

Programmdokumentation LaMBDA

Inhaltsverzeichnis

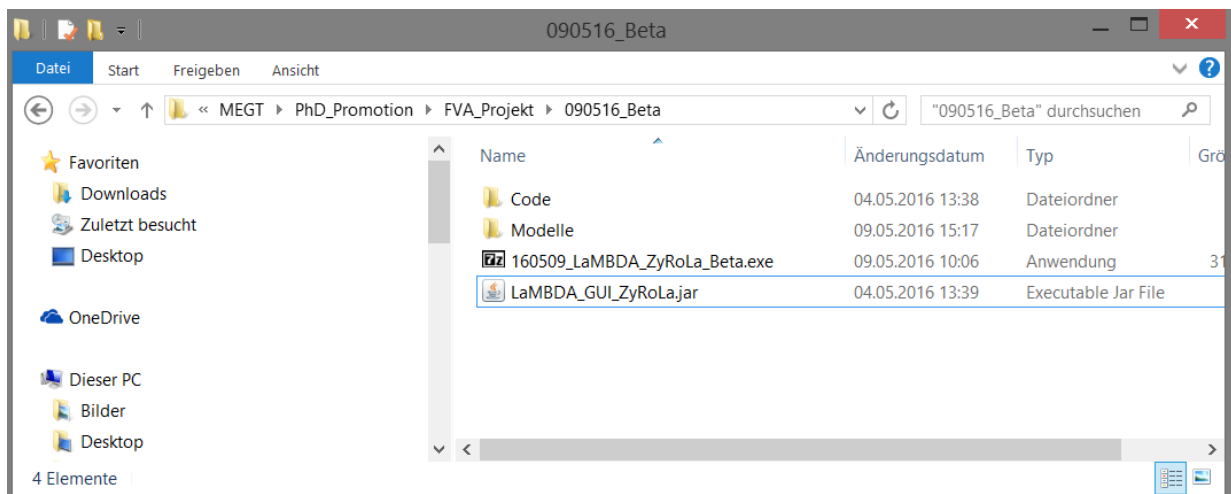
1	Systemvoraussetzungen.....	1
2	Nutzung der Benutzeroberfläche	1
3	Lagermodell in Simpack.....	6
4	Installation Wälzlagermodell	9
5	Typische Fehler/Probleme	12
6	Nutzungsbeispiel	13
7	Dokumentation ASCII-Ausgabe	21
8	Dokumentation Systemlager	29
9	Dokumentation – Einbindung einer flexiblen Anschlusskonstruktion	35

1 Systemvoraussetzungen

Die Benutzeroberfläche von LaMBDA kann unter Windows XP/Vista/7/8/10 32/64bit und Linux 32/64bit aufgerufen werden. Für die Nutzung von LaMBDA muss mindestens das Java Runtime 8 installiert sein (<http://java.com/de/>).

2 Nutzung der Benutzeroberfläche

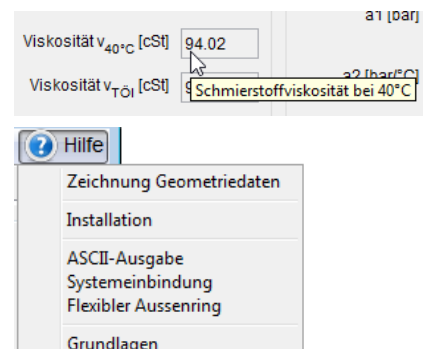
Die Benutzeroberfläche wird mit einem Doppelklick auf `LaMBDA_GUI_ZyRoLa.jar` gestartet.



Es öffnet sich das Hauptfenster von LaMBDA, in dem der Anwender Angaben zu Lagergeometrie, Randbedingungen usw. machen sowie Lagermodelle laden und speichern kann.

The screenshot shows the 'LaMBDA - Lager-MehrkörperBerechnung und Dynamik Analyse - ZyRoLaGUI Ver. 1.03' window. The 'Parameter' tab is active, showing various input fields for bearing parameters. The 'Aussenring' section includes fields for outer diameter, bore diameter, bore width, E-modulus, Poisson's ratio, density, and bearing type. The 'Innenring' section includes similar fields for inner diameter, bore diameter, bore width, E-modulus, Poisson's ratio, density, and bearing type. The 'Wälzkörper' section includes fields for diameter, length, number of balls, E-modulus, Poisson's ratio, density, profile type, radial clearance, and axial clearance. The 'Käfig' section includes a field for cage type. The 'Optionen' section includes checkboxes for 'Bordkräfte', 'ASCII-Ausgabe aktivieren', 'Einzellager', 'Kippen/Schränken', 'Flexibler Aussenring', and 'Systemlager'. The 'Simulation' section includes fields for contact type, Gauss integration points, number of curvefit points, maximum pressure for curvefit, and simulation parameters like speed, axial force, radial force, simulation time, sampling frequency, and ramp time. At the bottom, there are buttons for 'Speichern nach *.spck' and 'Lagerdaten aus Datenbank'.

Beim ersten Start muss LaMBDA zunächst konfiguriert und Simpack für die Nutzung der Lagermodelle eingerichtet werden (siehe Abschnitt 4 Installation Wälzlagermodell). Jedes Eingabefeld der Benutzeroberfläche ist mit einer so genannten Tooltiphilfe versehen. Hierzu muss der Mauszeiger kurz über dem entsprechenden Eingabefeld platziert und nicht bewegt werden. Ausführliche Hilfedokumente und eine Zeichnung mit den entsprechenden Geometriegrößen werden in der finalen Version über die Schaltfläche „Hilfe“ verfügbar sein.



2.1 Geometriedaten

Nach erfolgreicher Installation und Konfiguration können über die Benutzeroberfläche Wälzlagermodelle für Simpack erzeugt, gespeichert und geladen werden. Im Startbildschirm, bzw. „Parameter“ Tab sind unter „Außenring“, „Innenring“ und „Wälzkörper“ die Grund- und Innengeometrien des zu simulierenden Zylinderrollenlagers einzutragen. Hierzu wird in alle Eingabefelder der entsprechende Wert eingetragen. Das verwendete Zahlenformat verwendet als Dezimaltrennzeichen den Punkt. Falsche Eingabeformate werden automatisiert korrigiert (z.B. ersetzen von Komma durch Punkt).

Die Geometriedateneingabe kann über die Datenbankfunktion vereinfacht werden. Über die Datenbanken der FVA-Workbench® können die hinterlegten Daten von Standardlagern automatisch in die Eingabemaske übernommen werden. Über den Button „Lagerdaten als Datenbank“ können die hin-

terlegten Zylinderrollenlager eingeladen werden. Über eine Suchfunktion kann schnell auf das gewünschte Lager zugegriffen werden. Ein Doppelklick auf das Lager bzw. den Button „Lade Lagerdaten“ überträgt die Daten in die Eingabemaske.

Kurzzeichen	d	D	B
NU2210-E-TVP2	50.000	90.000	23.000
NU2211-E-TVP2	55.000	100.000	25.000
NU2212-E-TVP2	60.000	110.000	28.000
NU2213-E-TVP2	65.000	120.000	31.000
NU2214-E-TVP2	70.000	125.000	31.000
NU2215-E-TVP2	75.000	130.000	31.000
NU2216-E-TVP2	80.000	140.000	33.000
NU2217-E-TVP2	85.000	150.000	36.000

Aussenring		Innenring		Wälzkörper	
Aussendurchmesser (mm)	90.0	Innendurchmesser (mm)	50.0	Durchmesser (mm)	12.0
Laufbahndurchmesser (mm)	82.022	Laufbahndurchmesser (mm)	57.977	Länge (mm)	11.0
Laufbahnbreite (mm)	23.0	Laufbahnbreite (mm)	23.0	Anzahl(-)	18
E-Modul (N/mm ²)	210000.0	E-Modul (N/mm ²)	210000.0	E-Modul (N/mm ²)	210000.0
Querkontraktionszahl	0.3	Querkontraktionszahl(-)	0.3	Querkontraktionszahl(-)	0.3
Dichte (kg/m ³)	7850.0	Dichte (kg/m ³)	7850.0	Dichte (kg/m ³)	7850.0
Lagertyp	NU			Profiltyp	4 - Kreisprofil w/Rundungs...
Borddurchmesser (mm)	77.756			Profilradius (mm)	1400.0
Bordbreite (mm)	6.0			radiales Betriebsspiel (µm)	45.0

2.2 Weitere Parameter

Unter „Optionen“ und „Simulation“ werden z.B. Angaben zu Berechnungsmodellen, Detaillierungsgrad und Randbedingungen vorgenommen. Die Beschreibung einzelnen Punkte kann der Grundlegendokumentation entnommen werden.

Optionen		Simulation	
<input type="checkbox"/> Bordkräfte	<input checked="" type="checkbox"/> Kippen/Schränken	Contact-Type	DIN ISO 281
<input type="checkbox"/> ASCII-Ausgabe aktivieren	<input type="checkbox"/> Flexibler Aussenring	Gauss-Integrationspunkte	5.0
<input checked="" type="radio"/> Einzellager	<input type="radio"/> Systemlager	Anzahl der Curvefit-Punkte	100.0
		p _{max} für Curvefit	4000.0
		Einzellagerparameter:	
		Drehzahl (U/min)	0.0
		Axialkraft (N)	0.0
		Radialkraft (N)	0.0
		Simulationszeit (s)	0.3
		Sampling Frequenz	20000.0
		Rampenzeit (s)	0.1

Es kann ausgewählt werden, ob ein einzelnes Lager simuliert oder ein Lagermodell erzeugt werden soll, das in ein Systemmodell eingebunden werden kann (Auswahlpunkte „Systemlager“ und „Einzellager“). Bei der Simulation eines Einzellagers wird der Außenring als stehend angenommen und fest an die Umgebung gekoppelt. Der Innenring rotiert und wird mit einer Kraft belastet. Der Anwender kann hierbei Angaben zur Drehzahl, Radial- und Axialbelastung sowie der Simulationszeitdauer- und

Schrittweite machen. Belastung und Drehzahl werden über eine Rampenfunktion aufgebracht, deren Länge der Anwender im Feld „Rampenzeit“ anpassen kann.

Optionen	Simulation
<input type="checkbox"/> Bordkräfte <input type="checkbox"/> ASCII-Ausgabe aktivieren <input checked="" type="radio"/> Einzellager	Contact-Type: DIN ISO 281 Gauss-Integrationspunkte: 5.0 Anzahl der Curvefit-Punkte: 100.0 p _{max} für Curvefit: 4000.0
<input checked="" type="checkbox"/> Kippen/Schränken <input type="checkbox"/> Flexibler Aussenring <input type="radio"/> Systemlager	Einzellagerparameter: Drehzahl (U/min): 0.0 Axialkraft (N): 0.0 Radialkraft (N): 0.0 Simulationszeit (s): 0.3 Sampling Frequenz: 20000.0 Rampenzeit (s): 0.1

Für die Erstellung eines Lagermodells zur Systemeinbindung wird der Punkt „Systemlager“ aktiviert. Die Verwendung und Einbindung der Lager in Systemmodellen wird im Hilfedokument „Systemeinbindung“ ausführlich beschrieben. Beim Systemlager ergeben sich die Lagerbelastungen und -drehzahlen direkt aus der Systemanbindung. Für Modelle, die mit Initialwerten für Drehzahlen arbeiten, kann eine Startbedingung für Außen- und Innenringdrehzahl vorgegeben werden.

Optionen	Simulation
<input type="checkbox"/> Bordkräfte <input type="checkbox"/> ASCII-Ausgabe aktivieren <input type="radio"/> Einzellager	Contact-Type: DIN ISO 281 Gauss-Integrationspunkte: 5.0 Anzahl der Curvefit-Punkte: 100.0 p _{max} für Curvefit: 4000.0
<input type="checkbox"/> Kippen/Schränken <input type="checkbox"/> Flexibler Aussenring <input checked="" type="radio"/> Systemlager	
Systemlagerparameter: Drehzahl Aussenring (U/min): 0.0 Drehzahl Innenring (U/min): 0.0	

2.3 Käfig

Über das Auswahlfeld „Käfigtyp“ kann zwischen einem virtuellen Käfig, dem Taschenfederkäfig und Kontaktkäfigen gewählt werden. Der virtuelle Käfig hält die Wälzkörper allein über Bewegungsbeziehungen auf einem konstanten Winkelabstand. Der Taschenfederkäfig bildet die Taschenkräfte über einfache Federelemente nach. Die Kontaktkäfige bilden den Kontakt zwischen Wälzkörper und Käfigtasche über physikalische Zusammenhänge realitätsnah ab. Wird ein Kontaktkäfig ausgewählt, erscheinen als zusätzliche Geometrieingabefelder auch die Käfiggeometriedaten. Es wird unterschieden zwischen und Käfigen mit Wälzkörper-(M), Außenring- (MA) und Innenringführung (MB).

Käfig	
Käfigtyp	Massivkäfig
Aussendurchmesser (mm)	73.6
Innendurchmesser (mm)	66.4
Käfigbreite (mm)	11.55
Dicke Steg (mm)	0.217
Dichte (kg/m ³)	0.0
Elastizitätsmodul (N/mm ²)	0.0
Querkontraktionszahl (-)	0.0
Käfigmodell:	M
Taschendurchmesser (mm)	12.48

2.4 Schmierung und Reibung

Im Reiter „Schmierung & Reibung“ werden Angaben zu Reibungs- und Schmierungsbedingungen im Wälzlager gemacht. Die Grundlagen zur Reibungs- und Schmierstoffbeschreibung sind der Grundlegendokumentation zu entnehmen. Alle Eingabewerte werden mit plausiblen Vorgabewerten vorbelegt, mit denen auch die Modellverifikation durchgeführt wurde.

The screenshot shows the 'LaMBDA - Lager-MehrkörperBerechnung und Dynamik Analyse - ZyRoLaGUI Ver. 1.03' window. The 'Parameter' tab is active, and the 'Schmierung & Reibung' sub-tab is selected. The interface is organized into several functional groups:

- S&R Einstellungen:** Includes dropdowns for 'EHD-Reibung' (set to '1 - an') and 'Schmierstoffbeschreibung' (set to '1 - FVA 400').
- Öl (Oil):** Contains fields for 'Auswahl Öl' (FVA3), 'Viskosität $\nu_{40^\circ\text{C}}$ [cSt]' (94.02), 'Öltemperatur $T_{\text{Öl}}$ [°C]' (80.0), 'Viskosität $\nu_{T_{\text{Öl}}}$ [cSt]' (17.912), and 'Öldichte $\rho_{\text{Öl}}$ [g/ml]' (0.839).
- Festkörperreibung (Solid Friction):** Includes 'V_{statisch} [mm/s]' (5.0), ' μ_{statisch} [-]' (0.1), 'V_{dynamisch} [mm/s]' (10.0), and ' $\mu_{\text{dynamisch}}$ [-]' (0.08).
- Mischreibung (Mixed Friction):** Includes 'Oberfläche' (Behandelt), 'Sigma [mm]' (0.0), 'B_{zH} [-]' (2.1), and 'C_{zH} [-]' (0.85).
- Verluste (Losses):** Includes 'Materialhysteresekoeffizient [-]' (0.007), 'Rollwiderstandskoeffizient [-]' (0.005), and 'Rollwiderstandsexponent [-]' (0.65).
- Schmierstoffparameter (Lubricant Parameters):** A large section for 'FVA400' with fields for 'Grenzschubspannung [MPa]' (10.174), 'a1 [bar]' (361.0), 'a2 [bar/°C]' (2.775), 'b1 [-]' (0.007), 'b2 [1/°C]' (0.0), 'KV40 [cSt]' (94.02), 'KV100 [cSt]' (10.09), ' ρ_0 [g/ml]' (0.878), and ' α_p [g/(ml °C)]' (-0.001).
- Käfigreibung (Cage Friction):** Includes 'V_{statisch} [mm/s]' (50.0), 'V_{dynamisch} [mm/s]' (100.0), ' μ_{statisch} [-]' (0.03), and ' $\mu_{\text{dynamisch}}$ [-]' (0.02).
- Bordreibung (Rolling Friction):** Includes 'V_{statisch} [mm/s]' (1.0), 'V_{dynamisch} [mm/s]' (100.0), ' μ_{statisch} [-]' (0.02), and ' $\mu_{\text{dynamisch}}$ [-]' (0.01).

At the bottom, there are buttons for 'Speichern nach *.spck' and 'Lagerdaten aus Datenbank'.

Im Auswahlfeld „Öl“ kann der in der Simulation zu verwendende Schmierstoff ausgewählt werden. Als vordefinierte Schmierstoffe sind die in FVA400 – „Schmierfilmdicke“ betrachteten Öle enthalten. Benutzerdefinierte Eingaben können über die Auswahl „frei“ vorgenommen werden. Hierbei hat der Anwender die Auswahl zwischen einer Schmierstoffbeschreibung nach FVA400 oder nach Rodermund/Vogel. Die entsprechenden Schmierstoffparameter werden entsprechend der Auswahl angezeigt. Im Bereich „Festkörperreibung“ muss eine Reibwert-Relativgeschwindigkeitskurve zur Beschreibung der Festkörperreibung definiert werden. Wurde im Parameter-Reiter die Reibungsbeschreibung „Reibwert-Schlupf-Kurve“ gewählt, wird über diese Parameter allein das Reibverhalten im Kontakt nachgebildet. Die Beschreibung der Parameter zur Mischreibungsbeschreibung und der Verlustparameter ist der Grundlegendokumentation zu entnehmen. Ist ein Kontaktkäfig ausgewählt, sind zusätzlich die Parameter zur Beschreibung der Reibung im Wälzkörper-Käfigtaschen-Kontakt einzugeben. Die Berechnung der Normal- und Reibkräfte im Käfig-Laufbahn-Kontakt erfolgt auf Grundlage der Theorie für schmale Gleitlager (siehe Abschlussbericht). Für die Bordreibung stehen ebenfalls die relevanten Eingabefelder zur Verfügung.

