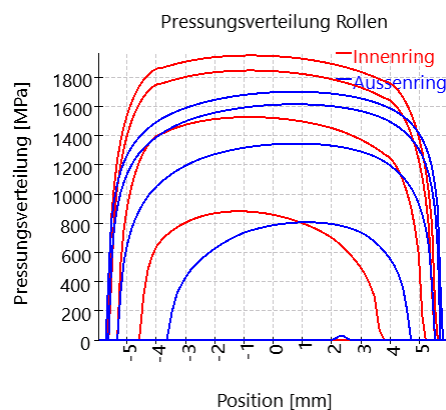
Dieses Diagramm zeigt die Lastverteilung in einer 3D-Visualisierung des Lagers. Die Höhe der Spannung wird durch die Farbe des Wälzkörpers und der Kontaktellipse angezeigt. Die Visualisierung kann in jeder Perspektive wiedergegeben werden. Die 3D-Ansichten lassen sich mit der linken Maustaste rotieren. Das Verschieben wird durch Drücken der Umschalttaste aktiviert, das Zoomen durch Drücken von "Strg".



### 3.6.5.5 Pressungsverteilung für Wälzlager

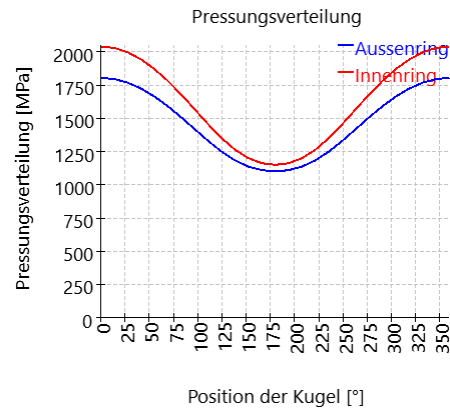
Die Pressungsverteilung für Wälzlager wird über die axiale Position oder die Länge der Rolle dargestellt. Dieses Beispiel gilt für ein Zylinderrollenlager unter radialer und axialer Last und ohne Fluchtungsfehler zwischen Innen- und Außenring.

Bei Axial-Zylinderrollenlagern und Axial-Pendelrollenlagern ist die Orientierung der Rollen von innen nach außen, während sie bei den anderen Lagertypen von links nach rechts verläuft.



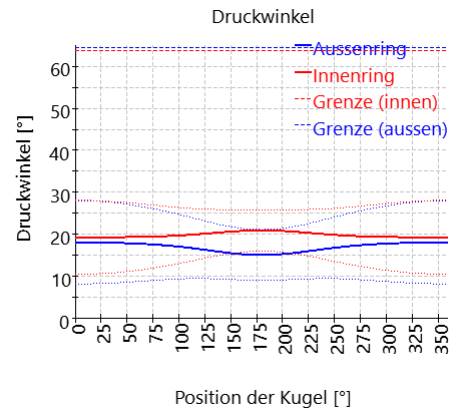
### 3.6.5.6 Pressungsverteilung

Die Pressungen können in einem Diagramm zusätzlich zum Polardiagramm in der [Lastverteilung](#)<sup>[250]</sup> dargestellt werden. Im Falle der Abschneidung bei Kugellagern wird eine zusätzliche Spannung für den abgeschnittenen Kontakt als gestrichelte Linien nach [Frantz und Leveille](#)<sup>[352]</sup> dargestellt.



### 3.6.5.7 Druckwinkel

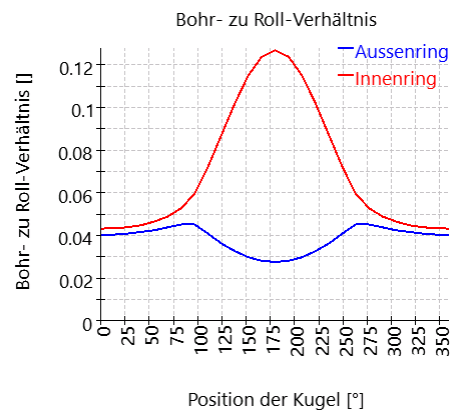
Der Druckwinkel ist für ein Schrägkugellager mit einem Nenndruckwinkel von 20° dargestellt. In der Lastzone sind die Druckwinkel von Innen- und Außenring fast gleich, aber gegenüber der Lastzone gibt es aufgrund der Zentrifugalkraft einen großen Unterschied.



Die Ausdehnung der Kontaktellipse ist durch die gestrichelten Linien dargestellt, so dass wir eine breite Kontaktellipse bei 0° und eine kleinere bei 180° haben. Der Winkel zum Kontakt, der der Schulter entspricht, ist oben als gestrichelte gerade Linie dargestellt, so dass die Schulterhöhe in diesem Fall hoch genug ist.

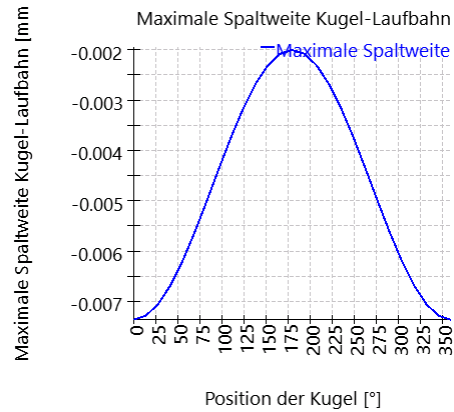
### 3.6.5.8 Bohr- zu Roll-Verhältnis

Das Bohr-Rollverhältnis kann ebenfalls dargestellt werden. Bei der Berechnung wird die Einstellung für das gyroskopische Moment unter Einstellungen berücksichtigt. Wenn keine Führung am Innen- oder Außenring definiert ist, dann basiert die Verteilung des Bohrens auf der Coulomb-Reibung.



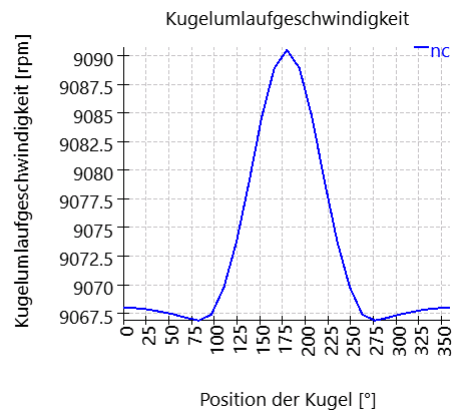
### 3.6.5.9 Maximale Spaltweite Kugel-Laufbahn

Dieses Diagramm zeigt an, wie viel Platz zwischen den beiden Laufbahnen vorhanden ist. Ist der Wert negativ, ist die Kugel belastet, ist er positiv, kann die Kugel den Kontakt verlieren. Dieses Diagramm gibt nur den geometrischen Abstand zwischen den beiden Laufbahnen an, aufgrund von Fliehkräften kann die Kugel dennoch belastet werden.



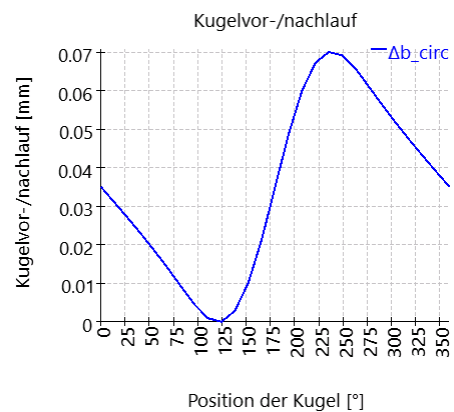
### 3.6.5.10 Kugelumlaufgeschwindigkeit

Bei der Berechnung der Kugelumlaufgeschwindigkeit wird ein Kontakt zwischen den Kugeln nicht berücksichtigt.



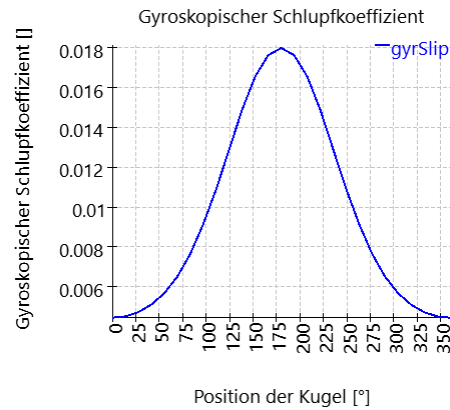
### 3.6.5.11 Kugelvorn-/nachlauf

Der Kugelvorn-/nachlauf wird als Grafik dargestellt. Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass die Umlaufgeschwindigkeit jeder Kugel in einem Abschnitt konstant ist. Aufgrund der unterschiedlichen Druckwinkel variiert die Kugelumlaufgeschwindigkeit zwischen den Wälzkörpern. Dies führt zu Schwankungen im Abstand zwischen den Wälzkörpern. Bei hohen Drehzahlen sollte der Kugelvorn-/nachlauf kleiner sein als das Spiel in der Käfigtasche.



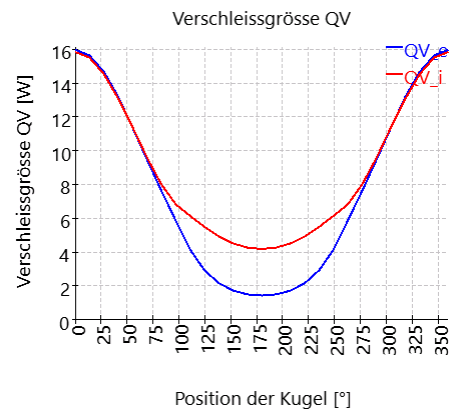
### 3.6.5.12 Gyroskopischer Schlupfkoeffizient

Der gyroskopische Schlupfkoeffizient ist der erforderliche Reibungskoeffizient, um ein Durchrutschen aufgrund des gyroskopischen Moments zu vermeiden. Er gibt lediglich einen Hinweis darauf, ob ein Schlupf wahrscheinlich ist oder nicht.



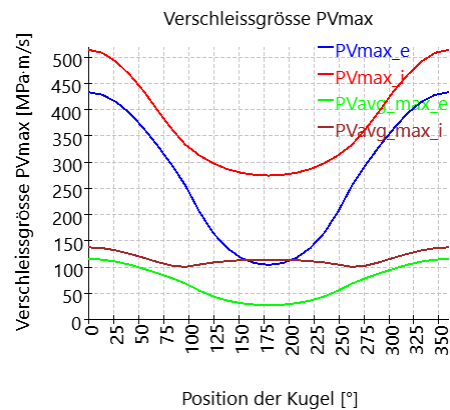
### 3.6.5.13 Parameter für Verschleissgröße QV

Für Kugellager werden die Bohr- und die Rollgeschwindigkeit in der Kontakt-Ellipse berechnet. Der Verschleissgröße QV wird für jede Kontaktzone berechnet als  $QV = \int (p \cdot v) dA$



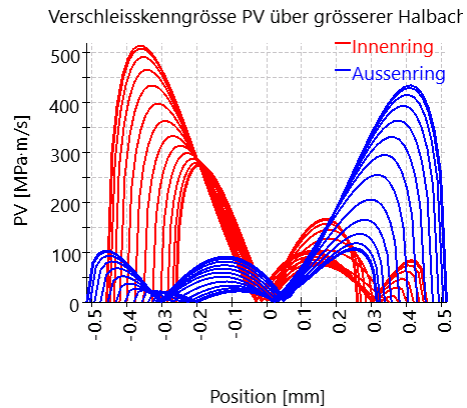
### 3.6.5.14 Verschleissparameter PVmax

Der Verschleissgröße PVmax ist der Maximalwert des Produktes Druck mal Gleitgeschwindigkeit in der Kontaktellipse.



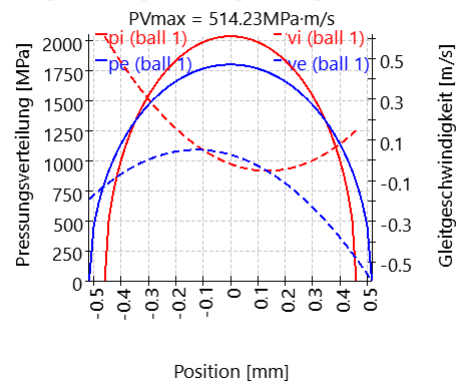
### 3.6.5.15 Verschleisskenngrösse PV über grösserer Halbachse

Dieses Diagramm zeigt den Verschleißparameter PV auf der grösseren Hauptachse der Kontaktellipse für alle Wälzkörper.



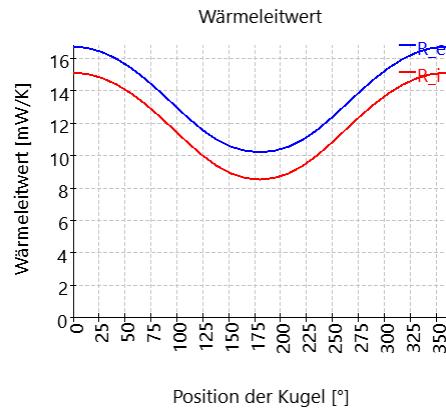
### 3.6.5.16 Contact stress and sliding speed on major axis

Dieses Diagramm zeigt die Kontaktspannung und die Gleitgeschwindigkeit für die Kugel mit PVmax. Die Grafikoptionen im Kontextmenü ermöglichen die Auswahl einer anderen Kugel.



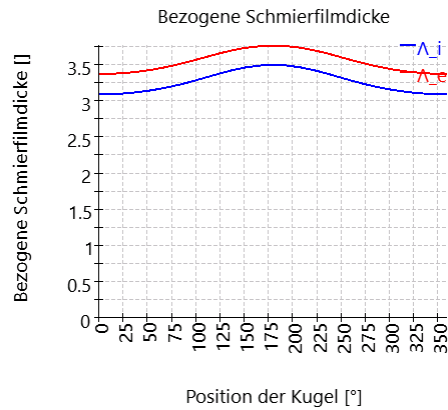
### 3.6.5.17 Kontaktspannung und Gleitgeschwindigkeit auf der grossen Halbachse

Dieses Diagramm zeigt den Wärmeleitwert für jeden Kontakt eines Kugellagers.



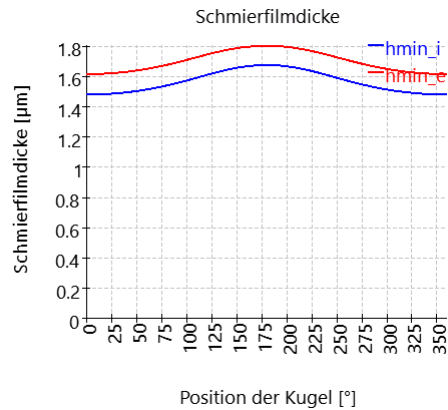
**3.6.5.18 Schmierfilmparameter**

Ein Diagramm für den Schmierfilmparameter  $\Lambda$  ist verfügbar, wenn die Berechnung der Schmierfilmdicke aktiviert ist.



**3.6.5.19 Schmierfilmdicke**

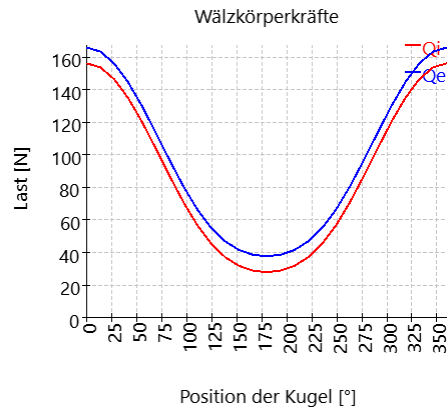
Ein Diagramm für die Schmierfilmdicke ist verfügbar, wenn die Berechnung der Schmierfilmdicke aktiviert ist.



**3.6.5.20 Wälzkörperkräfte**

Das Diagramm zeigt die Belastung für Innen- und Außenringkontakte von Kugellagern. Für Rollenlager wird die Rollenbelastung des Innenringkontakts und die Kraft auf die Schulter dargestellt.

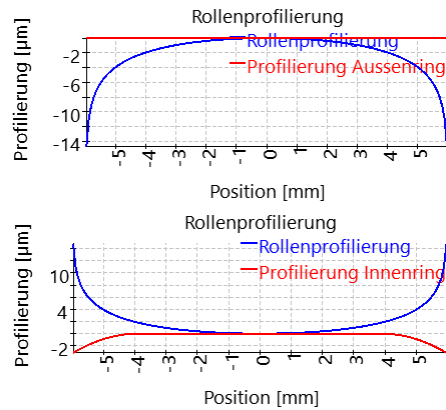
Bei Zylinderrollenlagern des Typs NUP ohne Axialspiel oder mit sehr kleinem Axialspiel und Kippwinkel kann dieses Diagramm verwendet werden, um die Kräfte an der Schulter zu überprüfen. Diese können auftreten, wenn die Rolle nicht genügend Platz zum Verkappen hat.





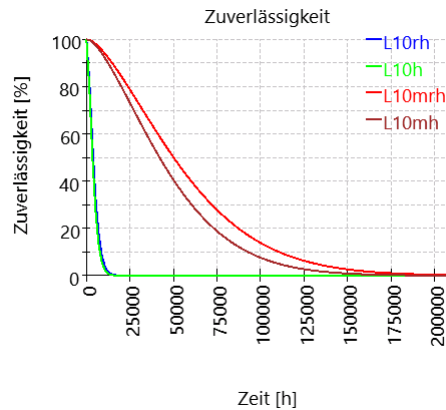
### 3.6.5.21 Rollenprofilierung

Die Rollenprofilierung und die Profilierung der Laufbahnen können grafisch dargestellt werden. Die Profilierung kann nur benutzerdefiniert werden, wenn die erweiterte Methode zur Pressungsverteilung aktiviert ist.



### 3.6.5.22 Zuverlässigkeit

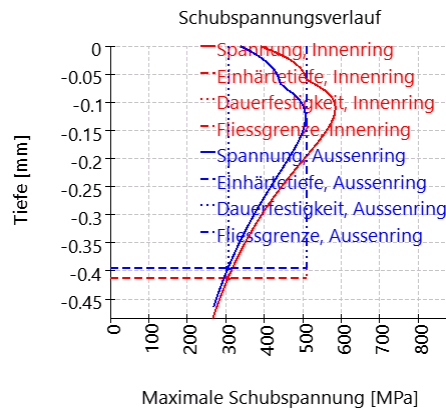
Dieses Diagramm zeigt die Zuverlässigkeit auf der Grundlage der vier Ergebnisse für die Lagerlebensdauer über die Lebensdauer. Es kann verwendet werden, um die Ausfallwahrscheinlichkeit (100% - Zuverlässigkeit) für eine bestimmte Lebensdauer zu bewerten.



### 3.6.5.23 Schubspannungsverlauf

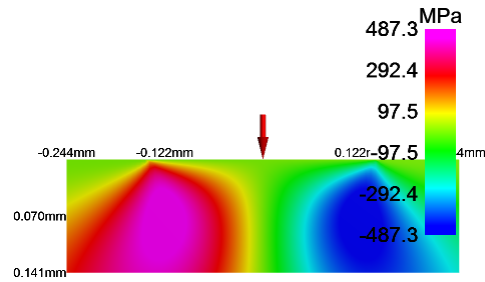
Der Schubspannungsverlauf ist für den Kontakt mit der höchsten Flächenpressung dargestellt. Die notwendige Einhärtetiefe ist im Diagramm in Abhängigkeit von der Dauerfestigkeit von Innen- und Aussenring dargestellt.

Die rote Kurve steht für die Schubspannung des Innenrings, die blaue Kurve für den Außenring.



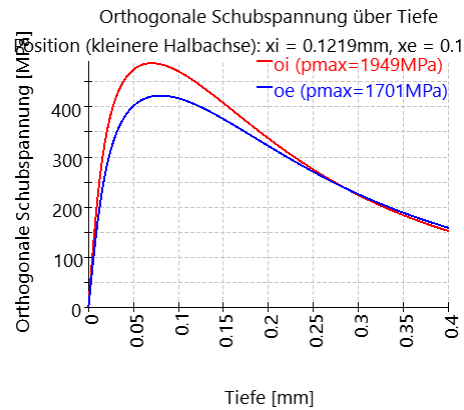
### 3.6.5.24 Orthogonale Schubspannung

Die orthogonale Schubspannung für den Innen- und Außenring kann als Farbdiagramm dargestellt werden. Das Diagramm ist für den Kontakt mit der maximalen Kontaktspannung dargestellt.



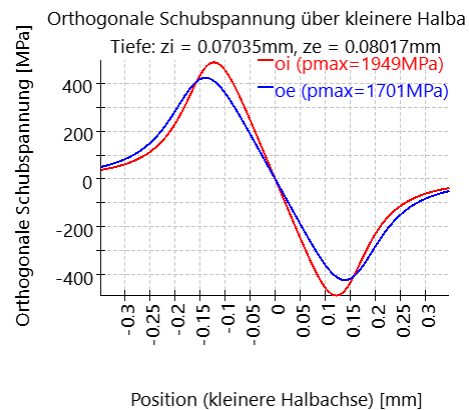
### 3.6.5.25 Orthogonale Schubspannung über der Tiefe

Die orthogonale Schubspannung über der Tiefe kann ebenfalls in einem Diagramm dargestellt werden.



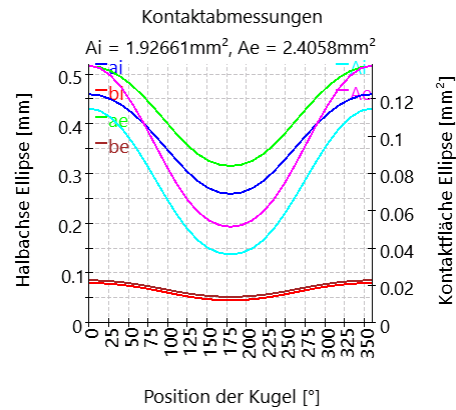
### 3.6.5.26 Orthogonale Schubspannung über kleinerer Halbachse

Die orthogonale Schubspannung ist unterhalb des Kontakts gleich Null und hat ihr Maximum in einem bestimmten Abstand vom Kontaktzentrum. Dies ist in diesem Diagramm der orthogonalen Scherspannung über die Position auf der kleinen Halbachse zu sehen.



### 3.6.5.27 Kontaktabmessungen

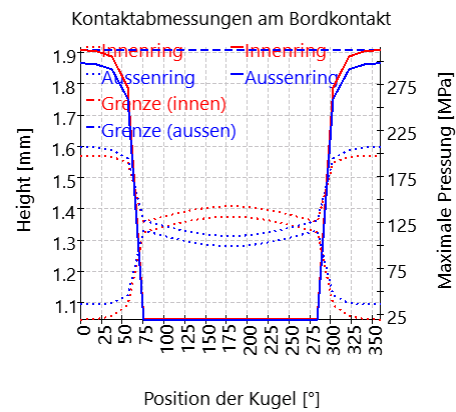
Die Abmessungen der Kontaktellipsen und der Kontaktflächen sind in diesem Diagramm dargestellt. Die Abmessungen für die Halbachsen sind auch in den Resultatetabellen verfügbar.



### 3.6.5.28 Kontaktabmessungen am Bordkontakt

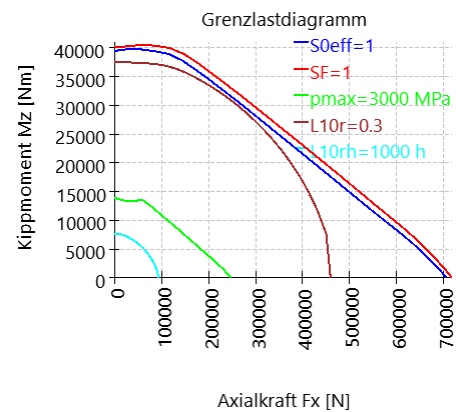
Dieses Diagramm zeigt die Lage und Ausdehnung der Kontaktellipse an der Schulter für Radial-Zylinderrollen- und Kegelrollenlager, wenn die Kontaktgeometrie definiert ist.

Die gestrichelten Linien zeigen die Grenzen für die Kontaktellipse und die gestrichelten Linien oben die Höhe der Schulter an. Die Höhen sind als Radien ausgehend von der Laufbahn angegeben. Die durchgezogenen Linien zeigen die Kontaktspannung.



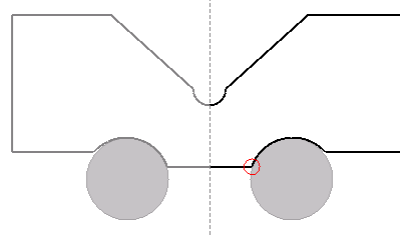
### 3.6.5.29 Grenzlastdiagramm

Das Grenzlastdiagramm zeigt den zulässigen Bereich für Kippmoment und Axialkraft für verschiedene Kriterien, die unter 'Berechnung' -> 'Grenzlastdiagramm' konfiguriert werden können.



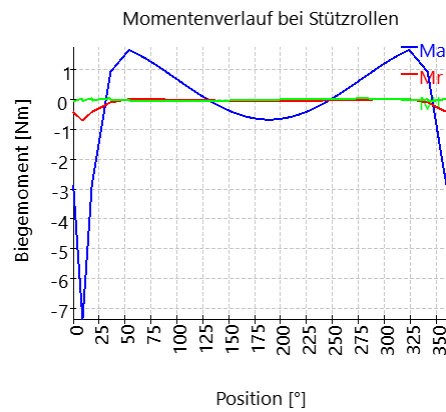
### 3.6.5.30 Geometrie der Stützrollen

Die Stützrollengeometrie wird angezeigt, wenn sie mit Punktdaten definiert wurde. Bei symmetrischen Querschnitten wird die Spiegelung grau dargestellt und der kritische Punkt für die Biegung durch einen roten Kreis markiert.



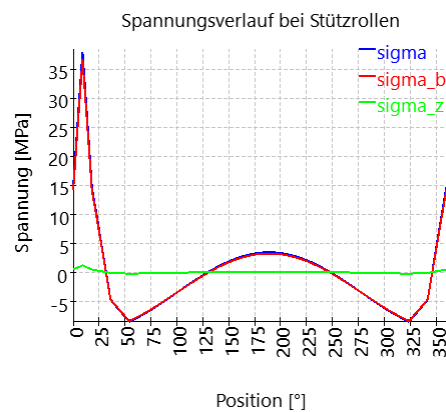
### 3.6.5.31 Momentenverlauf bei Stützrollen

Der Momentenverlauf bei Stützrollen wird mit Hilfe des lokalen Koordinatensystems dargestellt. Bei einer reinen Radialkraft auf einer symmetrischen Querschnittsfläche tritt nur das Kippmoment um die Lagerachse  $M_a$  auf. Das Moment  $M_r$  ist ein Kippmoment um eine radiale Achse und das Moment  $M_t$  ist ein Torsionsmoment im Balkenelement, das den Außenring beschreibt.



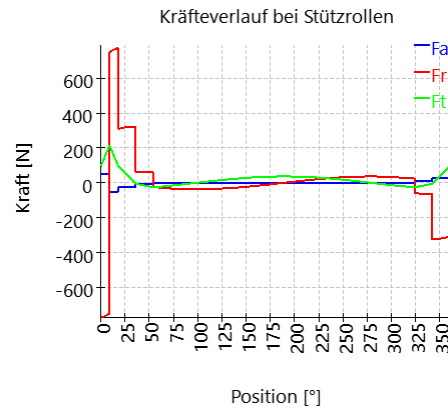
### 3.6.5.32 Spannungsverlauf bei Stützrollen

Die Biegespannung und die Spannung infolge von Zug/Druck sind im Diagramm dargestellt. Die Biegespannung wird für einen kritischen Punkt berechnet, der entweder manuell oder automatisch von der Software definiert wird. Diese Spannungen werden zur Berechnung eines statischen und dynamischen Sicherheitsfaktors für den Außenring verwendet.



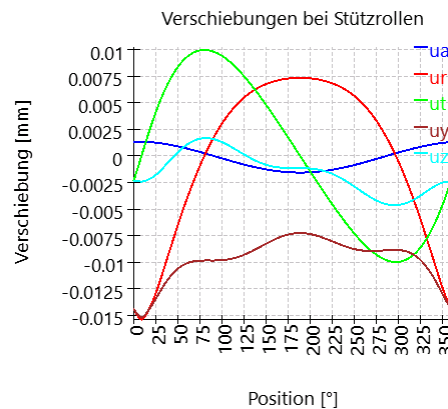
### 3.6.5.33 Kräfteverlauf bei Stützrollen

Dargestellt sind die Kräfte in den Balkenelementen, die den Außenring modellieren. Die Kraft  $F_a$  wirkt in Richtung der Lagerachse, es handelt sich also um eine Querkraft im Balken. Die Kraft  $F_r$  ist eine Querkraft in radialer Richtung und  $F_t$  ist die Tangentialkraft, also ein Zug/Druck (positiv) oder Druck (negativ) im Balkenelement.



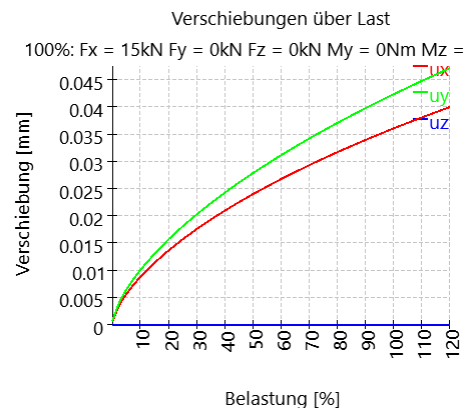
### 3.6.5.34 Verschiebungen bei Stützrollen

Die Verschiebungen sind in lokalen Koordinaten und in globalen Koordinaten dargestellt. Anhand der globalen Koordinaten lässt sich schnell erkennen, dass es sich bei diesem Beispiel hauptsächlich um eine Starrkörperbewegung des äußeren Rings in negativer y-Richtung handelt. In anderen Beispielen könnten die Verformungen des Rings anders sein, so dass die Werte in lokalen Koordinaten wichtiger sind.



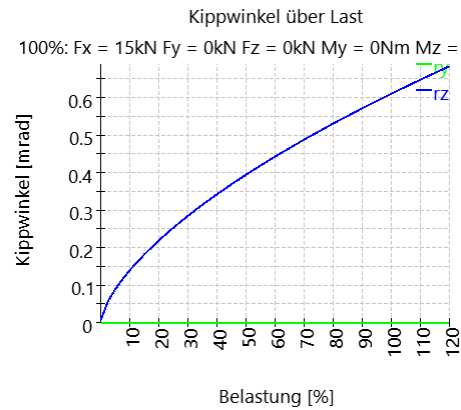
### 3.6.5.35 Verschiebungen über Last

Die Verschiebungen über Last können als Grafik dargestellt werden. Alle Lastkomponenten werden mit einem Lastfaktor multipliziert und die Verschiebungen werden angezeigt. Es werden nur Lasten mit dem Lastfaktor multipliziert, eingegebene Verschiebungen oder Rotationen werden nicht modifiziert. Dieses Diagramm kann als Information über die Steifigkeit verwendet werden. Abhängig vom Typ der Belastung (Axial- oder Radialkraft) können unterschiedliche Steifigkeiten berechnet werden.



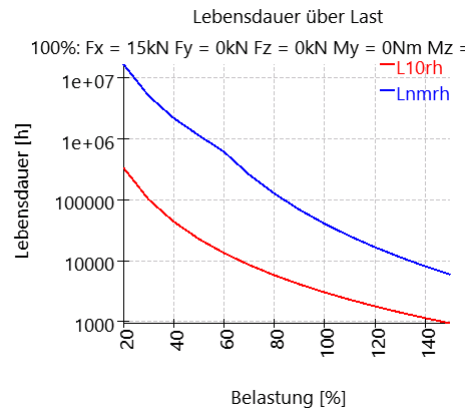
### 3.6.5.36 Rotation über Last

Wie in den Grafiken zuvor, werden die Rotationen in Abhängigkeit von einem Lastfaktor dargestellt. Diese Grafik kann nur angezeigt werden, wenn das Moment eine Eingabe ist, nicht für den Kippwinkel als Eingabe. Alle Belastungen werden mit dem Lastfaktor multipliziert.



