



Leseprobe

Günter Scheuermann

Simulationen mit Inventor

FEM und dynamische Simulation. Grundlagen und Beispiele ab Version
2017

ISBN (Buch): 978-3-446-45012-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-45013-4

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45012-7>

sowie im Buchhandel.

Inhalt

TEIL I Digital Prototyping

1	Einführung	3
1.1	Autodesk Inventor	3
1.2	Die Grenzen der Simulation	5
1.3	Was fehlt	5
1.4	Inventor-Schnittstellen	6
1.5	Inventor für Schüler und Studenten	7
	1.5.1 Inventor kostenlos?	7
1.6	Systemvoraussetzungen	7
	1.6.1 Hinweise zur Installation	7
	1.6.2 Hardware	7
	1.6.3 Betriebssysteme	8
	1.6.4 Sonstige Anforderungen	8
1.7	Voraussetzungen für Anwender	9
1.8	Übungsdateien und Videos auf DVD	9
1.9	Resümee	9
2	Digital Prototyping und Produktdesign	11
2.1	Virtuelle 3D-Modelle	11
2.2	Herstellung von Prototypen, Rapid Prototyping	12
2.3	Produktoptimierung	13
	2.3.1 Flächen- bzw. Formoptimierung	13
	2.3.2 Berechnungen	14
	2.3.3 Dynamische Simulation	14

TEIL II Oberflächenanalysen und Grundlagen

3	Bauteilanalysen	17
3.1	Zebra-Analyse	19
3.2	Entwurf, Verjüngungsanalyse	20
3.3	Fläche, Gauß-Analyse, Gauß'sche Flächenkrümmung	21
3.4	Schnitt, Querschnittsanalyse	23
3.5	Krümmungsanalyse, Krümmungskammanalyse	24
4	Technische Mechanik, Festigkeitslehre und Inventor	27
4.1	Statik	27
4.2	Freiheitsgrade	28
4.3	Freiheitsgrade überprüfen	30
4.3.1	Anzeige der Freiheitsgrade	30
4.3.2	Freiheitsgrad-Analyse	31
4.4	Gelenke	32
4.4.1	Inventor-Gelenke	33
4.5	Reibung	34
4.6	Kinematik	34
4.7	Dynamik	36
4.7.1	Schwerkraft, Gravitation	36
4.7.2	Masse, Gewichtskraft, Trägheitsmomente	37
4.7.3	Gelenkkräfte und -momente	37
4.7.4	Simulation	38
4.7.5	Export nach FEM	39
4.7.6	Schwingungen, Eigenfrequenz, Resonanz, Modalanalyse	40
4.8	Festigkeitslehre und FEM-Ergebnisse	41
4.8.1	Festigkeitshypothesen	42
4.8.2	Spannungen	43
4.8.3	Verformungen	44
4.8.4	Sicherheitsfaktoren, Belastung/Dehnung	44
4.8.5	Kontaktdruck	45
4.8.6	Knicken und Beulen	45
4.9	Grenzen der Inventor-Mechanik	46
5	Die Materialbibliothek	49
5.1	Der Materialien-Browser	49
5.2	Mit Materialien und Darstellungen arbeiten	50
5.2.1	Übersicht	50
5.3	Eine eigene Bibliothek mit neuen Materialien erstellen	55

5.3.1	Eigene Bibliothek und eigene Kategorien erstellen	55
5.3.2	Ein neues Material definieren	56
5.4	Problematische Materialien in der FEM	58
5.4.1	Beispiel: Silentblock	58
5.4.2	Material ohne Kennwerte	59
5.5	Nicht in der FE-Analyse verwendbare Werkstoffe	62
5.5.1	Polymere Werkstoffe	62
5.5.2	Verbundwerkstoffe	63
5.6	Bauteile mit großen Verformungen	64

TEIL III Grundlagen und Anwendungsbeispiele der Finiten-Elemente-Methode

6	FEM	69
6.1	FEM, allgemein	69
6.2	Konvergenz	70
6.2.1	Maximale Anzahl der H-Verfeinerungen	71
6.2.2	Stopp-Bedingung	71
6.2.3	Schwellenwert für H-Verfeinerungen	71
6.2.4	Konvergenz-Plots	72
6.2.5	Beispiel: Konvergenzeinstellungen und Auswirkung	72
6.3	Das FEM-Netz	75
6.3.1	Netzeinstellungen	75
6.3.2	Lokale Netzsteuerung	77
6.3.3	Allgemeine Richtlinien für die Netzerstellung	78
6.3.4	Netzgenerierungen und Simulationen mit dünnen Bauteilen	80
6.4	Abhängigkeiten, Einspannungen	80
6.5	Lasten und Lastangriffsfälle	81
6.5.1	Lastarten	81
6.5.2	Lastangriffsfälle	82
6.6	Beispiel einer einfachen vollständigen FE-Analyse	89
6.6.1	Das Bauteil und seine Eigenschaften	90
6.6.2	Funktion des Bauteils	91
6.6.3	Die erste Simulation erstellen	92
6.6.4	Das Bauteil einspannen	92
6.6.5	Trennen von Bauteilflächen	92
6.6.6	Das Bauteil belasten	93
6.6.7	Das Bauteilnetz	94
6.6.8	Simulation ausführen	95
6.6.9	Anpassung der Gestalt (Gestaltfestigkeit)	97
6.6.10	Materialanpassung	98
6.6.11	Hauptspannungen	100