2.5 Speichern und Laden

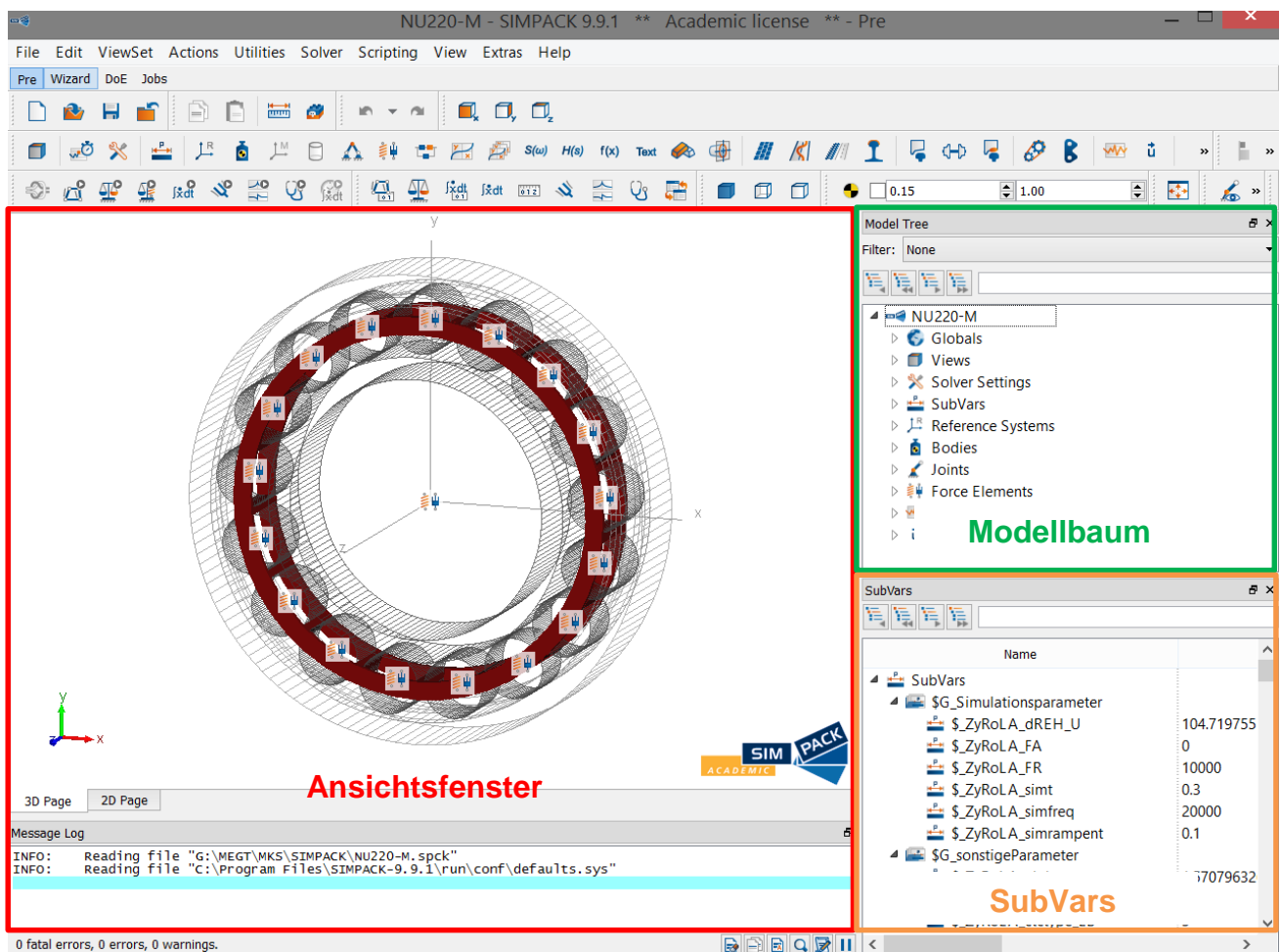
Im Reiter „Parameter“ kann über die Schaltflächen „Speichern nach *.spck“ das definierte Lager mit den festgelegten Bedingungen als Simpackmodell (.SPCK) gespeichert werden.

3 Lagermodell in Simpack

Im Folgenden wird die Nutzung der mit der Benutzeroberfläche erstellten Lagermodelle in Simpack beschrieben. Die Beschreibung bezieht sich auf die Simpackversion 9.9 und umfasst das Laden und Anpassen der Lagermodelle, das Durchführen von Simulationen und die Auswertung. In Kapitel 6 ist die Vorgehensweise exemplarisch für ein Beispiellager dokumentiert.

3.1 Lagermodell einladen – Simpack

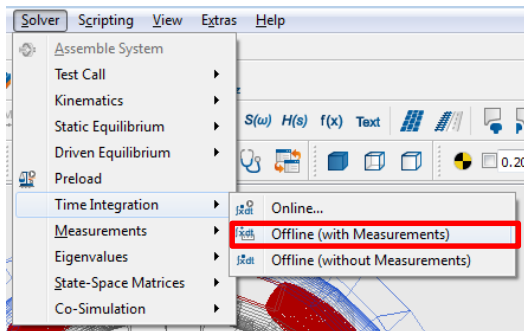
Wenn das Wälzlagermodell über die Benutzeroberfläche gespeichert wurde, kann es in Simpack eingeladen werden. Hierzu wird Simpack gestartet und über den Menüpunkt **File** -> **Open** die gespeicherte SPCK-Datei (%modellname%.spck) ausgewählt und mit einem Klick auf **Öffnen** eingeladen. Im Ansichtsfenster erscheint das eingeladene Lagermodell, im Modellbaum wird die Modellstruktur angezeigt.



Änderungen oder Anpassungen am Modell können im Modellbaum durchgeführt werden. An dieser Stelle können beispielsweise die Simulationseinstellungen geändert werden (Solver Settings -> \$SLV_SolverSettings) oder die Lagerbelastung angepasst werden (Force Elements -> \$F_Force_Torque).

3.2 Simulation starten – Simpack

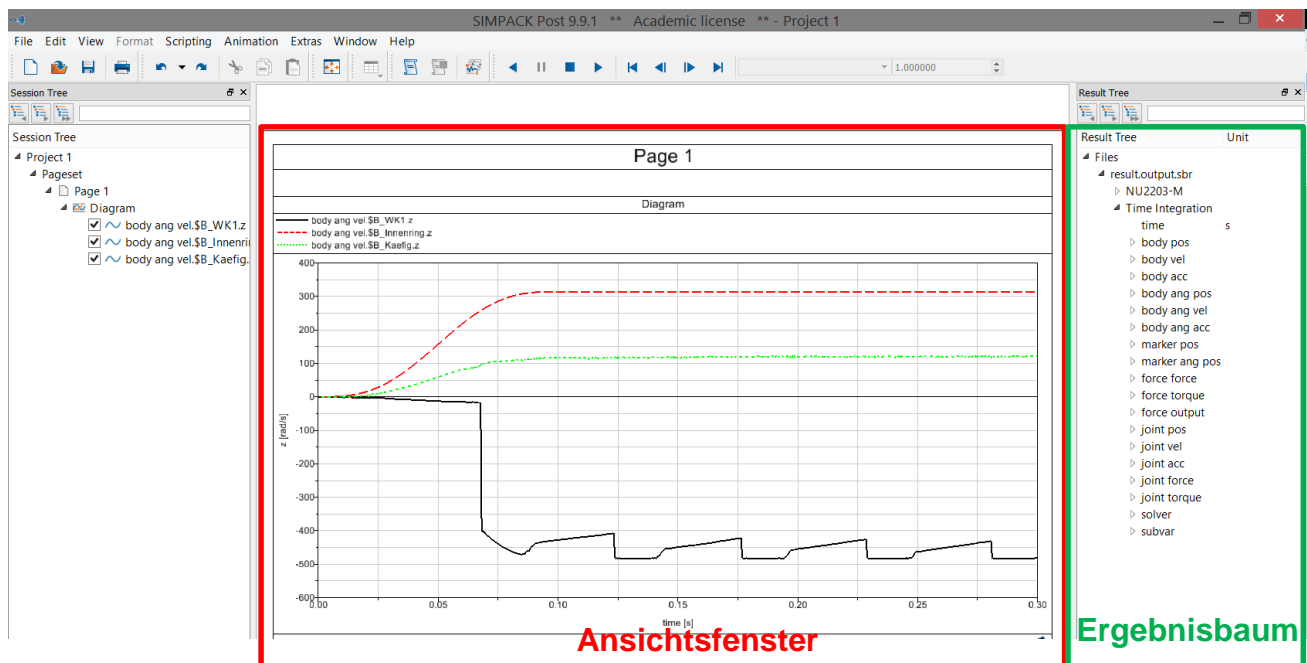
Über den Menüpunkt Solver -> Time Integration -> Offline (with Measurements) bzw. die entsprechende Schaltfläche in der Menüleiste kann die Berechnung gestartet werden.



Simpack springt danach automatisch auf den Reiter „Jobs“. Hier kann der Simulationsvorgang verfolgt werden. Wenn die Simulation beendet ist, erscheint der Text * Compressing SBR ... successfully finished. Damit ist die Berechnung abgeschlossen und die Ergebnisse können im PostProcessor ausgewertet werden.

3.3 Simulationen auswerten – Simpack PostProcessor

Zur Auswertung der Simulationen wird der Simpack PostProcessor gestartet. Über den Menüpunkt File -> Open wird die Ergebnisdatei (%modellname%_RESULT.sbr) eingeladen. Diese befindet sich im Unterordner %modellname%.output. Im Ergebnisbaum sind die verschiedenen Ergebniskomponenten aufgeführt und können per Drag-and-Drop im Ergebnisfenster angezeigt werden.



Unter `force output` sind für die Kontaktkräfte im Wälzlager bestimmte Ausgaben für jeden Kontakt vordefiniert. Die Kräfte F_{a_x} sind die Kräfte zwischen Wälzkörper und Außenring, F_{fi_x} die Kräfte zwischen Wälzkörper und Innenring und $F_{Kontaktkaefig_x}$ die Wälzkörper-Taschen-Kräfte.

Folgende Ausgabegrößen sind definiert:

Nr.	Bezeichnung	Einheit	Erklärung
1-4	Normalkraft (X, Y, Z, ABS)	[N]	Normalkraft im Kontakt
5-8	Dämpfungskraft (X, Y, Z, ABS)	[N]	Dämpfungskraft im Kontakt
9-12	Reibkraft (X, Y, Z, ABS)	[N]	Reibkraft im Kontakt
13-16	Reibmoment	[N-m]	Reibmoment im Kontakt
17	Schmierfilmhöhe	[μ m]	Thermisch korrigierte Schmierfilmhöhe (mittlere Scheibe)

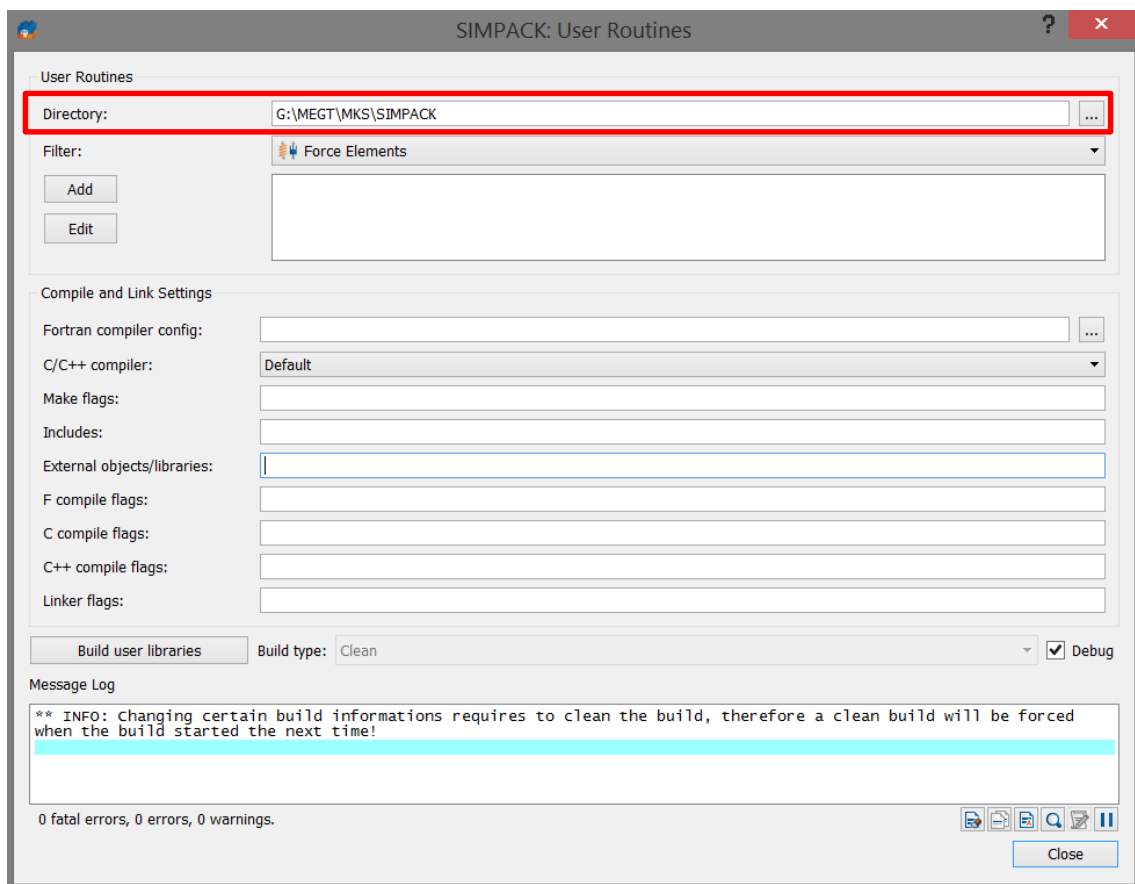
Nicht berechnete Werte (bei den Käfigkontakten) werden mit dem Wert -1 belegt. Die Kraftkomponenten werden dabei jeweils in X-, Y- und Z-Komponente und den Kraftbetrag aufgeteilt und wirken von Wälzkörper auf Laufbahn. Das zu Grunde liegende Koordinatensystem ist dabei das Referenzsystem (M_{lsys}) des Lagers.

4 Installation Wälzlagermodell

Die Installation der Userroutinen in Simpack für LaMBDA muss nur einmal vor der ersten Nutzung der Wälzlagermodelle durchgeführt werden. Im Folgenden sind die notwendigen Schritte hierfür beschrieben.

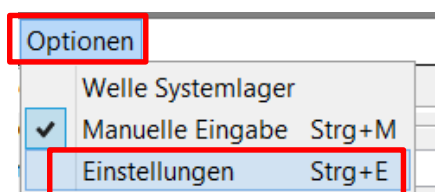
4.1 Simpack – Dateipfad für Benutzerrouinen festlegen

Sollten noch keine Benutzerrouinen in Simpack verwendet worden sein, muss Simpack zunächst für die Nutzung konfiguriert werden. Hierzu wird Simpack gestartet und das Menü für die Benutzerrouinen aufgerufen (*Actions* -> *Edit User Routines...*). Unter *Directory* muss der Pfad gewählt werden, in dem die Simpack Userrouinen gespeichert werden sollen (hier: *G:\MEGTWKS\SIMPACT*). Anschließend wird die Dialogbox geschlossen und Simpack beendet.

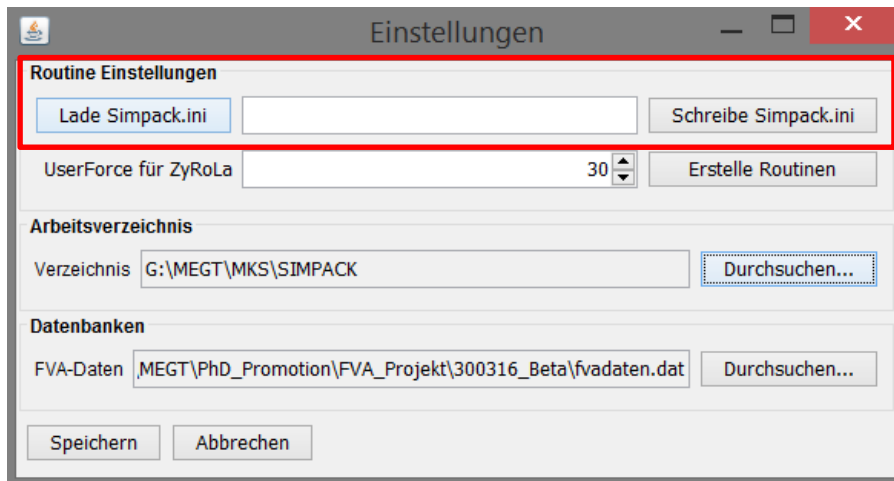


4.2 Benutzeroberfläche – Benutzerrouinen kopieren und einrichten

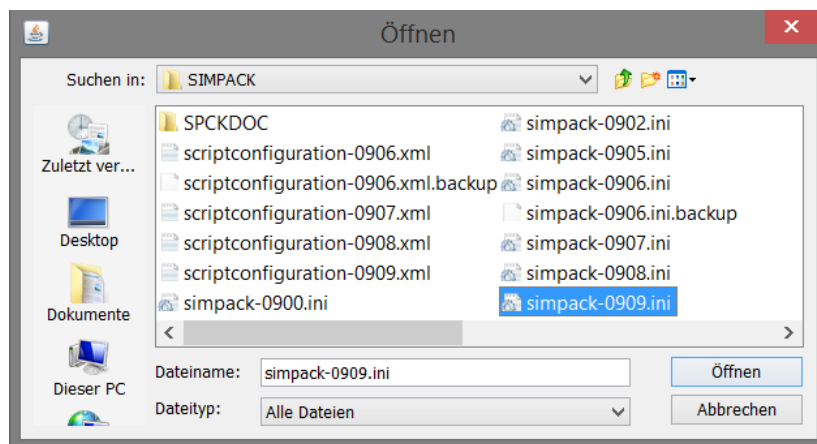
Beim ersten Start von LaMBDA müssen die Einstellungen für den Installationspfad von Simpack und das Einbinden der FVA-Lagerdatenbanken getroffen werden. Die geschieht über den Menüpunkt (*Optionen* -> *Einstellungen*).



Im folgenden Fenster wird Simpack für die Verwendung des Zylinderrollenlagermodells konfiguriert und der Speicherpfad der Datenbankendateien der FVA-Workbench® wird angegeben. Die Datenbanken befinden sich im Installationsverzeichnis der FVA-Workbench® unter dem Verzeichnis `Lagerkataloge`. Als Arbeitsverzeichnis kann der Nutzer ein Standardverzeichnis angeben, in dem die Lagermodelle abgelegt bzw. geladen werden. Der Speicherort kann später im Speichern-Dialog natürlich noch angepasst werden.