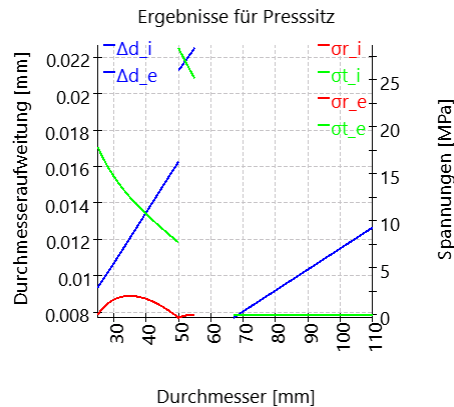
### 3.6.5.37 Lebensdauer über Last

Die Lebensdauer über Lastfaktor kann in einem Diagramm dargestellt werden. Alle Kräfte und Momente werden mit einem Lastfaktor multipliziert; alle Eingaben für Verschiebungen/Rotationen bleiben konstant. Als Referenz wird die Belastung oben im Diagramm dargestellt.



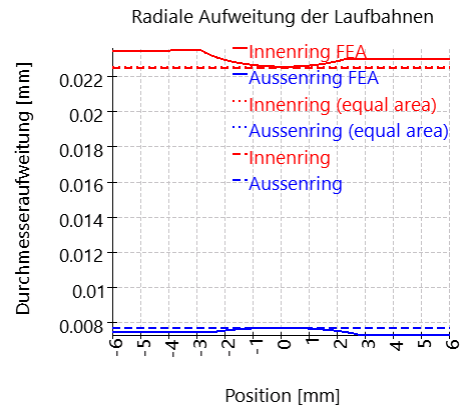
### 3.6.5.38 Resultate für Presssitz

Dieses Diagramm zeigt die Ergebnisse der Berechnung von Presspassungen. Die blauen Linien zeigen die diametrale Ausdehnung über den Durchmesser, die roten und grünen Linien die radialen und tangentialen Spannungen in der Passung.



### 3.6.5.39 Radiale Aufweitung der Laufbahnen

Die radiale Aufweitung der Laufbahnen wird mittels achsensymmetrischer FEA unter Berücksichtigung von Passung, Temperaturen und Fliehkräften berechnet. Zum Vergleich ist die radiale Ausdehnung gemäß der Geometrie des dicken Rings, wie sie für die Berechnung der Passung verwendet wird, dargestellt. Die gestrichelte Linie zeigt die Standardberechnung der Passung, die gepunktete Linie die Berechnung mit äquivalentem Querschnitt. Mit dieser Grafik kann geprüft werden, welcher Ansatz für die tatsächlichen Bedingungen besser geeignet ist.







# MESYS Berechnung für Kugelmwindtriebe

## 4 MESYS Berechnung für Kugelgewindetriebe

Diese Berechnung für Kugelgewindetriebe (Version 06/2024) berechnet die Lastverteilung und die äquivalente Lebensdauer nach ISO/TS 16281 (DIN 26281).

Die Innengeometrie der Kugelgewindetriebe muss vom Anwender vorgegeben werden. Das Betriebsspiel kann vorgegeben werden. Die Belastung kann unabhängig für jeden der fünf Freiheitsgrade als Kraft/Moment oder Kräfte und Verschiebungen/Drehung angegeben werden. Lagersätze können durch Verwendung einer Konfiguration mit mehreren Reihen definiert werden.

Die folgenden Ergebnisse sind in dem Protokoll zu finden:

- Referenzlebensdauer nach [ISO 16281](#)<sup>351</sup>
- Lastverteilung zwischen Wälzkörpern
- Reaktionskräfte/Momente und Verschiebungen/Rotationen
- Pressungsverteilung für jeden Kontakt
- Statischer Sicherheitsfaktor

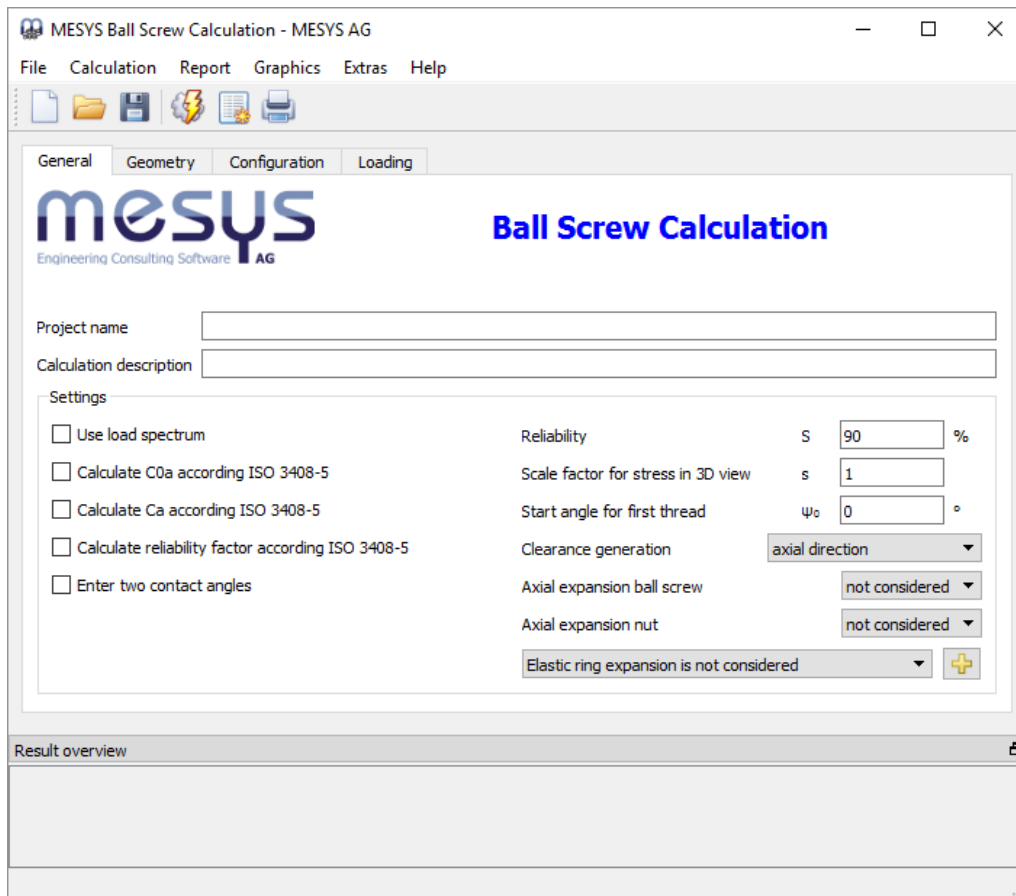
Zusätzlich zum Protokoll werden die Ergebnisse in mehreren Grafiken dargestellt. Protokoll und Benutzeroberfläche sind beide in metrischen oder US Einheiten verfügbar. Unterstützte Sprachen für Benutzeroberfläche und Protokoll sind Englisch, Deutsch, Französisch, Spanisch, Italienisch, Türkisch, Japanisch, Koreanisch und Chinesisch.

### 4.1 Eingabeparameter

---

#### 4.1.1 Allgemein

Auf der ersten Eingabeseite können neben einer Projektbezeichnung verschiedene Einstellungen vorgenommen werden.



#### 4.1.1.1 Projektname und Beschreibung der Berechnung

Der Projektname und die Beschreibung der Berechnung sind lediglich Eingaben, die im Protokollkopf angezeigt werden. Sie können verwendet werden, um Informationen über den Zweck der Berechnung zur Dokumentation einzugeben.

#### 4.1.1.2 Lastkollektiv verwenden

Anstelle eines Einzellastfalls kann ein Lastkollektiv verwendet werden. Diese Option kann hier aktiviert werden. Für jeden Lastfall wird eine vollständige Berechnung mit allen Faktoren durchgeführt. Die resultierende Lebensdauer wird anhand der Lebensdauer der einzelnen Elemente (Lastfälle) berechnet. Ergebnisgrafiken werden im Protokoll nur für das ausgewählte Ergebnis-Element des Lastkollektivs angezeigt. Die Ergebnisgrafiken, die einer beliebigen Nummer (Fallnummer) des Lastkollektivs entsprechen, können jedoch unter dem Menü 'Grafiken' -> 'Lastkollektiv' angezeigt werden.

Alle anderen Grafiken, die unter dem Menüpunkt 'Grafiken' verfügbar sind, gelten nur für das ausgewählte Element.

Zusätzlich werden unter 'Grafiken' -> 'Lastverteilung (Lastkollektiv)' alle Lastverteilungsfälle gleichzeitig in das Diagramm eingeblendet. Dies ist auch bei den Grafiken für die Rollen möglich.

Bitte beachten Sie, dass bei einer Berechnung für einen einzelnen Lastfall mehr Zwischenergebnisse im Protokoll gedruckt werden.

#### 4.1.1.3 Berechnung von COa nach ISO 3408-5

Wenn diese Option gewählt wird, wird die statische Tragzahl nach (ISO 3408-5, 2006) berechnet. In diesem Fall haben Werkstoffeigenschaften wie Elastizitätsmodul keinen Einfluss auf die statische Tragzahl.

Wenn die Option nicht ausgewählt ist, wird die statische Tragzahl nach (ISO 3408-5, 2006) berechnet, jedoch unter Verwendung von  $f_0$  nach (ISO/TR 10657, 1991) anstelle von  $k_0$ . In diesem Fall basiert die statische Tragzahl auf einer zulässigen Kontaktspannung von 4200 MPa wie bei Axialkugellagern nach (ISO 76, 2006).

#### 4.1.1.4 Berechnung von Ca nach ISO 3408-5

Wenn diese Option gesetzt ist, wird die Dynamische Tragzahl mit dem Exponenten 0,86 in Gleichung 8 von (ISO 3408-5, 2006) berechnet. Wenn die Option nicht gesetzt ist, wird der Exponent 0,7 wie in (ISO 281, 2007), (ISO/TR 1281-1, 2008) oder (Lundberg, et al., 1947) verwendet.

Die dynamische Tragzahl wird berechnet nach

$$C_a = f_c \cdot (i \cdot \cos \alpha)^{0.86} \cdot \tan \alpha \cdot z_l^{2/3} \cdot D_w^{1.8} \cdot (\cos \alpha)^{1.3}$$

entweder mit einem Exponenten 0,86 oder einem Exponenten von 0,7.

#### 4.1.1.5 Berechnung des Zuverlässigkeitsfaktors nach ISO 3408-5

Der Modifikationsfaktor für Zuverlässigkeit wird nach der Zwei-Parameter-Weibull-Verteilung nach (ISO 3408-5, 2006) berechnet, wenn diese Option gesetzt ist. Ist die Option nicht gewählt, wird die drei Parameter Weibull Verteilung wie in (ISO 281, 2007), (ISO/TR 1281-1, 2008) verwendet.

#### 4.1.1.6 Zwei Druckwinkel zum Kontakt eingeben

Es können entweder ein oder zwei Druckwinkel definiert werden. Für Spindel und Mutter können unterschiedliche Druckwinkel verwendet werden. Der Druckwinkel wird durch den radialen Kontakt der Kugel entweder mit der Spindel oder der Mutter bestimmt.

#### 4.1.1.7 Zuverlässigkeit S

Als Standard wird die Lagerlebensdauer für eine Zuverlässigkeit von 90% berechnet. Die gewünschte Zuverlässigkeit kann hier mit den Grenzen 90% und <100% geändert werden. Der Lebensdauerbeiwert für Zuverlässigkeit 'fac' wird entsprechend dieser Eingabe berechnet, wobei entweder die Drei-Parameter-Weibull-Verteilung, wie sie

als Formel in (ISO/TR 1281-2, 2008) angegeben ist, oder die Zwei-Parameter-Weibull-Verteilung, die in (ISO 3408-5, 2006) verwendet wird.

#### 4.1.1.8 Skalierungsfaktor für Spannungen in 3D-Ansicht $s$

Die Spannungsverteilung wird für eine Pressungsverteilung von 4000MPa in der 3D-Ansicht auf  $s \cdot D_w$  skaliert.

#### 4.1.1.9 Startwinkel für ersten Gang $\Psi_0$

Der Startwinkel definiert die Winkellage des linken Endes des ersten Ganges. Bei einem Winkel von  $0^\circ$  liegt der Start auf der y-Achse. Der Winkel definiert die Position der Mitte der Lücke vor der ersten Kugel.

#### 4.1.1.10 Art der Spielerzeugung

Der Nenndruckwinkel, der Kugeldurchmesser und die Radien der Laufbahnen werden verwendet, um die Positionen für die Krümmungsmittelpunkte im Falle des Spiels von Null zu definieren.

Es gibt vier Möglichkeiten, das Spiel zu definieren:

1. Die Krümmungsmittelpunkte werden axial verschoben. Dies ist nur bei gotischen Profilen mit Druckwinkel zum Kontakt größer Null möglich. Das maximale Spiel, das erreicht werden kann, ist begrenzt.
2. Die Krümmungsmittelpunkte werden radial verschoben.
3. Die Krümmungsmittelpunkte werden in Richtung des Druckwinkels verschoben. Bei Druckwinkel zum Kontakt Null kann dies nicht genutzt werden.
4. Das Spiel wird durch Reduktion des Kugeldurchmessers erzeugt. Dies führt zu einer leichten Reduzierung der Tragzahlen, da der reduzierte Kugeldurchmesser für die Berechnung der Tragzahlen verwendet wird.

#### 4.1.1.11 Axiale Dehnung der Kugelgewindetriebe und der Mutter

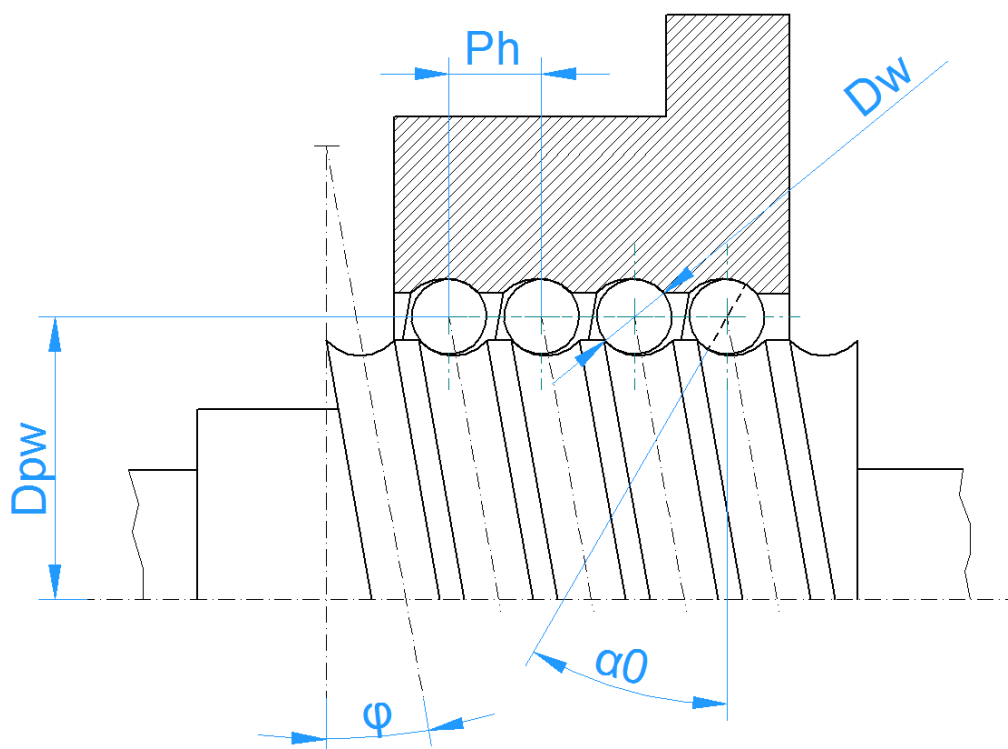
Für die axiale Dehnung der Kugelgewindespindel und der Mutter gibt es drei Möglichkeiten: "Nicht berücksichtigt", "Fest nach links", "Fest nach rechts". Bei einseitiger Lasteinleitung wird die Spindel aufgrund der Axialspannungen axial gedehnt oder gestaucht. "Fest nach links" bedeutet, dass die Last auf der linken Seite des Elements eingeleitet wird und die Axialspannung nach rechts abnimmt.

#### 4.1.1.12 Elastische Aufweitung der Ringe

Eine elastische Dehnung/Kompression aufgrund von Radialkräften kann berücksichtigt werden. Die Berechnung basiert auf der Theorie des dickwandigen Rohres mit konstantem Druck auf der Außen- oder Innenseite. Zur Berechnung

dieser elastischen Deformation wird entweder die minimale oder die mittlere Kontaktkraft der Kugeln verwendet. Die Deformation ist über die gesamte Länge der Mutter konstant. Daher ist die Methode nicht für eine reine Kippmoment-Belastung geeignet.

#### 4.1.2 Geometrie des Kugelgewindetriebs



| General                         | Geometry | Configuration                     | Loading                          |                      |                                   |                                   |                                  |
|---------------------------------|----------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Number of starts                | ns       | <input type="text" value="1"/>    | Dynamic load number              | Ca                   | <input type="text" value="0"/> kN | <input type="checkbox"/>          |                                  |
| Number of turns                 | nt       | <input type="text" value="1"/>    | Static load number               | C0a                  | <input type="text" value="0"/> kN | <input type="checkbox"/>          |                                  |
| Lead                            | Ph       | <input type="text" value="0"/> mm | <input checked="" type="radio"/> | Axial clearance      | Pa                                | <input type="text" value="0"/> mm | <input type="checkbox"/>         |
| Lead angle                      | phi      | <input type="text" value="0"/> °  | <input type="radio"/>            | Tolerance class      | 5                                 |                                   |                                  |
| Direction                       | right    |                                   | Material ball screw              | Steel                |                                   |                                   | <input type="button" value="+"/> |
| Number of loaded balls per turn | zl       | <input type="text" value="0"/>    | Material ball nut                | Steel                |                                   |                                   | <input type="button" value="+"/> |
| Ball diameter                   | Dw       | <input type="text" value="0"/> mm | Material rolling element         | Steel                |                                   |                                   | <input type="button" value="+"/> |
| Pitch diameter                  | Dpw      | <input type="text" value="0"/> mm | Ball screw inner diameter        | dsi                  | <input type="text" value="0"/> mm |                                   |                                  |
| Contact angle                   | $\alpha$ | <input type="text" value="0"/> °  | Nut outer diameter               | dhe                  | <input type="text" value="0"/> mm |                                   |                                  |
| Conformity ball screw           | frs      | <input type="text" value="0.52"/> | Ball screw lead error            | $\Delta_{\text{Ph}}$ | <input type="text" value="0"/> mm |                                   |                                  |
| Conformity ball nut             | frn      | <input type="text" value="0.52"/> |                                  |                      |                                   |                                   |                                  |
| Shoulder diameter ball screw    | dSi      | <input type="text" value="0"/> mm |                                  |                      |                                   |                                   |                                  |
| Shoulder diameter ball nut      | dSe      | <input type="text" value="0"/> mm |                                  |                      |                                   |                                   |                                  |

#### 4.1.2.1 Tragzahlen

Die Tragzahlen können als Eingabe oder als Ausgabe dienen. Wenn sie vom Anwender eingegeben werden, werden sie aufgrund der Oberflächenhärte des Werkstoffs nicht verändert. Die Oberflächenhärte wird nur berücksichtigt, wenn die Werte von der Software berechnet werden.

Die Tragzahlen werden mit dem freien Druckwinkel  $\alpha_0$  berechnet, nicht mit dem Nenndruckwinkel  $\alpha$ . Dies macht vor allem einen Unterschied bei einem Nenndruckwinkel von Null bei einem Vollradius.

##### 4.1.2.1.1 Dynamische Tragzahl

Die dynamische Tragzahl wird für die Berechnung der Lebensdauer der Lager verwendet. Sie wird berechnet nach (ISO 3408-5, 2006) mit dem Faktor  $f_c$  nach (ISO/TR 1281-1, 2008). Als Exponent wird entweder 0,86 oder 0,7 nach (ISO 281, 2007) verwendet.

Die dynamische Tragzahl kann durch einen bei den Werkstoffeigenschaften vorhandenen Modifikationsfaktor beeinflusst werden.

##### 4.1.2.1.2 Statische Tragzahl

Die statische Tragzahl wird nach (ISO 76, 2006) und (ISO/TR 10657, 1991) oder nach (ISO 3408-5, 2006) berechnet.

#### 4.1.2.2 Anzahl Gänge

Die Anzahl Gänge bestimmt das Verhältnis zwischen Steigung und Teilung oder die Anzahl der parallelen Kugelbahnen.

#### 4.1.2.3 Anzahl Windungen

Jede Kugelbahn hat diese Anzahl von Windungen. Es muss sich nicht um einen ganzzahligen Wert handeln.

#### 4.1.2.4 Steigung

Die Steigung ist der axiale Weg der Mutter bei einer 360° Rotation.

#### 4.1.2.5 Steigungswinkel

Anstelle der Steigung kann auch der Steigungswinkel als Eingabe verwendet werden.

Die Steigung ist  $P_h = D_{pw} \cdot \pi \tan \varphi$

##### 4.1.2.5.1 Richtung

Die Steigung kann entweder rechts oder links sein. Die Drehrichtung wird durch diesen Eingang definiert.

#### 4.1.2.6 Anzahl tragender Kugeln pro Umlauf

Die Anzahl tragender Kugeln pro Umdrehung wird üblicherweise nach (ISO 3408-5, 2006) berechnet. Sie kann überschrieben werden, wenn Abstandshalter verwendet werden.

#### 4.1.2.7 Kugeldurchmesser

Hier wird der Durchmesser der Kugeln angegeben.

#### 4.1.2.8 Teilkreis-Durchmesser

Der Teilkreisdurchmesser ist der Durchmesser der Mittelpunkte von Wälzkörpern, wenn sie zu beiden Laufbahnen gleich viel Spiel haben. Die Durchmesser von Innen- und Außenring werden aus diesem Wert, dem Durchmesser des Wälzkörpers, dem Druckwinkel und dem Spiel berechnet.

#### 4.1.2.9 Druckwinkel

Es können entweder ein oder zwei Druckwinkel definiert werden. Bei Druckwinkeln größer Null wird eine gotische Profilierung verwendet, bei Druckwinkeln von Null wird ein Vollradius verwendet.


Wenn ein Vollradius verwendet werden soll, muss das Spiel entweder radial oder durch Reduktion des Kugeldurchmessers erzeugt werden.

#### 4.1.2.10 Konformität Kugelgewindetrieb und Kugelgewindemutter

Die Konformität ist das Verhältnis zwischen dem Krümmungsradius einer Laufbahn und dem Kugeldurchmesser. Aus geometrischen Gründen muss der Wert größer als



0,5 sein. Die für die Berechnung der Tabellen in ISO 281 verwendeten Werte sind  $f_i = f_e = 0.52$  für Radiallager und  $f_i = f_e = 0.535$  für Axialkugellager, wie in (ISO/TR 1281-1, 2008) angegeben.

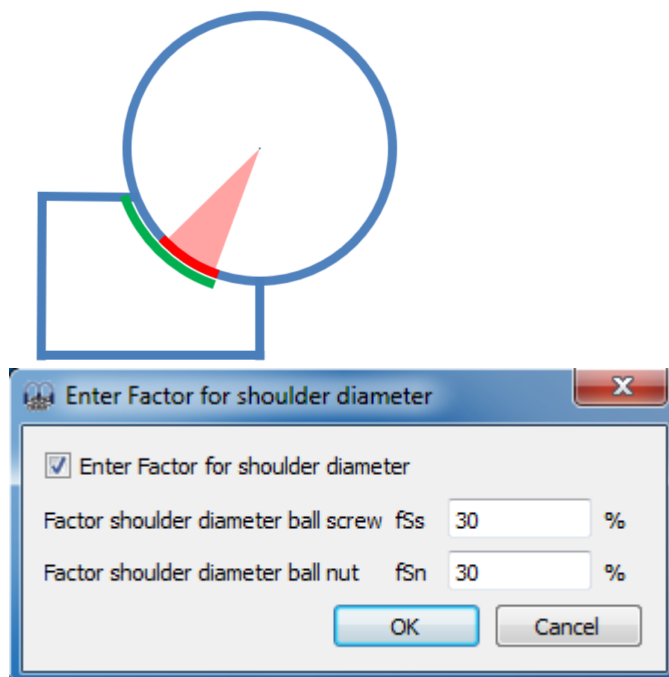
Mit Hilfe der -Schaltfläche hinter dem Eingabefeld kann die Konformität aus einem vorgegebenen Radius berechnet werden. Achten Sie darauf, dass Sie vorher den richtigen Durchmesser der Kugel und der Teilung eingegeben haben.

#### 4.1.2.11 Schulter-Durchmesser von Innen- und Außenring

Der Schulterdurchmesser von Innen- und Außenring kann definiert werden.

Der Schulterdurchmesser wird mit der maximalen Ausdehnung der Kontaktellipse verglichen. Eine Warnung wird angezeigt, wenn die Ellipse über den Absatz hinausgehen würde. Die Hertzsche Pressung ist in diesem Fall nicht gültig.

Der erforderliche Durchmesser der Schulter wird im Protokoll zusammen mit einem Längenverhältnis  $eLR_i$ ,  $eLR_e$  angezeigt, das eine Sicherheit der Schulterlänge darstellt. Das Längenverhältnis ist definiert als die Länge vom unteren Ende der Kontaktellipse bis zur Schulter (grüne Linie in der Grafik) geteilt durch die Länge der Kontaktellipse  $2a$  (rote Linie in der Grafik). Der Wert sollte daher größer als 1 oder 100% sein.




Anstelle eines absoluten Wertes kann die Höhe der Schulter auch durch einen Prozentsatz der Kugeldurchmesser definiert werden. Ein Faktor von 50% würde einen Absatz bis zum Teilkreis bedeuten, daher sollte der Faktor zwischen 10% und

40% liegen. Die Verwendung dieses Faktors ermöglicht eine Standard-Geometrie bei Änderung des Kugeldurchmessers oder der Teilung.

#### 4.1.2.12 Axialspiel


Das Axialspiel ist die Differenz zwischen der möglichen axialen Verschiebung in positiver und negativer Richtung. Es kann bei gotischen Profilen negativ sein, muss aber bei Vollradiusprofilen positiv sein.

Eine Vorspannung kann mit einem negativen Wert für das Axialspiel  $P_a$  eingegeben werden. Eine -Schaltfläche ermöglicht die Eingabe des Radialspiels anstelle des Axialspiels oder eines freien Druckwinkels für Vollradiusprofile.

#### 4.1.2.13 Toleranzklasse

Die Toleranzklasse wird bei der Berechnung der statischen und dynamischen Tragzahl berücksichtigt.

#### 4.1.2.14 Werkstoff

Hier kann der Werkstoff der Kugeln, der Mutter und der Kugeln definiert werden. Über die -Schaltfläche können auch die Härte und die Materialbehandlung definiert werden.

Der Werkstoff der Kugel wirkt sich nur auf die Kontaktsteifigkeit bei der Berechnung der Lastverteilung aus, er wird bei der Berechnung der Lebensdauer nicht berücksichtigt.

#### 4.1.2.15 Innendurchmesser Kugelgewindespindel

Der Innendurchmesser im Falle einer Hohlspindel. Diese Eingabe wird nur verwendet, wenn eine axiale oder radiale Ausdehnung berücksichtigt wird.

#### 4.1.2.16 Aussendurchmesser Kugelgewindemutter

Der Aussendurchmesser der Mutter. Diese Eingabe wird nur verwendet, wenn eine axiale oder radiale Ausdehnung berücksichtigt wird. Ist der Eingabewert Null, wird intern ein Durchmesser von  $D_{pw} + 20 \cdot D_w$  verwendet.

#### 4.1.2.17 Steigungsabweichung der Spindel

Eine optionale Steigungsabweichung der Spindel. Dies hat Auswirkungen auf die Lastverteilung.




### 4.1.3 Lagerkonfiguration

Eine Gruppe von Muttern kann bei der Berechnung berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass die Muttern mit einer starren Welle und einem Gehäuse

verbunden sind. Die Lasten oder Verschiebungen werden für den Ursprung der Gruppe statt für jedes einzelne Lager angegeben.

Für jede Mutter kann eine relative Position eingegeben werden. Ein axialer Versatz ermöglicht die Definition von Vorspannungen im System. Der Versatz ist eine zusätzliche Bewegung der Kugelgewindemutter. Die Verschiebungen, Kräfte und Momente unter Belastung werden an der Referenzposition 0 angesetzt. In den meisten Fällen sollten die Positionen also symmetrisch um den Nullpunkt gewählt werden.

|   | Position [mm] | Offset [mm] |
|---|---------------|-------------|
| 1 | -30           | 0           |
| 2 | 30            | 0           |

Zusätzliche Muttern können mit der -Schaltfläche hinzugefügt werden. Eine Zeile kann mit der -Schaltfläche gelöscht werden und die -Schaltfläche löscht alle Eingaben.

Mit dem Kontextmenü (rechte Maustaste) in der Tabelle können mehrere Resultate in der Tabelle angezeigt werden. So lässt sich schnell erkennen, wie sich die Belastung bzw. Lebensdauer auf die Muttern verteilt.

#### 4.1.4 Belastung

Für jede Koordinatenrichtung können Sie auswählen, ob eine Kraft oder eine Verschiebung eingegeben werden soll.

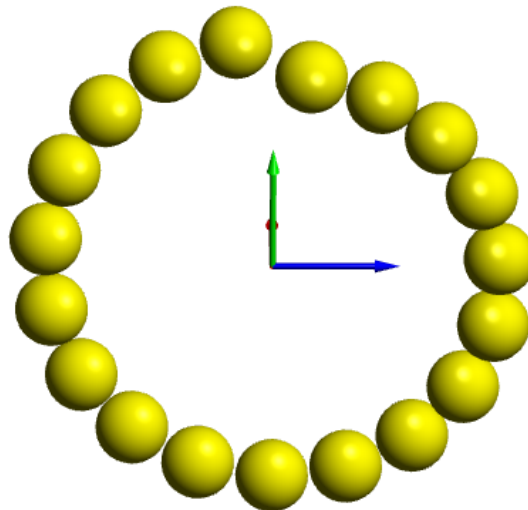
Eine Momentenbelastung kann nur für zwei Richtungen eingegeben werden, da das Drehmoment um die Achse mit der Axialkraft verbunden ist. Der Drehwinkel  $\alpha$  wirkt sich nur auf die axiale Verschiebung aus.