6.6.12	Verformung, Verschiebung	101
6.6.13	Rückstoßkräfte, Lagerkräfte	102
6.6.14	Ergebnisprotokoll	103
6.6.15	Bericht	104
7	Rückstoßkraft und Kraftermittlung über Verformungen	107
7.1	Beispiel: Rückstoßkraft ermitteln	107
7.2	Verformungskraft ermitteln	108
7.3	Fehlerbetrachtung	110
8	Parametrische FEM-Studien	111
8.1	Das parametrische Bauteil	111
8.2	Vorbereitung der parametrischen FE-Analyse	112
8.2.1	Die parametrische Tabelle	112
8.3	Die parametrische Simulation	117
8.4	Parametrische Ergebnisse	118
8.5	Das Modell anpassen	120
9	FEM an dünnen Bauteilen	123
9.1	Beispiel: Blechtraverse	123
9.2	Simulation als normaler Körper	124
9.3	Simulation als dünnwandiges Bauteil	125
10	Modal- oder Eigenfrequenzanalyse	129
10.1	Eine Modalanalyse durchführen	129
10.2	Ein zweites Beispiel	132
11	Stimmgabel 440 Hz entwerfen	135
11.1	Die Konstruktion	135
11.2	Die Belastungsanalyse	136
11.2.1	Netzverfeinerung	137
11.2.2	Die erste Simulation	137
11.3	Frequenzermittlung iterativ	138
11.4	Frequenzermittlung mit parametrischer Tabelle	140

12	FEM an Schweißbaugruppen	143
12.1	Erstes Beispiel	143
12.1.1	Die Baugruppe	143
12.1.2	Die Schweißverbindung	144
12.1.3	Die Vorbereitung der Belastungssimulation	145
12.1.4	Kontakte überprüfen	146
12.1.5	Die Simulation	148
12.2	Zweites Beispiel	149
12.2.1	Die Schweißkonstruktion	149
12.2.2	Simulation vorbereiten	150
12.2.3	Kontakte kontrollieren	151
12.2.4	Die Simulation	152
12.2.5	Sicherheitsfaktor	153
12.3	Punktschweißen	154
12.3.1	Die Punktschweißung im Beispiel	155
12.3.2	Die Simulation vorbereiten	155
12.3.3	Kontakte bearbeiten	156
12.3.4	Die Simulation	156

TEIL IV Einfache Bewegungssimulationen und Baugruppenvereinfachung

13	Einfache Bewegungssimulationen	161
13.1	Baugruppen von Hand bewegen	161
13.2	Automatische Bewegung in der Baugruppe	162
13.3	Bewegung in der Präsentationsumgebung	164
13.3.1	Eine Präsentation erstellen	165
13.3.2	Die Präsentationsfunktionen	165
13.4	Die Präsentationsanimation von Schrauben	169
13.4.1	Komponentenpositionen	169
13.5	Bewegung im Inventor Studio	171
13.5.1	Die Inventor Studio-Arbeitsumgebung	172
13.6	Beispiel einer Studio-Animation	176
13.6.1	Vorbereitung der Animation	176
13.6.2	Abhängigkeit animieren	177
13.6.3	Die Ablaufsteuerung	178
13.6.4	Animation aufzeichnen	179