Für die Installation des Berechnungskerns sind die folgenden Schritte notwendig. Zunächst wird die Simpack-Konfigurationsdatei eingelesen, um den Speicherpfad für die User Routinen zu ermitteln. Dies geschieht mit einem Klick auf *Lade Simpack.ini*. Im folgenden Öffnen-Dialog muss die Datei *simpack-090x.ini* ausgewählt werden, wobei das x die Simpack-Versionsnummer angibt:



- `simpack-0909.ini` --- Simpack V9.9

Die Datei befindet sich im Verzeichnis `%APPDATA%\SIMPACK`, welcher automatisch im Öffnen-Dialog angezeigt wird. Sollte die Datei nicht im Standardordner sein, muss der Anwender den entsprechenden Pfad selbst auswählen. Bei diesem Öffnen wird automatisch ein Backup dieser Datei angelegt.

Nach dem Laden der Datei erscheint im Textfeld neben der Schaltfläche „*Lade Simpack.ini*“ jetzt der aktuelle Pfad der User Routinen, der in Simpack genutzt wird. Dieser kann hier gegebenenfalls manuell korrigiert werden. Danach muss mit *Schreibe Simpack.ini* die Konfigurationsdatei für die Verwendung des Lagermodells gespeichert werden.

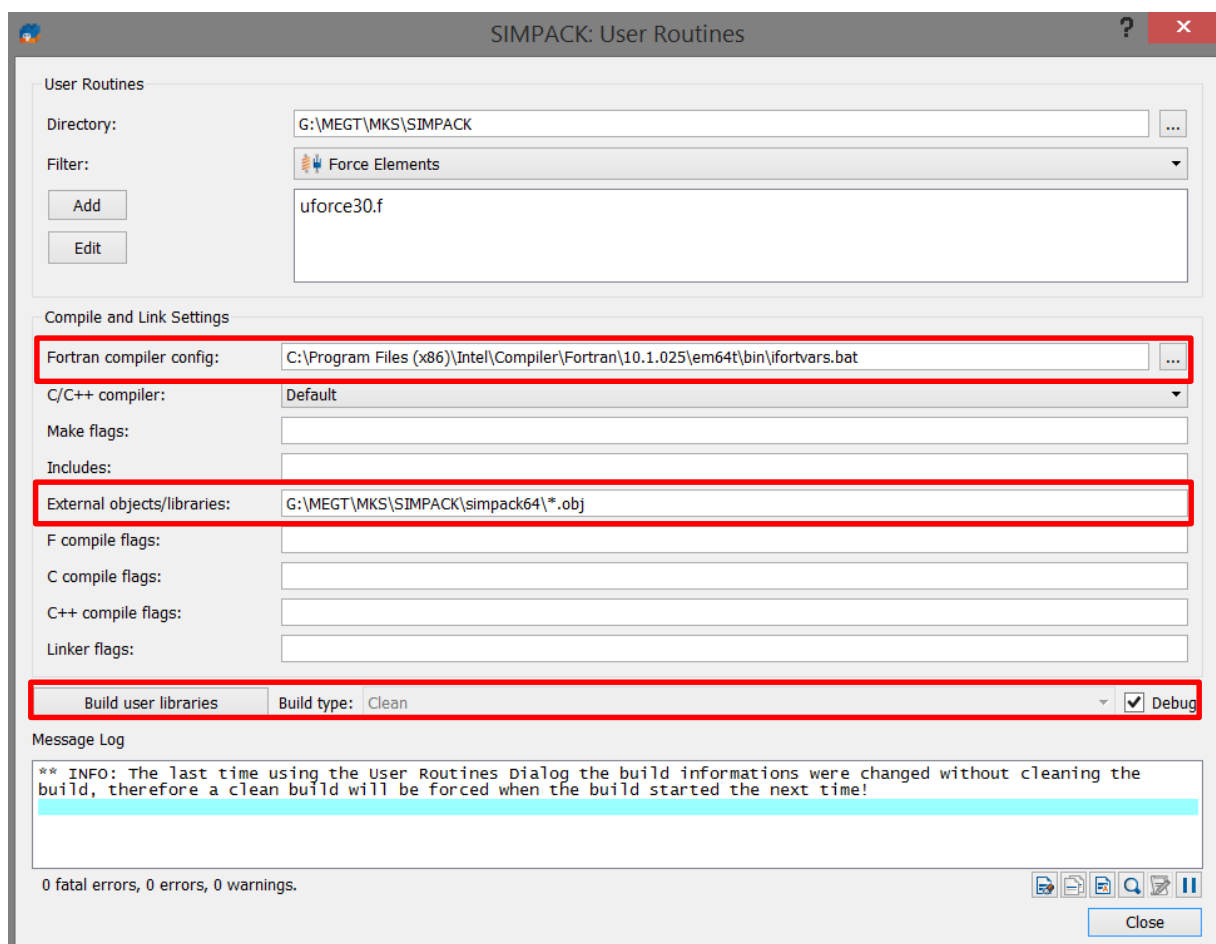
Über die darunterliegenden Nummernfelder kann der Anwender festlegen, welche uforce-Nummern für das Lagermodell verwendet werden. Erlaubt sind nach Simpackvorgabe die Nummern 20-40. Es muss nur eine Nummer gewählt werden (Userforce 30).

Mit dem Button *Erstelle Routine* muss der Berechnungskern und die uforce-Datei in das Userroutinen Verzeichnis geschrieben werden. Die Vorbereitungen für das Kompilieren der Userroutine sind damit abgeschlossen.

4.3 Kompilieren der Userroutine

Das Kompilieren der erstellten Userroutine muss über Simpack erfolgen. Hierzu wird Simpack geöffnet und über den Menüpunkt *Actions* -> *Edit User Routines...* die Userroutinen-Verwaltung geöffnet.

In diesem Fenster muss unter *Fortran compiler config*: noch der Pfad zur Datei *ifortvars.bat* des Intel Fortran Compilers angegeben werden. Diese Datei liegt im Unterordner *bin* des Installationspfades des Intel Fortran Compilers mit der jeweiligen Versionsnummer (zum Beispiel: *C:\Program Files (x86)\Intel\Compiler\Fortran\10.1.025\em64t\bin*).



Im Feld *Build type*: muss der Wert *clean* ausgewählt sein, damit der Berechnungskern in Simpack zur Verfügung steht. Mit einem Klick auf *Build user libraries* wird die uforce kompiliert und ist für die Simulation bereit.

Danach können über die GUI erstellten Zylinderrollenlager in Simpack eingelesen und simuliert werden.

4.4 Vorkompilierte Userroutinen

Als Alternative zum zuvor beschriebenen Erzeugen der Userroutinenbibliothek bzw. wenn kein Compiler verfügbar ist, kann auch eine vorkompilierte Version verwendet werden, die jeweils unter einer bestimmten Simpackversion lauffähig ist. Dabei entfällt das Kompilieren und die Berechnungsroutinen sind auf die Uforce 30 voreingestellt. Zum Verwenden des vorkompilierten Berechnungskerns muss die passende zip-Datei in das Verzeichnis entpackt werden, in dem die Simpack-Userroutinen liegen sollen. Bitte keine bestehenden Ordner überschreiben. In Simpack kann der entpackte Ordner dann als „User Routines Directory“ ausgewählt werden.

Die Dateien enthalten:

- \src\mbselem\uforce30.f bzw. uforce20 - Quellcode der Userroutinen
- \simpack32*.obj bzw. \simpack64*.obj - kompilierter Berechnungskern (Windows)
- \lib\...\user.dll - kompilierte Userroutinenbibliothek für Simpack

Wenn die Dateien bspw. in den Ordner " G:\MEGT\PhD_Promotion\FVA_Projekt\090516_Beta\Code l" entpackt werden, wird für die Simpackversion 9.9.1 darin der Unterordner "code" erstellt. Dieser Ordner (Bsp. " G:\MEGT\PhD_Promotion\FVA_Projekt\090516_Beta\Code") muss in Simpack über "Actions -> Edit User Routines" im Feld "Directory" ausgewählt werden. Anschließend kann das Fenster wieder geschlossen werden. Nun ist die LaMBDA-Userroutine in Simpack verfügbar. Die vorkompilierten Userroutinen müssen für die entsprechenden Simpackversion individuell erstellt werden. Die Lauffähigkeit für andere Versionen kann nicht garantiert werden.

5 Typische Fehler/Probleme

Im Folgenden sind einige mögliche Probleme bei der Nutzung von LaMBDA zusammengestellt und mögliche Lösungsansätze bzw. Ursachen aufgeführt.

Problem	Lösung/Ursache
Die Benutzeroberfläche startet nicht.	<ul style="list-style-type: none"> • Java nicht installiert. Bitte Java Runtime 8 installieren. • Falsche Java-Version installiert. Bitte Java Runtime 8 installieren.
Erstellung/Kompilieren der Userroutinen funktioniert nicht.	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Fortran Compiler installiert. Bitte die von Simpack freigegebene Version des Intel Fortran Compilers installieren. • Falsche Version des Intel Fortran Compilers installiert. Bitte die von Simpack freigegebene Version des Intel Fortran Compilers installieren. • Fehlerhafte Angabe bei „Fortran Compiler config“. Bitte auf das richtige Batchscript „ifortvars.bat“ verweisen. • Quellcode der uforce nicht/falsch angegeben. Bitte kontrollieren Sie die Angabe unter „Force Elements“.

	<ul style="list-style-type: none"> • Objektdatei nicht/falsch angegeben. Bitte kontrollieren Sie die Angabe bei „External objects/libraries“. • Führen Sie ein Build mit dem „Build Type“ „Clean“ durch. • Falsche Simpackversion. LaMBDA wurde für die Simpackversion 9.9 erstellt und getestet. Bitte nutzen Sie die Version 9.9.
Lagermodell (.spck) kann nicht eingeladen werden.	<ul style="list-style-type: none"> • Falsche Simpackversion. LaMBDA wurde für die Simpackversion 9.9 erstellt und getestet. Bitte nutzen Sie die Version 9.9. • Ungültiger Dateiname. Bitte keine Sonderzeichen außer „_“ im Dateinamen verwenden. • Datei wurde vom Anwender verändert und kann von Simpack nicht mehr verarbeitet werden. Bitte erzeugen Sie die Datei mit Hilfe der Benutzeroberfläche neu. • Datei wurde in einer neueren Simpackversion gespeichert. Nutzen Sie wenn möglich nur die Simpackversion 9.9.
Fehler bei der Simulation.	<ul style="list-style-type: none"> • Randbedingungen des Modells fehlerhaft. Randbedingungen überprüfen. • Zu große Unstetigkeiten in den Randbedingungen. Stetige oder Rampenfunktionen für die Randbedingungen nutzen.

6 Nutzungsbeispiel

Im Folgenden wird das Erstellen eines Lagermodells mit LaMBDA sowie das Laden, Simulieren und Auswerten in Simpack am Beispiel eines Einzellagers NU220-M beschreiben.

6.1 Lagermodell erstellen

Nach dem Öffnen der Benutzeroberfläche von LaMBDA per Doppelklick auf die Datei `LaMBDA_GUI_ZyRoLa.jar` öffnet sich das Programmfenster. Die Erstkonfiguration nach Abschnitt 4 - „Installation Wälzlagermodell“ sollte bereits durchgeführt sein.

LaMBDA - Lager-MehrkörperBerechnung und Dynamik Analyse - ZyRoLaGUI Ver. 1.03

Datei Optionen Manuelle Eingabe/Override Hilfe

Parameter Schmierung & Reibung

Ausserenring

Aussendurchmesser (mm) 0.0
 Laufbahndurchmesser (mm) 0.0
 Laufbahnbreite (mm) 0.0
 E-Modul (N/mm²) 0.0
 Querkontraktionszahl (-) 0.0
 Dichte (kg/m³) 0.0
 Lagertyp

Innenring

Innendurchmesser (mm) 0.0
 Laufbahndurchmesser (mm) 0.0
 Laufbahnbreite (mm) 0.0
 E-Modul (N/mm²) 0.0
 Querkontraktionszahl (-) 0.0
 Dichte (kg/m³) 0.0

Wälzkörper

Durchmesser (mm) 0.0
 Länge (mm) 0.0
 Anzahl (-) 1
 E-Modul (N/mm²) 0.0
 Querkontraktionszahl (-) 0.0
 Dichte (kg/m³) 0.0
 Profiltyp 3 - DIN ISO 281
 radiales Betriebsspiel (μm) 0.0
 axiales Wälzkörperspiel (μm) 0.0

Käfig

Käfigtyp virtueller Käfig

Optionen

☐ Bordkräfte ☐ Kippen/Schränken
☐ ASCII-Ausgabe aktivieren ☐ Flexibler Ausserenring
☒ Einzellager ☐ Systemlager

Simulation

Contact-Type DIN ISO 281
 Gauss-Integrationspunkte 5.0
 Anzahl der Curvefit-Punkte 100.0
 P_{max} für Curvefit 4000.0

Einzellagerparameter:

Drehzahl (U/min) 0.0
 Axialkraft (N) 0.0
 Radialkraft (N) 0.0
 Simulationszeit (s) 0.0
 Sampling-Frequenz (Hz) 0.0
 Rampenzeit (s) 0.0

Speichern nach *.spck Lagerdaten aus Datenbank

Ein Klick auf die Schaltfläche Lagerdaten aus Datenbank öffnet ein neues Fenster, in dem ein Lager ausgewählt werden kann (hier: NU220). Der in der Liste angegebene Käfigtyp spielt keine Rolle und wird erst anschließend in der GUI festgelegt.

Lagerdatenbank

Hersteller: FAG
 Lagerart: Zylinderrollenlager
 Suche: NU220

Kurzzeichen	d	D	B
NU2203-E-TVP2	17.000	40.000	16.000
NU2204-E-TVP2	20.000	47.000	18.000
NU2205-E-TVP2	25.000	52.000	18.000
NU2206-E-TVP2	30.000	62.000	20.000
NU2207-E-TVP2	35.000	72.000	23.000
NU2208-E-TVP2	40.000	80.000	23.000
NU2209-E-TVP2	45.000	85.000	23.000
NU220-E-TVP2	100.000	180.000	34.000

Lade Lagerdaten Schließen

Über die Schaltfläche Lade Lagerdaten oder Doppelklick auf das ausgewählte Lager werden die Lagerdaten in die entsprechenden Eingabefelder übernommen. Im Dropdownfeld Käfigtyp wird der Massivkäfig ausgewählt. Es werden zusätzlich die Geometrieparameter des Käfigs eingeblendet und mit den berechneten Geometriewerten belegt. Zusätzlich werden Angaben zur Lagerdrehzahl und –belastung vorgenommen.

LaMBDA - Lager-MehrkörperBerechnung und Dynamik Analyse - ZyRoLaGUI Ver. 1.03

Parameter | Schmiegun & Reibung | Lagertyp: NU220-M | Hilfe

Ausserenring		Innenring		Wälzkörper	
Aussendurchmesser (mm)	180.0	Innendurchmesser (mm)	100.0	Durchmesser (mm)	23.0
Laufbahndurchmesser (mm)	163.034	Laufbahndurchmesser (mm)	116.966	Länge (mm)	21.4
Laufbahnbreite (mm)	34.0	Laufbahnbreite (mm)	34.0	Anzahl (-)	17
E-Modul (N/mm²)	210000.0	E-Modul (N/mm²)	210000.0	E-Modul (N/mm²)	210000.0
Querkontraktionszahl (-)	0.3	Querkontraktionszahl (-)	0.3	Querkontraktionszahl (-)	0.3
Dichte (kg/m³)	7850.0	Dichte (kg/m³)	7850.0	Dichte (kg/m³)	7850.0
Lagertyp	NU			Profiltyp	3 - DIN ISO 281
Borstdurchmesser (mm)	155.183			radiales Betriebsspiel (µm)	67.5
Bordbreite (mm)	6.247			axiales Wälzkörperspiel (µm)	107.0
Bordöffnungswinkel (°)	1.1				

Käfig		Optionen		Simulation	
Käfigtyp	Massivkäfig	<input type="checkbox"/> Bordkräfte	<input type="checkbox"/> Kippen/Schränken	Contact-Type	DIN ISO 281
Aussendurchmesser (mm)	146.9	<input type="checkbox"/> ASCII-Ausgabe aktivieren	<input type="checkbox"/> Flexibler Ausserenring	Gauss-Integrationspunkte	5.0
Innendurchmesser (mm)	133.1	<input checked="" type="radio"/> Einzellager	<input type="radio"/> Systemlager	Anzahl der Curvefit-Punkte	100.0
Käfigbreite (mm)	22.47			p _{max} für Curvefit	4000.0
Dicke Steg (mm)	2.872			Einzellagerparameter:	
Dichte (kg/m³)	7850.0			Drehzahl (U/min)	1000.0
Elastizitätsmodul (N/mm²)	210000.0			Axialkraft (N)	0.0
Querkontraktionszahl (-)	0.3			Radialkraft (N)	10000.0
Käfigmodell:	M			Simulationszeit (s)	0.3
Taschendurchmesser (mm)	23.92			Sampling-Frequenz (Hz)	20000.0
				Rampenzeit (s)	0.1