Verwenden Sie die Optionsfelder, um die Elemente auszuwählen, die Sie eingeben möchten.

| General              | Geometry | Configuration                      | Loading                                                                                                                                                              |
|----------------------|----------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Axial load           | Fx       | <input type="text" value="0"/> N   | <input checked="" type="radio"/> Displacement <span style="margin-left: 100px;"><input type="text" value="0"/> <math>\mu\text{m}</math> <input type="radio"/></span> |
| Radial load          | Fy       | <input type="text" value="0"/> N   | <input checked="" type="radio"/> Displacement <span style="margin-left: 100px;"><input type="text" value="0"/> mm <input type="radio"/></span>                       |
| Radial load          | Fz       | <input type="text" value="0"/> N   | <input checked="" type="radio"/> Displacement <span style="margin-left: 100px;"><input type="text" value="0"/> mm <input type="radio"/></span>                       |
| Moment               | Mx       | <input type="text" value="0"/> Nm  | <input type="radio"/> Rotation angle <span style="margin-left: 100px;"><input type="text" value="0"/> mrad <input checked="" type="radio"/></span>                   |
| Moment               | My       | <input type="text" value="0"/> Nm  | <input type="radio"/> Rotation angle <span style="margin-left: 100px;"><input type="text" value="0"/> mrad <input checked="" type="radio"/></span>                   |
| Moment               | Mz       | <input type="text" value="0"/> Nm  | <input type="radio"/> Rotation angle <span style="margin-left: 100px;"><input type="text" value="0"/> mrad <input checked="" type="radio"/></span>                   |
| Speed inner ring     | ni       | <input type="text" value="0"/> rpm | <input checked="" type="checkbox"/> Inner ring rotates to load                                                                                                       |
| Speed outer ring     | ne       | <input type="text" value="0"/> rpm | <input type="checkbox"/> Outer ring rotates to load                                                                                                                  |
| Temperature of shaft | Ti       | <input type="text" value="20"/> °C | Temperature of housing <span style="margin-left: 100px;"><input type="text" value="20"/> °C</span>                                                                   |

### 4.1.4.1 Koordinatensystem

Das Koordinatensystem ist mit x als axialer Richtung definiert. Die y-Achse (in grün) zeigt nach oben zur Mitte der Lücke vor dem ersten Wälzkörper und der Winkel  $\psi$  ist positiv um die x-Achse bzw. im Diagramm rechts im Uhrzeigersinn (mit Blick in Richtung der x-Achse). Der Winkel beginnt auf der y-Achse mit Null; er kann unter Einstellungen geändert werden. Momente sind positiv, wenn sie um die entsprechende Achse wirken.



Die Last wirkt auf den inneren Ring, so dass eine positive Last in y-Richtung zu einer Belastung der Wälzkörper auf der Oberseite führt

### 4.1.4.2 Innenring rotiert zur Last

Die resultierende Lebensdauer ist etwas anders, wenn die Lastverteilung auf einem Laufring stationär oder rotierend ist. Bei vielen Lagern rotiert der Innenring relativ zur Last. Dies ist der Fall, wenn der Innenring mit einer rotierenden Welle verbunden ist und die Last stationär im Raum steht.

Was ist die richtige Eingabe, wenn nur eine Axialkraft auftritt? In diesem Fall spielt die Eingabe keine Rolle, da die Ergebnisse für beide Einstellungen gleich sind, wenn alle Rollen die gleiche Belastung haben.

### 4.1.4.3 Außenring rotiert zur Last

Für den Aussenring gilt das Gleiche wie für den Innenring. In vielen Anwendungen ist der Aussenring gegenüber der Last feststehend.

### 4.1.4.4 Temperatur von Spindel und Mutter

Die Temperaturen der Spindel und der Mutter werden bei der axialen Dehnung der Schraube und der Mutter berücksichtigt und beeinflussen das Radialspiel aufgrund der radialen Wärmeausdehnung.

### 4.1.5 Lastkollektiv




Wenn auf der Registerkarte 'Allgemein' das Flag für die Berechnung mit Lastkollektiv gesetzt ist, wird statt für einen einzelnen Lastfall für ein Lastkollektiv gerechnet. Für jedes Element können die Last bzw. Verschiebung, die Rotation und die Temperaturen angegeben werden.



The screenshot shows the 'Loading' tab in the MESYS software. It contains a table with the following data:

|   | Frequency | Fx [N] | Fy [N] | Fz [N] | rx [mrad] | ry [mrad] | rz [mrad] | ni [rpm] | ne [rpm] | Ti [°C] | Te [°C] |
|---|-----------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|---------|---------|
| 1 | 0.45      | 8000   | 0      | 0      | 0         | 0         | 0         | 1000     | 0        | 20      | 20      |
| 2 | 0.35      | 5000   | 0      | 0      | 0         | 0         | 0         | 50       | 0        | 20      | 20      |
| 3 | 0.1       | 2000   | 0      | 0      | 0         | 0         | 0         | 100      | 0        | 20      | 20      |

Below the table, there are two checkboxes:  inner Ring rotates to load and  Outer ring rotates to load. To the right, there is a 'Results for No' dropdown menu set to '1' and several navigation icons.

Über das Kontextmenü, das sich durch Anklicken der rechten Maustaste öffnet, kann ausgewählt werden, welche Kräfte oder Momente als Eingabewerte verwendet werden sollen. Ist ein Wert nicht ausgewählt, kann die entsprechende Verschiebung/Rotation eingegeben werden.

Mit der -Schaltfläche können Zeilen hinzugefügt werden, mit der -Schaltfläche kann eine markierte Zeile gelöscht werden. Mit der -Schaltfläche werden alle Eingaben gelöscht.

Mit der -Schaltfläche wird das Lastkollektiv aus einer Datei gelesen. Für die Eingabedatei müssen die aktuell angezeigten Spalten mit ihren Einheiten verwendet werden. Da die Daten aus der Datei zu den Eingaben hinzugefügt werden, müssen Sie die Eingaben zuerst löschen, um ein vollständiges Lastspektrum zu definieren. Ebenso kann eine erstellte Lastkollektiv-Tabelle mit der entsprechenden -Schaltfläche exportiert werden.

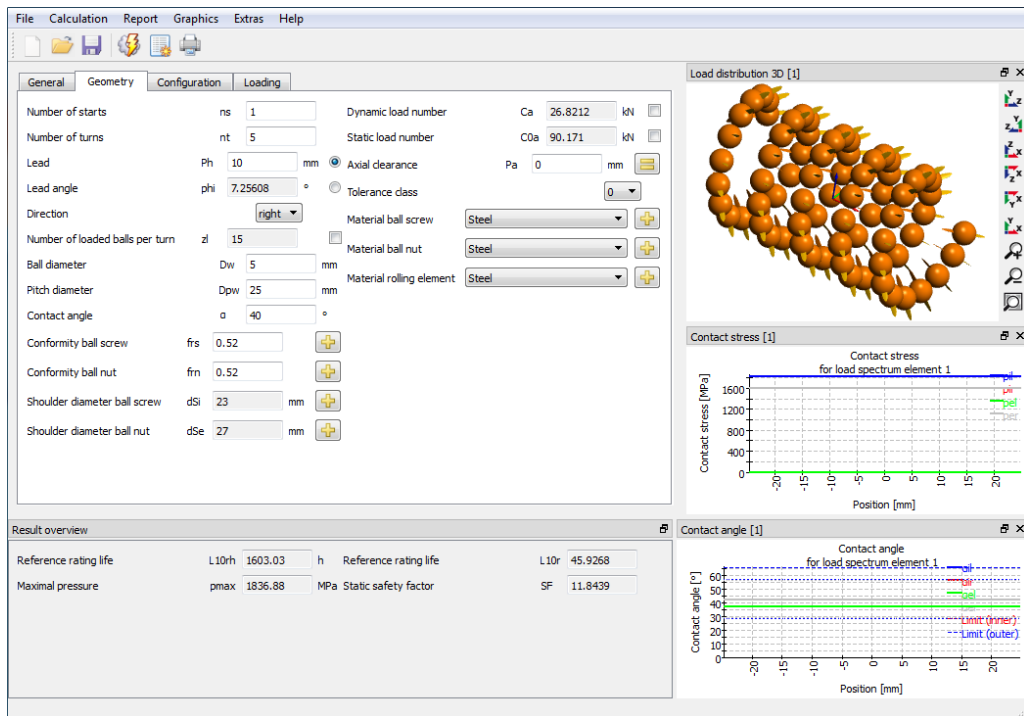
Wie bei der Einzellast kann man auch hier auswählen, ob der Ring relativ zur Last rotiert oder nicht. Ein nicht zur Last rotierender Ring wäre auf der sicheren Seite.

Die Lastverteilung wird für jeden Lastfall berechnet. Als Ergebnis wird die resultierende Lebensdauer für das gesamte Lastkollektiv angezeigt und die minimale statische Sicherheit aller Elemente. Die Ergebnisgrafiken werden nur für das Element des Lastkollektivs angezeigt, das auf dieser Seite als Ergebnis ausgewählt wurde.

## 4.2 Resultate

---

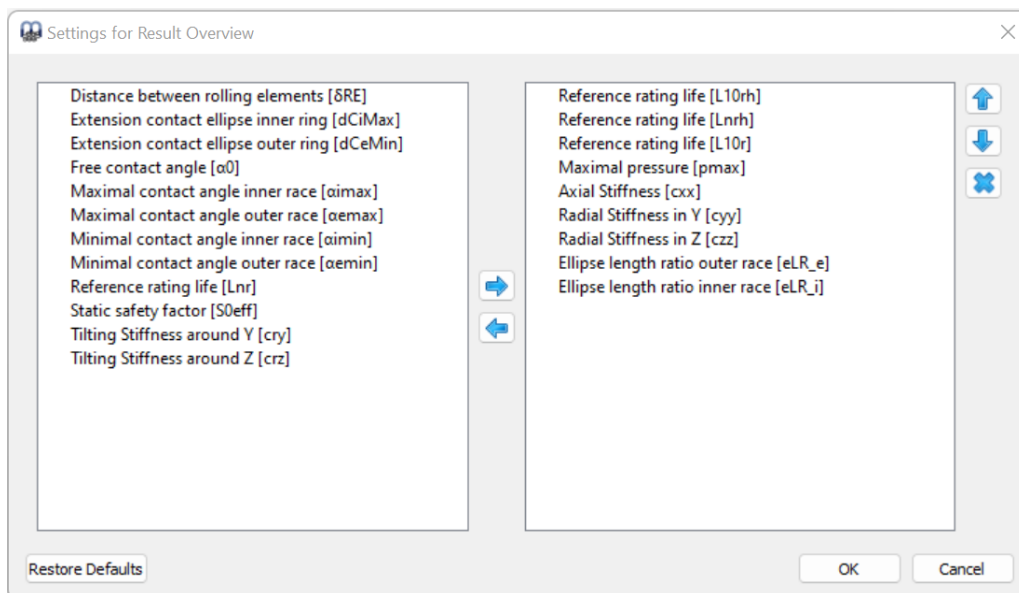
Ergebnisse werden in Form einer kleinen Resultateübersicht direkt in der Software, eines PDF-Protokolls und separater Grafikfenster bereitgestellt. Grafik-Fenster können an die Hauptprogrammoberfläche angedockt werden und werden bei jeder Berechnung automatisch aktualisiert.



## 4.2.1 Resultateübersicht

Die Resultateübersicht zeigt die Referenzlebensdauer  $L_{10r}$  in  $10^6$  Rotationen und die Referenzlebensdauer  $L_{10rh}$  in Stunden. Die maximale Pressung und die statische Sicherheit geben Auskunft über die maximale Belastung.

Die Resultateübersicht kann unter Extras->Resultateübersicht konfiguriert werden.



Die Liste links zeigt alle verfügbaren Einträge für die Resultateübersicht an. Mit den Pfeilen können die ausgewählten Einträge in die rechte Liste verschoben werden, die für die Resultateübersicht verwendet wird. Die Reihenfolge der ausgewählten Ergebnisse kann mit den Auf-/Abwärtspfeilen rechts geändert werden. Beachten

Sie, dass in der Resultateübersicht tatsächlich nur gültige Resultate-Werte angezeigt werden. Sie sehen also weniger Werte als in den Einstellungen ausgewählt.

Die Einstellungen der Resultateübersicht werden in den Benutzereinstellungen gespeichert, nicht in der Datei der Berechnung. Sie sind also für verschiedene Berechnungen gleich.

## 4.2.2 Hauptprotokoll der Ergebnisse

Das Textprotokoll wird im PDF-Format erstellt.

Im Menü "Protokoll->Optionen" kann der Inhalt des Protokolls konfiguriert werden. Die einzubeziehenden Grafiken können ausgewählt werden und einige Abschnitte des Protokolls können verworfen werden, wenn sie nicht von Interesse sind. Die Legende für alle Parameter der Tabelle kann im Protokoll angezeigt werden.

### 4.2.2.1 Speichern des Hauptprotokolls

Das Hauptprotokoll kann über das Menü "Protokoll->Speichern als" in verschiedenen Formaten gespeichert werden. Er kann als PDF, DOC, DOCX oder ODT (Open Office) Format gespeichert werden.

### 4.2.2.2 Protokoll-Logo anpassen

Standardmäßig wird oben auf dem Protokoll ein MESYS Logo angezeigt. Dies kann angepasst werden, indem ein Logo in der Datei "mesys.ini" definiert wird. Das Logo sollte in einer Größe erstellt werden, dass es in die Kopftabelle passt. Die DPI-Einstellung im Logo wird berücksichtigt, so dass auch ein hochauflösendes Bild verwendet werden kann. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, eine eigene Vorlage der unterstützten Dateiformate (DOC, DOCX und ODT) zu erstellen und daraus das Protokoll zu generieren, wodurch die Möglichkeit besteht, das Logo anzupassen.

## 4.2.3 Grafiken

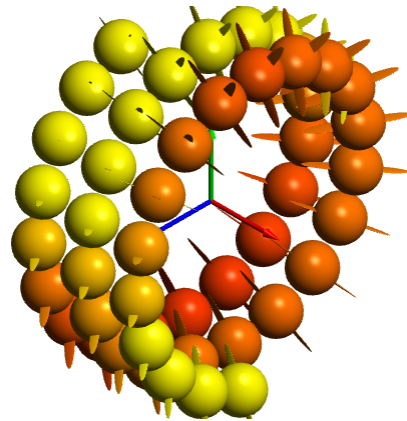
Mehrere Ergebnisse können als Grafiken dargestellt werden. Alle Grafiken werden auch an das Protokoll angehängt, so dass eine vollständige Dokumentation in einem Dokument vorliegt.

Über das Kontextmenü (rechte Maustaste) kann die Grafik in einem Grafikfenster als Datei exportiert oder gedruckt werden.



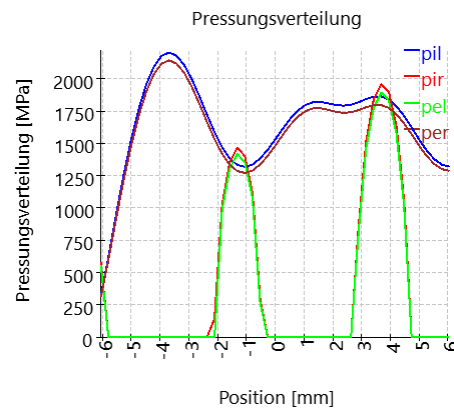
### 4.2.3.1 Lastverteilung 3D

Hier wird die Kontaktspannung einer Kugelgewindetriebs in einer 3D-Ansicht dargestellt.



### 4.2.3.2 Pressungsverteilung

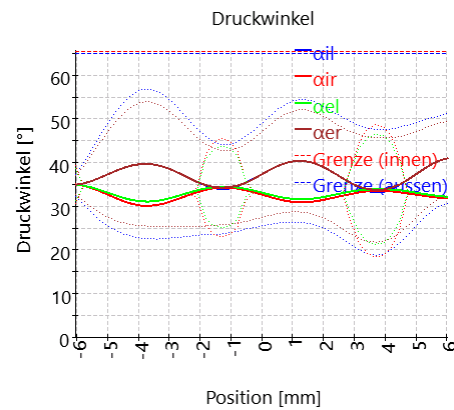
Die Pressungsverteilung ist für jede Kugel und jeden der vier möglichen Kontakte dargestellt.



### 4.2.3.3 Druckwinkel zum Kontakt

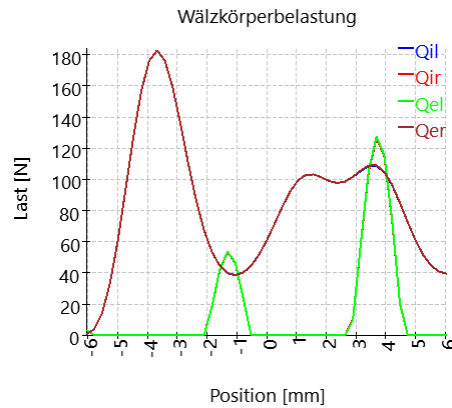
Der Druckwinkel ist für einen Nennkontaktwinkel von 35° dargestellt.

Die Ausdehnung der Kontaktellipse ist durch die gestrichelten Linien dargestellt. Der Winkel zum Kontakt mit dem Absatz ist als gestrichelte gerade Linie oben dargestellt, so dass der Absatz in diesem Fall hoch genug ist.



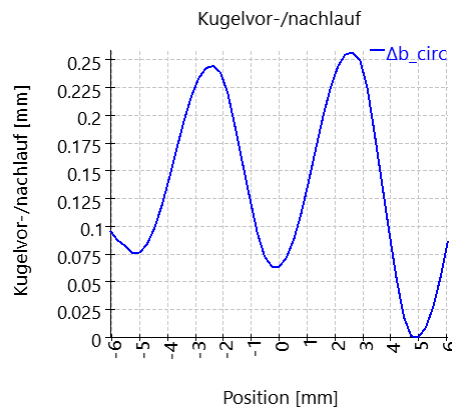
### 4.2.3.4 Belastung der Kugeln

This diagram shows the forces on each ball for the up to four contacts. Dieses Diagramm zeigt die Kräfte, die auf jede Kugel bei bis zu vier Kontakten wirken.



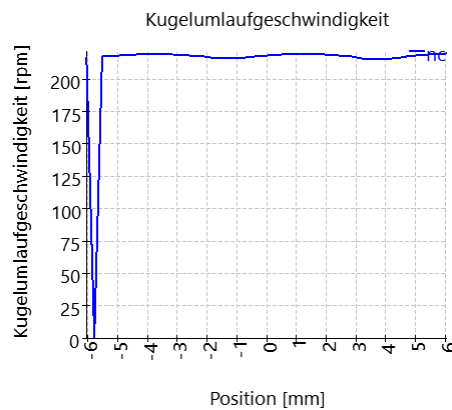
### 4.2.3.5 Kugelvornachlauf

Der Kugelvornachlauf wird als Grafik dargestellt. Er basiert auf der Annahme, dass die Umlaufgeschwindigkeit jeder Kugel in einem Abschnitt konstant ist. Aufgrund der unterschiedlichen Winkel zum Kontakt variiert die Kugelumlaufgeschwindigkeit zwischen den Wälzkörpern. Die Berechnung erfolgt wie bei Kugellagern, die Steigung wird nicht berücksichtigt. Eine Verringerung des Vor-/Nachlaufs der Kugeln bedeutet, dass die nächste Kugel langsamer ist, was zu Kräften zwischen den Kugeln führt. Bei der Berechnung der Kugelumlaufgeschwindigkeit wird ein Kontakt zwischen den Kugeln nicht berücksichtigt.



### 4.2.3.6 Kugelumlaufgeschwindigkeit

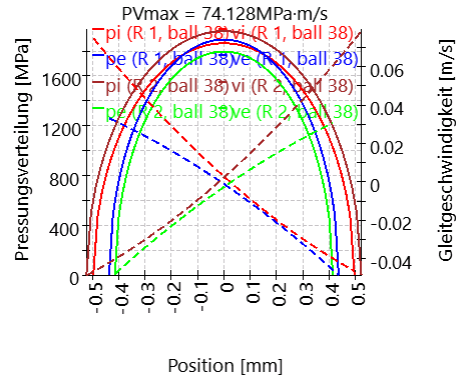
Bei der Berechnung der Kugelumlaufgeschwindigkeit wird ein Kontakt zwischen den Kugeln nicht berücksichtigt.



### 4.2.3.7 Kontaktspannung und Gleitgeschwindigkeit auf der grossen Halbachse

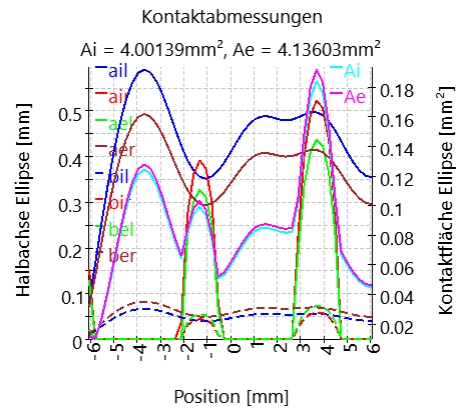
Kontaktspannung und Gleitgeschwindigkeit werden über der grossen Halbachse der Kontaktellipse für die Kugel mit dem maximalen PV-Wert angezeigt. Mit den Graphioptionen kann ein anderer Kontakt ausgewählt werden.

essung und Gleitgeschwindigkeit auf grösserer Halbachs



### 4.2.3.8 Kontaktabmessungen

Die Abmessungen der Kontaktellipsen und der Kontaktflächen sind in diesem Diagramm dargestellt. Die Abmessungen für die Halbachsen sind auch in den Resultatetabellen verfügbar.





# MESYS Hertz Berechnung

## 5 MESYS Hertz Berechnung

Die MESYS Hertz-Berechnung (Version 06/2024) berechnet die Hertzschon Pressungen und Schubspannungen unter der Oberfläche für Punkt- oder Linienkontakt.

Die folgenden Ergebnisse sind im Protokoll zu finden:

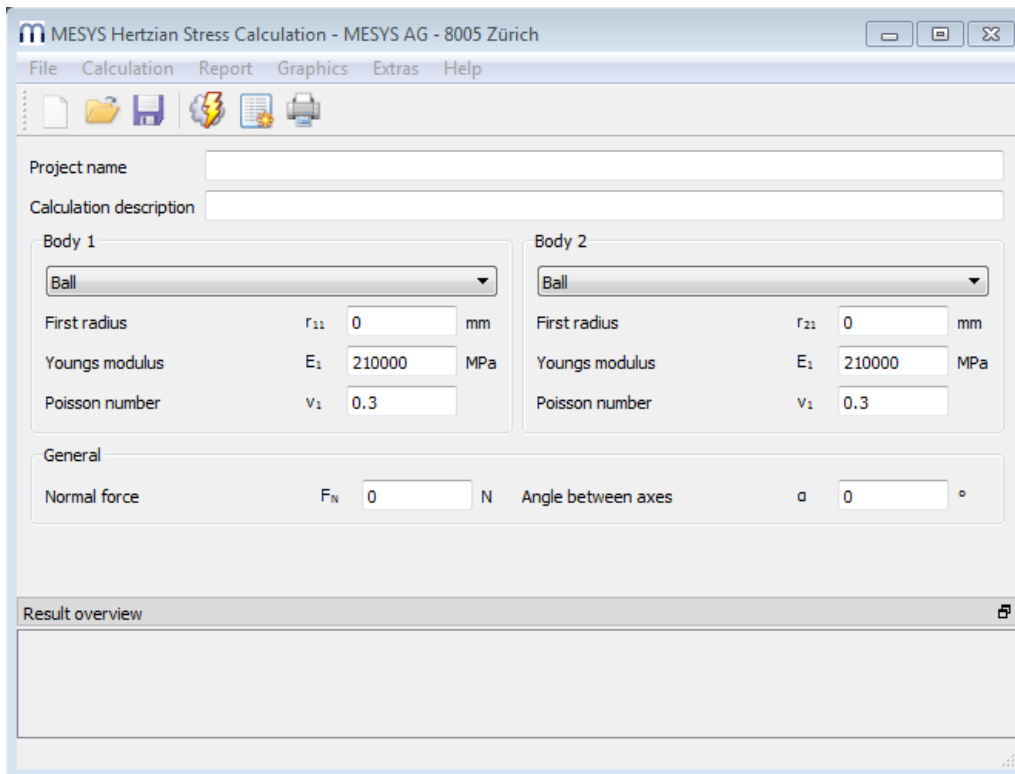
- Grössere Halbachse der Druckellipse a
- Kleinere Halbachse der Druckellipse b
- Annäherung der beiden Körper
- Kontaktsteifigkeit R
- Hertzische Pressung
- Maximale Schubspannung
- Maximale oktaedrische Schubspannung
- Tiefe für max. Schubspannung
- Tiefe für max. oktaedrische Schubspannung
- Vergleichsspannung (Tresca)
- Vergleichsspannung (Mises)

Zusätzlich zum Protokoll werden die Ergebnisse in mehreren Grafiken dargestellt. Sowohl das Protokoll als auch die Benutzeroberfläche sind in metrischen oder US-Einheiten verfügbar. Unterstützte Sprachen für Benutzeroberfläche und Protokoll sind Englisch, Deutsch, Französisch, Spanisch, Italienisch, Türkisch, Japanisch, Chinesisch und Koreanisch.

### 5.1 Eingabeparameter

---

Alle Eingaben werden auf einer eigenen Seite angezeigt:

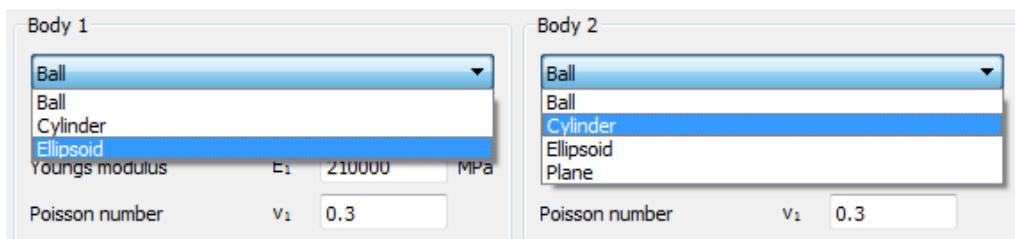


## 5.1.1 Projektname und Beschreibung der Berechnung

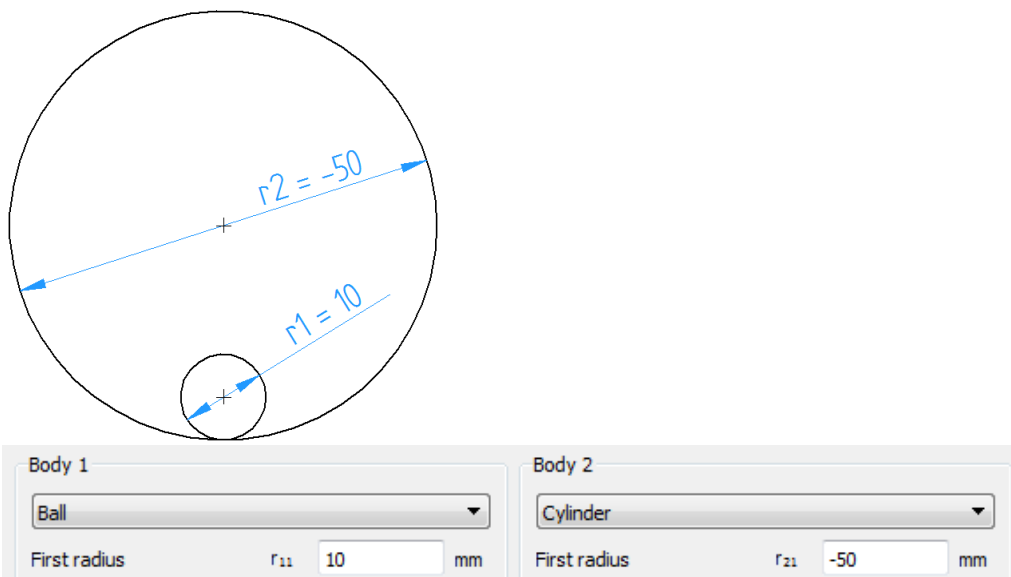
Der Projektname und die Beschreibung der Berechnung sind lediglich Eingaben, die im Protokollkopf angezeigt werden. Sie können verwendet werden, um Informationen über den Zweck der Berechnung zur Dokumentation einzugeben.

## 5.1.2 Körper im Kontakt

Körper wie Kugel, Zylinder, Ellipsoid und Ebene sind in den Dropdown-Listen der Querschnitte "Körper 1" und "Körper 2" verfügbar. Alle Kombinationen sind möglich, mit Ausnahme des Kontakts zwischen Ebene und Ebene.

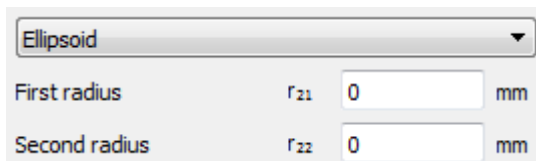


### 5.1.2.1 Krümmungsradien



Bei Kugeln und Zylindern wird nur ein Radius benötigt. Beachten Sie, dass konkave Flächen durch negative Werte definiert werden müssen.

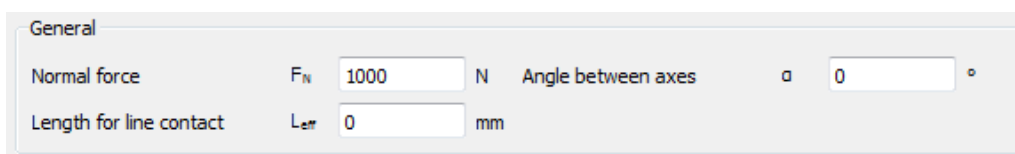
Bei einem Ellipsoid müssen die beiden Radien angegeben werden, so dass diese Eingabe bei Auswahl aktiviert wird:



### 5.1.2.2 Werkstoffeigenschaften

Für die in Kontakt stehenden Körper werden nur der Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl benötigt. Die Spannungen für beide Körper sind für gleiche Werkstoffe gleich, für unterschiedliche Werkstoffe können sie sich unterscheiden.

### 5.1.3 Allgemein



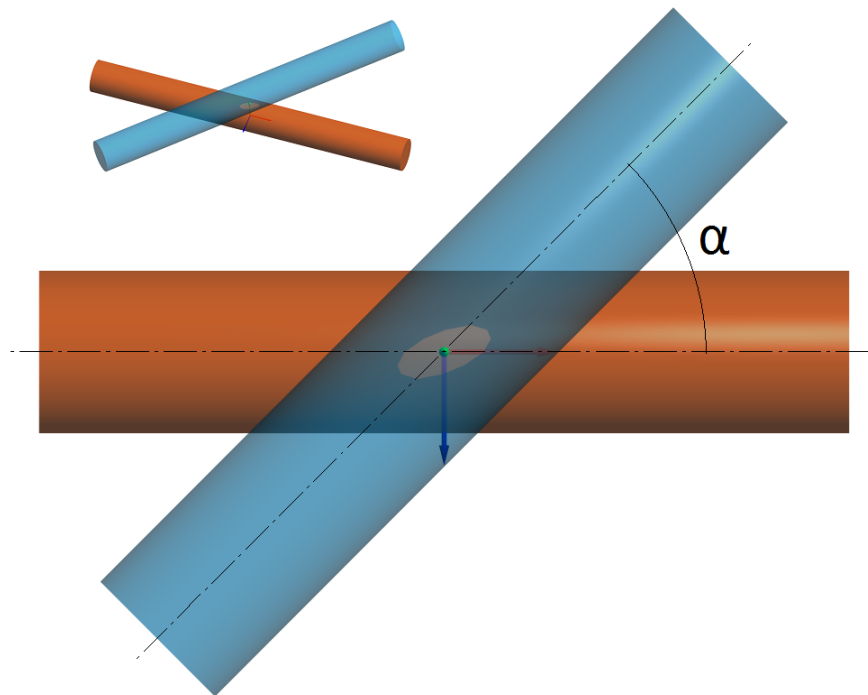
#### 5.1.3.1 Normalkraft

Hier wird die Kontaktkraft als Normalkraft angegeben.