14	Bauteil- bzw. Baugruppenvereinfachung	181
14.1	Beispiel: Kurbeltrieb	182
14.2	Detailgenauigkeit erstellen	182
14.3	Bauteile mit vereinfachtem Bauteil ersetzen	184
TEIL V Die dynamische Simulation anhand zahlreicher Beispiele		
15	Die dynamische Simulationsumgebung	189
15.1	Die Arbeitsumgebung	189
15.1.1	Funktionsgruppe Verbindung	190
15.1.2	Funktionsgruppe Laden	190
15.1.3	Funktionsgruppe Ergebnisse	191
15.1.4	Funktionsgruppe Animieren	191
15.1.5	Funktionsgruppe Verwalten	192
15.1.6	Funktionsgruppe Belastungsanalyse	193
15.1.7	Funktionsgruppe Beenden	193
15.2	Der Objektbrowser in der dynamischen Simulation	193
15.3	Bewegliche Gruppen einfärben	196
15.4	Beschreibung der Gelenkarten	197
15.4.1	Normgelenk	197
15.4.2	Abhängigkeiten und Gelenke	197
15.4.3	Vordefinierte Gelenke	199
15.5	Gelenkeinfügungsarten	201
15.5.1	Gelenkeinfügung von Hand: die Funktion Gelenk einfügen	201
15.5.2	Gelenk aus Abhängigkeit erzeugen: die Funktion Abhängigkeiten ableiten	206
15.5.3	Automatische Gelenkdefinition	207
15.6	Eigenschaften der Normverbindung bearbeiten	209
15.6.1	Registerkarte Allgemein	209
15.6.2	Registerkarte Freiheitsgrad x (R/T)	211
15.7	Gelenkkräfte, Steifigkeit und Dämpfung	212
15.7.1	Nichts ist starr – alles ist Gummi!	212
15.7.2	Steifigkeit und Dämpfung – der Sprungbretteffekt	212
15.7.3	Inventor ist ein Starrkörpersystem	213
15.7.4	Inventor ist elastisch?	213
15.7.5	Steifigkeit	214
15.7.6	Dämpfung	215
15.8	Gelenkeigenschaften	215
15.8.1	Anfangsbedingungen bearbeiten	216
15.8.2	Gelenkdrehmoment bzw. Gelenkkraft bearbeiten	217
15.8.3	Festgelegte Bewegung bearbeiten	218

15.9	Das Eingabediagramm	218
15.9.1	Die Diagrammfläche	219
15.9.2	Sektor-Optionen	219
15.9.3	Start- und Endpunkt	220
15.9.4	Funktionsdefinitionen speichern und laden	221
15.9.5	Referenzachsen bestimmen	221
16	Pendelklappe mit Schwerkraft	223
16.1	Die Bauteile und die Baugruppe	223
16.2	Die dynamische Simulation starten	224
16.3	Schwerkraft definieren	225
16.4	Die erste Simulation	226
16.5	Einen 3D-Kontakt einfügen	227
16.6	Die zweite Simulation	228
16.7	Ändern der Pufferdämpfung	228
16.8	Drehgelenkeigenschaften einstellen	229
17	Das Ausgabediagramm	231
17.1	Die Oberfläche des Ausgabediagramms	232
17.2	Diagrammoptionen	232
17.3	Variable anzeigen	233
17.4	Eine zweite Variable überlagern	235
17.5	Nullpunktverschiebung	236
17.6	Darstellungs- und Wertegenauigkeit	237
17.7	Diagramm und Werte nach Excel exportieren	238
18	Fliehkraftregler	239
18.1	Die Baugruppenabhängigkeiten	240
18.2	Baugruppe bewegen	242
18.3	Die dynamische Simulation	243
18.3.1	Überbestimmungen	243
18.3.2	Der Objektbrowser	244
18.4	Der Antrieb	245
18.4.1	Antriebsmoment	246
18.4.2	Dämpfung	246
18.4.3	Reibung	247
18.5	Die Vertikalbewegung der unteren Gleitbuchse	247
18.5.1	Die Rotation	248
18.6	Andere Gelenke mit Reibwerten versehen	249

18.7	Die Simulation	250
18.8	Das Ausgabediagramm	251
	18.8.1 Rotationsgeschwindigkeit interpretieren	251
	18.8.2 Schwingungen untersuchen	252
18.9	Feder einfügen	253
18.10	Simulation mit eingebauter Feder	257
18.11	Kurven im Ausgabediagramm bearbeiten	258
18.12	Export nach FEM und FE-Analyse von Bauteilen	259
	18.12.1 Die Vorbereitung	259
	18.12.2 Zeitschritt auswählen	260
	18.12.3 Bauteile zur FE-Analyse auswählen	260
	18.12.4 Überbestimmte Bauteile heilen	261
	18.12.5 In die Belastungsanalyse wechseln	263
	18.12.6 Die Belastungsanalysen	264
	18.12.7 Fazit	266
19	Spielerei mit einem Ball	267
19.1	Die Bauteile und die Konstruktion	267
19.2	Die Simulationsumgebung	269
	19.2.1 Feder einfügen	269
	19.2.2 Schwerkraft definieren	270
	19.2.3 Der Ball benötigt Gelenke	271
	19.2.4 Der Objektbrowser	273
19.3	Die Simulation	274
	19.3.1 Starres Abprallen	274
20	Kurbelschwinge	277
20.1	Die Funktion	277
20.2	Die Bauteile	278
20.3	Die Abhängigkeiten	279
20.4	Nach Abhängigkeit bewegen	280
20.5	Vorbereitung der Simulation	281
	20.5.1 Nichts geht mehr	281
	20.5.2 Geht doch!	282
	20.5.3 Der Antrieb	282
20.6	Die erste Simulation	283
20.7	Schiebegelenk einfügen	284
20.8	Die zweite Simulation	286
20.9	Schwerkraft und Reibung	286
	20.9.1 Schwerkraft	286
	20.9.2 Reibungswerte und Kraftübertragung	287