Speichern nach *.spck | Lagerdaten aus Datenbank

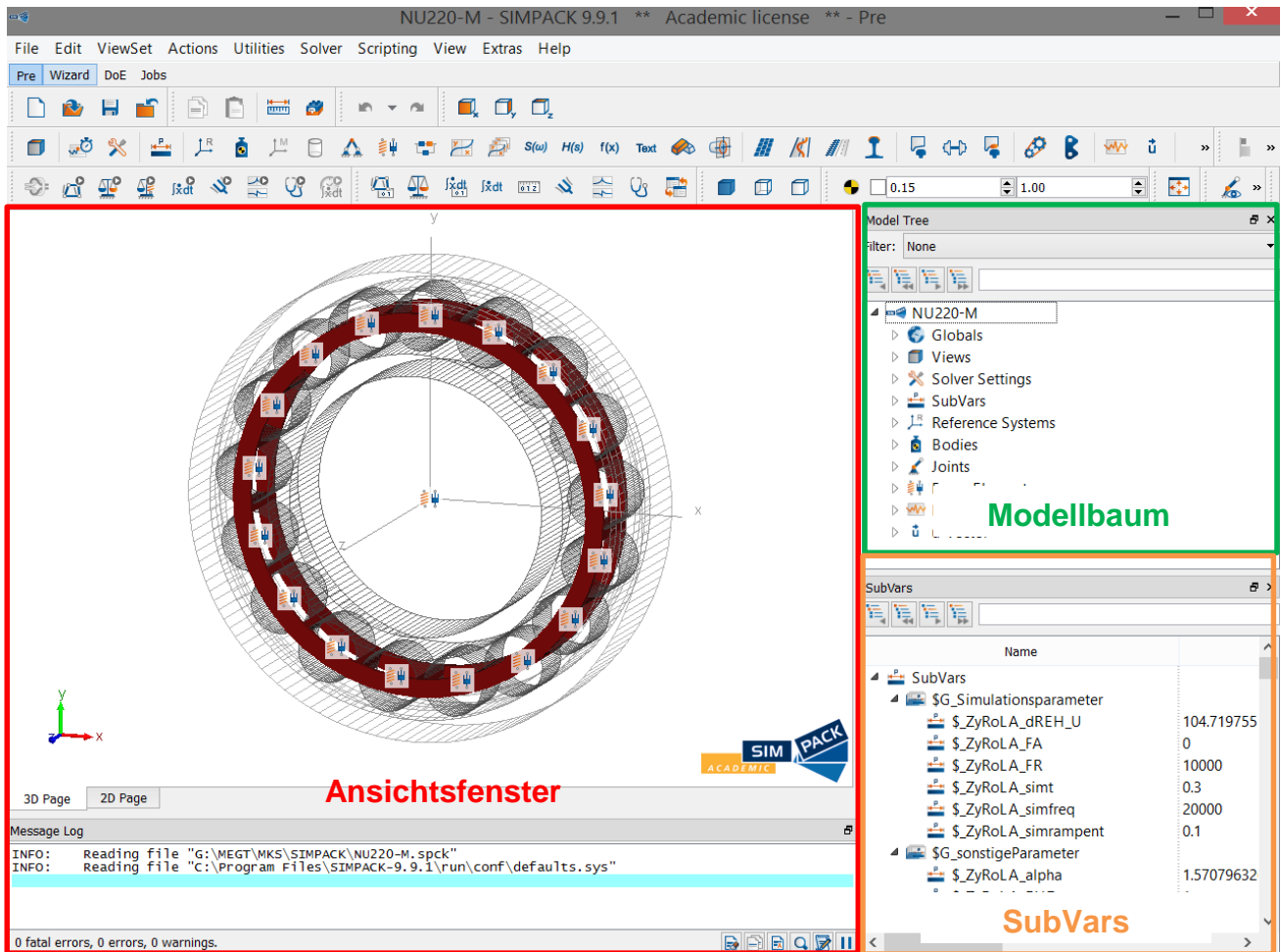
Ein Klick auf die Schaltfläche **Speichern nach *.spck** öffnet ein Fenster, in dem Speicherpfad und Dateiname (NU220-M.spck) für das Modell angegeben werden müssen. Mit Klick auf die Schaltfläche **Speichern** wird das Modell als Simpackmodelldatei gespeichert. Die Benutzeroberfläche kann nun geschlossen werden.

Die Modelldatei (NU220-M.spck) liegt nun im ausgewählten Ordner.

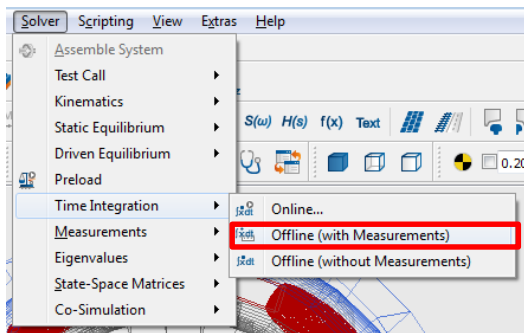
6.2 Lagermodell in Simpack einladen

Wenn das Wälzlagermodell über die Benutzeroberfläche gespeichert wurde, kann es in Simpack eingeladen werden. Hierzu wird Simpack gestartet und über den Menüpunkt **File -> Open** oder die entsprechende Schaltfläche das Öffnen-Dialogfenster geöffnet. Hier wird die gespeicherte SPCK-Datei (NU220-M.spck) ausgewählt und mit einem Klick auf **Öffnen** eingeladen.

Im Ansichtsfenster erscheint das eingeladene Lagermodell mit der entsprechenden Käfigdarstellung (hier: M-Käfig). Im **Modellbaum** wird die Modellstruktur angezeigt.



Über den Menüpunkt Solver -> Time Integration -> Offline (with Measurements) bzw. die entsprechende Schaltfläche in der Menüleiste kann die Berechnung gestartet werden.

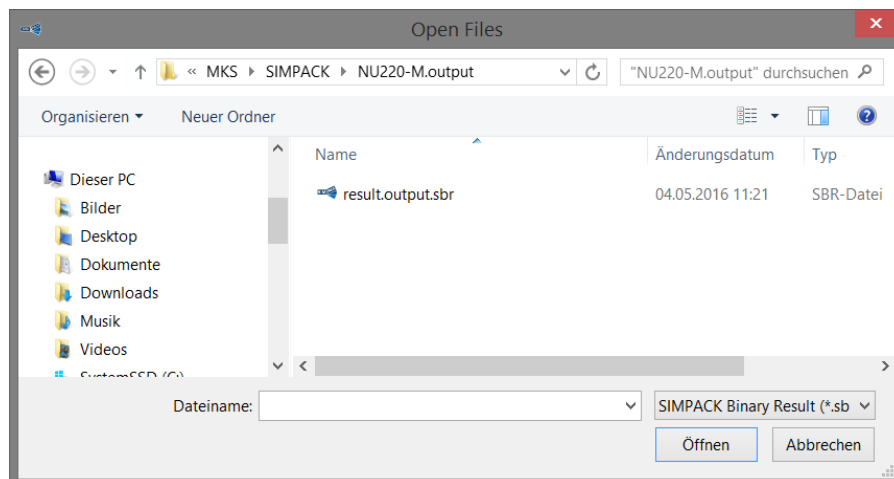
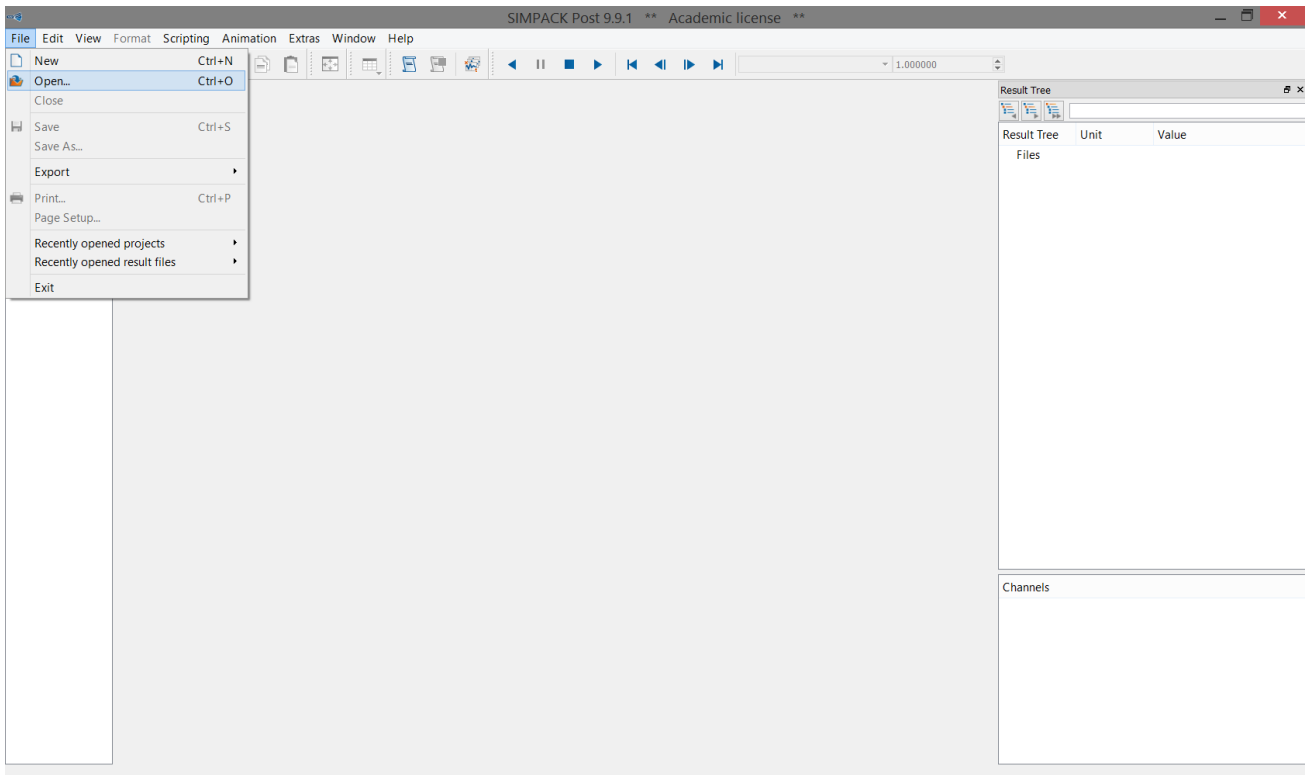


Simpack springt danach automatisch auf den Reiter „Jobs“. Hier kann der Simulationsvorgang verfolgt werden. Wenn die Simulation beendet ist, erscheint der Text * Compressing SBR ... successfully finished. Damit ist die Berechnung abgeschlossen und die Ergebnisse können im PostProcessor ausgewertet werden.

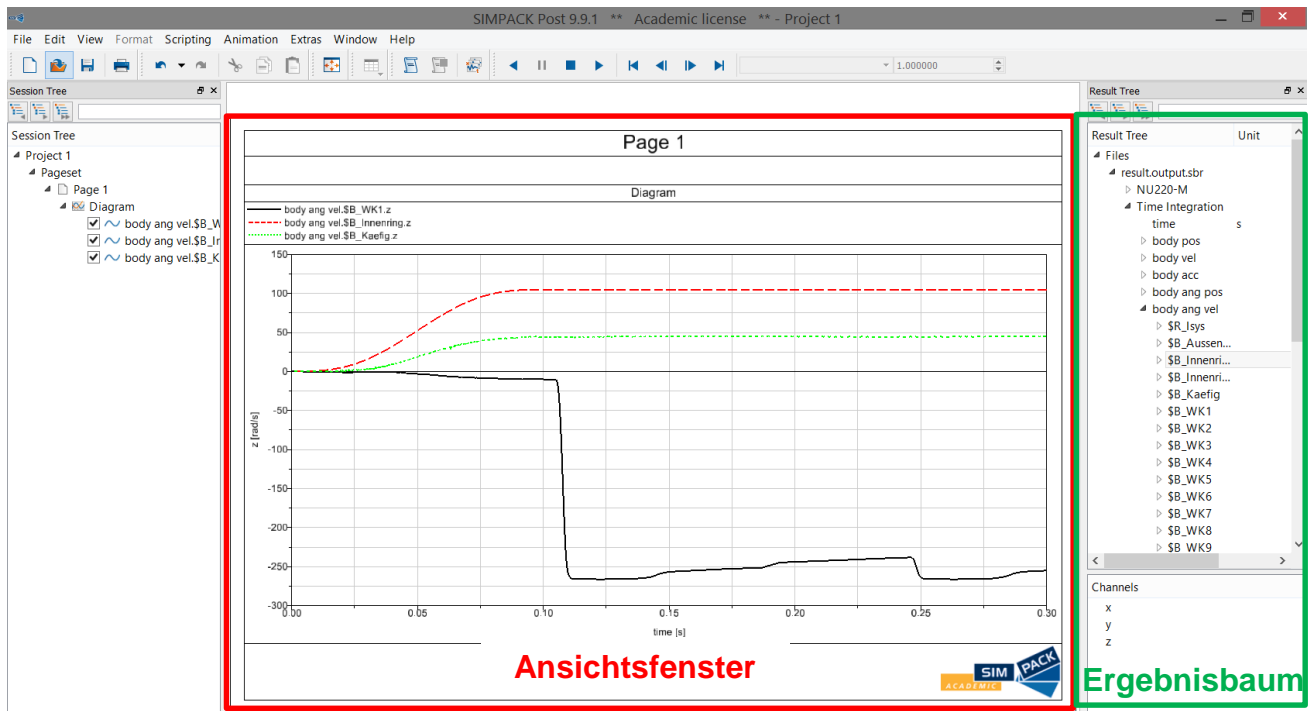
Die Rechenzeit für das Modell aus diesem Beispiel mit den gegebenen Randbedingungen mit Kontaktkäfig liegt auf einem Standard-PC bei etwa 30 Minuten.

6.3 Simulationen auswerten – Simpack PostProcessor

Zu Auswertung der Simulationen wird der Simpack PostProcessor gestartet. Über den Menüpunkt File -> Open wird die Ergebnisdatei (NU220-M_RESULT.sbr) eingeladen. Diese befindet sich im Unterordner NU220-M.output.

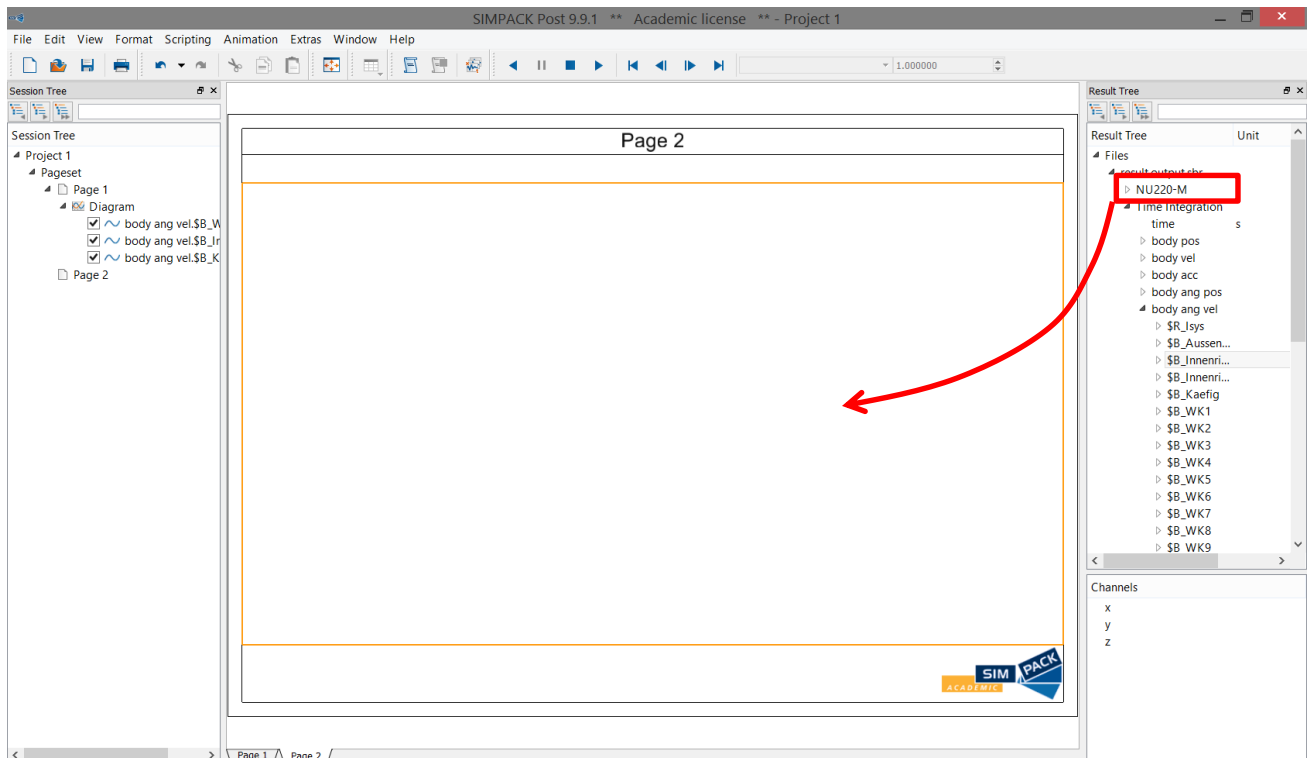


Im Ergebnisbaum sind die verschiedenen Ergebniskomponenten aufgeführt und können per Drag-and-Drop im Ergebnisfenster angezeigt werden.