### 5.1.3.2 Winkel zwischen den Achsen

Die Krümmungsradien von zwei Körpern können in zwei Ebenen angegeben werden, und es kann ein Winkel zwischen diesen Ebenen bestimmt werden. Der Winkel wird zwischen den Geraden definiert, die senkrecht zu den Ebenen stehen, in denen die Radien  $r_{11}$  und  $r_{21}$  liegen, wie in der Abbildung dargestellt:



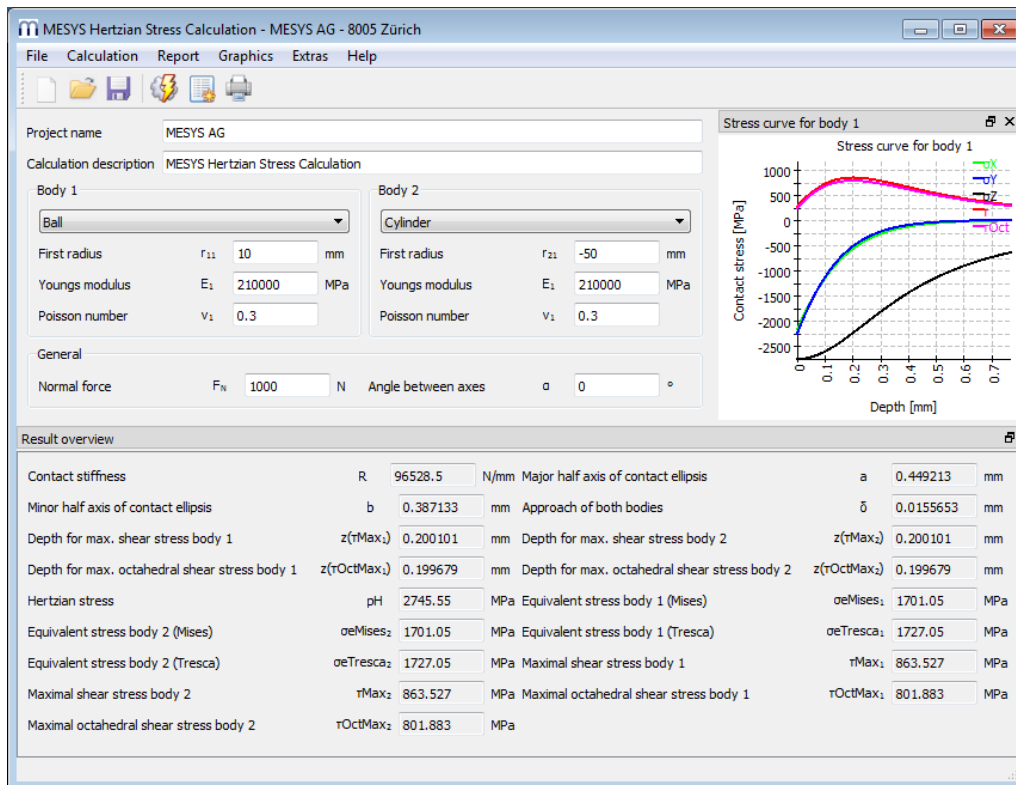
### 5.1.3.3 Länge für Linienkontakt

Für den Fall, dass zwei Zylinder in Kontakt stehen, ist es erforderlich, die Länge für Linienkontakt zu definieren, daher wird das entsprechende Eingabefeld unter 'Allgemein' aktiviert, wie im Bild oben gezeigt.

## 5.2 Resultate

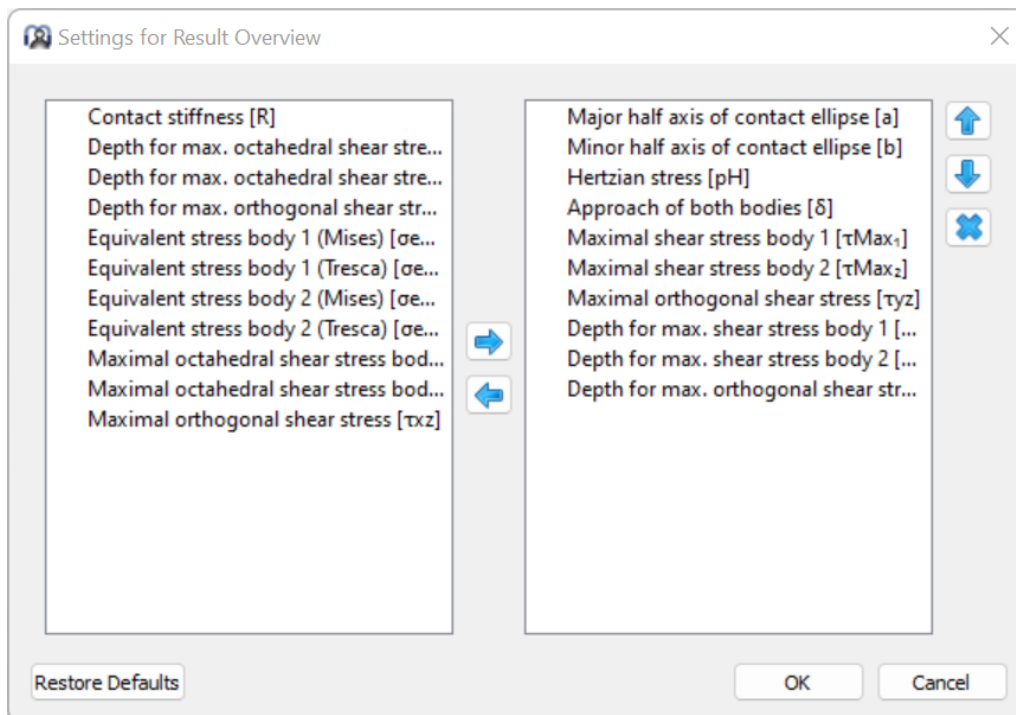
---

Ergebnisse werden in Form einer kleinen Resultateübersicht direkt in der Software, eines PDF-Protokolls und separater Grafikfenster bereitgestellt. Grafik-Fenster können an die Hauptprogrammoberfläche angedockt werden und werden bei jeder Berechnung automatisch aktualisiert.



## 5.2.1 Resultateübersicht

Die Ergebnisübersicht am unteren Rand des Fensters zeigt die wichtigsten Ergebnisse an. Die Resultateübersicht kann unter Extras->Resultateübersicht konfiguriert werden.



Die Liste links zeigt alle verfügbaren Einträge für die Resultateübersicht an. Mit den Pfeilen können die ausgewählten Einträge in die rechte Liste verschoben werden, die für die Resultateübersicht verwendet wird. Die Reihenfolge der ausgewählten Ergebnisse kann mit den Auf-/Abwärtspfeilen rechts geändert werden. Beachten Sie, dass in der Resultateübersicht tatsächlich nur gültige Resultate-Werte angezeigt werden. Sie sehen also weniger Werte als in den Einstellungen ausgewählt.

Die Einstellungen der Resultateübersicht werden in den Benutzereinstellungen gespeichert, nicht in der Datei der Berechnung. Sie sind also für verschiedene Berechnungen gleich.

## 5.2.2 Hauptprotokoll der Ergebnisse

Das Textprotokoll wird im PDF-Format erstellt.

Im Menü 'Protokoll->Optionen' kann der Inhalt des Protokolls konfiguriert werden. Die einzubeziehenden Grafiken können ausgewählt werden und einige Abschnitte des Protokolls können verworfen werden, wenn sie nicht von Interesse sind. Die Legende für alle Parameter der Tabelle kann im Protokoll angezeigt werden.

### 5.2.2.1 Speichern des Hauptprotokolls

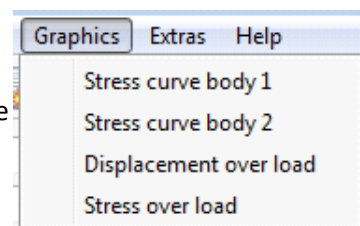
Das Hauptprotokoll kann über das Menü "Protokoll->Speichern als" in verschiedenen Formaten gespeichert werden. Er kann als PDF, DOC, DOCX oder ODT (Öffnen Office) Format gespeichert werden.

### 5.2.2.2 Protokoll-Logo anpassen

Standardmäßig wird oben auf dem Protokoll ein MESYS Logo angezeigt. Dies kann angepasst werden, indem ein Logo in der Datei "mesys.ini" definiert wird. Das Logo sollte in einer Größe erstellt werden, dass es in die Kopftabelle passt. Die DPI-Einstellung im Logo wird berücksichtigt, so dass auch ein hochauflösendes Bild verwendet werden kann. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, eine eigene Vorlage der unterstützten Dateiformate (DOC, DOCX und ODT) zu erstellen und daraus das Protokoll zu generieren, um so die Möglichkeit zu haben, das Logo anzupassen.

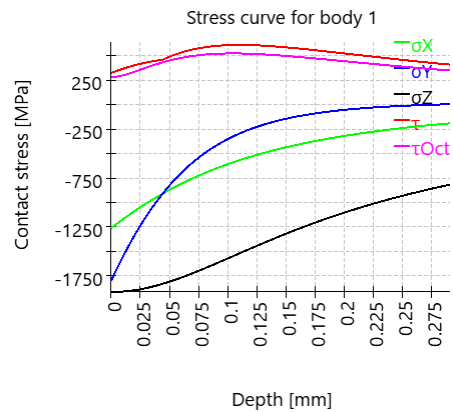
## 5.2.3 Grafiken

Alle verfügbaren Diagramme finden Sie unter dem Menüpunkt 'Grafiken'. In der aktuellen Version können die Spannungsverläufe für beide Körper sowie die Verschiebungen über Last oder die Spannungen über Last analysiert werden.



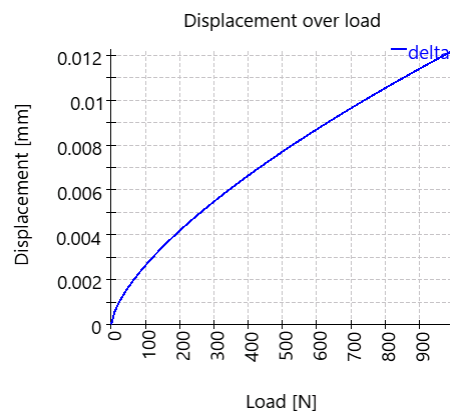
### 5.2.3.1 Spannungsverläufe für Körper 1 und Körper 2

Dargestellt sind die maximale Hauptspannung ( $\sigma_{xx}$   $\sigma_{yy}$   $\sigma_{zz}$ ), die maximale Scherspannung ( $\tau$ ) und die maximale oktaedrische Scherspannung ( $\tau_{Oct}$ ) an der Kontaktlinie unter den Oberflächen.



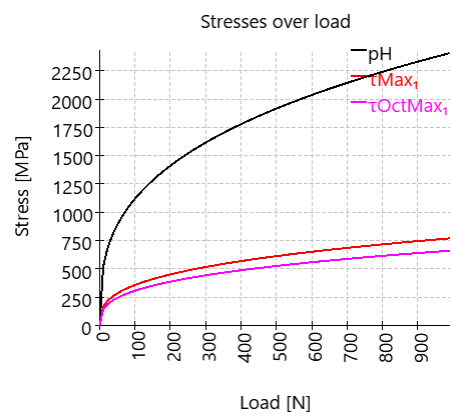
### 5.2.3.2 Verschiebungen über Last

Dieses Diagramm zeigt, wie sich die Körper (1 und 2) mit zunehmender Last um die Beträge  $\delta_1$  und  $\delta_2$  aufeinander zu bewegen. Delta ist also die gesamte Abnahme des Abstands um einen Betrag  $\delta = \delta_1 + \delta_2$  zwischen den Punkten auf den Körpern, die nicht von der lokalen Deformation nahe 0 betroffen sind.



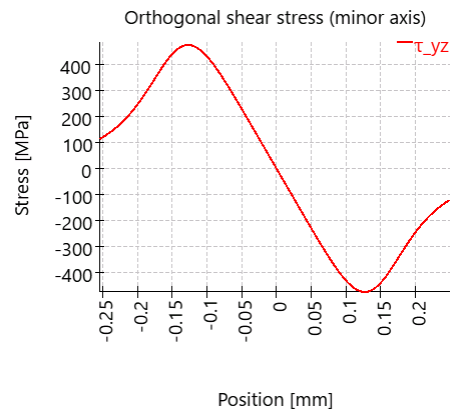
### 5.2.3.3 Spannungen über Last

Hier werden die Hertzische Pressung, die maximale Scherspannung und die maximale oktaedrische Spannung gegenüber der Last dargestellt.



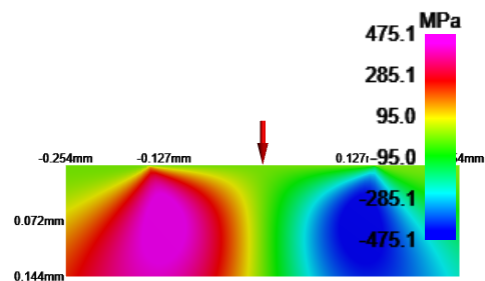
### 5.2.3.4 Orthogonale Schubspannung

Die orthogonale Schubspannung wird in einem Diagramm über der Neben- und Hauptachse der Kontaktellipse dargestellt.



### 5.2.3.5 Orthogonale Schubspannung 2D

Die orthogonale Schubspannung wird in einer 2D-Farbdarstellung über der Haupt- und Nebenachse der Kontaktellipse angezeigt.





# MESYS Axial-Radial-Rollenlager

## 6 MESYS Axial-Radial-Rollenlager

Die Berechnungssoftware für Axial-/Radial-Rollenlager oder dreireihige Drehverbindungen (Version 06/2024) berücksichtigt Verformungen der Lagerringe mittels Finite-Elemente-Analyse. Die Geometrie der Lager von axialsymmetrischen Ringen kann vom Anwender durch ein Polygon im Querschnitt definiert werden. Es kann eine beliebige Anzahl von Axial- oder Radial-Zylinderrollenlagern bzw. Kreuzrollenlagern definiert werden und die Schraubenvorspannung wird berücksichtigt. Belastungen können flächig oder punktförmig aufgebracht werden. Für die Berechnung der Steifigkeit ist eine Berechnung einer Serie mit Variation der Last möglich.

Als Resultate stehen die folgenden Daten in mehreren Grafiken und einem PDF-Protokoll zur Verfügung:

- Die Pressungsverteilung auf die Rollen
- Die Lagerlebensdauer für jede Reihe und das System nach [ISO 16281](#)<sup>351</sup>
- Die Deformation und die Steifigkeit, definiert durch zwei Punkte
- Die maximale und minimale Last auf den Schrauben

### 6.1 Allgemeine Bedienung

Die Software kann mit einem Dateinamen in der Befehlszeile aufgerufen werden. Die Ergebnisse können mit dem Parameter "-save" gespeichert werden. Beispiel: "MesysAxRaRBC64.exe Datei1.xml -save"

Bei größeren Modellen kann die Berechnungszeit bis zu einer Stunde betragen. Daher wird die folgende Vorgehensweise empfohlen: Wählen Sie "Nur Präprozessing" und erstellen Sie das Modell interaktiv. Speichern Sie das Modell und führen Sie die Berechnung über die Kommandozeile aus. Anschließend können die Ergebnisse in das Programm geladen werden, um die Ergebnisse auszuwerten.

Die Anzahl der in der FEA verwendeten Prozessorkerne kann durch Änderung des folgenden Eintrags in mesys.ini geändert werden:

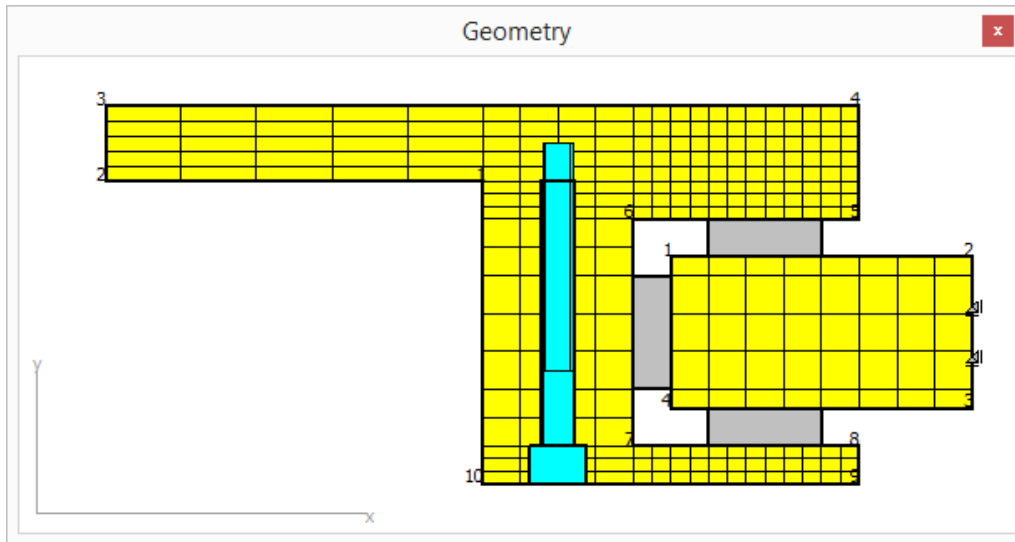
```
[axrabc]
numberofthreads=2
```

Die Verwendung von mehr als four Threads führt nur zu geringen Verbesserungen.



## 6.2 Eingaben

Die Eingabedaten werden auf mehreren Eingabeseiten bereitgestellt, die auf den folgenden Seiten beschrieben werden. Die Eingabedaten beziehen sich auf die folgende Geometrie:



### 6.2.1 Allgemein

| General                                                          | Geometry of parts                                        | Bolts                                                       | Bearings                                | Cross roller bearings | Loading | Load spectrum | Results |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|---------|---------------|---------|
| <b>General</b>                                                   |                                                          |                                                             |                                         |                       |         |               |         |
| Project name <input type="text"/>                                |                                                          |                                                             |                                         |                       |         |               |         |
| Calculation description <input type="text"/>                     |                                                          |                                                             |                                         |                       |         |               |         |
| Number of parts                                                  | <input type="text" value="1"/>                           | Number of radial bearings                                   | <input type="text" value="0"/>          |                       |         |               |         |
| Maximum angle for mesh                                           | $\Psi_{max}$ <input type="text" value="0"/> °            | Number of axial bearings                                    | <input type="text" value="0"/>          |                       |         |               |         |
| Number of bolted joints                                          | <input type="text" value="0"/>                           | Number of cross roller bearings                             | <input type="text" value="0"/>          |                       |         |               |         |
| <input type="checkbox"/> Consider load spectrum                  |                                                          | Number of surface loads                                     | <input type="text" value="0"/>          |                       |         |               |         |
| <input checked="" type="checkbox"/> Preprocessing only           |                                                          | Reliability for bearings                                    | Z <input type="text" value="90"/> %     |                       |         |               |         |
| <input checked="" type="checkbox"/> Allow general geometry input |                                                          |                                                             |                                         |                       |         |               |         |
| <b>Calculation of series</b>                                     |                                                          |                                                             |                                         |                       |         |               |         |
| <input type="checkbox"/> Activate calculation for series         |                                                          | Number of steps                                             | <input type="text" value="3"/>          |                       |         |               |         |
| Start factor                                                     | <input type="text" value="0"/>                           | End factor                                                  | <input type="text" value="1"/>          |                       |         |               |         |
| <b>Lubrication</b>                                               |                                                          |                                                             |                                         |                       |         |               |         |
| Viscosity at 40°C                                                | nu40 <input type="text" value="220"/> mm <sup>2</sup> /s | Oil lubrication with on-line filter ISO4406 -/17/14         |                                         |                       |         |               |         |
| Viscosity at 100°C                                               | nu100 <input type="text" value="19"/> mm <sup>2</sup> /s | Temperature                                                 | TOil <input type="text" value="50"/> °C |                       |         |               |         |
| <input type="checkbox"/> contains effective EP additives         |                                                          | <input checked="" type="checkbox"/> Calculate modified life |                                         |                       |         |               |         |

#### 6.2.1.1 Anzahl Bauteile

Das Lager kann aus mehreren Bauteilen zusammengesetzt sein. In der Regel werden zwei Bauteile verwendet. Für die Anzahl Bauteile gibt es keine Beschränkung.

### 6.2.1.2 Anzahl der Lager

Hier kann die Anzahl der Radial-, Axial- und Kreuzrollenlager festgelegt werden. Im Normalfall werden ein Radial- und zwei Axiallager benötigt.

### 6.2.1.3 Maximaler Winkel für Vernetzung

Für das Vernetzen in Umfangsrichtung kann ein Maximaler Winkel definiert werden. Bei einem Wert von Null ergibt sich der Winkel aus der Anzahl Schrauben und Rollen. Der Winkel kann nur verkleinert, aber nicht vergrößert werden.

Ein großer Winkel kann zu einer erhöhten Steifigkeit der Bauteile führen. Um den Einfluss des Winkels abzuschätzen, können einige Berechnungen zum Vergleich durchgeführt werden.

### 6.2.1.4 Anzahl Schraubenreihen

Optional können ein oder mehrere Schraubenreihen berücksichtigt werden.

### 6.2.1.5 Lastkollektiv berücksichtigen

Ein Lastkollektiv kann berücksichtigt werden. Ist eine Serienberechnung aktiviert, können nur mehrere Drehzahlen definiert werden. Ohne Serienberechnung können auch unterschiedliche Lasten pro Lastkollektiv-Element definiert werden.

### 6.2.1.6 Nur Präprozessing

Wenn diese Option aktiviert ist, wird nur das Modell erstellt, aber keine FEA beim Ausführen der Berechnung durchgeführt.

### 6.2.1.7 Allgemeine Geometrieingabe zulassen

Wenn diese Option nicht gesetzt ist, wird die Geometrie nur durch horizontale und vertikale Linien definiert. Dadurch ist eine Koordinate pro Geometrie-Linie ausreichend und die zweite wird automatisch gesetzt.


Ist die Option aktiviert, müssen alle Koordinaten für die Geometrie definiert werden, aber ein allgemeines Polygon ist als Geometrie erlaubt. Es wird dann ein Vernetzungsalgorithmus verwendet, der zu weniger Elementen führt als bei nur horizontalen und vertikalen Linien.

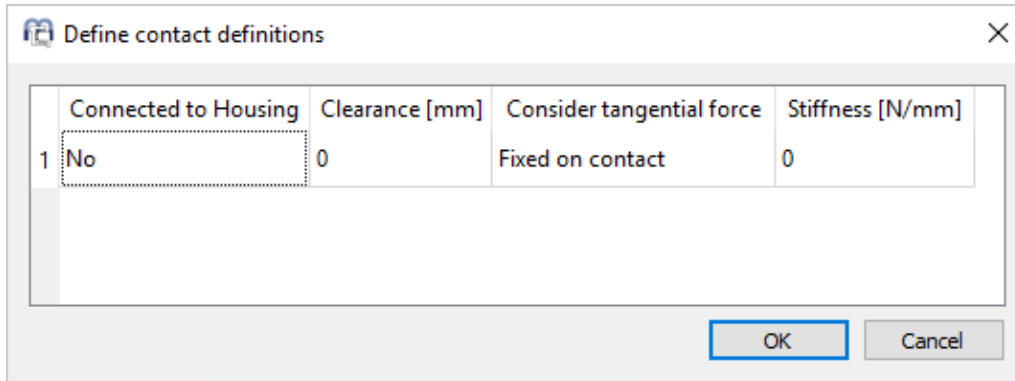
### 6.2.1.8 Anzahl Flächenlasten

Mit diesem Eingabewert kann die Anzahl der auf Flächen wirkenden Belastungen definiert werden.

### 6.2.1.9 Anzahl der Kontakte

Ein Kontakt zwischen Bauteilen oder zwischen einem Bauteil und der starren Umgebung kann definiert werden, wenn 'Allgemeine Geometrieingabe zulassen' aktiviert ist. Die Anzahl der Kontakte ist die Anzahl der Kontaktdefinitionen. Jede Definition kann mehrfach verwendet werden.

Die -Schaltfläche ermöglicht es, die Eigenschaften für jede Kontakt-Definition zu definieren:



|   | Connected to Housing | Clearance [mm] | Consider tangential force | Stiffness [N/mm] |
|---|----------------------|----------------|---------------------------|------------------|
| 1 | No                   | 0              | Fixed on contact          | 0                |

Die erste Spalte definiert, ob der Kontakt zwischen einem Bauteil und der starren Umgebung (dem 'Gehäuse') oder zwischen zwei Bauteilen besteht.

Die zweite Spalte erlaubt es, das Spiel im Kontakt zu definieren.

Alle Kontakte führen zu einer Normalkraft im Kontaktfall, aber es gibt verschiedene Optionen für die Tangentialkraft, die in der dritten Spalte definiert werden kann:

- "Fest bei Kontakt" führt zu einer Einschränkung der tangentialen Bewegung im Kontaktfall.
- "Keine Bedingung" führt zu keiner Einschränkung in tangentialer Richtung.
- "Verschweisst" führt immer zu einer tangentialen Einschränkung. Darüber hinaus können auch die Normalkräfte in beide Richtungen wirken.

Die Eingabe der Steifigkeit in der letzten Spalte sollte in den meisten Fällen gleich Null sein. Falls ein Wert größer Null eingegeben wird, wird dieser für die Normalsteifigkeit verwendet. Dies kann nützlich sein, um ein Bauteil mit geringer Steifigkeit im Raum zu fixieren. Da die Steifigkeit pro Knoten verwendet wird, hängt ihre Wirkung von der Netzfeinheit ab.

### 6.2.1.10 Zuverlässigkeit von Wälzlagern

Die Zuverlässigkeit von Wälzlagern beträgt standardmäßig 90%. Die Eingabe wird für die Berechnung des Lebensdauerbeiwerts  $a_1$  verwendet.

Die Zuverlässigkeit ist für alle Lagerreihen auf den gleichen Wert eingestellt.

### 6.2.1.11 Serienberechnung

Eine Serie von Lastfällen kann durch Multiplikation der Last mit einem Faktor berechnet werden.

Der Lastfaktor für die erste Berechnung ist der 'Start Faktor' für die letzte Berechnung wird der 'End Faktor' verwendet. Dazwischen wird eine bestimmte Anzahl von Schritten berechnet. Für die Ergebnisse steht eine Auswahl für den in Grafiken dargestellten Lastschritt zur Verfügung.

### 6.2.1.12 Schmierung

Für die Berechnung der erweiterten Lebensdauer wird die Definition des Schmierstoffs benötigt. Die Viskosität des Schmierstoffs wird für die Schmierstofftemperatur anhand der Referenzwerte bei 40°C und 100°C berechnet.

Die Auswahl 'Schmierung berücksichtigen' bestimmt, ob die erweiterte Lebensdauer  $L_{nmrh}$  und die Daten zur Schmierung im Protokoll angezeigt werden. Bei einer kleinen Drehzahlen findet keine wirksame Schmierung statt und der  $a_{ISO}$  Faktor nähert sich 0,1.

Die Sauberkeit des Schmierstoffs wird durch den Faktor eC berücksichtigt. Es kann definiert werden, ob der Schmierstoff wirksame EP Additive enthält, die einen Einfluss auf den  $a_{ISO}$  Faktor bei kleinen Drehzahlen haben.

Der eC Faktor kann entweder durch die Reinheit des Schmierstoffs definiert werden oder vom Anwender eingegeben werden. Eine Übersicht der empfohlenen eC-Faktoren ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

| Verunreinigungsgrad                                                                                                                                         | eC               |                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|
|                                                                                                                                                             | $D_{pw} < 100mm$ | $D_{pw} \geq 100mm$ |
| <b>Extreme Sauberkeit</b><br>Partikelgröße in der Größenordnung der Schmierfilmdicke, Laborbedingungen                                                      | 1                | 1                   |
| <b>Hohe Sauberkeit</b><br>Feinstfilterung der Ölzufuhr; typische Bedingungen bei einem gefetteten lebensdauer geschmierten Lager mit Dichtscheiben          | 0,8 bis 0,6      | 0,9 bis 0,8         |
| <b>Normale Sauberkeit</b><br>Öl durch einen Feinfilter gefiltert; typische Bedingungen bei einem gefetteten lebensdauer geschmierten Lager mit Deckscheiben | 0,6 bis 0,5      | 0,8 bis 0,6         |
| <b>Leichte Verunreinigung</b>                                                                                                                               | 0,5 bis 0,3      | 0,6 bis 0,4         |


|                                                                                                                                                                           |             |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| <b>Typische Verunreinigung</b><br>Typische Bedingungen bei Lagern ohne fest eingebaute Abdichtung; grobe Filterung; Verschleißpartikel und Fremdpartikel aus der Umgebung | 0,3 bis 0,1 | 0,4 bis 0,2 |
| <b>Starke Verunreinigung</b><br>Lagerumgebung stark verunreinigt und Lageranordnung nicht angemessen abgedichtet                                                          | 0,1 bis 0   | 0,1 bis 0   |
| <b>Sehr starke Verunreinigung</b>                                                                                                                                         | 0           | 0           |




## 6.2.2 Geometrie der Bauteile

Die Geometrie der Bauteile wird in einer Tabelle definiert. Die Punkte (Radius und y-Koordinate) müssen im Uhrzeigersinn eingegeben werden.

Wenn die allgemeine Geometrieeingabe nicht aktiviert ist, kann die Geometrie über horizontale und vertikale Linien definiert werden. Eine Koordinate, die nicht zum vorherigen Punkt geändert wird, kann auf Null gesetzt werden. So kann die Zahl der Eingaben um den Faktor zwei reduziert werden.

Ist die allgemeine Geometrieeingabe aktiviert, kann die Geometrie durch Linien in beliebiger Richtung definiert werden. In diesem Fall müssen alle Koordinatenwerte definiert werden.

Mit der -Schaltfläche hinter der Bezeichnung des Bauteils lassen sich die Werkstoffeigenschaften für dieses Bauteil definieren. Die Werkstoffdaten werden nur für die FEA-Berechnung dieses Bauteils verwendet, nicht für die Berechnung der Steifigkeit des Kontakts zwischen Rolle und Laufbahnen.

Mit den Schaltflächen unten rechts können zusätzliche Zeilen hinzugefügt oder gelöscht werden. Die -Schaltfläche kopiert die ausgewählte Zeile oder fügt eine neue Zeile hinzu, wenn nichts ausgewählt ist. Die -Schaltfläche löscht die ausgewählte Zeile und die -Schaltfläche löscht die gesamte Tabelle.

| General   Geometry of parts   Bolts   Bearings   Cross roller bearings   Loading   Load spectrum   Results |               |                                 |                 |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|
| Name <input type="text"/>                                                                                  |               |                                 |                 |                                         |
| Speed                                                                                                      | n             | <input type="text" value="20"/> | 1/min           | Maximum element size                    |
|                                                                                                            |               |                                 |                 | maxE <input type="text" value="20"/> mm |
|                                                                                                            | r-Coord. [mm] | y-Coord. [mm]                   | maxElement [mm] | Bearing/BC                              |
| 1                                                                                                          | 100           | 40                              | 0               | Not specified                           |
| 2                                                                                                          | 0             | 40                              | 0               | Not specified                           |
| 3                                                                                                          | 0             | 60                              | 0               | Not specified                           |
| 4                                                                                                          | 200           | 0                               | 0               | Surface load 1                          |
| 5                                                                                                          | 0             | 30                              | 4               | Not specified                           |
| 6                                                                                                          | 140           | 0                               | 5               | Axial bearing 1                         |
| 7                                                                                                          | 0             | -30                             | 0               | Radial bearing 1                        |
| 8                                                                                                          | 200           | 0                               | 5               | Axial bearing 2                         |
| 9                                                                                                          | 0             | -40                             | 4               | Not specified                           |
| 10                                                                                                         | 100           | 0                               | 10              | Bolted joint 1                          |
| 11                                                                                                         | 100           | 40                              | 10              | Not specified                           |

### 6.2.2.1 Größe der Elemente

Die Größe der Elemente kann als maximale Größe pro Bauteil oder in der dritten Spalte der Tabelle für eine einzelne Zeile definiert werden. Eine Eingabe von Null führt zu dem Standardwert.

Wenn in einem Bauteil Biegung zu erwarten ist, sind mehr Elemente erforderlich. Ein Element kann einen konstanten Spannungszustand korrekt modellieren. Für eine lineare Spannungsverteilung sind mehrere Elemente erforderlich.