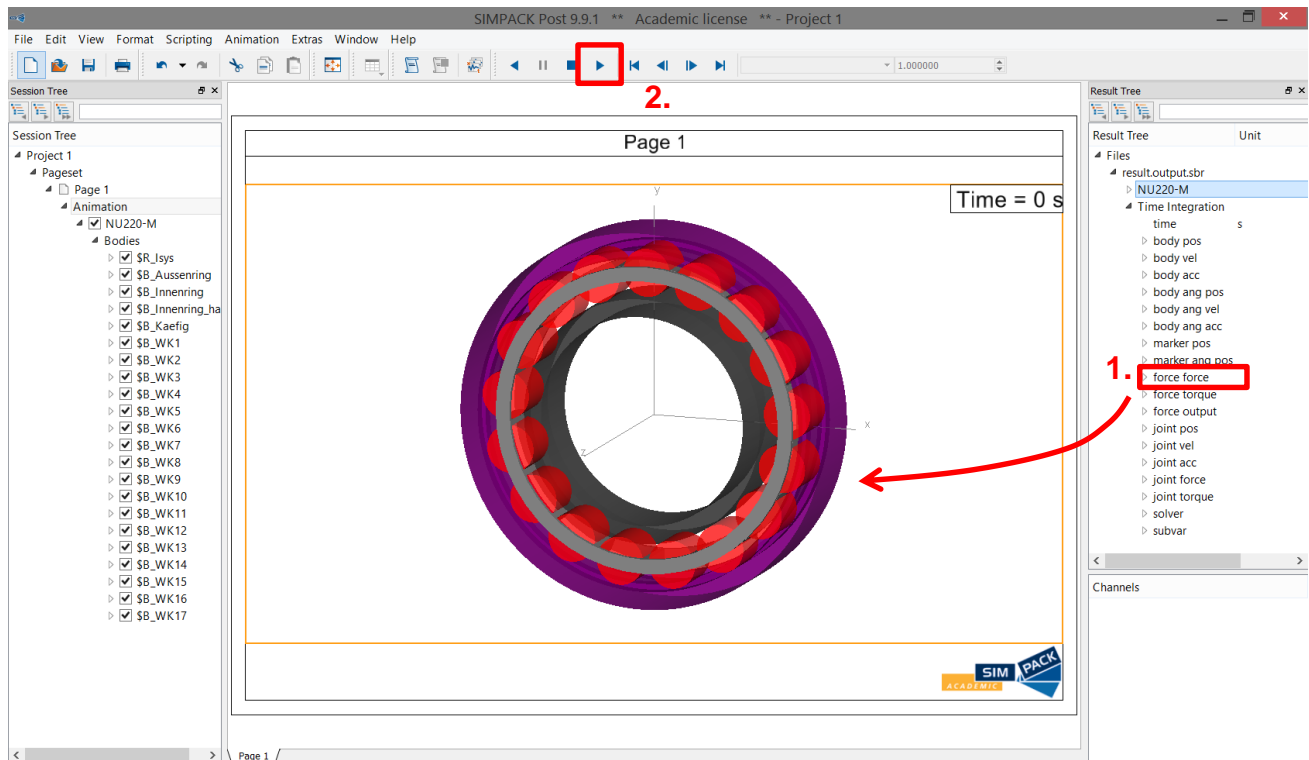


6.3.1 Animation des Lagers

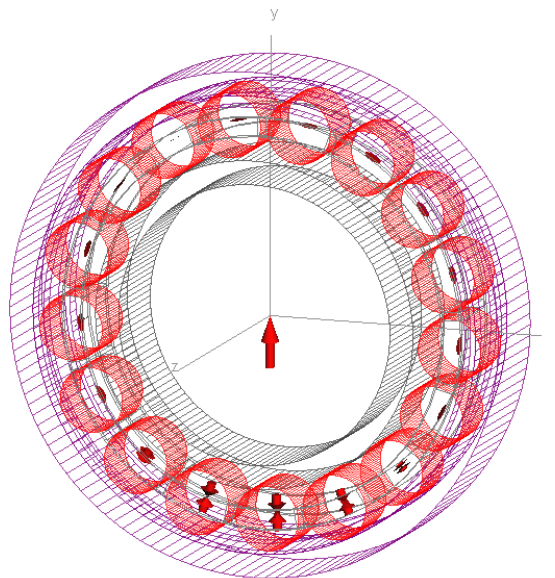
Um eine Animation der berechneten Ergebnisse im PostProcessor anzuzeigen, wird das Modell (NU220-M) per Drag-and-Drop in das Ansichtsfenster gezogen.



Im Ansichtsfenster erscheint das simulierte Lagermodell. Um zusätzlich die im Wälzlager wirkenden Kräfte in der Animation anzuzeigen, wird unter dem Ergebnispunkt `Time Integration` der Unterpunkt `force force per Drag-and-Drop` ins Ansichtsfenster gezogen.

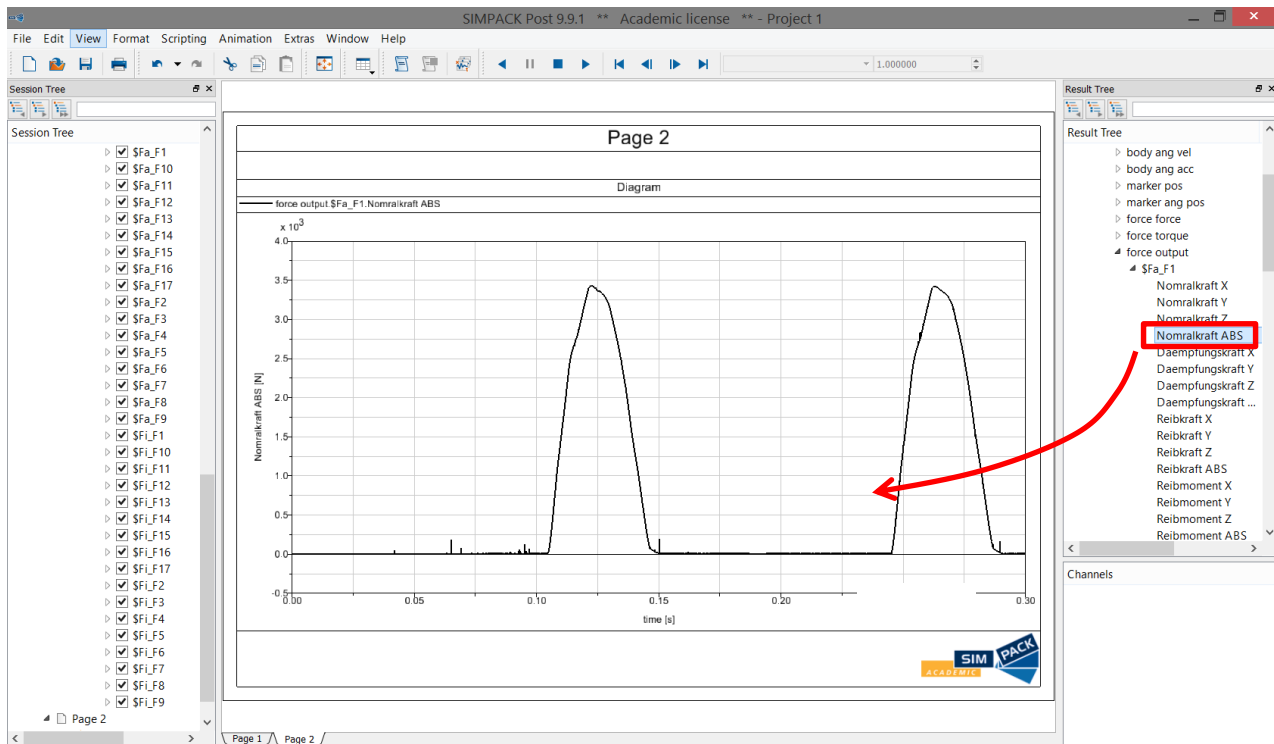


Ein Klick auf die Schaltfläche `Play` startet die Animation.



Ergebnisgrößen können im Simpack PostProcessor auch als Ergebnisplot dargestellt werden. Hierzu wird eine neue Seite im Anzeigefenster erstellt (Rechtsklick auf `Page 1` -> `Add Page`). Auf der neuen Seite können dann Ergebnisgrößen wie zum Beispiel der Betrag der Kontaktnormalkraft über der Zeit geplottet werden. Hierzu wird die Außenring-Kontaktkraft des ersten Wälzkörpers

(force output -> \$Fa_F1 -> Normalkraft ABS) per Drag-and-Drop ins Ansichtsfenster gezogen.



Weitere Ergebnisgrößen können der Ansicht hinzugefügt werden, indem die per Drag-and-Drop ins Ansichtsfenster gezogen werden. Im folgenden Beispiel ist eine zusätzliche y-Achse erzeugt worden und die Werte für Schmierfilmhöhe im Diagramm zusammen mit der Kontaktnormalkraft dargestellt.

7 Dokumentation ASCII-Ausgabe

Die ASCII-Ausgabe ermöglicht dem Anwender die gezielte Auswertung interessierender Ergebnisgrößen der durchgeführten dynamischen Wälzlagersimulationen.

7.1 Struktur und Installation

Die Ausgabe und Verarbeitung relevanter Ergebnisdateien ist automatisiert und vollständig in dem zur Verfügung gestellten Modell implementiert. Die Ablaufstruktur ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Nach der Aktivierung durch den Nutzer in der grafischen Programmoberfläche wird bei Simulationsstart automatisch die Ergebnisordnerstruktur erzeugt. Mittels dem beigefügten MatLab-Auswerteskript können die Ergebnisse exemplarisch ausgewertet werden. Weiterhin stellt dieses Skript eine mögliche Grundstruktur für eine individuelle und an die spezifische Problemstellung angepasste Auswertung dar. Die Ergebnisdateien sind ASCII-Textdokumente und können damit mit unterschiedlichster Software weiterverarbeitet werden. Umfang und Inhalt dieser Textdokumente werden im zugehörigen Kapitel dieser Dokumentation erläutert.

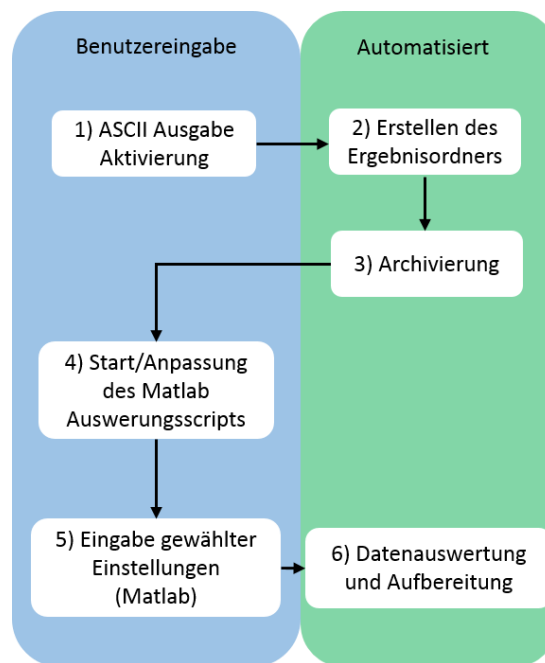


Abbildung 7-1: Ablaufstruktur der autom. ASCII-Ausgabe

Zur Aktivierung der Ausgabe muss vom Nutzer die in Abbildung 7-2 dargestellte Checkbox der grafischen Toolboxoberfläche aktiviert werden. Ist die automatische Ausgabe für das spezifische Wälzlagermodell gewählt, wird automatisch für jede nachfolgende Simulation des Modells ein zugehöriger Ergebnisordner erstellt.

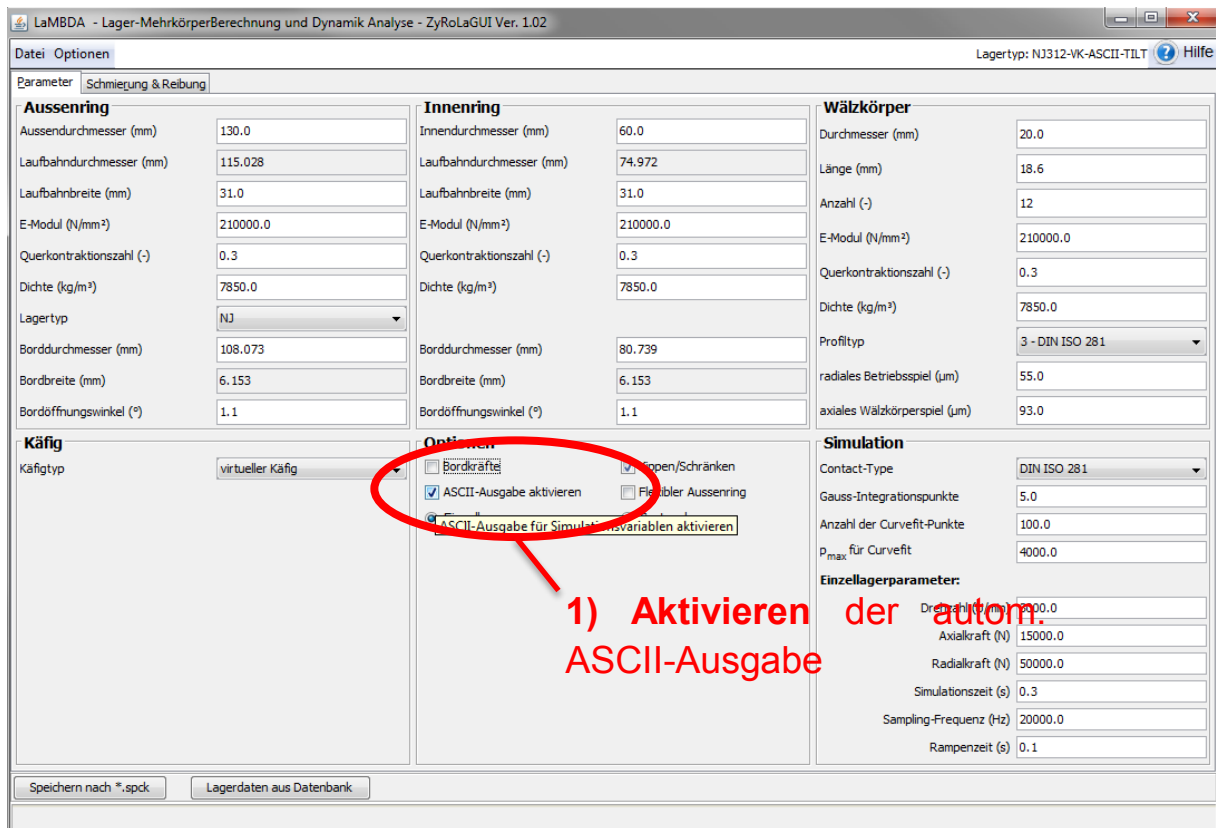


Abbildung 7-2 : Aktivieren der autom. ASCII-Ausgabe

Die Ergebnisausgabe erfolgt innerhalb des output-Ordners, welchen Simpack standardisiert im Modellordner anlegt (vgl. Abbildung 7-3).

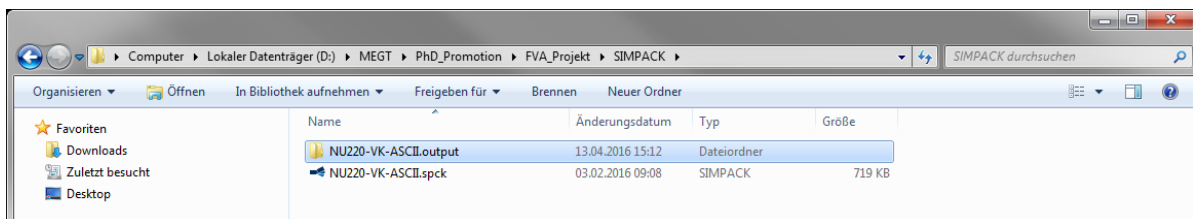


Abbildung 7-3: Exemplarische Darstellung des Simpack output-Ordners

Für jede durchgeführte Simulation des gewählten Modells wird abhängig vom Startzeitpunkt der Berechnung ein spezifischer Ausgabeordner erstellt (Abbildung 7-4). Der Ordnername ergibt sich nach DIN 8601 aus dem zugehörigen Datum sowie der Uhrzeit des Simulationsstarts. Das gewählte Format ist „YYYYMMDD_hhmm“. Die Ergebnisse einer Simulation, welche beispielsweise am 04. Februar 2016 um 02:33 Uhr gestartet wurde, werden somit in einem Ordner mit dem Namen „20160204_0233“ gespeichert. Um die Ausgabe von mehreren simultan durchgeführten Simulationen des gleichen Modells zu gewährleisten, werden die Ergebnisdateien chronologisch nummeriert („_Sim1_...“, „_Sim2_...“, usw.).

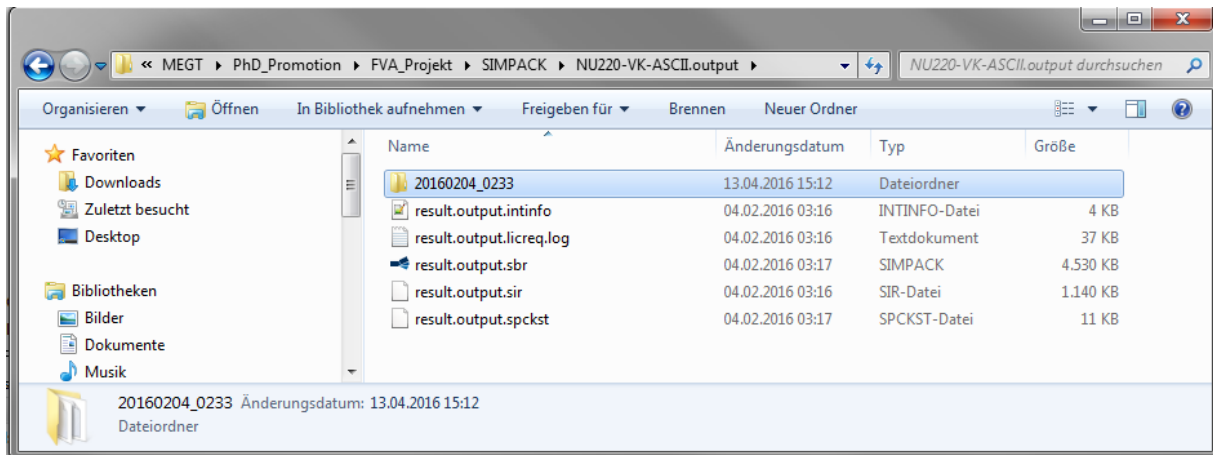


Abbildung 7-4: Erstellung spezifischer Ausgabeordner

Innerhalb des Ausgabeordners werden die einzelnen Ergebnisgrößen in Textdokumenten gespeichert (Abbildung 7-5). Die Struktur der Dateinamen ist in Abbildung 7-6 dargestellt. Im nachfolgenden Kapitel werden die ausgegebenen Ergebnisgrößen sowie ihr Ausgabeformat erläutert.

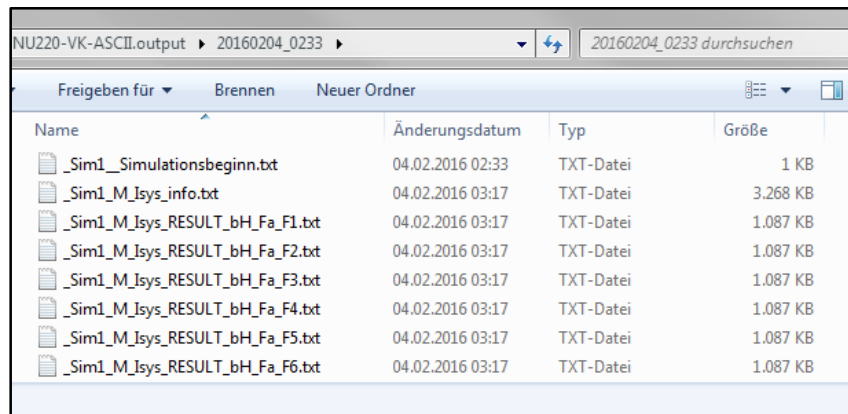


Abbildung 7-5: Exemplarischer Ausschnitt der gespeicherten Ergebnisdateien

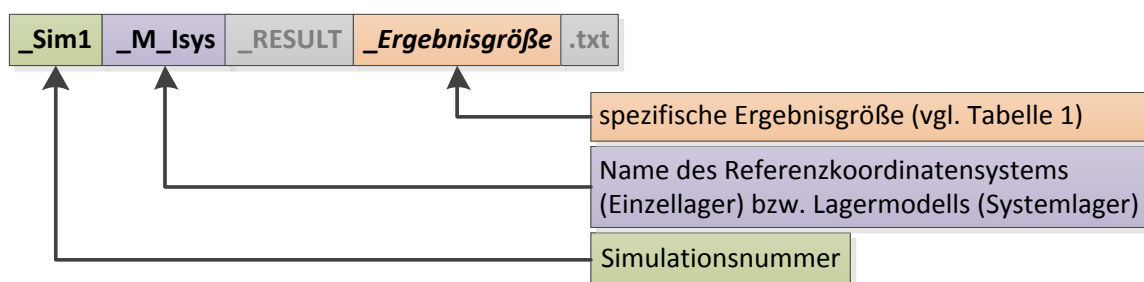


Abbildung 7-6: Struktur des Ergebnisdateinamens

7.2 Erläuterung der Ausgabevariablen

Tabelle 1 stellt die in den einzelnen Ergebnisdateien abgespeicherten Inhalte zusammenfassend dar. Änderungen und individuelle Erweiterungen der Ausgabevariablen können in der uforce-Datei im Abschnitt „automatisierte Ausgabe“ selbstständig durchgeführt werden. Eine Vielzahl der ausgegebenen Daten sind innerhalb der Textdokumente in Spalten aufgeführt. Eine Spalte stellt hierbei eine Komponente (Beispielsweise x-Komponente eines Kraftvektors) dar.

Tabelle 1: Übersicht der Ausgabevariablen

Ergebnisgröße (Dateiname)	Beschreibung	Ein- heit
Simulationsbeginn	Angabe des exakten Simulationsbeginns	-
time	Simulationszeit	s
info	<i>Informationen (Zeit, Namen) ausschließlich zur MatLab-Auswertung</i>	-
CFJointAR	Constraint Forces des Außenring Joints 8-Komponenten: (1) Kraftmagnitude, (2-4) Kraft in x-, y-, und z-Richtung; (5) Momentenmagnitude, (6-8) Moment um x-, y-, z-Achse	N; Nm
CFJointIR	Constraint Forces des Innenring Joints 8-Komponenten: (1) Kraftmagnitude, (2-4) Kraft in x-, y-, und z-Richtung; (5) Momentenmagnitude, (6-8) Moment um x-, y-, z-Achse	N; Nm
displ_AR_GR_GR	Verschiebung des Außenringmarkers bezogen auf das Ground-KOS im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	m
displ_IR_AR_AR	Verschiebung des Innenringmarkers bezogen auf den Außenringmarker im Außenringmarker-KOS (3 Raumkomponenten)	m
displ_IR_GR_GR	Verschiebung des Innenringmarkers bezogen auf das Ground-KOS im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	m
displ_KF_GR_GR	Verschiebung des Käfigmarkers bezogen auf das Ground-KOS im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	m
Force_AR	Kraft zwischen Außenring- und Groundmarker im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	N
Force_IR	Kraft zwischen Innenring- und Groundmarker im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	N
Force_KF	Kraft zwischen Käfig- und Groundmarker im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	N
kipp_IR_AR_AR	Verkipfung des Innenringmarkers bezogen auf den Außenringmarker im Außenringmarker-KOS (3 Raumkomponenten)	rad
nKF_ideal	kinematische Käfigdrehzahl	rad/s
nWK_ideal	kinematische Wälzkörperdrehzahl	rad/s
rot-geschw_IR_GR_GR	Rotationsgeschwindigkeit des Innenrings bezogen auf das Ground-KOS im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	rad/s
rot-geschw_KF_GR_G R	Rotationsgeschwindigkeit des Käfigs bezogen auf das Ground-KOS im Ground-KOS (3 Raumkomponenten) (wird <u>nicht</u> für den virtuellen Käfig ausgegeben)	rad/s
Torque_AR	Moment zwischen Außenring- und Groundmarker im Ground-KOS	Nm

		(3 Raumkomponenten)	
	Torque_IR	Moment zwischen Innenring- und Groundmarker im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	Nm
	Torque_KF	Moment zwischen Käfig- und Groundmarker im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	Nm
wälzkörperspezifisch	distnce	Rollenlängekoordinaten	mm
	pH	Kontaktpressung des betrachteten Scheiben im Scheibenmodell (Komponentenanzahl abhängig von Scheibenzahl, Standard: 41)	
	pm	Mittlere Flächenpressung	MPa
	bH	Druckflächenhalbachse des betrachteten Scheiben im Scheibenmodell (Komponentenanzahl abhängig von Scheibenzahl, Standard: 41)	
	h0	Schmierfilmdicke des betrachteten Scheibens im Scheibenmodell (Komponentenanzahl abhängig von Scheibenanzahl, Standard: 41)	mm
	h0m	Minimale Schmierfilmdicke	mm
	displ_WK_AR_AR	Verschiebung des Wälzkörpermarkers bezogen auf den Außenringmarker im Außenringmarker-KOS (3 Raumkomponenten)	m
	displ_WK-Ta-Ta	Verschiebung des Wälzkörpermarkers bezogen auf den zugehörigen Käfigtaschenmarker im Taschenmarker-KOS (3 Raumkomponenten)	m
	rotge- schw_WK_KF_GR	Rotationsgeschwindigkeit des Wälzkörpers bezogen auf den Käfigmarker im Ground-KOS (3 Raumkomponenten)	rad/s
	FN_abs	Normalkraftmagnitude auf den Wälzkörper	N

Die Dateinamen der wälzkörperspezifischen Ausgabegrößen enden mit dem Namen der zugehörigen uforce-Kraftelemente („F_j“ bzw. „Fi_j“). Die nachgestellte Ziffer j gibt den zugehörigen nummerierten Wälzkörper an, der Kraftname indiziert den Kontakt zwischen Wälzkörper und Außenring („F_j“) oder den Kontakt zwischen Wälzkörper und Innenring („Fi_j“).

Bei der Weiterverarbeitung der Ergebnisdateien ist unbedingt darauf zu achten, dass diese abhängig vom zugehörigen Ausgabeaufruf innerhalb der uforce unterschiedliche Dimensionen besitzen können. Beispielsweise wird die Simulationszeit für jeden uforce-Aufruf und damit für die unterschiedlichen Kontaktsituationen (Wälzkörper-Außenring, Wälzkörper-Innenring und Wälzkörper-Käfig) für jeden im Modell vorhandenen Wälzkörper beschrieben. Innerhalb des Auswerteskripts wird deshalb die Wälzkörperanzahl bestimmt und der Ergebnisvektor entsprechend gekürzt.

Bei der Auswertung von Kräften und Momenten ist darauf zu achten, dass ausschließlich direkt aufgeprägte Kräfte zwischen zwei Markern wie beispielsweise die gewählte Belastung des Innenrings bei einem Einzellager über die Ausgabedateien „Force“ bzw. „Torque“ adressiert werden können. Werden Kräfte hingegen über Joints abgestützt, sind diese in den Ausgaben der Constraint Forces „CFJoint“ abgespeichert. So wird beispielsweise das Reibmoment am Außenring eines Einzellagers mit angetriebenem Innenring über die Momentkomponenten von „CFJointAR.txt“ ausgelesen.

Die implementierte Ausgabe umfasst alle wesentlichen Parameter, die zur Erstellung von Lastkollektiven sowie als Eingabeparameter für eine nachfolgende Lebensdauerberechnung innerhalb der FVA Workbench (LAGER2) gefordert werden.

7.3 Auswertung der Ergebnisdateien

Die Auswertung der Ergebnisse kann beispielsweise mittels MatLab erfolgen. Hierzu wird ein Beispielskript zur Verfügung gestellt, welches einige exemplarische Plots erzeugt. Nach der Ausführung des Skripts wird der Benutzer aufgefordert, den Pfad des auszuwertenden Ergebnisordners anzugeben (vgl. Abbildung 7-7).

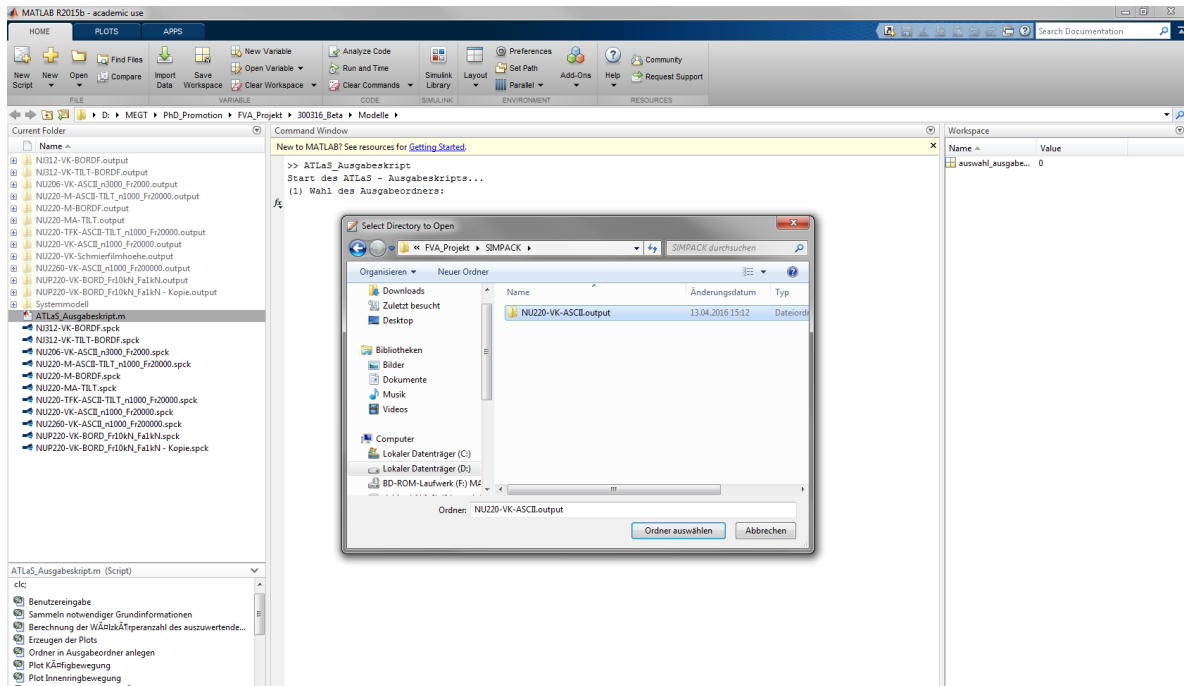


Abbildung 7-7: Angabe des auszuwertenden Ergebnisordners in MatLab

Anschließend wird die Nummer der gewünschten Simulation gefordert. Der Nutzer kann die wälzkörperspezifischen Darstellungen für alle Wälzkörper aktivieren oder auf einen einzelnen beschränken (Abbildung 7-8).

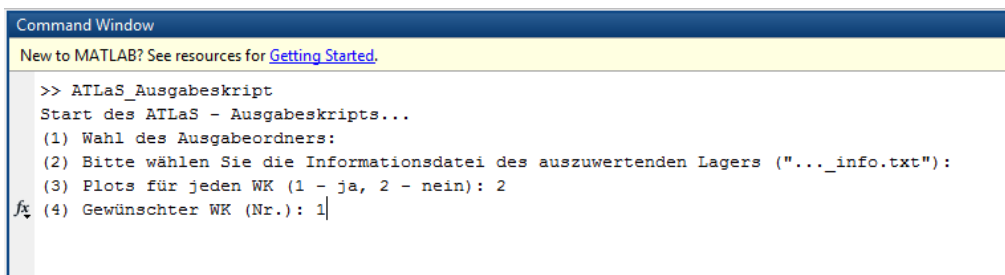


Abbildung 7-8: Wahl der auszuwertenden Ergebnisse in MatLab

Nach der korrekten Eingabe aller geforderten Randbedingungen wird eine Vielzahl unterschiedlicher Ergebnisse ausgewertet und in einem Unterordner („plots“) des Ergebnisordners grafisch dargestellt.

Die Strukturierung des beigefügten MatLab-Auswerteskripts ermöglicht dem Nutzer eine individuelle Anpassung und Erweiterung nach den gewünschten Auswertekriterien.

Die nachfolgenden Abbildungen 9 bis 11 zeigen eine Auswahl exemplarisch erzeugter Ergebnisplots. Das mitgelieferte Auswerteskript für MatLab bildet lediglich eine mögliche Auswertungsstrategie und erleichtert durch seine Grundstruktur eine individuell gestaltete Simulationsauswertung. Der Vorteil dieser Auswertungsmethode im Vergleich zum Simpack-PostProcessor ist, dass wesentliche dynamische Berechnungsgrößen wie beispielsweise die Schmierfilmdicke ausgewertet werden können, da diese nicht in Variablen innerhalb der Simpack-Umgebung gespeichert werden.

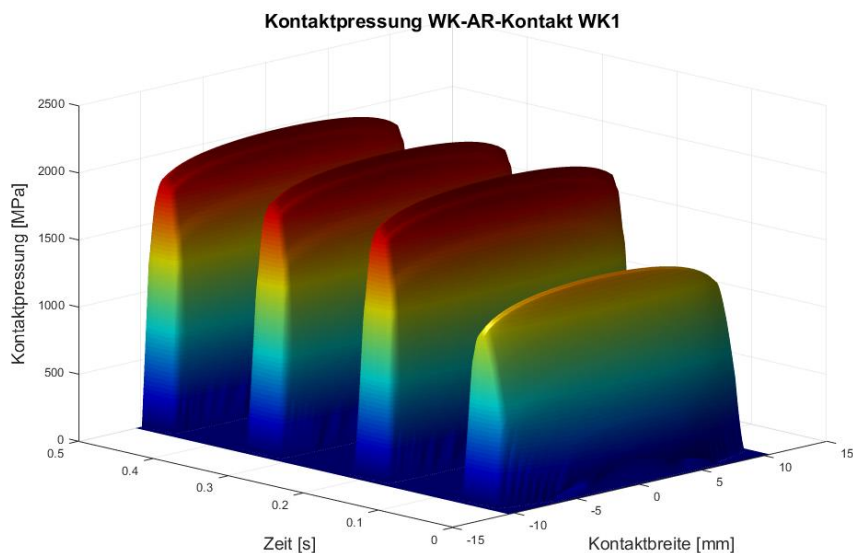


Abbildung 7-9: Exemplarischer Ergebnisplot der Pressung über der Kontaktbreite sowie der Zeit

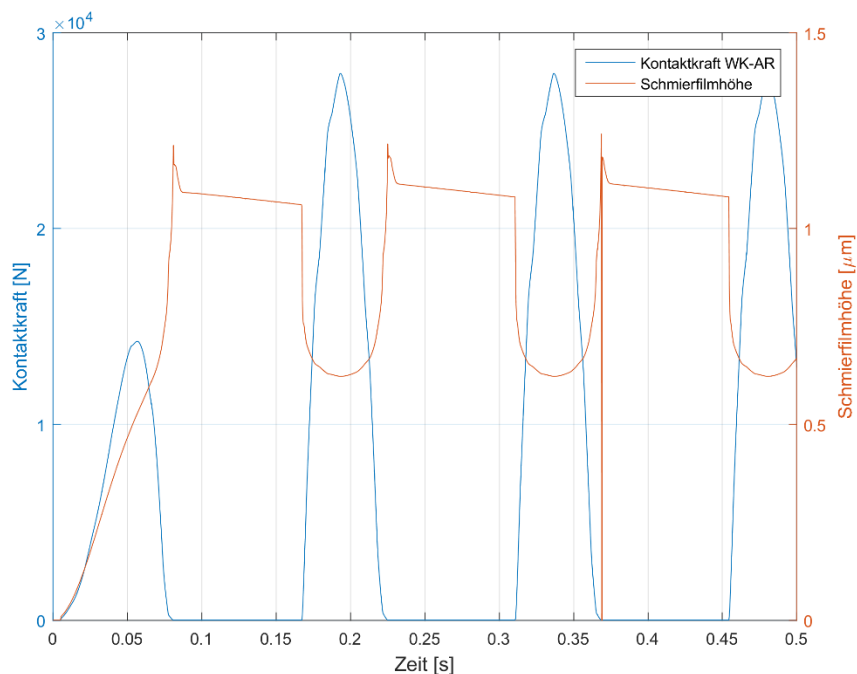


Abbildung 7-10: Exemplarischer Ergebnisplot der Kontaktkraft sowie der Schmierfilmdicke über der Zeit

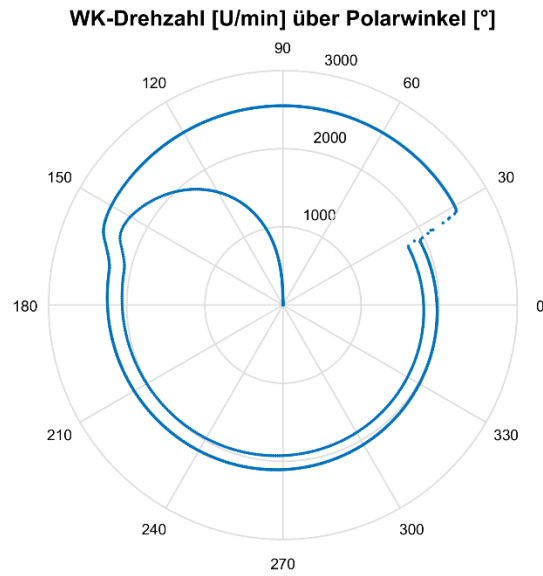


Abbildung 7-11: Exemplarischer Ergebnisplot Wälzkörpergeschwindigkeit über dem Polarwinkel (Position des Wälzkörpers)

8 Dokumentation Systemlager

A.1 Dokumentation Systemlager

In dieser Dokumentation werden die notwendigen Grundlagen zur Erstellung und Simulation von Systemlagermodellen am Beispiel eines Zwei-Lager-Modells (Abbildung 8-1) erläutert.