### 6.2.2.2 Drehzahl

Die Rotationsgeschwindigkeit für die Berechnung der Lagerlebensdauer kann für jedes Bauteil festgelegt werden. Das Vorzeichen wird berücksichtigt, so dass ein Bauteil eine positive und ein Bauteil eine negative Drehzahl haben kann.

### 6.2.2.3 Randbedingungen

Randbedingungen können zeilenweise definiert werden. Die folgenden Auswahlmöglichkeiten stehen zur Verfügung:

- Radial fest: Alle Knoten für diese Fläche sind radial fest.
- Axial fest: Alle Knoten für diese Fläche sind axial fest.
- Radial und axial fest: Alle Knoten für diese Fläche sind radial und axial fest.
- Verschraubung: Der Kopf der Schrauben befindet sich auf dieser Ebene.

- Radiallager: Ein Radiallager ist mit dieser Ebene verbunden.
- Axiallager: Ein Axiallager ist mit dieser Ebene verbunden. Diese Eingabe wird zur axialen Positionierung verwendet.
- Kreuzrollenlager: Ein Kreuzrollenlager ist mit dieser Fläche verbunden.
- Flächenlast: Auf diese Fläche wird eine Last aufgebracht.
- Kontakt: Ein Kontakt zu einem zweiten Bauteil oder zur starren Umgebung wird berücksichtigt.

### 6.2.3 Verschraubung

Auf dieser Seite können die Daten für die Verschraubung festgelegt werden.

| Parameter                            | Symbol | Value | Unit | Parameter                                        | Symbol | Value | Unit |
|--------------------------------------|--------|-------|------|--------------------------------------------------|--------|-------|------|
| Number of bolts                      | Z      | 36    |      | Pitch diameter                                   | D      | 240   | mm   |
| Nominal diameter                     | d      | 8     | mm   | Bolt length                                      | L      | 80    | mm   |
| Bore diameter                        | dh     | 9     | mm   | Depth of bore                                    | H      | 80    | mm   |
| Diameter of counterbore              | dS     | 15    | mm   | Depth of counterbore                             | HS     | 10    | mm   |
| Assembly preload                     | F      | 20    | kN   | <input checked="" type="checkbox"/> Shank length | Ls     | 30    | mm   |
| Tightening torque                    | MA     | 0     | Nm   | Amount of embedding                              | fz     | 8     | µm   |
| Effective diameter of bolt head area | Dkm    | 0     | mm   | Pitch of the thread                              | P      | 1.25  | mm   |
| Friction coefficient head            | µk     | 0.1   |      | Friction coefficient thread                      | µs     | 0.1   |      |

Die Bohrung für die Schrauben und das Gewinde können sich im selben Bauteil befinden oder bei Kontaktdefinitionen in verschiedenen Teilen. Die Tiefe der Bohrung wird von der Oberfläche aus gemessen; das Gewinde im Bauteil beginnt unterhalb.

Wenn keine Senkung vorhanden ist, können der Durchmesser und die Tiefe der Senkung auf Null gesetzt werden. Der Zylinder mit dem Durchmesser der Senkung darf sich nicht mit den Kanten des Bauteils überschneiden. Gegebenenfalls muss der Durchmesser für die Berechnung reduziert werden.

Die Vorspannung wird pro Schraube definiert. Alle Schrauben haben die gleiche Vorspannung. Es kann entweder die effektive Vorspannung definiert werden oder ein Montagedrehmoment und ein Setzbetrag. Nach VDI 2230 beträgt der Setzbetrag für Oberflächenrauheiten zwischen  $10 < Rz < 40$   $3\mu\text{m}$  für den Kopf und das Gewinde und  $2\mu\text{m}$  für jede Lage. In den meisten Fällen wird er  $fz = 3+3+2 = 8\mu\text{m}$  betragen.

Die Steigung des Gewindes wird für die Berechnung des Kerndurchmessers der Schraube benötigt, der für ihre Steifigkeit erforderlich ist. Außerdem wird sie für die Berechnung der Vorspannkraft aus dem Anzugsmoment der Montage benötigt.

Wird das Anzugsmoment eingegeben, werden der mittlere Durchmesser der Kopfauflage und die Reibwerte für Gewinde und Kopfauflage benötigt.

## 6.2.4 Lager

Auf dieser Eingabeseite kann die Geometrie der Lager definiert werden.

The screenshot shows a software interface with several tabs: General, Geometry of parts, Bolts, Bearings, Cross roller bearings, Loading, Load spectrum, and Results. The 'Bearings' tab is active, showing two sections: 'Radial bearings' and 'Axial bearings'.

**Radial bearings section:**

- Number of rolling elements: Z = 70
- Diameter of rolling elements: Dw = 10 mm
- Pitch diameter: Dpw = 290 mm
- Effective length of roller: Lwe = 30 mm
- Radial clearance: Pd = 0 mm
- Axial position: pa = 0 mm
- Type of profile: Profile according ISO/TS 16281
- Surface hardness: HRC = 58
- Dynamic load number: Cr = 304.491 kN
- Static load number: C0 = 892.138 kN
- Fatigue load limit: Cu = 79.0494 kN

**Axial bearings section:**

- Number of rolling elements: Z = 70
- Diameter of rolling elements: Dw = 10 mm
- Pitch diameter: Dpw = 350 mm
- Effective length of roller: Lwe = 30 mm
- Axial clearance: Pa = -0.01 mm
- Axial position: pa = 25 mm
- Type of profile: Profile according ISO/TS 16281
- Surface hardness: HRC = 58
- Dynamic load number: Ca = 537.953 kN
- Static load number: C0 = 4620 kN
- Fatigue load limit: Cu = 386.908 kN

### 6.2.4.1 Anzahl Wälzkörper

Hier muss die Anzahl der Rollen festgelegt werden.

### 6.2.4.2 Durchmesser des Wälzkörpers

Hier wird der Durchmesser der Rollen definiert.

### 6.2.4.3 Teilkreis-Durchmesser

Der Teilkreisdurchmesser durch die Mittelpunkte der Rollen muss für beide Typen von Lagern definiert werden. Bei Radiallagern wird eine Warnung angezeigt, wenn der Teilkreisdurchmesser nicht zwischen den ausgewählten Ebenen liegt.



#### 6.2.4.4 Effektive Rollenlänge

Die effektive Länge der Rollen  $L_{we}$  ist die Länge, die bei der Berechnung der Tragfähigkeit zugrunde gelegt wird. Sie ist die Gesamtlänge der Rolle, reduziert um die Kantenradien.

#### 6.2.4.5 Radial-/Axialspiel

Das Spiel ist nicht durch die Abmessungen der Bauteile definiert, so dass es nur eine Eingabe für das Spiel gibt und es nicht erforderlich ist, die Geometrie mit vielen Nachkommastellen zu definieren. Das Spiel ist das Nennspiel vor dem Anziehen der Schrauben.

Eine Vorspannung ist als negatives Spiel definiert.

#### 6.2.4.6 Axiale Position

Hier wird die axiale Position der Mitte der Rolle eingegeben. Bei Axiallagern wird die axiale Position durch die Lage der ausgewählten Ebenen der Bauteile bestimmt.

#### 6.2.4.7 Profilierung

Es können Profile für Innenring, Außenring und Rolle definiert werden.

Define roller profiles
✕

Difference between effective and total roller length     $\Delta L_w$   mm

Number of roller sections used    nSec

Roller

Type of profile    Standard profile according ISO/TS 16281 ▾

Profile definition over effective roller length    ▾

Inner race

Type of profile    Tangential crowning ▾

Profile definition over total roller length    ▾

Profile    pr   $\mu\text{m}$

Unmodified cylindrical part    Lwu  %

Outer race

Type of profile    User defined ▾

Profile definition over total roller length    ▾

Profile    pr   $\mu\text{m}$

Als allgemeine Eingaben kann die Differenz zwischen effektiver und gesamter Rollenlänge definiert werden. Da sie die Steifigkeit der Rolle erhöht, hat sie einen Einfluss auf die Berechnung.

Die Anzahl der Abschnitte für die Berechnung muss größer als 30 sein und eine ungerade Zahl sein. Die Berechnungsgenauigkeit und die Berechnungszeit nehmen mit einer größeren Anzahl von Abschnitten zu.

Für die Definition der Profilierung stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Standard-Profil nach ISO/TS 16281:  
Hierbei werden die Vorgaben der Norm verwendet, d.h. logarithmisches Profil der Rolle und keine Profilierung der Laufringe.
2. Logarithmisches Profil:  
Der Betrag der Rücknahme kann definiert werden und ein zylindrischer Anteil, das nicht modifiziert werden soll. Es wird die folgende Formel verwendet:

$$P(x) = pr \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - \left\{ \frac{2|x| - L_{wu}}{L_{we} - L_{wu}} \right\}^2} \right)$$

Für die Rolle wird über eine Schaltfläche die Standardrücknahme nach ISO/TS 16281 vorgegeben. Die Standard-Rücknahme von  $0,00035 \cdot D_w$  für kurze Zylinderrollenlager entspricht einer Kontaktspannung von 3000MPa.

### 3. Modifiziertes logarithmisches Profil:

Die Höhe der Rücknahme wird nach folgender Formel berechnet, die aus (Fujiwara, et al., 2010) abgeleitet ist:

$$P(x) = A \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - \left\{ 1 - e^{-\frac{pr}{A}} \right\} \left( \frac{2|x| - L_{wu}}{L_{we} - L_{wu}} \right)^2} \right)$$

$$A = 2D_w \cdot \left( \frac{p \cdot (1 - \nu^2)}{E} \right)^2$$

Die maximale Rücknahme ist nicht unendlich an der Kante der Rolle wie bei der logarithmischen Profilierung nach ISO/TS 16281, sondern begrenzt auf den Maximalwert von  $pr$ .

Bei der Verwendung von  $p = 3000\text{MPa}$  und  $pr = \text{Unendlich}$  sind die Ergebnisse dieselben wie bei der logarithmischen Profilierung nach ISO/TS 16281 (Oberhalb).

Die Werkstoffdaten für dieses Profil werden immer von dem Kontakt Rolle/Innenring übernommen.

### 4. Tangentiale Balligkeit:

Zur Profilierung wird ein tangential zum Zylinder verlaufender Kreisbogen verwendet. Der Betrag der Rücknahme und ein Prozentsatz der unveränderten Zylinderlänge können festgelegt werden.

### 5. Balligkeit:

Zur Profilierung wird ein Kreisbogen mit axialer Positionierung in der Mitte der Rolle verwendet. Der Betrag der Rücknahme und ein Prozentsatz der unveränderten Länge des Zylinders sowie ein Übergangsradius können definiert werden.

### 6. Zwei tangentielle Radien:

Ein erstes zylindrisches Bauteil mit der Breite " $L_{wu}$ " wird durch zwei tangentielle Radien verlängert. Die Breite für den ersten Radius wird als Prozentsatz " $L_{wr1}$ " definiert. Eine Anforderung ist " $L_{wr1} > L_{wu}$ ". " $L_{wu}$ " kann auf Null gesetzt werden, um nur zwei Radien zu haben.

7. Exponent

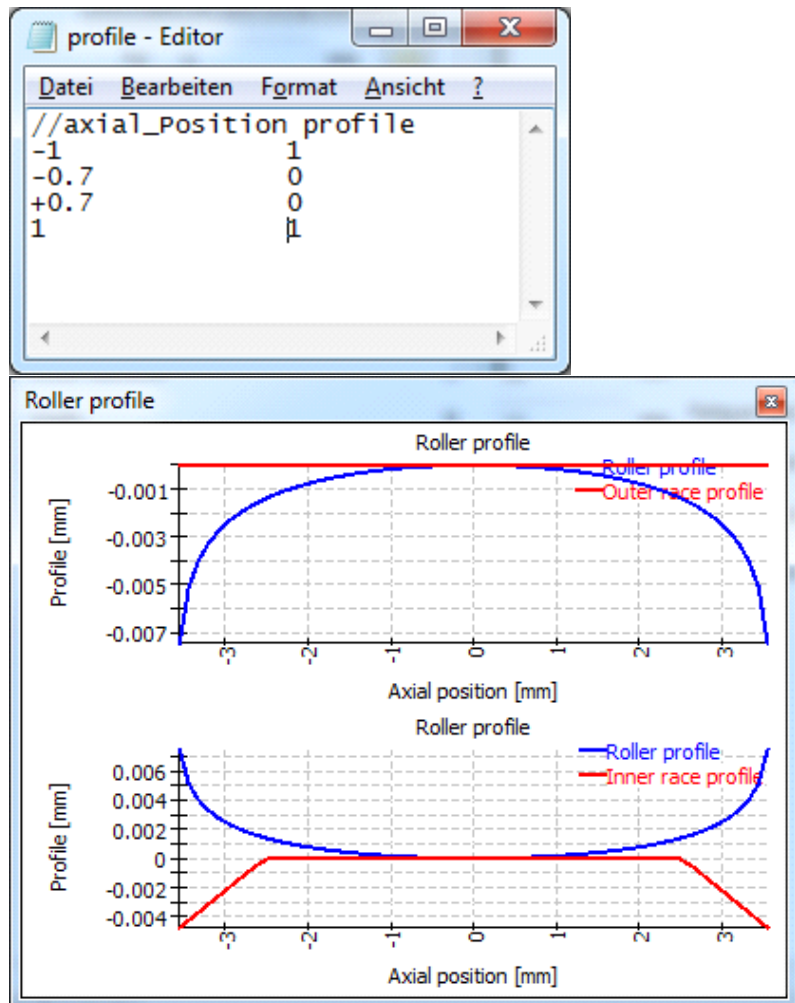
Es kann ein Exponent "e" und eine unveränderte Länge "Lwu" für die Profilierung angegeben werden. Der Exponent muss sein  $e \geq 2$ . Für die Profilierung wird die folgende Formel verwendet:

$$P(x) = pr \cdot \left( \frac{2|x| - L_{wu}}{L_{we} - L_{wu}} \right)^e$$

8. Datei einlesen:

Das Profil kann aus einer Datei gelesen werden. Die Daten müssen mit zwei Werten in jeder Zeile angegeben werden, einer axialen Position und der Rücknahme. Die axiale Position wird mit der Länge der Rolle und die Rücknahme mit der Eingabe für die Profilierung skaliert. So kann ein Bereich von -1 bis +1 für die Axiale Position und 0 bis 1 für die Rücknahme verwendet werden.

Eine sehr einfache Datei wird hier gezeigt. Sie wurde für die Profilierung des Innenrings auf der rechten Seite ausgewählt:



Das unsymmetrische Profil wird für die meisten Lager von links nach rechts verwendet. Bei Kegelrollenlagern und Axial-Pendelrollenlagern werden die Profile von links nach rechts verwendet, wenn die Richtung des Druckwinkels links ist. Bei Druckwinkel zum Kontakt nach rechts wird

das Profil gespiegelt. Die Bedingungen für den Einbau haben also keinen Einfluss auf die Profilierung.

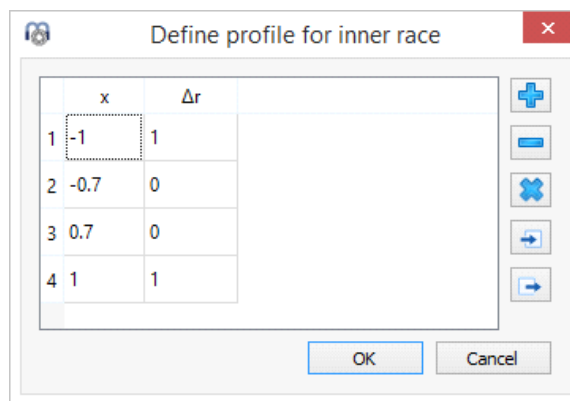
#### 9. Datei ohne Skalierung lesen:

Wie bei der Option "Datei einlesen" werden die Daten aus einer Datei gelesen. Mit dieser Option wird keine Skalierung vorgenommen. Die axiale Ausdehnung muss von  $-L_{we}/2$  bis  $+L_{we}/2$  oder von 0 bis  $L_{we}$  definiert werden. Die Profilierung ist in "mm" definiert und wird nicht mit skaliert.

#### 10. Eigene Eingaben:

Anstatt eine Bezeichnung für die Datei zu definieren, können die Punkte für die Profilierung in einer Tabelle definiert werden. Auch hier gilt, wie oben, ein Bereich von -1 bis +1 für die axiale Position und ein Wert zwischen 0 und 1 für die Profilierung.

Die Tabelle im Diagramm rechts zeigt die gleichen Daten wie die Datei oben.



#### 11. Benutzerdefinierte Formel:

Eine benutzerdefinierte Formel kann in der ECMAScript-Sprache definiert werden. Die Variable 'x' hat den Bereich  $-1 < x < +1$  und die Variablen 'Dw', 'Lwe', 'Lw' sind definiert und in 'mm'. Das Ergebnis der Gleichung wird in 'mm' betrachtet und ein positiver Wert vergrößert den Abstand.

Beispiele sind "return 0.01\*x\*\*4;" oder "return -

0.00035\*Dw\*Math.log(1-x\*x);" oder mit Bedingungen wie

```
if(x < -0.5) {
 return 0.01*(-0.5-x);
}
if(x > 0.5) {
 return 0.01*(x-0.5);
}
return 0;
```

### 6.2.4.8 Oberflächenhärte

Die Oberflächenhärte wird verwendet, um die Tragzahlen der Lager gemäß der NREL-Richtlinie DG03 zu reduzieren. Nur eine Härte von weniger als 58 HRC führt zu

einer Reduktion der Tragzahlen. Die Härte wird nur berücksichtigt, wenn die Tragzahlen von der Software berechnet werden.

### 6.2.4.9 Dynamische Tragzahl

Die dynamische Tragzahl wird nach ISO 281 berechnet. Ihr Wert kann vom Anwender überschrieben werden. Die Härte wird bei Werten unter 58HRC wie folgt berücksichtigt:

$$C' = C \left( \frac{HRC}{58} \right)^{3.6}$$

Wird die Tragzahl vom Benutzer eingegeben, wird keine weitere Reduktion um die Härte berücksichtigt.

### 6.2.4.10 Statische Tragzahl

Die statische Tragzahl wird nach ISO 76 berechnet. Ihr Wert kann vom Anwender überschrieben werden. Die Last wird mit dem folgenden Wert  $f_s$  für reduzierte Härte multipliziert:

$$f_s = 2 \left( \frac{HV}{800} \right)^2 \text{ mit } f_s \leq 1$$

Wird die Last vom Anwender eingegeben, wird keine weitere Härteabnahme berücksichtigt.

### 6.2.4.11 Ermüdungsbelastung

Die Ermüdungsbelastung wird gemäß ISO 281 Anhang B.3.2.1.3 berechnet. Der Wert kann vom Anwender überschrieben werden.

## 6.2.5 Kreuzrollenlager

The screenshot shows the 'Cross roller bearings' configuration window in the MESYS software. The window has several tabs: 'General', 'Geometry of parts', 'Bolts', 'Bearings', 'Cross roller bearings' (selected), 'Loading', 'Load spectrum', and 'Results'. The 'Cross roller bearings' tab contains the following parameters and controls:

- Number of rolling elements:** Z, value 0, with navigation arrows and '1/1'.
- Diameter of rolling elements:** Dw, value 0 mm.
- Pitch diameter:** Dpw, value 0 mm.
- Effective length of roller:** Lwe, value 0 mm.
- Radial clearance:** Pd, value 0 mm.
- Axial position:** pa, value 0 mm.
- Configuration:** Cross roller bearing (dropdown menu).
- Calculated as:** Radial bearing (dropdown menu).
- Contact angle:**  $\alpha$ , value 0°.
- Surface hardness:** HRC, value 58.
- Dynamic load number:** Cr, value 0 kN, with a checkbox.
- Static load number:** C0r, value 0 kN, with a checkbox.
- Fatigue load limit:** Cur, value 0 kN, with a checkbox.
- Type of profile:** Profile according ISO/TS 16281 (dropdown menu).

Für Kreuzrollenlager sind drei zusätzliche Eingaben im Vergleich zu den anderen Lagertypen erforderlich:

### Konfiguration

Zusätzlich zu den Kreuzrollenlagern gibt es auch eine Berechnung mit Schrägrollenlagern. In diesem Fall haben alle Rollen die gleiche Orientierung.

Die Anzahl der Rollen ist jeweils die Gesamtzahl. Bei Kreuzrollenlagern muss es eine gerade Zahl sein.

### Berechnet als

Das Lager kann als Axial- oder Radiallager berechnet werden. Je nach Auswahl werden als Eingaben entweder  $C_a$ ,  $C_{0a}$ ,  $P_a$  oder  $C_r$ ,  $C_{0r}$ ,  $P_d$  angezeigt.

### Druckwinkel

Der Druckwinkel kann zwischen  $40^\circ$ - $50^\circ$  gewählt werden. Standard ist  $45^\circ$ . Für Schrägrollenlager beträgt der zulässige Bereich  $20^\circ$ - $70^\circ$ .

## 6.2.6 Belastung

Die Last kann als Punkt- oder Flächenlast definiert werden. Flächenlasten sind wegen der sanfteren Lasteinleitung zu bevorzugen. Punktlasten können nur innerhalb eines Bauteils definiert werden.

The screenshot shows the 'Loading' tab in the MESYS software. It is divided into two main sections: 'Surface loads' and 'Point loads'.

**Surface loads:**

- Force in x-direction:  $F_x = 0$  kN
- Force in y-direction:  $F_y = -200$  kN
- Force in z-direction:  $F_z = 0$  kN
- Moment around x-axis:  $M_x = 0$  Nm
- Moment around z-axis:  $M_z = 0$  Nm
- Checkboxes:  is varied in series,  calculate stiffness

**Point loads:**

| x-Pos. [mm] | y-Pos. [mm] | z-Pos. [mm] | Fx [kN] | Fy [kN] | Fz [kN] | Series |
|-------------|-------------|-------------|---------|---------|---------|--------|
|             |             |             |         |         |         |        |

Wenn "in Serie variieren" ausgewählt ist, wird die Kraft bei aktiver Serienberechnung mit dem Faktor für Belastung multipliziert. Die Option wird auch verwendet, um die Kraft in das Lastkollektiv zuzufügen, wenn dieses aktiv ist.

Wenn die Option "Steifigkeit berechnen" aktiv ist, wird die Steifigkeit für die ausgewählte Fläche berechnet und im Protokoll ausgegeben. Ein Zentralknoten wird durch Mittelwertbildung mit der Fläche verbunden und dann wird die Berechnung der Steifigkeit für diesen Knoten durchgeführt. Die Werte im Protokoll sind die Kehrwerte der Hauptdiagonalen der Nachgiebigkeitsmatrix.

### 6.2.6.1 Flächenlasten

Flächenlasten können durch eine Eingabe von drei Kraft- und zwei Momenten-Komponenten definiert werden. Ein Drehmoment um die y-Achse kann vom Lager nicht aufgenommen werden, daher ist es als Eingabe nicht verfügbar.

Für jede Belastung kann ausgewählt werden, ob die Belastung in einer Serienberechnung mit einem Faktor für Belastung multipliziert werden soll. Wenn nicht ausgewählt, wird die Last für alle Lastschritte als konstant angesehen.

### 6.2.6.2 Punktlasten

Punktlasten werden durch einen Kraftvektor mit drei Komponenten und einer Position definiert. Die Position muss sich innerhalb eines Bauteils befinden.

Für Punktlasten kann auch definiert werden, ob die Last mit einem Lastfaktor in der Serienberechnung multipliziert oder als konstant angenommen werden soll.

Die Punktlast wird über mehrere Knoten in der Nachbarschaft der gegebenen Position eingeleitet, so dass der Lastschwerpunkt an der gewählten Position liegt.

### 6.2.7 Lastkollektiv

Wenn die Berechnung des Lastkollektivs aktiviert wurde, kann es auf der Seite "Lastkollektiv" definiert werden. Es werden nur Lasten angezeigt, bei denen das Flag "wird in Serie variiert" gesetzt ist.

|   | Frequency | P1-n [rpm] | P2-n [rpm] | SL1-Fx [kN] | SL1-Fy [kN] | SL1-Fz [kN] | SL1-Mx [Nm] | SL1-Mz [Nm] |
|---|-----------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0.5       | 20         | 0          | 0           | -200        | 0           | 0           | 0           |
| 2 | 0.5       | 30         | 0          | 100         | -300        | 0           | 0           | 0           |



## 6.3 Resultate

The screenshot shows the 'Results' tab in the MESYS software. It contains several input fields and a checkbox. The 'Results' section has a 'Clear results' button, a 'Current result' indicator (3/3), and fields for 'Factor for displacements' (200), 'Angle for graphic deformation' (0 degrees), 'Minimal stress for graphics' (sigma\_min: -200 MPa), and 'Maximal stress for graphics' (sigma\_max: 200 MPa). The 'Calculation of stiffness' section has fields for 'Radius point 1' (r1: 20 mm), 'Axial position point 1' (y1: 60 mm), 'Radius point 2' (r2: 230 mm), and 'Axial position point 2' (y2: -20 mm). There is also a checkbox for 'generate short report'.

Wenn die Ergebnisseite aktiv ist, ist die Auswertung der Ergebnisse ohne eine neue FEA-Berechnung möglich. Durch Drücken der Schaltfläche Berechnen werden die Ergebnisse lediglich ausgewertet.

### 6.3.1 Faktor für Verschiebungen

Der Faktor für Verschiebungen definiert die Überhöhung der Deformationen, die in Grafiken verwendet werden. Er wird in der 3D-Ansicht und 2D-Ansicht für die Deformation eines Querschnitts verwendet.

### 6.3.2 Winkel für Grafik Deformationen

Hier kann der Winkel für den Querschnitt gewählt werden, der in der 2D-Ansicht für Deformationen verwendet wird. Derselbe Winkel wird in den Diagrammen für Spannungen innerhalb der Bauteile verwendet.

### 6.3.3 Minimale und Maximale Spannung für Grafiken

Für die Spannungsdiagramme kann hier der Bereich für die Farbskala eingestellt werden.

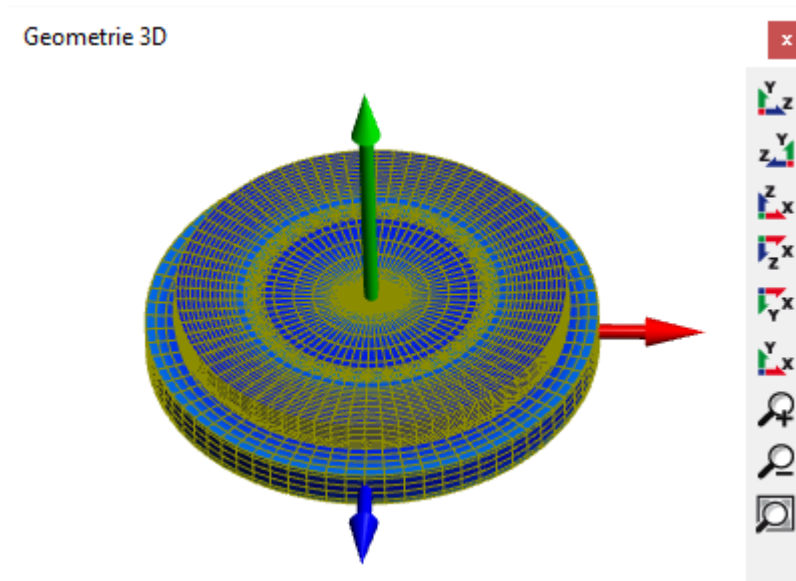
### 6.3.4 Berechnung der Steifigkeit berechnen

Für die Berechnung der Steifigkeit und die Diagramme für Verformung und Kippwinkel müssen zwei Punkte definiert werden. Die Software bildet für diese Punkte den Mittelwert der Verformungen um den Umfang herum, und das Ergebnis wird zur Berechnung eines Wertes für die Steifigkeit verwendet.

### 6.3.5 Grafiken

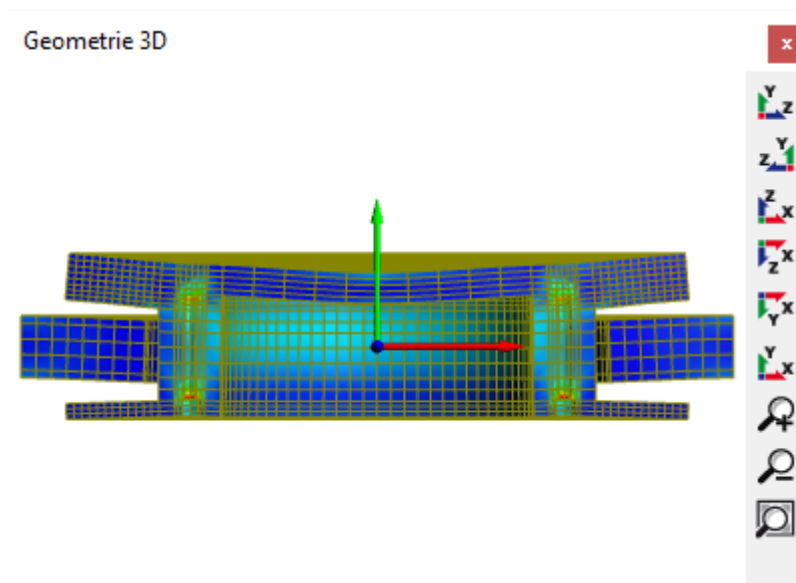
#### 6.3.5.1 3D-Ansicht

Die 3D-Ansicht kann mit der linken Maustaste rotiert werden. Mit der Ctrl-Taste kann die Größe verändert werden.



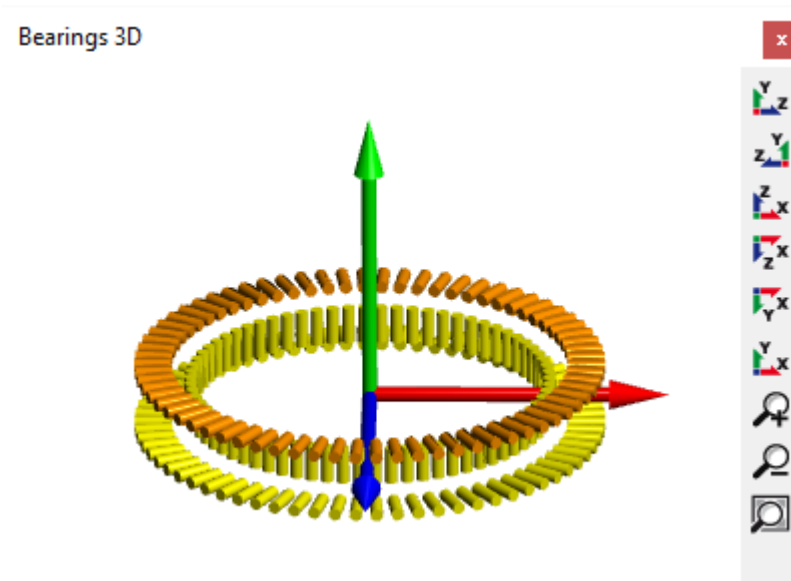
### 6.3.5.2 Geometrie 3D Geometrie Schnittdarstellung

Die 3D Geometrie Schnittdarstellung ist ein Schnitt der 3D Geometrie unter Verwendung des auf der Ergebnisseite definierten Winkels.