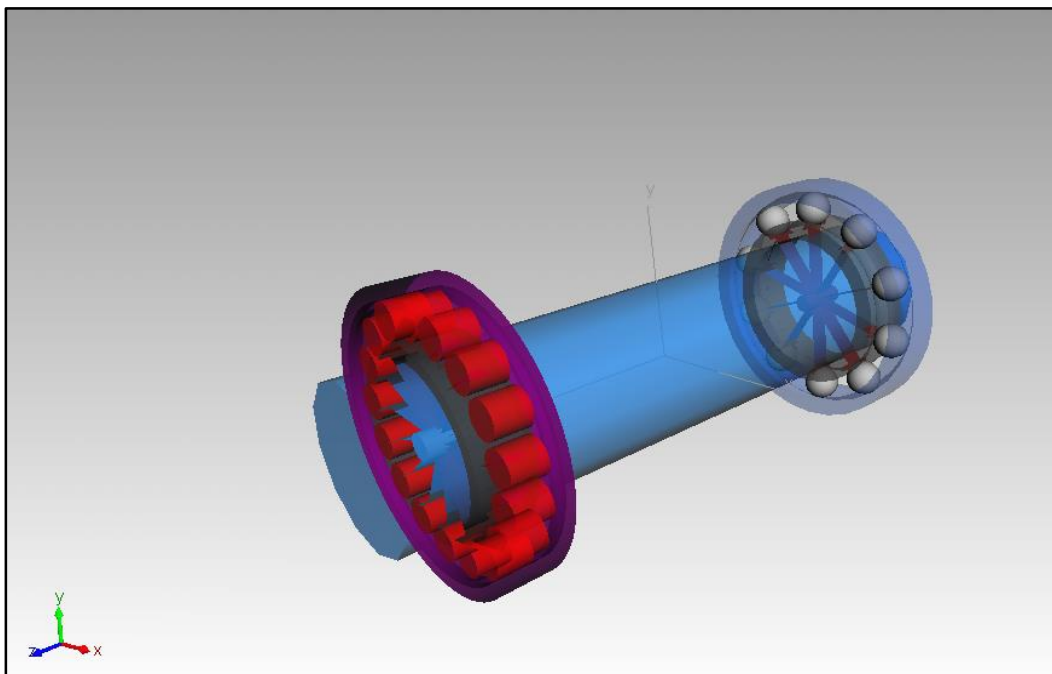


Abbildung 8-1 : Beispielmodell zur Systemlagererstellung: Zwei-Lager-Modell

Grundlage der Erstellung von Lagersystemen ist ein Grundmodell, in welches die Lagermodelle hinzugefügt werden sollen. Im behandelten Beispiel des Zwei-Lager-Modells stellt die Welle dieses Grundmodell dar. Um ein Lagermodell für die Systemintegration zu erstellen, muss die zugehörige Checkbox in der grafischen Programmoberfläche ausgewählt werden (vgl. Abbildung 8-2).

Optionen		Simulation
<input checked="" type="checkbox"/> Bordkräfte	<input checked="" type="checkbox"/> Kippen/Schränken	Contact-Type
<input type="checkbox"/> ASCII-Ausgabe aktivieren	<input type="checkbox"/> Flexibler Aussenring	Gauss-Integrationspunkte
<input type="radio"/> Einzellager	<input checked="" type="radio"/> Systemlager	Anzahl der Curvefit-Punkte
Systemlagerparameter:		
Drehzahl Aussenring (U/min)	<input type="text" value="0.0"/>	
Drehzahl Innenring (U/min)	<input type="text" value="0.0"/>	

Lagermodell für Systemlagersimulation erstellen

Abbildung 8-2: Erstellen eines Systemlagers

Über die Angabe der Drehzahl von Außen- und Innenring werden die kinematischen Geschwindigkeiten der Lagerkörper intern vorberechnet und als Startbedingung dem Systemlager aufgeprägt.

Dadurch können komplexe Systemsimulationen direkt im Betriebszustand simuliert und analysiert werden. Ein notwendiger Beschleunigungsvorgang des Gesamtsystems wird dadurch verzichtbar.

Die erstellten Systemlagermodelle werden im Simpack-Grundmodell als Substructures eingebunden. Hierfür muss der Nutzer für jedes Lagermodell diese über einen Rechtsklick auf den Modellnamen erstellen (vgl. Abbildung 8-3).

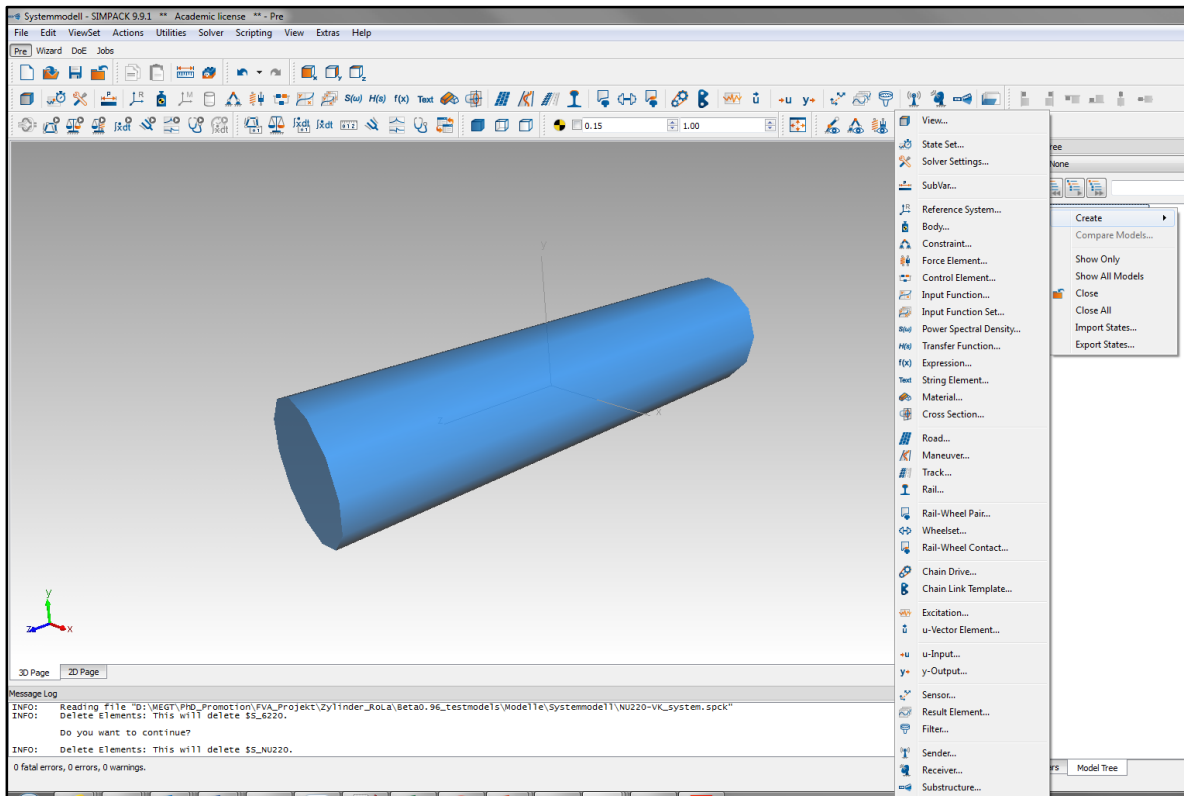


Abbildung 8-3: Erstellen einer Substructure in Simpack

In den Einstellungen der erstellten Substruktur (Rechtsklick -> Properties) muss unter dem Reiter „Additional Search Path Entry“ der Pfad zu den gespeicherten Systemlagermodellen angegeben werden (Abbildung 8-4). Diese Eingabe wird anschließend durch den Apply-Button bestätigt. Im Reiter „General“ kann anschließend das gewünschte Systemlagermodell ausgewählt werden (Abbildung 8-5). Damit kann das Lager anschließend einfach durch ein anderes Lagermodell ersetzt werden. Die Position und die Jointdefinitionen bleiben dabei erhalten.

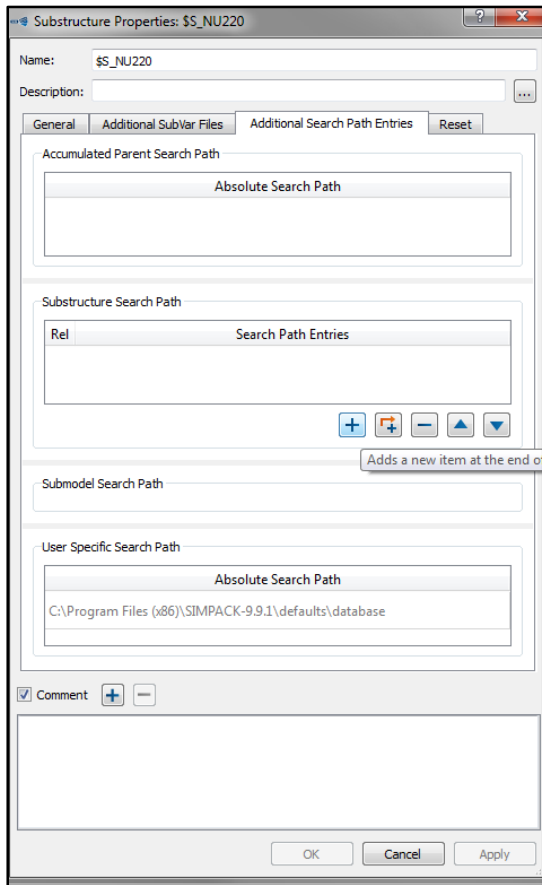


Abbildung 8-4: Angabe des Systemlager-Pfads

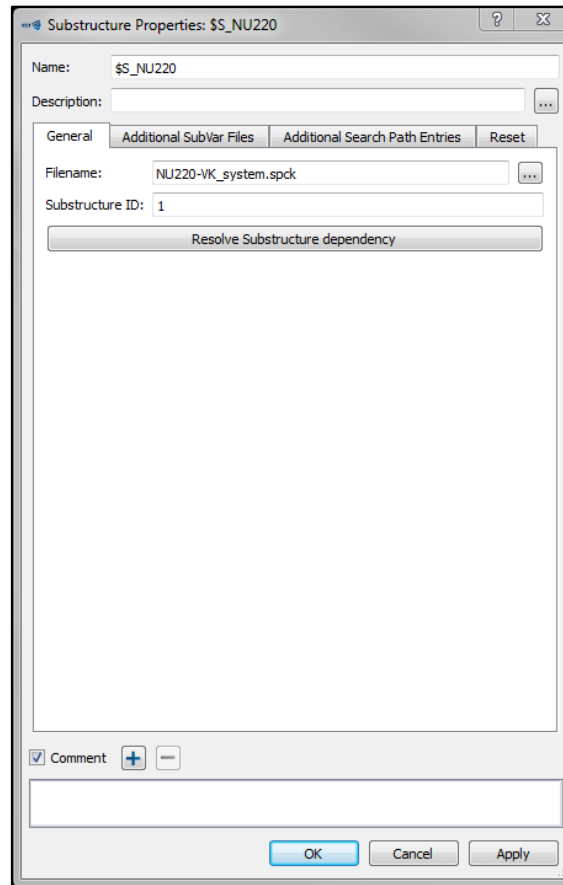


Abbildung 8-5: Auswahl des Systemlagers

Nach dem erfolgreichen Einladen des gewählten Lagers, erscheint dieses zunächst im Systemursprung (Abbildung 8-6). Die korrekte Position und kinematischen Beziehungen werden nun über die Anpassung der Joints des Außenringmarkers sowie des Groundmarkers des Lagermodells angepasst.

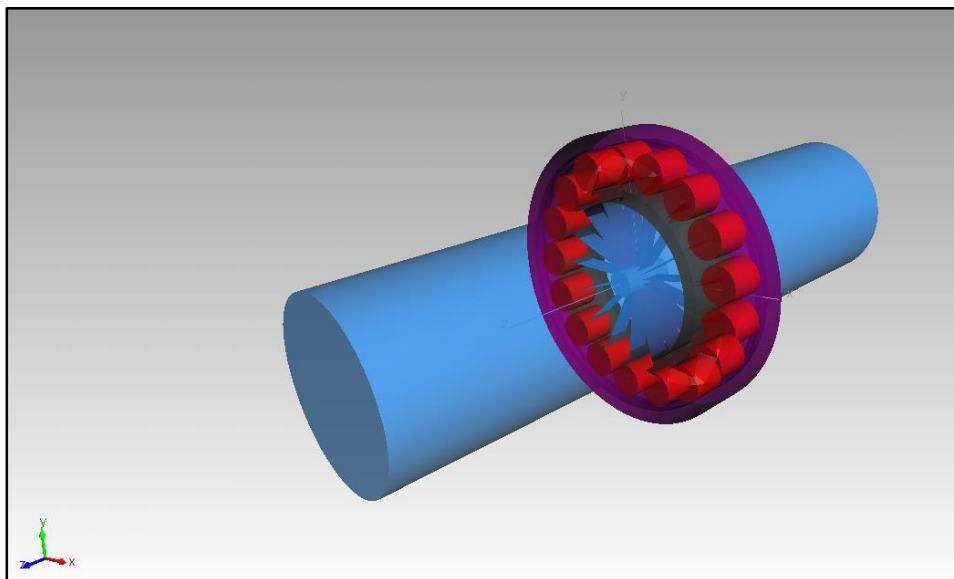


Abbildung 8-6: Lagerposition zunächst im Systemursprung

Zur Anpassung eines Joints wird dieser mit einem Rechtsklick ausgewählt (Abbildung 8-7 und Abbildung 8-8). Wie in Abbildung 8-8 dargestellt, muss der Außenringmarker durch einen „0 Degrees of Freedom“-Joint dem zugehörigen Koordinatensystemmarker des Systems (Gehäuse bzw. Umgebung) verknüpft werden. Der notwendige Joint ist bereits im Lagermodell enthalten und muss lediglich wie dargestellt angepasst werden. Analog wird der Ground-Marker des Lagermodells mit dem zugehörigen Positionsmarker der Welle fixiert (vgl. Abbildung 8-9). Nun ist das Systemlager vollständig im System eingebunden (vgl. Abbildung 8-10).

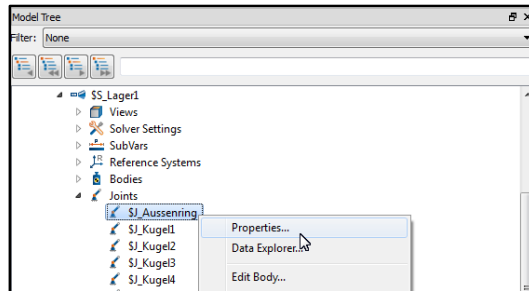


Abbildung 8-7: Anpassen des Außenringjoints

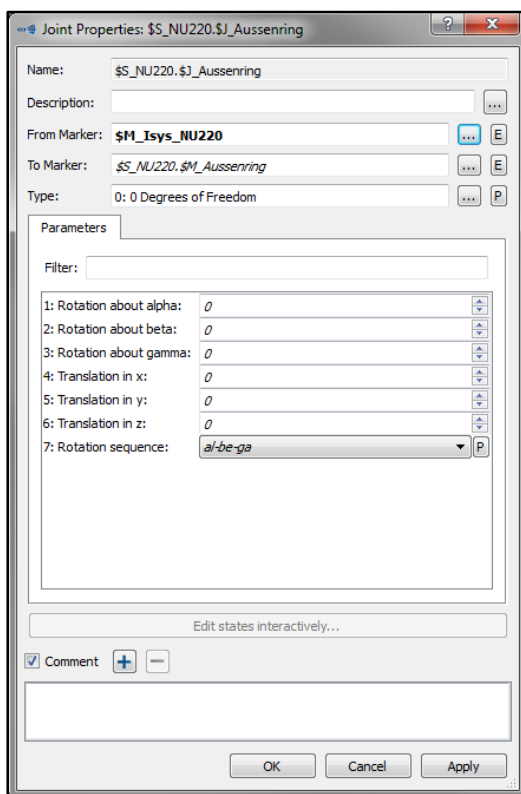


Abbildung 8-8: Außenring-Joint Anpassung

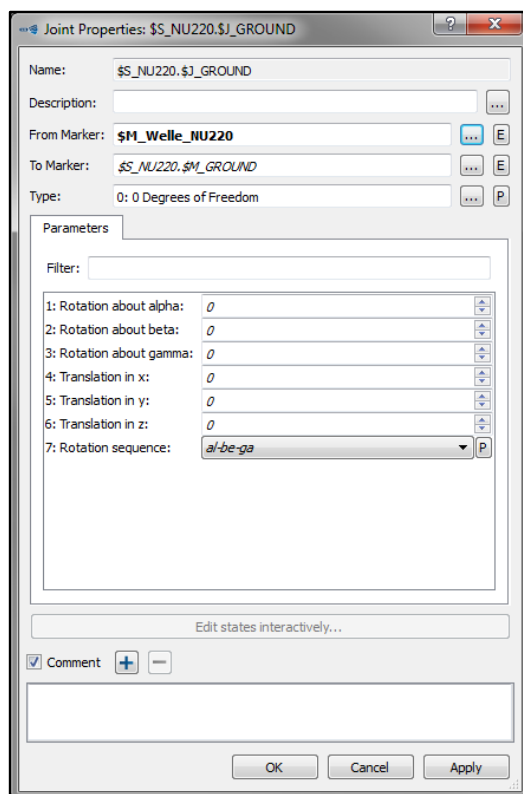


Abbildung 8-9: Ground-Joint Anpassung

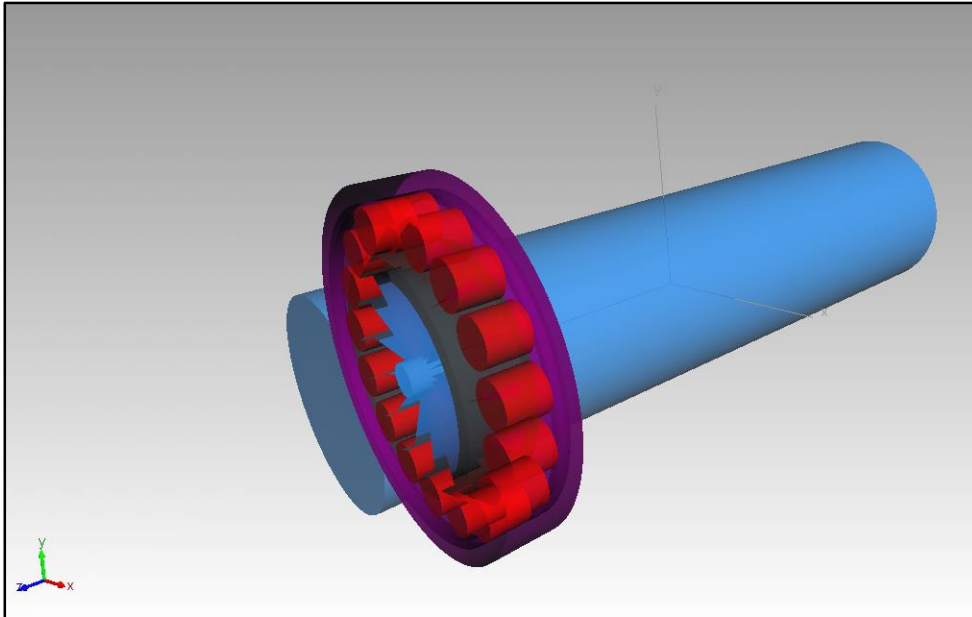


Abbildung 8-10: Erfolgreiche Einbindung des Systemlagermodells

Analog können alle Systemlagermodelle in die Systemumgebung eingeladen werden. Auf Wunsch können die Lager über den Einstellungsreiter der Substructure nachträglich durch andere Lagermodelle ersetzt werden.