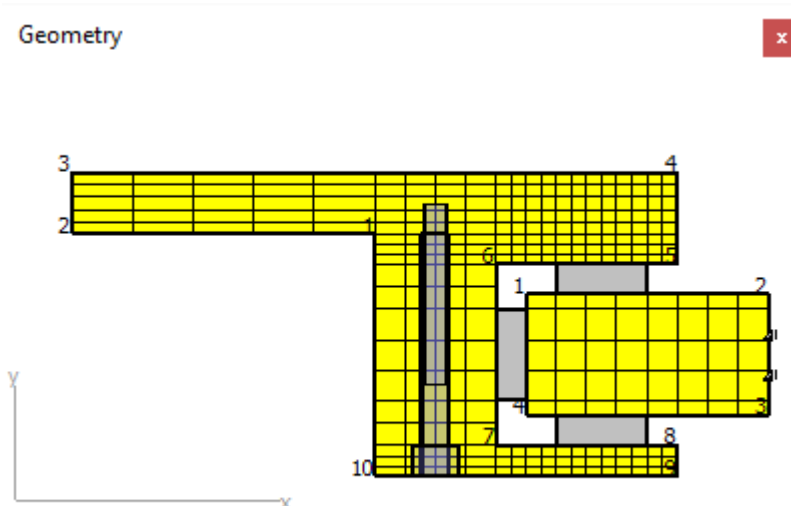
### 6.3.5.3 Wälzlager 3D

Die Lastverteilung kann auf dem 3D-Lagersatz dargestellt werden.



### 6.3.5.4 Geometrie

Die Grafik 'Geometrie' ist nach dem Präprozessing verfügbar. Sie kann verwendet werden, um die Vernetzung und die Position von Schrauben und Lagerreihen zu prüfen.

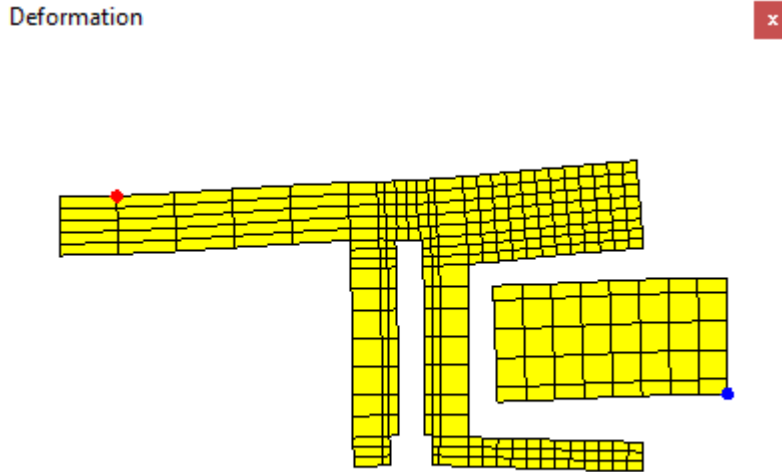


### 6.3.5.5 Deformation

Die Grafik 'Deformation' zeigt das deformierte Vernetzen für einen bestimmten Winkel an. Die beiden Punkte zur Auswertung der Verschiebungen sind farblich

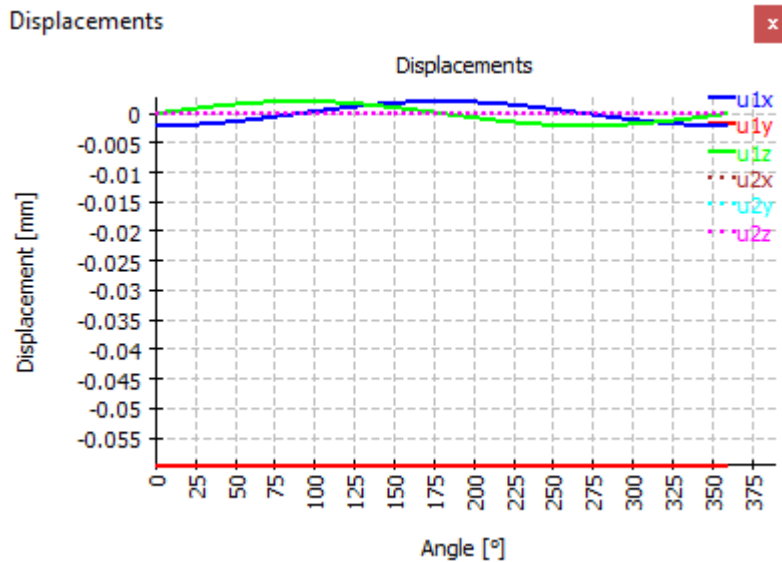
gekennzeichnet.

Der erste Punkt ist in rot, der zweite in blau dargestellt.



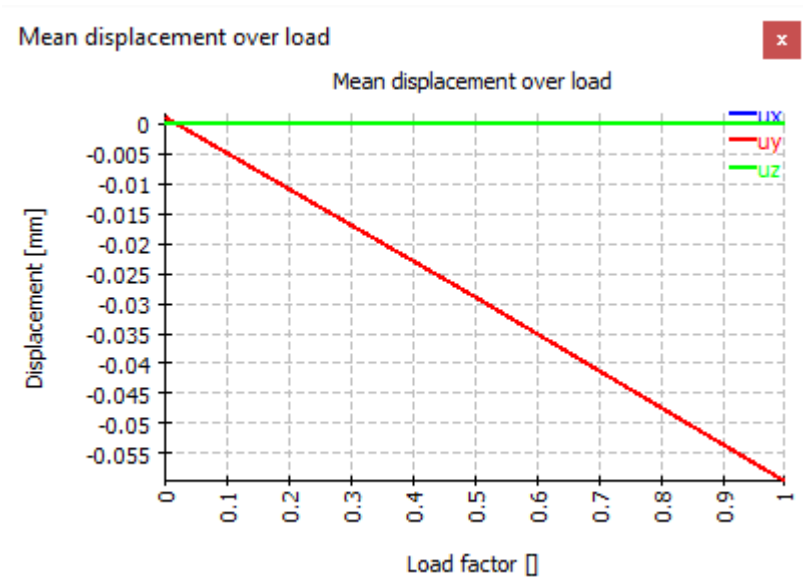
### 6.3.5.6 Verschiebungen

Die Verschiebungen für die ausgewählten Punkte werden über den Umfang angezeigt.



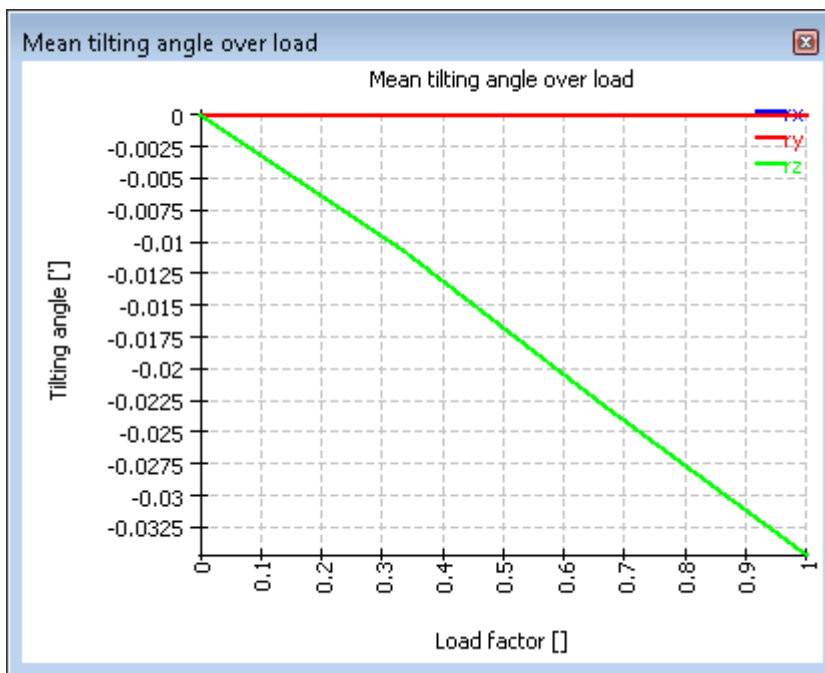
### 6.3.5.7 Verschiebungen über Lastfaktor

Im Falle einer Serienberechnung werden die mittleren Verschiebungen über dem Lastfaktor ausgewiesen.



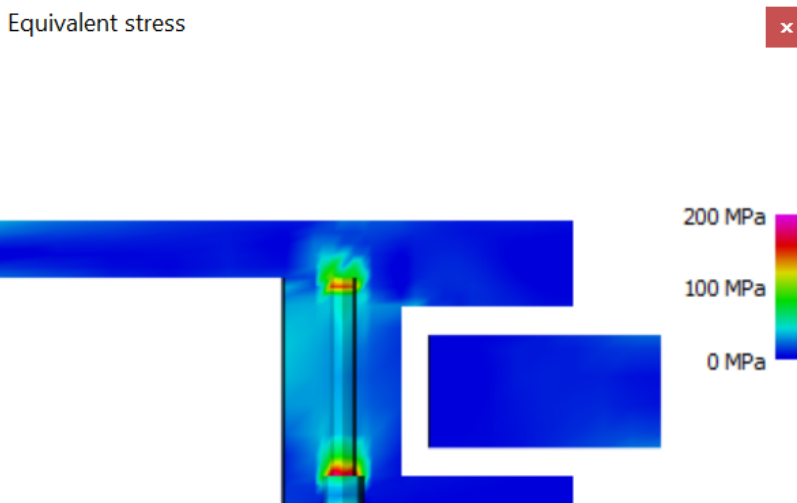
### 6.3.5.8 Kippwinkel über Lastfaktor

Wie die mittlere Verschiebung kann auch der mittlere Kippwinkel in Abhängigkeit von der Last in einem Diagramm dargestellt werden.



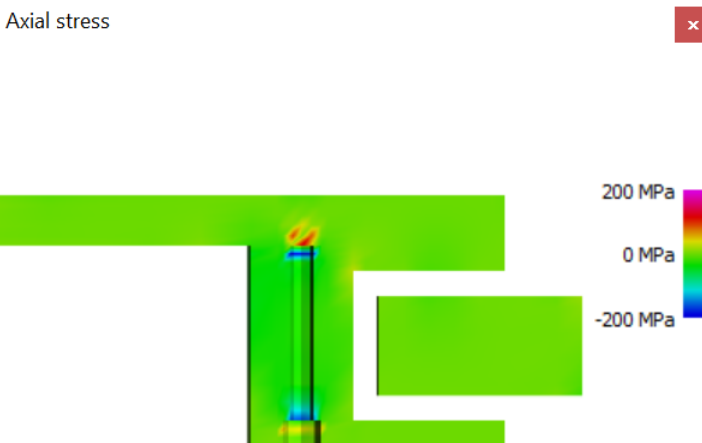
### 6.3.5.9 Vergleichsspannungen in Bauteilen

Die Vergleichsspannung in Bauteilen ist in diesem Diagramm dargestellt.



#### 6.3.5.10 Axiale, radiale und tangentialen Spannungen in Bauteilen

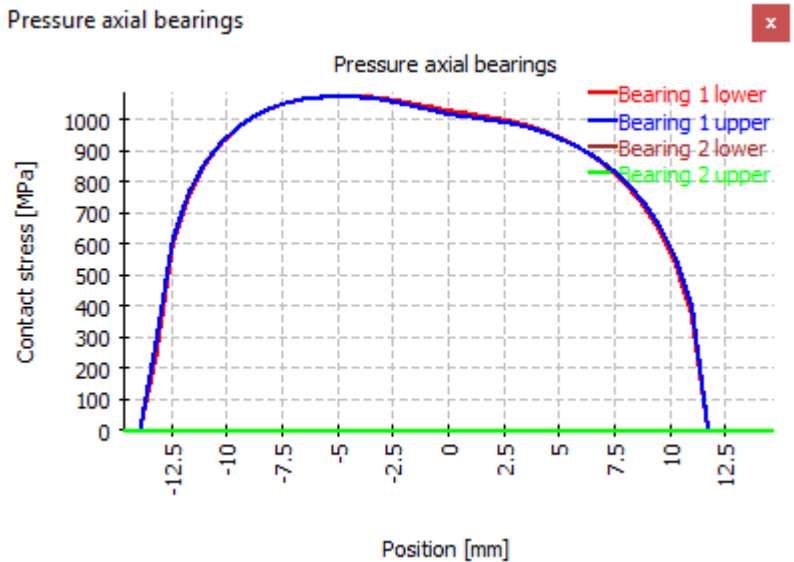
Weitere Diagramme zeigen die axialen, radialen und tangentialen Spannungen in den Bauteilen. Der Bereich für die Farbskala kann auf der Ergebnisseite definiert werden.



#### 6.3.5.11 Pressungsverteilung für Lager

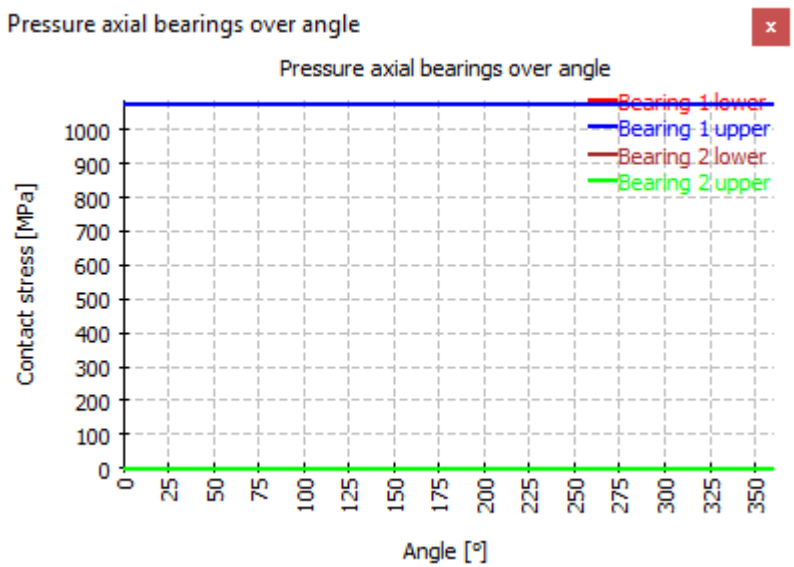
Die Pressungsverteilung wird über die Länge der Rollen dargestellt. In der Benutzeroberfläche gibt es eine Grafik für alle Lager eines Typs, im Protokoll wird für jedes Lager ein Diagramm angezeigt.

Die Position im Diagramm ist entweder die axiale oder radiale Koordinate mit dem Ursprung in der Mitte der Rolle. Bei Radiallagern ist die Orientierung wie die Orientierung der y-Achse. Die Position verläuft von unten nach oben im Lager. Bei Axiallagern ist die Orientierung der Radius; die Position verläuft von innen nach außen.



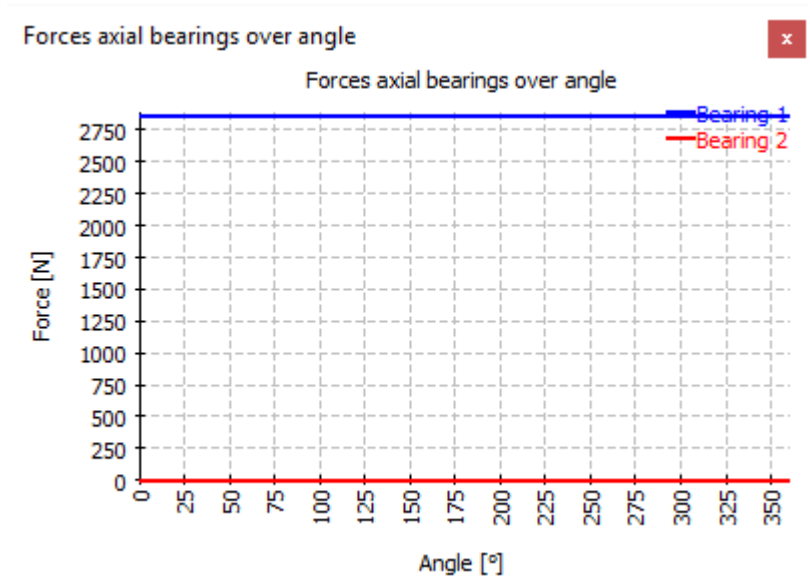
### 6.3.5.12 Pressungsverteilung über den Winkel

Die Pressungsverteilung kann auch über die Position des Winkels dargestellt werden. Dargestellt wird die maximale Spannung pro Rolle. Der Winkel Null liegt auf der x-Achse, 270° auf der z-Achse.



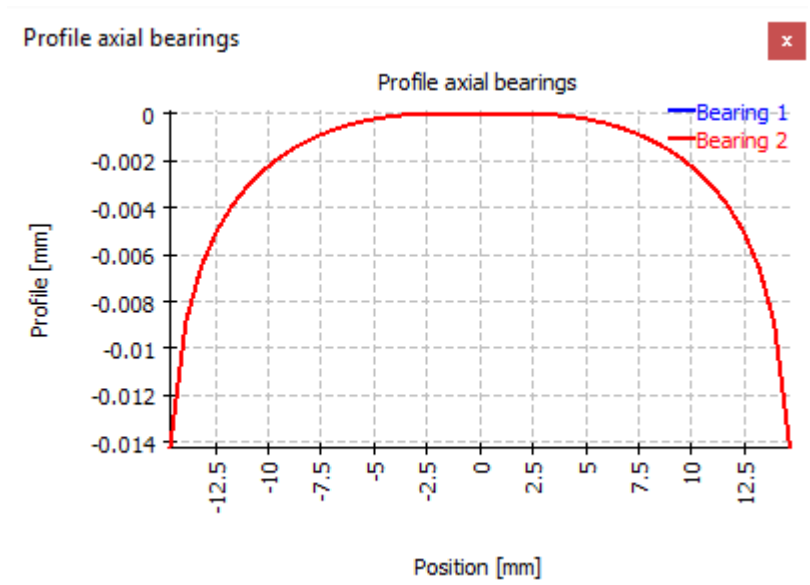
### 6.3.5.13 Kräfte über Winkel

Die Verteilung der Kräfte pro Wälzkörper über den Winkel ist in diesem Diagramm dargestellt. Bei der Kraft handelt es sich um die Gesamtkraft zwischen Rolle und Laufbahn.



### 6.3.5.14 Rollenprofilierung

Die Profilierung der Rollen ist in diesem Diagramm dargestellt. Es wird hauptsächlich zum Prüfen der Eingaben verwendet.

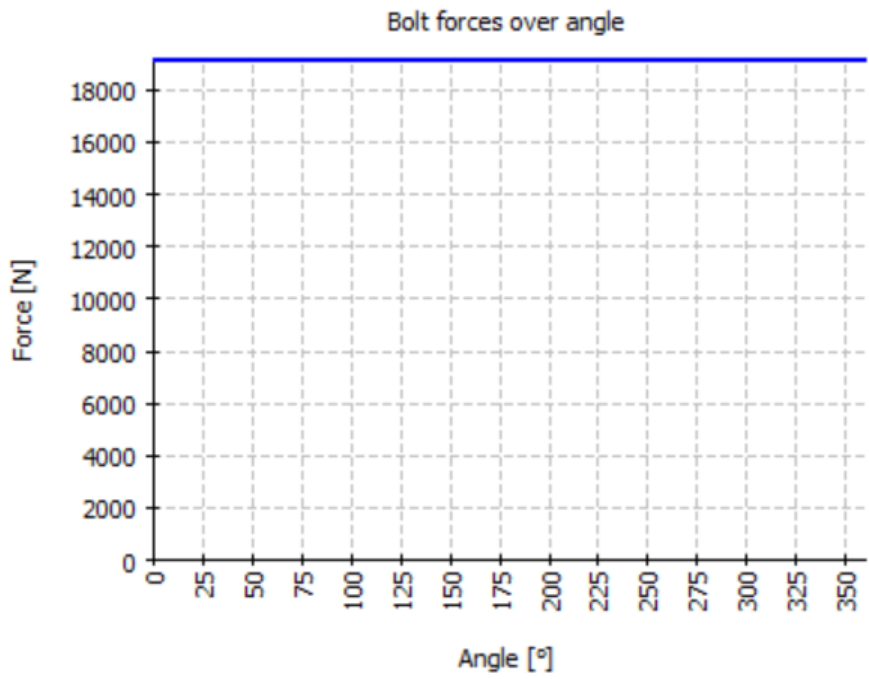


### 6.3.5.15 Schraubenkräfte über Winkel

Dieses Diagramm zeigt die Schraubenkräfte über Winkel.



Bolt forces over angle





# MESYS Stirnradpaar

## 7 MESYS Stirnradpaar

Die Stirnradpaar-Berechnung (Version 06/2024) berechnet die Geometrie der Zahnräder auf Basis der [ISO 21771-1](#)<sup>[351]</sup> und die Festigkeit nach [ISO 6336](#)<sup>[351]</sup>. Die folgenden Funktionen werden unterstützt:

- Berechnung der Geometrie von Stirnrädern nach [ISO 21771-1](#)<sup>[351]</sup>. Bei Innenzahnradern werden alle Eingangs- und Ausgangsdurchmesser in der Software als positive Werte verwendet, da sie für die Herstellung und Dokumentation verwendet werden. Nur die Zähnezahlnzahl für Innenverzahnungen wird auf einen negativen Wert gesetzt.
- Festigkeitsberechnung von Zahnradern nach [ISO 6336](#)<sup>[351]</sup> Teil 1, 2, 3, 5, 6. Es stehen verschiedene Optionen für die zu verwendende Zahndicke und die Überdeckung zur Verfügung.
- Unterstützung für Lastkollektive. Zusätzlich zu Drehzahl und Drehmoment können im Lastkollektiv auch Eingriffsabweichungen, Breitenlastfaktoren oder Einflussfaktoren der Mittelspannungsempfindlichkeit definiert werden.
- Grafiken zur Zahnform für einzelne Zähne, ganze Stirnräder, Herstellung oder Zahneingriff
- Grafiken für spezifisches Gleiten, Sicherheiten über Lebensdauer, zulässige Drehmomente über Lebensdauer
- FEM-basierte Zahnfußspannungen mittels 2D-FEA. Für schrägverzahnte Zahnräder kann entweder das virtuelle Geradstirnrad oder der Normalschnitt verwendet werden.
- Die 3D-Zahnrad-Geometrie ist als STEP-Export verfügbar. Der Stirnschnitt wird mit einer Genauigkeit besser als  $10^{-4}m_n \cos(\beta)$  erzeugt und dann entlang einer Schraubenlinie extrudiert. Die Genauigkeit entlang der Schraubenlinie hängt vom CAD-System ab. Derzeit sind keine Profil- oder Flankenlinien-Modifikationen enthalten.

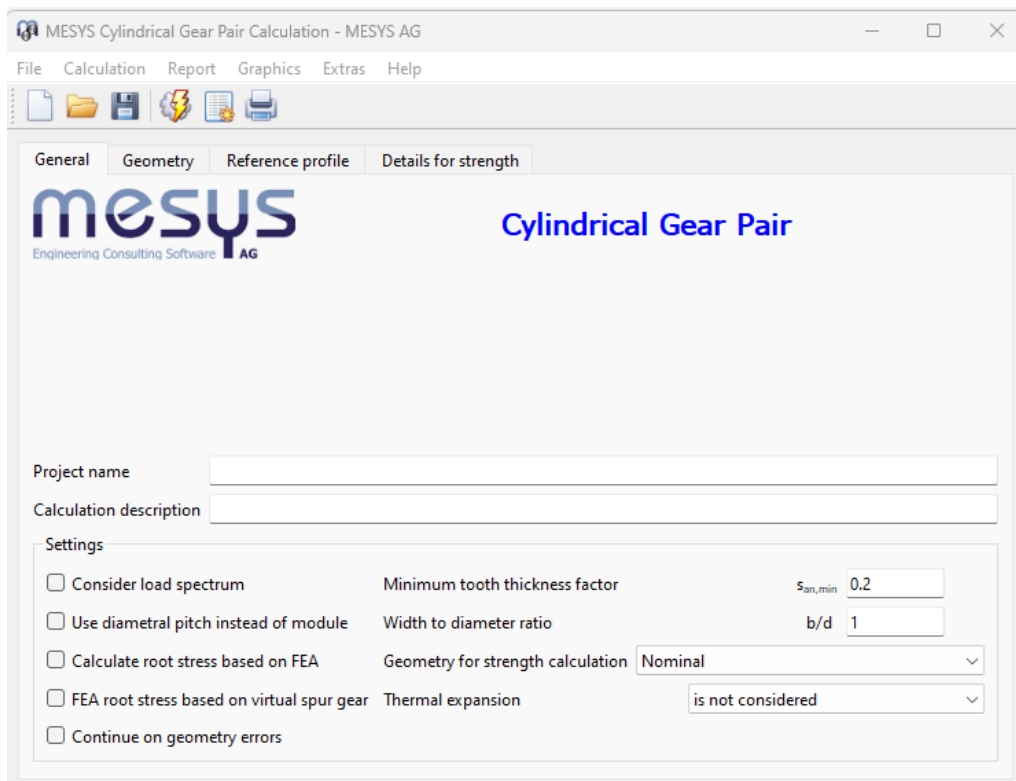
### 7.1 Eingaben

---

Die Eingabparameter werden auf vier oder fünf Registerkarten angezeigt.

#### 7.1.1 Allgemein

Auf der ersten Eingabeseite können neben einem Projektnamen und einer Beschreibung verschiedene Einstellungen vorgenommen werden.



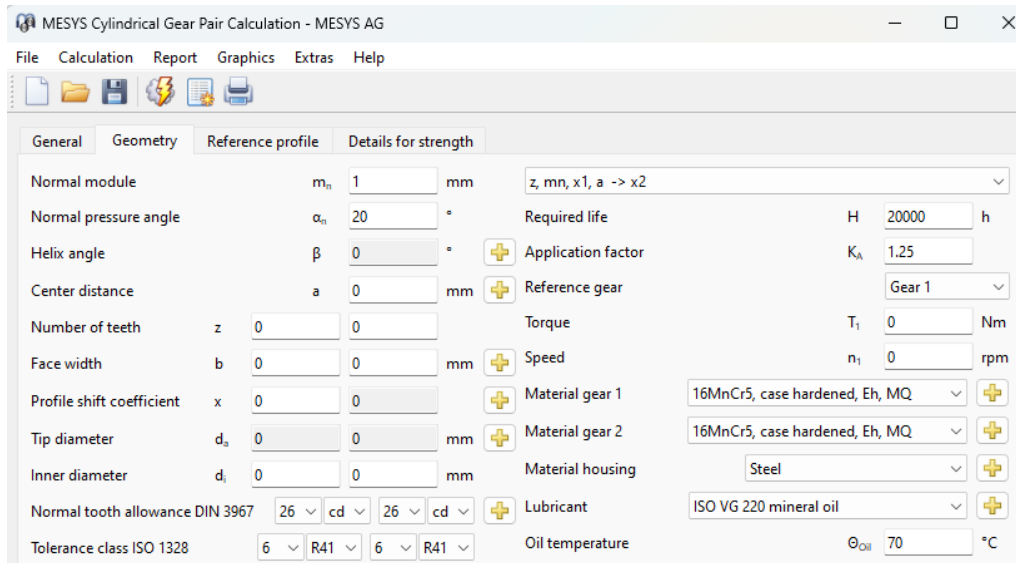
- Wählen Sie "Lastkollektiv berücksichtigen", wenn eine Berechnung mit Lastkollektiv durchgeführt werden soll.
- Wählen Sie "'Diametral Pitch' statt Normalmodul verwenden", wenn 'Diametral pitch' eine Eingabe sein soll.
- Die Berechnung von FEM-basierten Zahnfußspannungen kann aktiviert werden. Bei Stirnrädern kann sie auf dem Normalschnitt oder auf dem virtuellen Geradstirnrad basieren.
- Wenn "Bei Geometriefehlern weiterrechnen" aktiviert ist, wird die Software bei Geometriefehlern nicht abbrechen. In diesem Fall können einige Ergebnisse ungültig sein.
- Der Faktor für die minimale Zahndicke wird für Warnungen im Falle einer kleinen Zahndicke am Kopf verwendet.
- Das Verhältnis von Breite zu Durchmesser wird für die Dimensionierung des Stirnradpaares verwendet.
- Für die Festigkeitsberechnung stehen mehrere Optionen für die Geometrie innerhalb des Toleranzfeldes zur Verfügung. Nach [ISO/TR 6336-30](#)<sup>351</sup> wird für die Faktoren YS/YF das Nennmaß mit minimaler Zahndicke verwendet, was jedoch nicht auf alle Beispiele im Protokoll zutrifft. Bei großen Toleranzfeldern sollte entweder die mittlere Position im Toleranzfeld oder die minimale Zahndicke verwendet werden. Die minimale Zahndicke wird für die Festigkeit der Biegung

kritisch sein. Für die Überdeckung könnte entweder das Maximum oder das Minimum kritisch sein, abhängig von der tatsächlichen Anwendung.

- Die Wärmeausdehnung der Zahnräder und des Gehäuses kann bei der Überdeckung berücksichtigt werden.

## 7.1.2 Geometrie

Die Geometrie der Zahnräder ist auf dieser Seite definiert.



Die Auswahl der aktiven Eingaben kann über die Liste oben rechts ausgewählt werden. Sie definiert, welche Werte Eingaben und welche Ausgaben sind. Die beiden letzten Optionen beinhalten auch eine Festigkeitsberechnung unter Verwendung des Drehmoments als Eingabe für die Geometrie.

### 7.1.2.1 Normalmodul

Das Normalmodul definiert die Größe der Zähne. Eine Standardzahndicke ist  $m_n \cdot \pi/2$ , der Teilkreisdurchmesser ist  $d = z m_n / \cos \beta$ .

Anstelle des Normalmoduls kann die diametrale Teilung verwendet werden, das ist

$$Pd = \frac{1}{m_n} \frac{25.4 \text{ mm}}{\text{in}}$$

### 7.1.2.2 Normaleingriffswinkel


Der Normaleingriffswinkel hängt vom Werkzeug ab. Der Standardwinkel beträgt 20°.

### 7.1.2.3 Schrägungswinkel

Bei einem Schräg Zahnrad verlaufen die Flankenlinien der Zähne schraubenförmig statt auf einer geraden Linie. Bei einem Schräg Zahnrad wird die Last auf mehr Zähne verteilt. Ein schrägverzahntes Zahnrad führt zu einer Axialbelastung der Welle.

Die -Schaltfläche erlaubt es, die Schrägungsrichtung zu definieren..


#### 7.1.2.4 Achsabstand

Der Achsabstand ist der Abstand zwischen den Achsen der beiden gepaarten Zahnräder. Mit dem -Button können die Toleranzen für den Achsabstand definiert werden.

#### 7.1.2.5 Zähnezahl


Für Innenzahnräder muss eine negative Zähnezahl festgelegt werden. Für das erste Zahnrad, das Ritzel, muss die kleinere Zähnezahl verwendet werden.

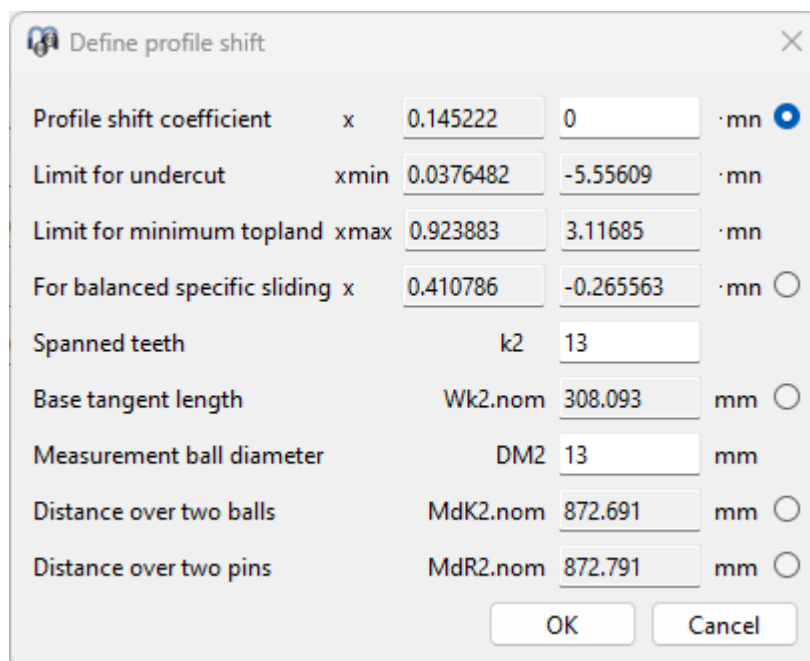
#### 7.1.2.6 Zahnbreite

Die Zahnbreite der beiden Zahnräder kann unterschiedlich sein. Mit der -Schaltfläche kann ein axialer Versatz zwischen den beiden Zahnrädern definiert werden.