8.1.1 Hinweis:

Sollte es bei der Einbindung der Lagermodelle in einem Systemmodell Berechnungsabbrüche geben, kann dies durch eine zu große Solver-Fehlertoleranz, eine zu große Berechnungsschrittweite oder die Ausrichtung der Joints begründet sein.

Die absolute und relative Fehlertoleranz für die Einzellagermodelle wird bei der Modellerstellung automatisch auf $1e-6$ gesetzt. Dieser Wert führt in der Regel zu zuverlässigen Berechnungsergebnissen. Sollte es trotzdem zu Problemen bei der Berechnung kommen, kann der Anwender die Toleranz selbst verringern, um die Stabilität des Modells zu verbessern (siehe Abbildung 8-11). In Systemmodellen haben sich Toleranzwerte von $1e-6$ bzw. $1e-7$ für den absoluten und den relativen Fehler als zuverlässig erwiesen. Die maximale Berechnungsschrittweite sollte im Bereich von $1e-5s$ liegen.

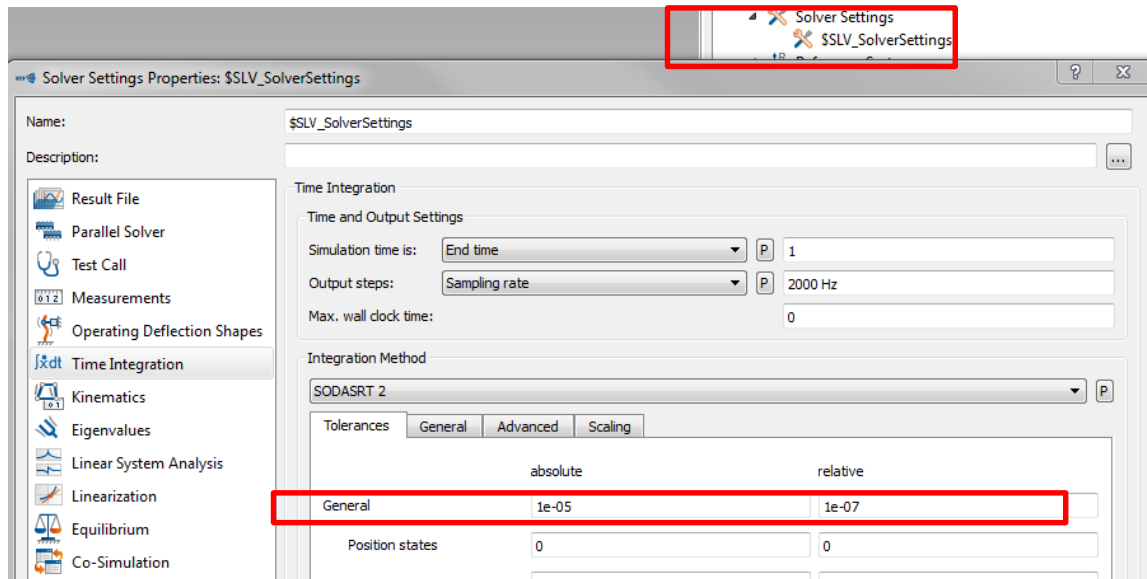
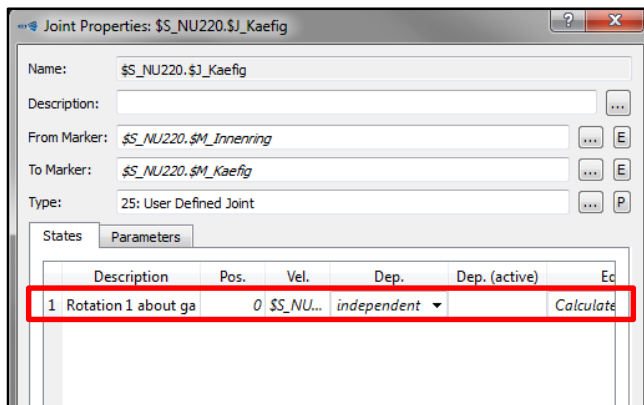
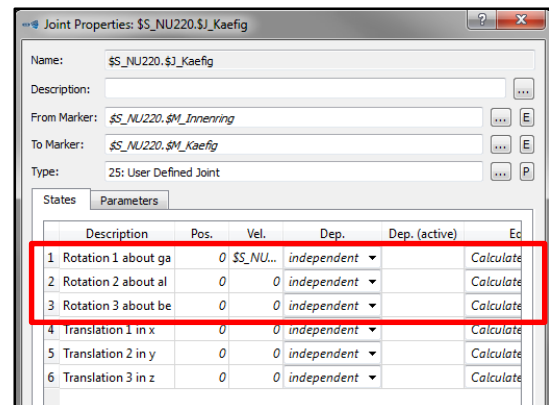


Abbildung 8-11: Einstellen der Solvertoleranzen

Die problematische Jointausrichtung gilt insbesondere für den Käfig-Joint. Dieser wird als User-Defined-Joint erstellt, welcher mit 6 Freiheitsgraden ausgestattet ist. Die Reihenfolge der Rotationsachsen kann dabei für Berechnungsabbrüche verantwortlich sein. Laut Aussage von Simpack sollte möglichst die dritte eingestellte Rotationsachse die Hauptrotationsachse sein (Abbildung 8-12). Eine definitive Aussage ist auf Grund der unzähligen möglichen Systemumgebungen jedoch nicht möglich. An dieser Stelle muss der Anwender möglicherweise die Reihenfolge der jeweiligen Käfig-Joints selbst anpassen.



(a)



(b)

Abbildung 8-12: Definition der Rotationsreihenfolge des Käfig-Joints im Systemmodell (a) Virtueller Käfig (b) Kontakt Käfig

9 Dokumentation – Einbindung einer flexiblen Anschlusskonstruktion

9.1 Grundlagen

Der Einfluss der Verformung des Außenrings in Abhängigkeit der Belastung und der Anschlusskonstruktion wird mit einer Finiten Elemente (FE) Vorberechnung berücksichtigt. Für die folgenden Beispiele in Abbildung 9-1 wurde die FE Simulationssoftware ANSYS verwendet. Die berechnete Verformung des Außenrings wird über Textdateien der MKS zugänglich gemacht. Dabei werden definierte Belastungszustände eines Lagers vorberechnet. In der MKS werden die Ergebnisse aus verschiedenen Belastungsergebnissen dann entsprechend interpoliert und in der dynamischen Berechnung berücksichtigt.

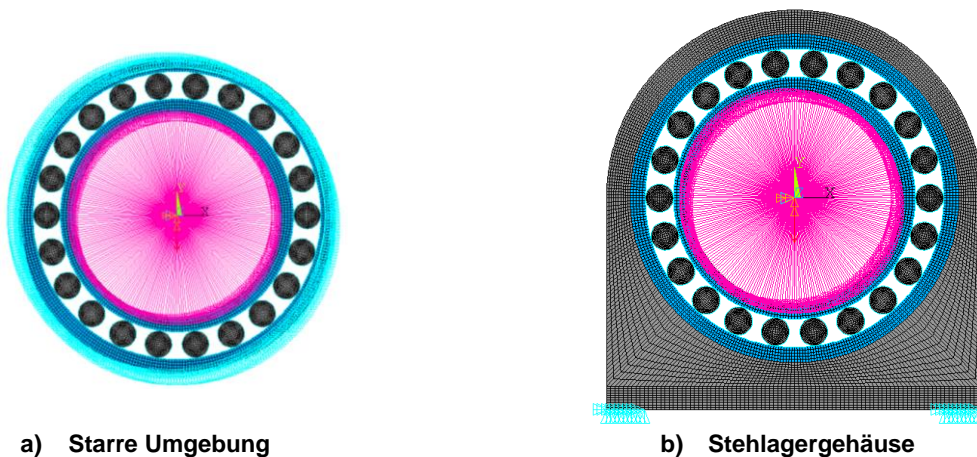


Abbildung 9-1 : Exemplarische FE-Modelle für die Erzeugung der Steifigkeitskennfelder des Außenrings

Parametrische Beispieldateien mit starrem Gehäuse, Stehgehäuse und aufgehängtem Gehäuse für ANSYS werden vom MEGT Lehrstuhl zur Verfügung gestellt. Anhand dieser Beispieldateien können weiter individuelle Gehäuseformen in die FE Berechnung eingefügt werden. Anhand der Ergebnisddatei können diese dann in der MKS Berechnung berücksichtigt werden.

Ziel der FE-Berechnungen ist die Erstellung eines Kennfeldes, in welchem die Außenringverformung in Abhängigkeit der Lastrichtung und der Wälzkörperposition hinterlegt ist. Der Last-einfluss wird linear aus der FE-Berechnung skaliert um die Anzahl der notwendigen FE-Rechnungen in Grenzen zu halten. Im FE-Modell werden mehrere Berechnungsdurchgänge durchgeführt, bei denen die Lastangriffsrichtung verändert wird. Die lokalen Kontaktverformungen, die in den Kontakten zwischen Wälzkörper und Laufbahn entstehen, werden über eine Referenzrechnung bestimmt und von den globalen Verformungen abgezogen. Die globalen Laufbahnverformungen werden für die berechneten Lastrichtungen als Textdateien ausgegeben. Ein MatLab-Skript wird verwendet, um die FE-Ausgabedateien auszuwerten und in eine Simpack-Kennfelddatei (.afs) umzuwandeln.

9.1.1 Anleitung

9.1.1.1 Dateiformat

Das Kennfeld des Verformungsverhaltens des Außenrings und der Umgebungsstruktur wird als *Input Function* in Simpack eingebunden. Die Verwendung eines flexiblen Außenrings setzt voraus, dass eine Simpack-Kennfelddatei vorhanden ist, in der das Vorformungsverhalten des Außenrings und dessen Umgebungsstruktur hinterlegt ist. Der Aufbau des Kennfeldes ist wie folgt definiert:

- x-Komponente: Winkelposition des Wälzkörpers im Lager $[-\pi, \pi]$; 0° Position auf positiver x-Achse
- y-Komponente: Lastangriffsrichtung $[-\pi, \pi]$; 0° Position auf positiver y-Achse
- $f(x,y)$: Verformung des Außenrings unter der Last $F_{R,FE}$ in mm

Der Aufbau der Simpack-Kennfelddatei (.afs) kann der Simpackhilfe bzw. den beiliegenden Beispieldateien entnommen werden. Das eingeladene Kennfeld kann in Simpack überprüft werden (siehe Abbildung 9-2).

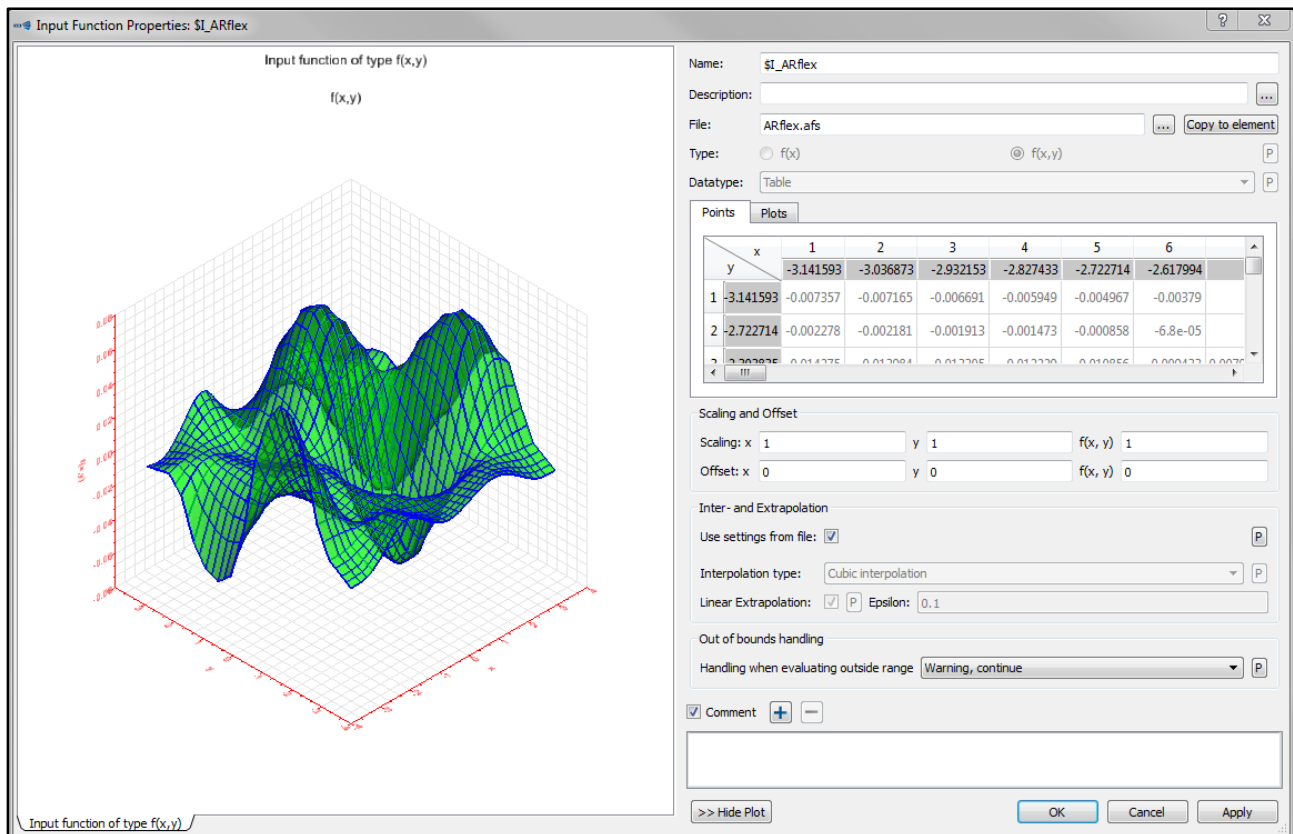


Abbildung 9-2: Grafische Benutzeroberfläche in Simpack für Input Functions

9.1.1.2 ANSYS

Die FE-Vorberechnung in ANSYS gliedert sich in zwei Schritte. Im ersten wird ein Referenzmodell mit starrer Umgebung gerechnet, im zweiten Schritt wird das Modell mit der interessierenden Umgebungs konstruktion gerechnet. Dabei dürfen sich die Modelle des eigentlichen Lagers (Innen-, Außenring und Wälzkörper) bei beiden Berechnungsschritten nicht unterscheiden, da die Referenzrechnung dazu verwendet wird, die lokalen Kontaktverformungen aus der globalen Laufbahnverformung herauszurechnen. Daher sollte zuerst die Modellierung des Lagers erfolgen und anschließend auf dieser Basis die Umgebungs konstruktion hinzugefügt werden.

Die Berechnungen selbst werden dann für verschiedene Lastangriffsrichtungen durchgeführt. Diese sollten möglichst den gesamten Lagerumfang umfassen. Die Winkelschritte zwischen den Berechnungen sollten möglichst $<30^\circ$ sein. Bei symmetrischen Umgebungen kann diese Symmetrie ausgenutzt werden, um Rechenzeit in der FE einzusparen.

Die Beispiel-FE-Modelle lassen sich in ANSYS aufrufen durch den Befehl „File -> Read Input from...“. Hier können die Dateien *Stehgehaeuse/01_Lastverteilung_Welle_starr_Gehaeuse_starr.ans* bzw. *Steif/Stehgehaeuse/01_Lastverteilung_Welle_starr_Gehaeuse_starr.ans* eingelesen werden. Der Modellaufbau, die Vernetzung, die Randbedingungen, die Berechnungen und die Ausgabe in den Skripten automatisiert. Der Nutzer kann unter „Benutzereingaben“ in den jeweiligen Skriptdateien (*01_Lastverteilung_Welle_starr_Gehaeuse_starr.ans*, *01a_stehendesGH.ans*) die Lager- bzw. Gehäusegeometrie und weitere Parameter anpassen. Die Beispielmmodelle stehen für ein Starre Gehäuse (*SteifGH*) und ein stehendes Gehäuse (*StehendGH*) zur Verfügung.

9.1.1.3 **MatLab**

Die Auswertung der FE-Ergebnisse kann beispielsweise mit MatLab erfolgen. Ziel der Auswertung ist die Umwandlung der Verformungsergebnisse aus der FE in das Simpack-Kennfeldformat. Weiterhin sollte hier das Herausrechnen der Kontaktverformungen erfolgen.

Das MatLab-Beispielskript erlaubt die Auswertung der ANSYS-Ergebnisse der beigefügten ANSYS-Skripte. Hierzu werden die Knotenpositionen und -verschiebungen ausgelesen und daraus die Laufbahnverformung über den Lagerumfang berechnet. Diese werden dann mittels eines Splines interpoliert und als Simpack-Kennfelddatei ausgegeben (*ARflex.afs*).

9.1.1.4 **Simpack**

Zur Verwendung des flexiblen Außenrings muss in der GUI der Menüpunkt „Flexibler Außenring“ aktiviert werden und die Lagerbelastung FR,FE aus der FE-Berechnung im Feld „Kraft FE-Berechnung“ angegeben werden. Zusätzlich muss im Ordner, in dem das Lagermodell erstellt wird, eine Simpack-Kennfelddatei mit dem Namen „ARflex.afs“ liegen, in der das Verformungskennfeld des Lagers hinterlegt ist.