#### 7.1.2.7 Profilverschiebungsfaktor

Der Profilverschiebungsfaktor definiert eine Verschiebung des Werkzeugprofils während der Herstellung. Eine positive Profilverschiebung führt zu einer größeren Zahndicke.

Mit der -Schaltfläche kann die Profilverschiebung aus Messwerten berechnet werden und es werden Vorschläge auf der Basis eines ausgeglichenen spezifischen Gleitens angezeigt.



| Parameter                     | Unit     | Value 1   | Value 2   | Unit | Radio                            |
|-------------------------------|----------|-----------|-----------|------|----------------------------------|
| Profile shift coefficient     | x        | 0.145222  | 0         | ·mn  | <input checked="" type="radio"/> |
| Limit for undercut            | xmin     | 0.0376482 | -5.55609  | ·mn  |                                  |
| Limit for minimum top-land    | xmax     | 0.923883  | 3.11685   | ·mn  |                                  |
| For balanced specific sliding | x        | 0.410786  | -0.265563 | ·mn  | <input type="radio"/>            |
| Spanned teeth                 | k2       | 13        |           |      |                                  |
| Base tangent length           | Wk2.nom  | 308.093   |           | mm   | <input type="radio"/>            |
| Measurement ball diameter     | DM2      | 13        |           | mm   |                                  |
| Distance over two balls       | MdK2.nom | 872.691   |           | mm   | <input type="radio"/>            |
| Distance over two pins        | MdR2.nom | 872.791   |           | mm   | <input type="radio"/>            |

Buttons: OK, Cancel

### 7.1.2.8 Kopfkreisdurchmesser

Der Kopfkreisdurchmesser wird nur zur Information angezeigt. Mit der  $\oplus$ -Schaltfläche können Sie die Toleranzen für den Kopfkreisdurchmesser festlegen.

### 7.1.2.9 Innendurchmesser

Der Innendurchmesser definiert eine Bohrung im Zahnrad.

### 7.1.2.10 Zahndickenabmass nach DIN 3967

Die Zahndickenabmasse können über die Auswahl der Toleranzklassen nach DIN 3967 oder über eine eigene Benutzereingabe mit der  $\oplus$ -Schaltfläche definiert werden.

Die Zahl zwischen 21 und 30 definiert die Breite des Toleranzfeldes und der Buchstabe definiert die Lage des Toleranzfeldes nach DIN 3967. Der Buchstabe 'h' führt zu einem oberen Aufmaß von Null und damit zu einem minimalen Spiel.

Mit der  $\oplus$ -Taste können eigene Toleranzwerte definiert und der Messkugeldurchmesser oder die Messzähnezahl festgelegt werden.

| Parameter                            | Gear 1                   | Gear 2                   |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| User input for allowances            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Upper tooth thickness allowance Esns | -0.095 mm                | -0.175 mm                |
| Lower tooth thickness allowance Esni | -0.175 mm                | -0.305 mm                |
| Measurement ball diameter DM         | 16 mm                    | 13 mm                    |
| Spanned teeth k                      | 3                        | 13                       |

### 7.1.2.11 Toleranzklasse nach ISO 1328

Die Toleranzklassen definieren die zulässigen Teilungsfehler oder Flankenlinienabweichungen.

### 7.1.2.12 Erforderliche Lebensdauer

Die erforderliche Lebensdauer wird für die Anzahl der Lastwechsel bei der Festigkeitsberechnung verwendet.

### 7.1.2.13 Anwendungsfaktor

Der Anwendungsfaktor wird mit der Belastung der Zahnräder multipliziert. Er kann verwendet werden, um Unsicherheiten bei der Belastung zu berücksichtigen.

### 7.1.2.14 Drehmoment und Drehzahl

Drehmoment und Drehzahl werden für das gewählte Bezugsrad definiert.



### 7.1.2.15 Werkstoffeigenschaften

Die Werkstoffeigenschaften der Zahnräder werden für die Festigkeitsberechnung verwendet.

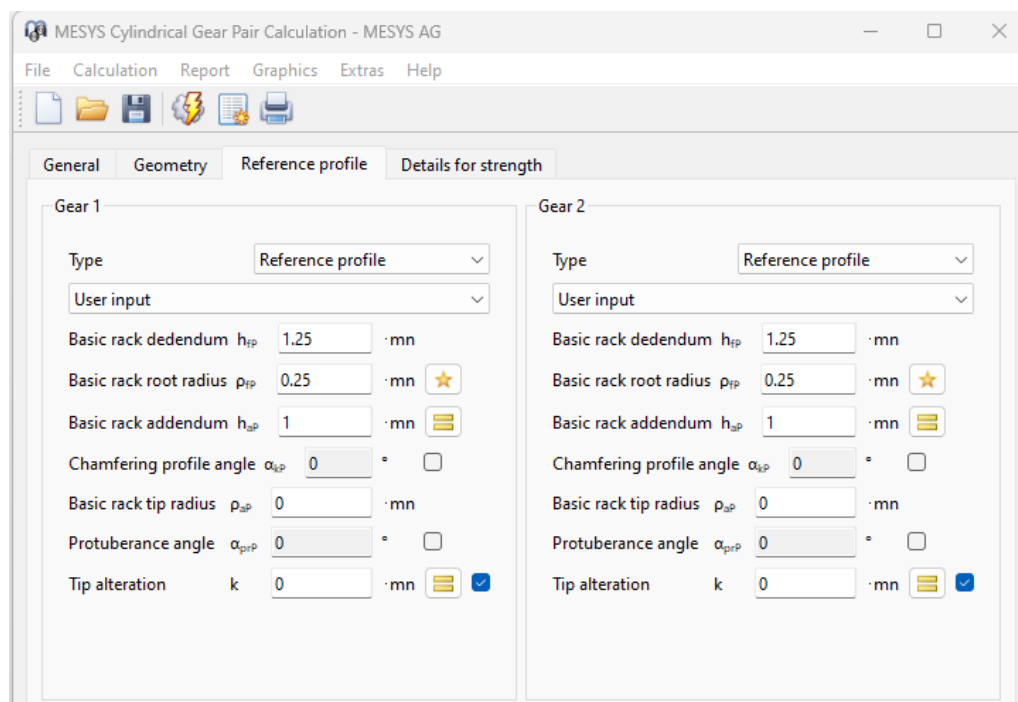
Die Werkstoffe der Zahnräder und des Gehäuses werden auch zur Berechnung der thermischen Veränderung des Spiels verwendet, wenn die thermische Ausdehnung berücksichtigt wird.

### 7.1.2.16 Schmierstoff

Der Schmierstoff kann durch Auswahl aus der Datenbank oder durch Benutzereingabe der Viskosität definiert werden.

### 7.1.3 Bezugsprofil

Das Bezugsprofil des Zahnrads kann auf drei Arten festgelegt werden. Entweder mit einem Bezugsprofil, einem Wälzfräser oder einem Stossrad. Der Wälzfräser wird bei Innenzahnradern nicht unterstützt.



Wenn ein Wälzfräser oder ein Stossrad ausgewählt wird, können sowohl die Fusshöhe des Werkzeugs  $h_{fP0}$  als auch die Kopfhöhe des Bezugsprofils  $h_{aP}$  definiert werden, wenn es sich nicht um ein überschneidendes Werkzeug handelt. Die Fusshöhe des Werkzeugs muss größer sein als die Kopfhöhe des Bezugsprofils, sonst würde das Werkzeug den Kopfkreisdurchmesser schneiden. Wenn dies nicht der Fall ist, wird eine Warnung angezeigt, aber der Kopfkreisdurchmesser wird immer noch durch die Kopfhöhe des Bezugsprofils berechnet. Bitte wählen Sie in diesem Fall ein überschneidendes Werkzeug.

## 7.1.4 Details für Festigkeit

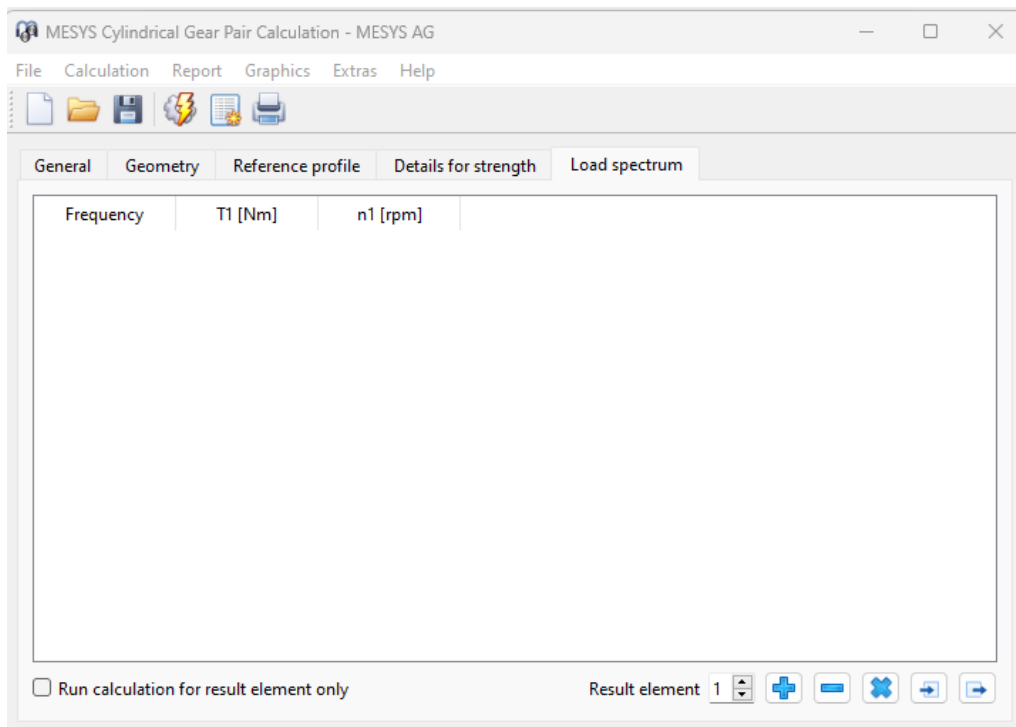
Details zur Festigkeitsberechnung nach ISO 6336 können auf dieser Seite definiert werden.

The screenshot shows the 'Details for strength' tab in the MESYS Cylindrical Gear Pair Calculation software. The interface includes a menu bar (File, Calculation, Report, Graphics, Extras, Help) and a toolbar with icons for file operations. The main area is divided into several sections:




- Dynamic factors:** Dynamic factor  $K_V$  (1.05), Mesh load factor  $K_M$  (1), Face load coefficient  $K_{H\beta}$  (1.25).
- Misalignments:** Pinion arrangement (Figure 13a), Equivalent misalignment  $f_{sh}$  (0  $\mu\text{m}$ ), Mesh misalignment  $f_{ma}$  (0  $\mu\text{m}$ ).
- Geometric parameters:** Bearing span  $l$  (0 mm), Offset of pinion center  $s$  (0 mm), Pinion shaft diameter  $d_{sh}$  (0 mm), Pinion inner shaft diameter  $d_{shi}$  (0 mm), Web thickness  $b_s$  (0 mm), Number of meshes  $N_M$  (1), Reversed bending (No).
- Strength and Life factors:** Tip relief (checkbox), Root relief (checkbox), Surface roughness flank  $R_{zH}$  (6  $\mu\text{m}$ ), Surface roughness root  $R_{zF}$  (18  $\mu\text{m}$ ), Mean stress influence factor  $Y_M$  (1), Life factor limit for  $10^{10}$  cycles  $Y_{NTim}$  (0.85), Life factor limit for  $10^{10}$  cycles  $Z_{NTir}$  (0.85).
- Stiffening and Modifications:** Stiffening by pinion (checkbox), Profile modifications compensate deflections (checkbox), Limited pitting allowable (checkbox), Flank modification (fZCa) (None), Contact pattern (Unproven), Helix modification (None).
- Safety Factors:** Required safety factor root  $S_{Fmin}$  (1.4), Required safety factor flank  $S_{Hmit}$  (1).



## 7.1.5 Lastkollektiv

Wenn unter Allgemein aktiviert, steht eine zusätzliche Eingabeseite für das Lastkollektiv zur Verfügung.




Die erste Spalte "Häufigkeit" muss sich für alle Lastkollektivelemente auf eins (oder weniger) summieren. Weitere Spalten können über das Kontextmenü mit der rechten Maustaste hinzugefügt werden.

Mit der -Schaltfläche können Zeilen hinzugefügt werden, mit der -Schaltfläche kann eine markierte Zeile gelöscht werden. Die -Schaltfläche löscht alle Eingaben.

Mit der -Schaltfläche wird das Lastkollektiv aus einer Datei gelesen. Für die Eingabedatei müssen die aktuell angezeigten Spalten mit ihren Einheiten verwendet werden. Da die Daten aus der Datei zu den Eingaben hinzugefügt werden, müssen Sie die Eingaben zuerst löschen, um ein vollständiges Lastspektrum zu definieren. Ebenso kann eine erstellte Lastkollektiv-Tabelle mit der entsprechenden -Schaltfläche exportiert werden.

#### 7.1.5.1 Berechnung für nur ein Lastkollektiv-Element

Es ist möglich, die Berechnung nur für ein Element (Lastfall) durchzuführen, wenn der Anwender das Flag 'Berechnung nur für gewähltes Element durchführen' setzt. Der gewünschte Lastfall wird entweder über die Pfeile des kleinen Kästchens neben der -Schaltfläche oder durch direkte Eingabe der Nummer des Elements ausgewählt. Die Grafiken werden nur für das ausgewählte Element angezeigt.

Dies ermöglicht es, die Lastkollektiv-Berechnung als Eingabeoberfläche für unabhängige Lastfälle zu verwenden, die unabhängig voneinander berechnet werden.

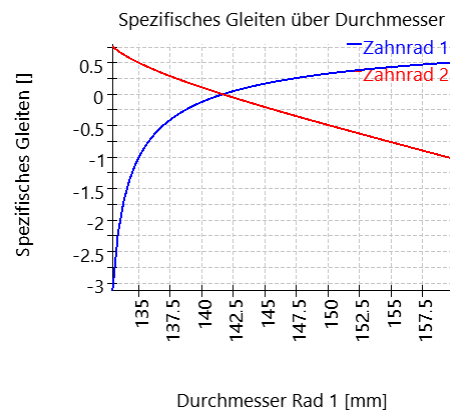
## 7.2 Resultate

Die Ergebnisse werden in Form einer kleinen Resultateübersicht direkt in der Software, in einem PDF-Textprotokolls und separaten Grafikfenstern bereitgestellt. Grafik-Fenster können an die Hauptprogrammoberfläche angedockt werden und werden bei jeder Berechnung automatisch aktualisiert.

### 7.2.1 Resultategrafiken

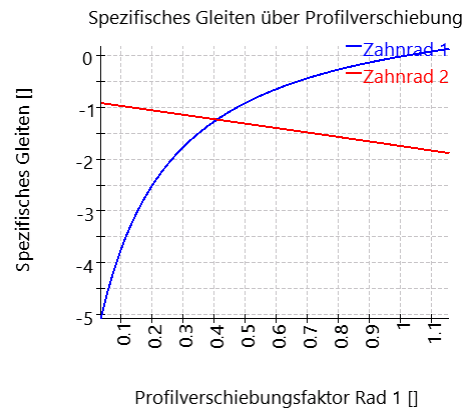
#### 7.2.1.1 Spezifisches Gleiten über Durchmesser

Das spezifische Gleiten wird über dem Durchmesser für die definierte Geometrie angezeigt. In der Regel wird ein spezifisches Gleiten größer als -3 bevorzugt.



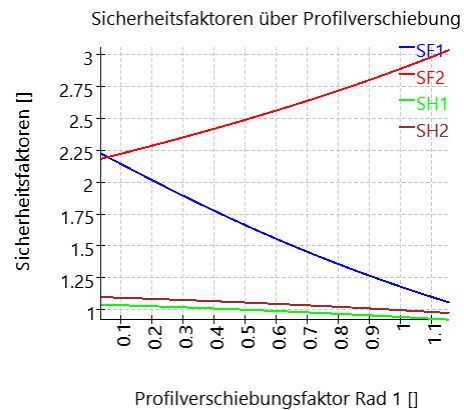
#### 7.2.1.2 Specific sliding over profile shift

Das spezifische Gleiten wird über die Profilverchiebung von Rad 1 bei konstantem Achsabstand dargestellt. In der Regel wird ein spezifisches Gleiten größer als -3 bevorzugt.



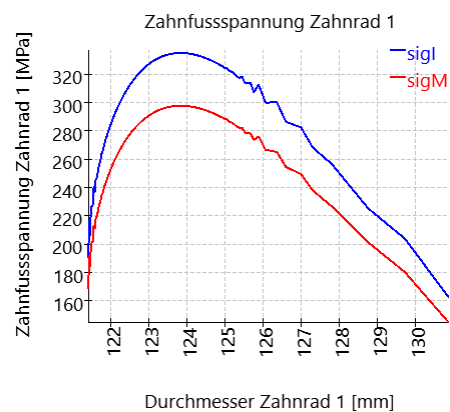
### 7.2.1.3 Spezifisches Gleiten über Profilverschiebung

Die Sicherheitsfaktoren werden über der Profilverschiebung für Rad 1 bei konstantem Achsabstand angezeigt. Sie können verwendet werden, um die optimale Profilverschiebung zu finden.



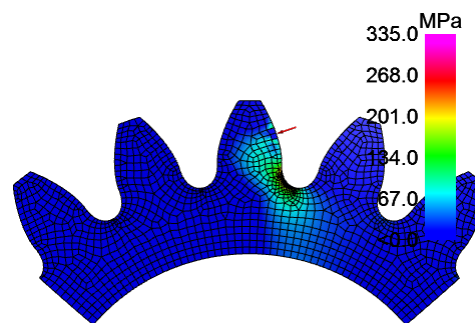
### 7.2.1.4 Zahnfußspannung

Die auf der 2D-FEA basierende Zahnfußspannung ist in diesem Diagramm über dem Durchmesser dargestellt.



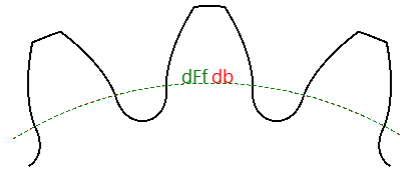
### 7.2.1.5 Zahnfußspannung (2D)

Die auf der 2D-FEA basierende Zahnfußspannung ist als Farbdiagramm dargestellt.



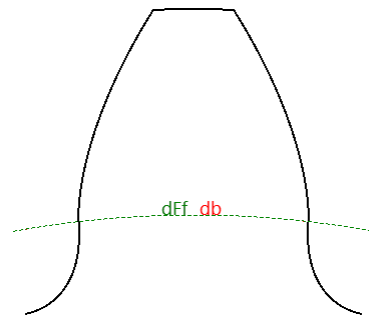
## 7.2.1.6 Zahnform

Die Grafik der Zahnform kann für beide Zahnräder angezeigt werden. Diese Grafik zeigt nur drei Zähne, um die Form der Zähne zu überprüfen.



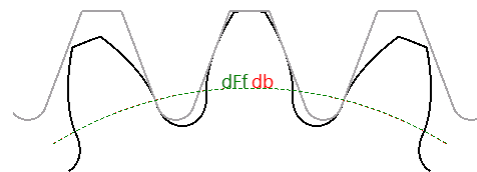
## 7.2.1.7 Einzelner Zahn

Für jedes Zahnrad kann ein einzelner Zahn dargestellt werden.



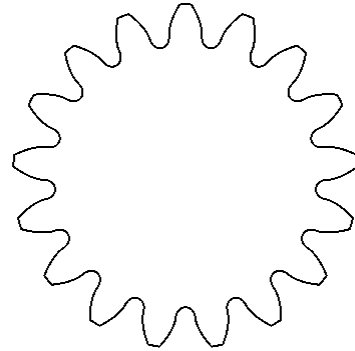
## 7.2.1.8 Herstellung

Jedes Zahnrad kann zusammen mit seinem Werkzeug dargestellt werden. Diese Grafik ist auch als Animation verfügbar.



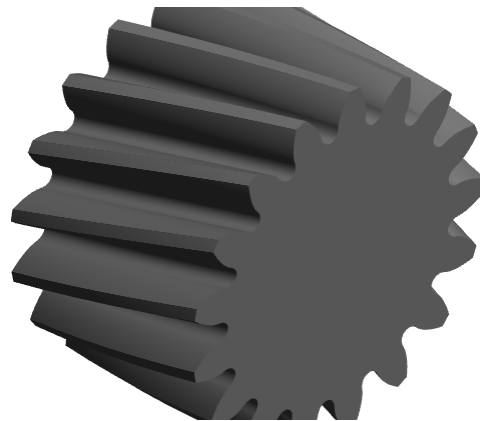
### 7.2.1.9 Geometrie (2D)

Die gesamte Zahnrad ist in dieser Grafik als 2D dargestellt.



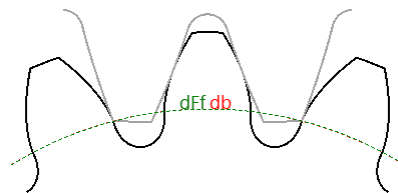
### 7.2.1.10 Geometrie (3D)

Die Zahnradgeometrie kann als 3D-Ansicht dargestellt werden.



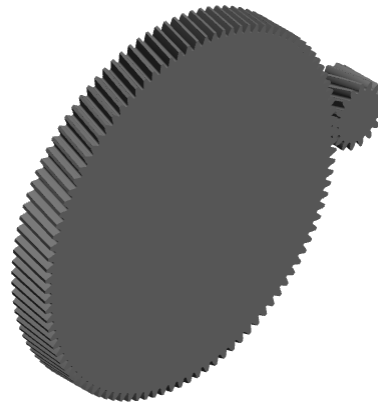
### 7.2.1.11 Zahneingriff

Der Eingriff des Zahnradpaares wird in dieser Grafik dargestellt, um den Zahnradkontakt zu überprüfen. Sie ist auch als Animation verfügbar.



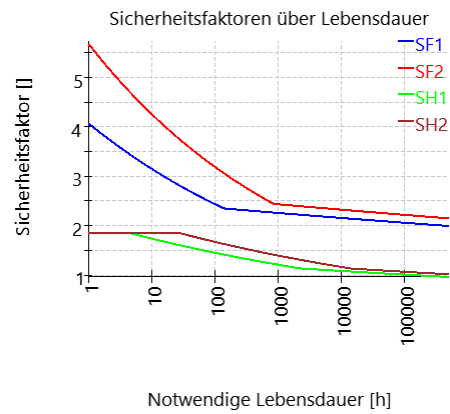
### 7.2.1.12 Zahneingriff (3D)

Der Zahneingriff kann auch als 3D-Ansicht dargestellt werden.



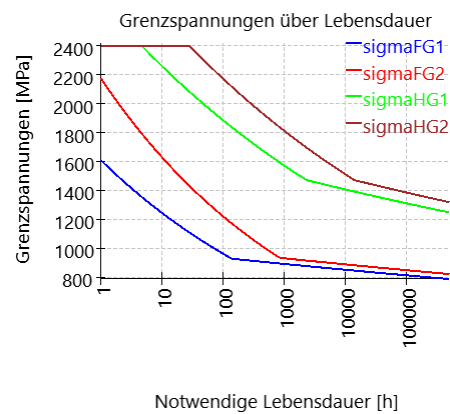
### 7.2.1.13 Sicherheitsfaktoren über Lebensdauer

Die Sicherheitsfaktoren sind in diesem Diagramm über die Lebensdauer dargestellt.



### 7.2.1.14 Grenzspannungen über Lebensdauer

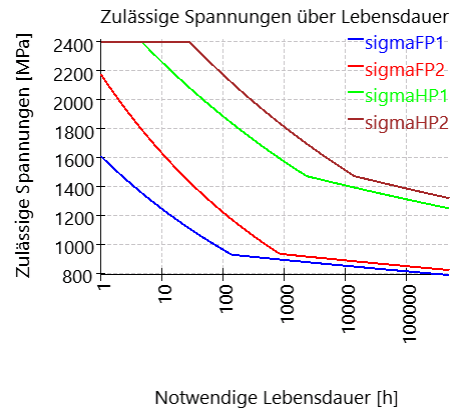
Dieses Diagramm zeigt die Grenzspannungen über der Lebensdauer.





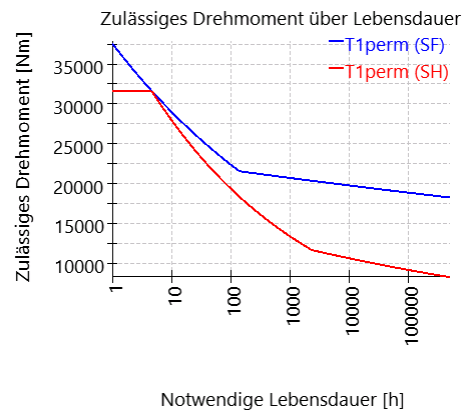
### 7.2.1.15 Zulässige Spannung über Lebensdauer

Dieses Diagramm zeigt die zulässige Spannung über der Lebensdauer.



### 7.2.1.16 Zulässiges Drehmoment über Lebensdauer

Das zulässige Drehmoment über der Lebensdauer ist in diesem Diagramm dargestellt.



### 7.2.2 CAD Export

Mehrere Grafiken können im Menü Grafiken->CAD ausgewählt werden. Die Zahnform im Stirnschnitt wird mit Bezier-Kurven exportiert, deren Genauigkeit besser ist als  $10^{-4} m_n \cdot \cos(\beta)$ . Dieser Stirnschnitt wird dann entlang der Schraubenlinie für ein schrägverzahntes Zahnrad extrudiert. Die Genauigkeit der Extrusion hängt vom CAD-System ab.

Derzeit werden keine Profil- und Flankenlinienkorrekturen berücksichtigt.



# MESYS Single Cylindrical Gear

## 8 MESYS Single Cylindrical Gear

Die Einzelstirnradberechnung (Version 06/2024) berechnet die Zahnradgeometrie nach [ISO 21771-1](#)<sup>351</sup>. Die folgenden Funktionen werden unterstützt:

- Berechnung der Zahnradgeometrie nach [ISO 21771-1](#)<sup>351</sup>. Bei Innenverzahnungen werden alle Eingangs- und Ausgangsdurchmesser in der Software als positive Werte verwendet, wie sie auch für die Fertigung und Dokumentation verwendet werden. Nur die Anzahl der Zähne für Innenverzahnungen wird auf einen negativen Wert gesetzt.
- Zahnformgrafiken für Einzelzähne, gesamte Verzahnung oder Fertigung
- 3D-Zahnradgeometrie als STEP-Export verfügbar. Die Querschnitte werden mit einer Genauigkeit besser als  $10^{-4}m_n \cos(\beta)$  erzeugt und dann entlang einer Helix extrudiert. Die Genauigkeit entlang der Helix hängt vom CAD-System ab. Derzeit sind keine Profil- oder Flankenmodifikationen enthalten.

### 8.1 Eingabeparameter

---

#### 8.1.1 Allgemein

Auf der ersten Eingabeseite können neben einem Projektnamen und einer Beschreibung verschiedene Einstellungen vorgenommen werden.

- Wählen Sie "Diametral Pitch statt Modul verwenden", wenn der Diametral Pitch eine Eingabe sein soll.
- Wenn "Bei Geometriefehlern weiterrechnen" aktiviert ist, wird die Software bei Geometriefehlern nicht anhalten. In diesem Fall können einige Ergebnisse ungültig sein.
- Der minimale Zahndickenfaktor wird für Warnungen im Falle einer kleinen Zahnkopfdicke verwendet.

#### 8.1.2 Geometrie

Die Verzahnungsgeometrie wird auf dieser Seite definiert.

### 8.2 Resultate

---

# MESYS Zahnrad Positionsrechnung

## 9 MESYS Zahnrad Positionsberechnung

MESYS Zahnrad Positionsberechnung (Version 06/2024) berechnet die Positionierung der Zahnräder in einem System, das bestimmte Kriterien in Bezug auf Zahnradauslegungsdaten und geometrische Bedingungen zwischen den Zahnrädern erfüllen muss.

Die folgenden Ergebnisse sind in dem Protokoll zu finden:

- Zentralkoordinaten aller Zahnräder des Systems
- Grafische Darstellungen der realisierbaren Zahnrad-Konfigurationen

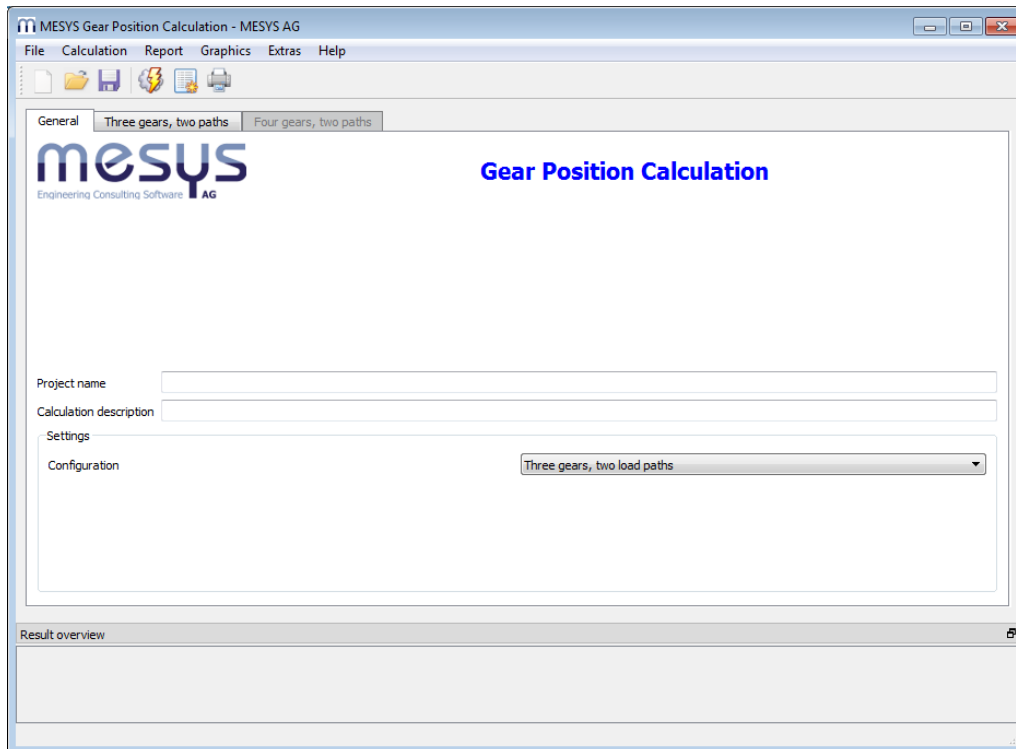
Zusätzlich zum Protokoll werden die Ergebnisse in mehreren Grafiken dargestellt. Protokoll und Benutzeroberfläche sind beide in metrischen oder US Einheiten verfügbar. Unterstützte Sprachen für Benutzeroberfläche und Protokoll sind Englisch, Deutsch, Französisch, Spanisch, Türkisch, Japanisch, Chinesisch und Koreanisch.

### 9.1 Eingabeparameter

---

Die Parameter für die Eingaben werden auf drei verschiedenen Registerkarten angezeigt.

### 9.1.1 Allgemein



#### Projektname und Beschreibung der Berechnung

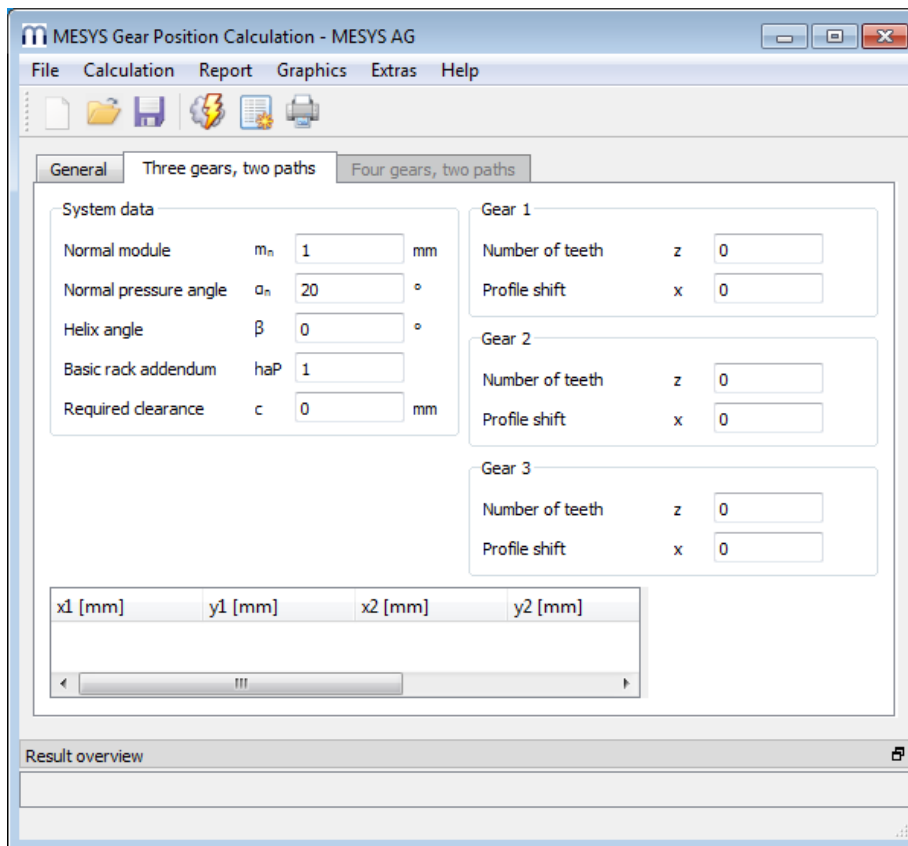
Der Projektname und die Beschreibung der Berechnung sind lediglich Eingaben, die im Protokollkopf angezeigt werden. Sie können verwendet werden, um Informationen über den Zweck der Berechnung zur Dokumentation einzugeben.

#### Einstellungen

Es stehen zwei Konfigurationen zur Verfügung:

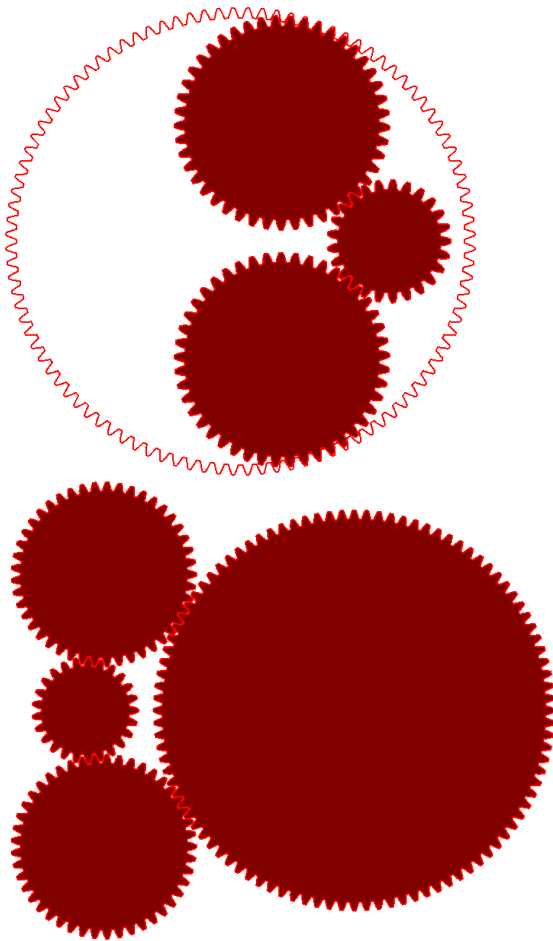
- Drei Räder, zwei Stränge
- Vier Räder, zwei Stränge

## 9.1.2 Drei Räder, zwei Stränge



Dieses Modul des Programms ermöglicht die Konfiguration eines symmetrischen Systems mit zwei verschiedenen Strängen zur Übertragung der Leistung, das aus je drei Zahnrädern besteht.





### 9.1.2.1 Systemdaten

In diesem Abschnitt können allgemeine Daten und Einstellungen für das gesamte System definiert werden, wie z.B:

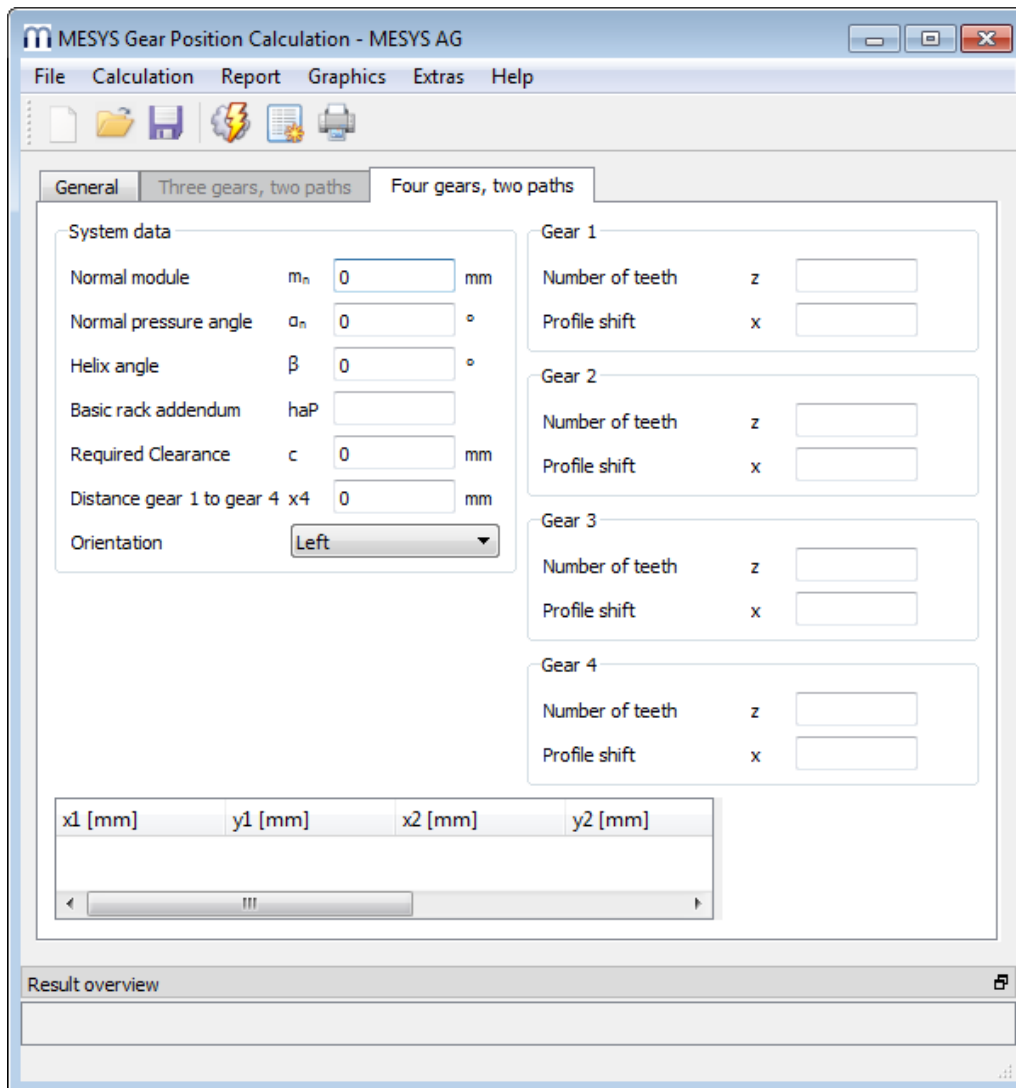
- Normalmodul
- Normaleingriffswinkel
- Schrägungswinkel
- Kopfhöhe Bezugsprofil:  $h_{ap}$  ist der Kopfhöhenfaktor des Bezugsprofils der Standard-Bezugsprofils, definiert als  $Kopfhöhe = h_{ap} * m_n$ . Dieser Wert ist normalerweise gleich 1, so dass die Kopfhöhe =  $m_n$  ist.

- **Notwendiges Spiel:** Das notwendige Spiel ist eine Einschränkung, die einen minimal zulässigen Abstand zwischen den Zahnköpfen von unverbundenen Zahnradern festlegt, um zu verhindern, dass diese miteinander kollidieren.

### 9.1.2.2 Zahnräder

Für jedes der drei Zahnräder können die Zähnezahlen und die Profilverchiebung als Parameter angegeben werden. Ein positiver Wert für die Zähnezahl wird standardmäßig als Außenverzahnung verstanden, so dass negative Werte für die Modellierung von Innenverzahnungen verwendet werden. Aus montagetechnischen Gründen kann nur das dritte Zahnrad negative Werte für die Verzahnung annehmen.

### 9.1.3 Vier Räder, zwei Stränge

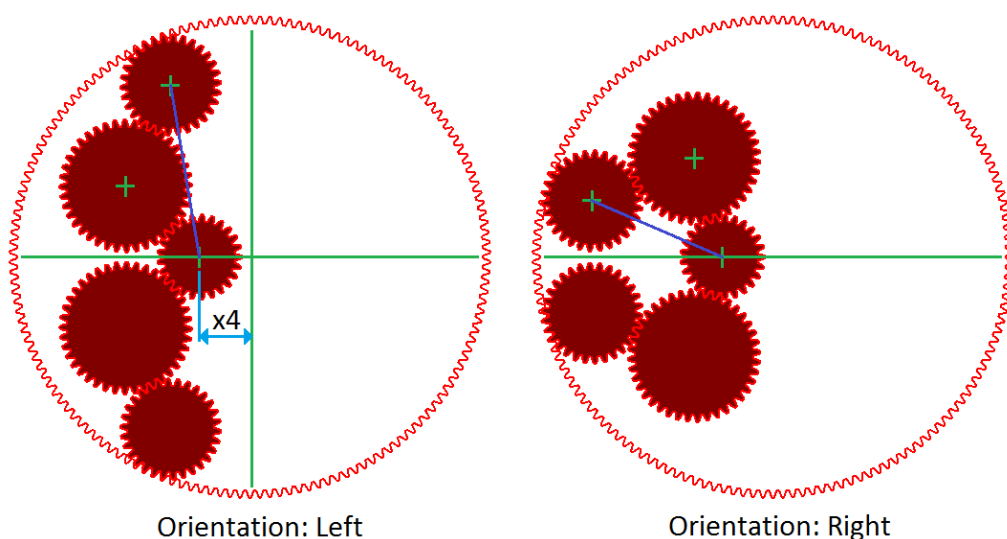


Dieses zweite Modul des Programms ermöglicht die Konfiguration eines symmetrischen Systems mit zwei verschiedenen Strängen zur Übertragung der Leistung, die aus jeweils vier Zahnrädern bestehen.

### 9.1.3.1 Systemdaten

Wie zuvor können in diesem Querschnitt allgemeine Daten und Einstellungen für das gesamte System vorgestellt werden, wie z.B.:

- Normalmodul
- Normaleingriffswinkel
- Schrägungswinkel
- Kopfhöhe Bezugsprofil:  $h_{ap}$  ist der Kopfhöhenfaktor des Bezugsprofils der Standard-Bezugsprofils, definiert als  $Kopfhöhe = h_{ap} * m_n$ . Dieser Wert ist normalerweise gleich 1, so dass die Kopfhöhe =  $m_n$  ist.
- Notwendiges Spiel: Das Notwendige Spiel ist eine Beschränkung, die einen minimal zulässigen Abstand zwischen den Zahnköpfen von nicht verbundenen Zahnrädern festlegt, um zu verhindern, dass diese miteinander kollidieren.
- Abstand Rad 1 zu Rad 4: Dieser Abstand ist definiert als der Abstand zwischen den Zahnradmitten von Zahnrad 1 und Zahnrad 4. Positive Werte verschieben die Mitte von Zahnrad 4 nach rechts in Bezug auf die Mitte von Zahnrad 1.
- Orientierung: Die Orientierung kann als 'Rechts' oder 'Links' gewählt werden, was die möglichen Ergebnisse auf jene Konfigurationen einschränkt, bei denen das zweite Zahnrad seine Position entweder auf der linken oder rechten Seite der Mittellinie zwischen dem ersten und dem dritten Zahnrad beibehält, wie unten gezeigt:



## 9.2 Resultate

Ergebnisse werden in Form einer kleinen Resultateübersicht direkt in der Software, eines PDF-Protokolls und separater Grafikfenster bereitgestellt. Grafik-Fenster können an die Hauptprogrammoberfläche angedockt werden und werden bei jeder Berechnung automatisch aktualisiert.

| x1 [mm] | y1 [mm] | x2 [mm]  | y2 [mm] | x3 [mm] | y3 [mm] | x4 [mm] | y4 [mm] | cMin [mm] |
|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 0       | 0       | -17,1074 | 14,6146 | 3,96374 | 39,3585 | 20      | 0       | 2,22924   |
| 0       | 0       | -15,3923 | 16,4111 | 6,60614 | 40,3343 | 20      | 0       | 5,82229   |
| 0       | 0       | -13,4067 | 18,0696 | 9,45352 | 41,1706 | 20      | 0       | 9,13916   |
| 0       | 0       | -11,1271 | 19,556  | 12,5316 | 41,8387 | 20      | 0       | 11,2395   |
| 0       | 0       | -8,51245 | 20,8276 | 15,8838 | 42,3002 | 20      | 0       | 12,6907   |
| 0       | 0       | -5,4801  | 21,8224 | 19,5951 | 42,4981 | 20      | 0       | 14,4522   |
| 0       | 0       | -1,82268 | 22,4261 | 23,8748 | 42,323  | 20      | 0       | 16,5926   |
| 0       | 0       | 3,40671  | 22,2406 | 29,6693 | 41,2854 | 20      | 0       | 17,4812   |
| 0       | 0       | 10,32    | 19,9937 | 36,5901 | 39,1282 | 20      | 0       | 12,9874   |
| 0       | 0       | 13,1398  | 18,2646 | 38,9175 | 38,0576 | 20      | 0       | 9,5292    |

The screenshot shows the software interface. On the left is a table with 9 columns: x1 [mm], y1 [mm], x2 [mm], y2 [mm], x3 [mm], y3 [mm], x4 [mm], y4 [mm], and cMin [mm]. The table contains 10 rows of numerical data. To the right of the table is a window titled 'Result 1' displaying a gear diagram with four red circles of varying sizes arranged in a vertical line, all enclosed within a larger red circle.

Below the table and result window is a 'Result overview' section. It contains two input fields: 'Gear ratio' with the value '6' and 'Number of results' with the value '16'. To the right of this section are three docked windows titled 'Result 5', 'Result 10', and 'Result 15', each showing a similar gear diagram with four red circles.

# Literaturverzeichnis

## 10 Literaturverzeichnis

- DIN 732. 2010.** *Wälzlager - Thermisch zulässige Betriebsdrehzahl - Berechnung und Beiwerte.* s.l. : DIN, 2010.
- DIN 743-1. Dezember 2012.** *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Grundlagen.* s.l. : DIN, Dezember 2012.
- DIN 743-2. Dezember 2012.** *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Formzahlen und Kerbwirkungszahlen.* s.l. : DIN, Dezember 2012.
- DIN 743-3. Juli 2024.** *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Werkstoff-Festigkeitswerte.* s.l. : DIN, Juli 2024.
- DIN 743-4. Dezember 2012.** *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen - Schädigungsäquivalente Spannungsamplitude.* s.l. : DIN, Dezember 2012.
- DIN 3967. 1978.** *Getriebe-Paßsystem; Flankenspiel, Zahndickenabmaße, Zahndickentoleranzen, Grundlagen.* DIN, August 1978.
- DIN 3975-1. 2017.** *Begriffe und Bestimmungsgrößen für Zylinder-Schneckengetriebe mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen - Teil 1: Schnecke und Schneckenrad.* DIN, September 2017.
- DIN 7190-1. 2017.** *Pressverbände - Teil 1: Berechnungsgrundlagen und Gestaltungsregeln für zylindrische Pressverbände.* 2017.
- ISO 76. 2006.** *Rolling bearings - Static load ratings.* s.l. : ISO, 2006.
- ISO 281. 2007.** *Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life.* 2007.
- ISO 286-1. 2010.** *ISO code system for tolerances of linear sizes - Basis of tolerances, deviations and fits.* 2010.
- ISO 1002. 1983.** *Rolling Bearings - Airframe bearings - Characteristics, boundary dimensions, tolerances, static load ratings.* 1983.
- ISO/TR 1281-1. 2021.** *Rolling bearings - Explanatory notes on ISO 281 - Part 1: Basic dynamic load rating and basic rating life.* s.l. : ISO, 2021.
- ISO/TR 1281-2. 2008.** *Rolling bearings - Explanatory notes on ISO 281 - Part 2: Modified rating life calculation, based on a systems approach to fatigue stresses.* s.l. : ISO, 2008.
- ISO 3408-5. 2006.** *Static and dynamic axial load ratings and operational life.* s.l. : ISO, 2006.
- ISO 5753. 2009.** *Rolling bearings - Internal clearance - Part 1: Radial internal clearance for radial bearings.* 2009.

- ISO 6336-1. November 2019.** *Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors.* 2019.
- ISO 6336-2. November 2019.** *Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 2: Calculation of surface durability (pitting).* 2019.
- ISO 6336-3. November 2019.** *Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 3: Calculation of tooth bending strength.* 2019.
- ISO 6336-5. August 2016.** *Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 5: Strength and quality of materials.* 2016.
- ISO 6336-6. November 2019.** *Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 6: Calculation of service life under variable load.* 2019.
- ISO/TR 6336-30. December 2022.** *Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 30: Calculation examples for the application of ISO 6336 parts 1,2,3,5.* 2022.
- ISO 7902-1. June 2020.** *Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions - Calculation procedure - Third edition.* s.l. : ISO, June 2020.
- ISO 7902-2. June 2020.** *Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions - Functions used in the calculation procedure - Second edition.* s.l. : ISO, June 2020.
- ISO 7902-3. June 2020.** *Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions - Permissible operational parameters - Second edition.* s.l. : ISO, June 2020.
- ISO/TR 10657. 2021.** *Explanatory notes on ISO 76.* s.l. : ISO, 2021.
- ISO 15312. 2003.** *Rolling bearings - Thermal speed rating - Calculation and coefficients.* 2003.
- ISO 16281. 2025.** *Rolling Bearings - Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded rolling bearings.* s.l. : ISO, 2025.
- ISO 17956. 2025.** *Rolling Bearings - Method for calculating the effective static safety factor for universally loaded rolling bearings.* s.l. : ISO, 2025.
- ISO 20056-1. 2017.** *Rolling bearings - Load ratings for hybrid bearings with rolling elements made of ceramic - Part 1: Dynamic load ratings.* 2016.
- ISO 20056-2. 2017.** *Rolling bearings - Load ratings for hybrid bearings with rolling elements made of ceramic - Part 2: Static load ratings.* 2017.
- ISO 21771-1. 2024** *Cylindrical involute gears and gear pairs - Part 1: Concepts and Geometry.* s.l. : ISO, October 2024.

- AGMA 925. 2003.** *Effect of Lubrication on Gear Surface Distress.* 2003.
- Baalmann, K. 1994.** Gleichung für die Sollviskosität nach DIN ISO 281. *Tribologie und Schmierungstechnik.* 1994.
- Baly, Hatem. 2005.** *Reibung fettgeschmierter Wälzlager.* Hannover : Universität Hannover, 2005.
- Barnsby, Roger. 2003.** *Life ratings for modern rolling bearings.* NewYork : ASME International, 2003.
- Boresi, Arthur P. and Schmidt, Richard J. 2005.** *Advanced Mechanics of materials.* s.l. : John Wiley&Sons, 2005.
- Correns, Martin. 2015.** Berechnung der Ermüdungslebensdauer von Wälzkörpern. *11. VDI Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen.* 2015.
- de Mul, J. M., Kalker, J. J. and Fredrikson, B. 1986.** The Contact Between Arbitrary Curved Bodies of Finite Dimensions. *Journal of Tribology.* 1986, Vol. 108.
- Fujiwara, Hiroki and Yamauchi, Kazuto. 2010.** Tolerance Design of Logarithmic Roller Profiles in Cylindrical Roller Bearings. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing.* 4, 2010, Vol. 4.
- Frantz, P. P. and Leveille. 2001.** An Approach to Predicting the Treshold of Damage to an Anular Contact Bearing During Truncation. *Aerospace Report No. TR-2001(8565)-4* March, 2001
- Gohar, Ramsey. 2001.** *Elastohydrodynamics.* London : Imperial College Press, 2001.
- Harnoy, Avraham. 2003.** *Bearing Design in Machinery.* New York, Basel : Marcel Dekker, 2003.
- Harris, T., Rumbarger, J. H. and Butterfield, C. P. 2009.** *Wind Turbine Design Guideline DG03: Yaw and Pitch Rolling Bearing Life.* Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- Harris, Tedric A. and Kotzalas, Michael N. 2007.** *Rolling Bearing Analysis: Advanced Concepts of Bearing Technology.* s.l. : CRC Press, 2007.
- Harris, Tedric A. and Kotzalas, Michael N. 2007.** *Rolling Bearing Analysis: Essential Concepts of Bearing Technology.* CRC Press : s.n., 2007.
- Heemskerck, R. 1980.** EHD lubrication in rolling bearings, review of theory and influence on fatigue life. *TRIBOLOGIA E LUBRICATIONE.* 1980.
- Houpert, L. 1999.** Bearing Life Calculation in Oscillatory Applications. *Tribology Transactions.* 1999, Bd. 42.



- Koch, Asmus. 1996.** *Steigerung der Höchstdrehzahl von Schrägkugellagern bei Ölminimalmengenschmierung.* Aachen : Shaker Verlag, 1996.
- Nakajima, Katsuhiko. 1995.** Thermal Contact Resistance Between Balls and Rings of a Bearing Under Axial, Radial, and Combined Loads. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer.* 9, 1995, Bd. 1.
- Niemann, G. und Winter, H. 2003.** *Maschinenelemente Band 2: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe - Grundlagen, Stirnradgetriebe.* Heidelberg : Springer, 2003.
- . **2004.** *Maschinenelemente Band 3: Schraubrad-, Kegelrad-, Schnecken-, Ketten-, Riemen-, Reibradgetriebe, Kupplungen, Bremsen, Freiläufe.* Heidelberg : Springer, 2004.
- Niemann, G., Winter, H. und Höhn, B.-R. 2005.** *Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen.* Heidelberg : Springer, 2005.
- Paland, E.-G. 1968.** Die Lastverteilung in einem auf der Ebene abgestützten Zylinderrollenlager. *Maschinenbautechnik (Schmierungstechnik).* 17, 1968, Bd. 8.
- Schlecht, Berthold. 2007.** *Maschinenelemente 1.* München : Pearson Studium, 2007.
- . **2010.** *Maschinenelemente 2.* München : Pearson Studium, 2010.
- Teutsch, Roman and Sauer, Bernd. 2004.** An Alternative Slicing Technique to Consider Pressure Concentrations in Non-Hertzian Line Contacts. *Journal of Tribology.* 2004, Vol. 126.
- Cowper., G. R. June 1966.** The Shear Coefficient in Timoshenko's Beam Theory. *Journal of Applied Mechanics – Transactions of the ASME.* June 1966.
- Hutchinson, J. R. January 2001.** Shear Coefficients for Timoshenko Beam Theory. *Journal of Applied Mechanics – Transactions of the ASME.* January 2001.



**- 3 -**

- 3D Grafiken 29
- 3D-elastische Bauteile 124
- 3D-elastisches Bauteil als Gehäuse 131
- 3D-elastisches Bauteil als Welle 126

**- A -**

- aISO 169
- Aktualisieren 25
- Allgemeine Randbedingungen 94
- Allgemeine Verwendung 25
- Anforderungen 25
- Anregung des Lagers 104
- Anregung durch Verschiebung 104
- Auswahl der Toleranzlage für Lagerspiele 172
- Axiale Steifigkeit 102
- Axial-Kegelrollenlager 197
- Axial-Pendelrollenlager 200
- Axial-Radial-Rollenlager-Berechnung 296
- Axialrillenkugellager 182
- Axial-Schräggugellager 185
- Axialspiel 218, 274
- Axial-Zylinderrollenlager 193
- Axial-Zylinderrollenlager (zweireihig) 194

**- B -**

- Benutzerdefinierte Protokollvorlagen 53
- Berechnung der Hertzchen Pressung 286
- Berechnung der Zahnrad-Positionen 342
- Berechnung für Kugelgewindetriebe 266
- Berechnung mit Lastkollektiv 119
- Beschleunigungen 67

**- C -**

- CAD-Geometrie importieren 132
- Campbell Diagramm 68
- COM-Schnittstelle 54

**- D -**

- Dämpfungsmatrix 101
- Datenbank 31
- Datenbank-Tabellen 34
- Diagramm Optionen 25
- Diametrales Lagerspiel 218

- Dicke des Schmierstoffs 170
- DIN 743 71, 80, 105
- Dokumentationspunkt 105
- Druck-Viskositäts-Koeffizient 226
- Duplex Lager 189
- Dynamisch zulässige Biegespannung 236
- Dynamische Belastung 91
- Dynamische Tragzahl 204

**- E -**

- Eigenfrequenzen 68, 139
- Eigenfrequenzen berechnen 68
- Einbau 18
- Einheitensystem 25
- Elastische 3D-Planetenträger 128
- Elastische Aufweitung der Ringe 175
- EP-Additive 225
- Ermüdungsgrenzbelastung 204
- Erweiterte Lebensdauer berechnen 177
- Exzentrizität der Kraft 89

**- F -**

- Faktor für Verunreinigungsbeiwert 224
- Festigkeitsberechnung der Welle 80
- Fettgebrauchsdauer 242
- Flankenlinie-Endrücknahme 116
- Flankenlinien-Balligkeit 115
- Flankenlinien-Modifikationen 114
- Flankenlinien-Winkelmodifikation 116
- Frequenzgang 139
- Fusspunkterregung 104

**- G -**

- Geometrie der Stützrollen 233
- Geometrie der Welle 81
- Geometrie des Kugelgewindetriebs 270
- Gewicht 67
- Grafiken 2D 27
- Grafiken exportieren als... 25
- Grenzlastdiagramm 242
- Gyroskopischer Effekt 68
- Gyroskopisches Moment 173

**- H -**

- Halbes radiales Pendelrollenlager 199
- Harmonische Antwort 139

Härtetiefe 172  
 Hauptbericht 52  
 Hintergrundzeichnung 83

**- I -**

Inhalt einfrieren 25  
 INI-Datei 18  
 ISO 20056 178  
 ISO 281 204  
 ISO 286 221  
 ISO 3408-5 268  
 ISO 492 219  
 ISO 5753 217  
 ISO 76 204

**- K -**

Kegelrad 87  
 Kinematische Viskosität 225  
 Konfiguration 18  
 Konfigurationen 74, 121  
 Konformität 209  
 Kontaktsteifigkeit 104  
 Kraft 89  
 Kräfte 84  
 Kräfteverlauf der Wellen 84  
 Kreuzrollenlager 201  
 Kugelgewindetrieb 100  
 Kupplung 85  
 Kupplung für Reaktionsmoment 100

**- L -**

Lager für Wellen 93  
 Lagertypen 178  
 Lastkollektiv 119, 231, 277, 312  
 Lastkollektiv berücksichtigen 73  
 Lebensdauer für Wälzkörper 175  
 Logarithmisches Profil 210

**- M -**

Masse 89  
 Mehrlagiger Presssitz 220  
 Mehrschichtiger Presssitz 61

**- N -**

Nadellager 193

Nichtlineare Wälzlagersteifigkeit berücksichtigen 106  
 Nichtlineares Wellenmodell verwenden 73

**- O -**

Optionen für Kreiselmoment 173  
 Optionen für Lagertyp 178  
 Orbit speed 253  
 Oszillierendes Lager 171

**- P -**

Parameter für die Befehlszeile 30  
 Parameter Variationen 35  
 Pendelkugellager (einreihig) 188  
 Pendelkugellager (zweireihig) 188  
 Pendelrollenlager 199  
 Planetenlagerung 102  
 Position für ersten Wälzkörper 71, 173  
 Presssitz des Lagers 219

**- R -**

Radiales zylindrisches Radialgleitlager 99  
 Radial-Kegelrollenlager 194  
 Radial-Kegelrollenlager (zweireihig) 196  
 Radial-Rillenkugellager 180  
 Radial-Schräggkugellager 183  
 Radial-Zylinderrollenlager 191  
 Radial-Zylinderrollenlager (zweireihig) 192  
 Randbedingungen 93  
 Reliability 257  
 Resultatetabellen 54  
 Resultateübersicht 51  
 REXS-Exportieren 76  
 REXS-Importieren 76  
 Riemenscheibe 91  
 Rollenprofilierung 210

**- S -**

Scheibenwinkel 209  
 Schmiegun 209  
 Schmierstofftemperatur 75, 225  
 Schmierung 75, 223  
 Schnecke 88  
 Schneckenrad 88  
 Schrägrollenlager 201  
 Schubverformungen 72, 107, 234

Schweisspunkt 101  
Statisch zulässige Biegespannung 236  
Statische Tragzahl 204  
Statistische Parameter-Variationen 44  
Steifigkeitsmatrix 100  
Steifigkeitsmatrix des Gehäuses 74  
Steifigkeitsmatrix für Gehäuse 122  
Stirnrad 85  
Stützrollen 232

## - T -

Temperatur des Wälzkörpers 173  
Temperatur pro Element berücksichtigen 107  
Thermisch zulässige Betriebsdrehzahl 240  
Toleranz des Lagers 219  
Toleranzen  
    Lager 219  
    Wahrscheinliche Werte 172  
    Welle/Gehäuse 221  
Tonnenlager 198  
Toroidallager für Rollen 198  
Tragzahlen 271

## - U -

Übermass-Fit 61  
Unausgewogenheit 90  
Unwucht 70, 89, 90

## - V -

Verlässlichkeit 169  
Video exportieren 25  
Video-Export 29  
Vierpunktlager als Axiallager 187  
Vierpunktlager als Radiallager 186

## - W -

Wahrscheinliches Spiel 172  
Wälzlager 95  
Wälzlagerberechnung 166  
Welle importieren Geometrie 109  
Welle kopieren 108  
Welle teilen bei 108  
Wellen sortieren 76  
Wellen zufügen 76  
Wellenberechnung 64  
Winkel zum Kontakt 209, 272

## - Z -

Zentrifugalkräfte 171  
Zuverlässigkeit 268  
Zuverlässigkeit Wälzlager 71, 169  
Zweireihiges Axial-Schräggugellager 185  
Zweireihiges radiales Schräggugellager 183  
Zweireihiges Rillenkugellager 181  
Zylindrisches Lager 102