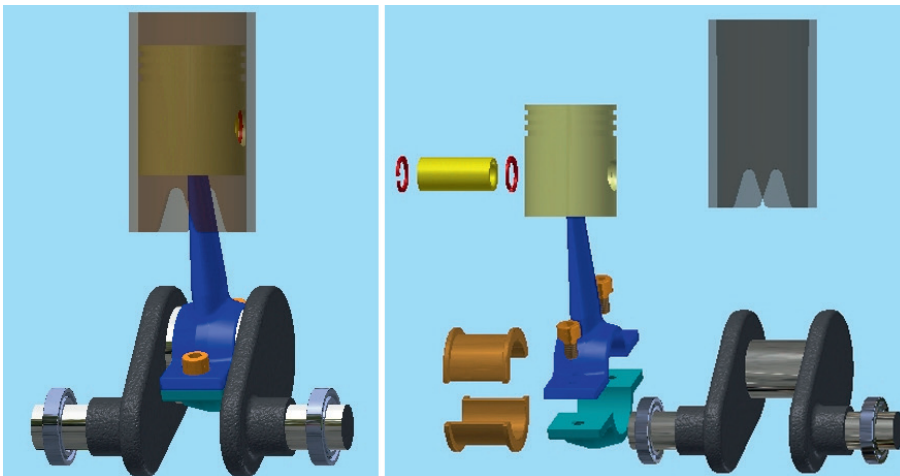
20.9.3	Beidseitige Kraftübertragung an der Schwinge	287
20.9.4	Gelenkreibungen der Drehgelenke	288
20.9.5	Startposition	288
20.10	Die dritte Simulation und das Ausgabediagramm	289
20.10.1	Das Ausgabediagramm	290
20.11	Externe Kraft einfügen	292
20.12	Die vierte Simulation und das Ausgabediagramm	293
20.13	Spur aufzeichnen	295
21	Schiebevorrichtung	299
21.1	Die Bauteile	299
21.2	Die Funktion	300
21.3	Gelenke einfügen	301
21.3.1	Zylindrisches Schiebegelenk	301
21.3.2	Punkt-Ebene-Gelenk	302
21.3.3	Druckfeder	303
21.4	Die erste Simulation	305
21.5	Status des Mechanismus	306
21.6	Redundante Abhängigkeiten	308
21.6.1	Redundanz hinzufügen	308
21.6.2	Redundanz untersuchen	309
21.7	Gelenkdrehmoment aktivieren	310
21.8	Die zweite Simulation	311
21.9	Externe Belastung	313
21.9.1	Externe Kraft definieren	313
21.9.2	Antriebsmoment anpassen	314
21.9.3	Die dritte Simulation	314
21.9.4	Das Ausgabediagramm	315
21.10	Export nach FEM	316
21.11	Die FE-Analyse der Schwinge	316
22	Kurbelschwinge, die Dritte	319
22.1	Die Bauteile	319
22.2	Die Baugruppe	320
22.3	Die Simulationsumgebung	320
22.4	Gelenke einfügen	321
22.4.1	Räumliches Gelenk	321
22.4.2	3D-Kontakte	322
22.5	Reibung definieren	323
22.6	Die Simulation	324

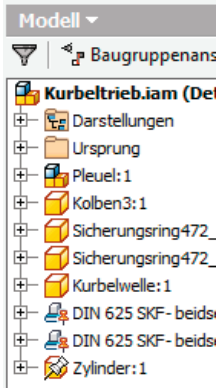
23	Hubkolben-Triebwerk	325
23.1	Die Baugruppe	325
23.2	Die Simulationsumgebung	326
23.3	Untersuchung der Redundanz	327
	23.3.1 Status des Mechanismus	327
	23.3.2 Schwerkraft definieren	328
	23.3.3 Gelenke überprüfen und bearbeiten	329
23.4	Die erste Simulation	332
23.5	Zweites Beispiel: Antrieb durch den Kolben	333
	23.5.1 Externe Kraft wirken lassen	334
	23.5.2 Externe Kraft definieren	334
	23.5.3 Kraft im Eingabediagramm definieren	335
23.6	Die zweite Simulation	336
	23.6.1 Das Ausgabediagramm	337
23.7	Beispiel: Verbrennungsmotor	338
	23.7.1 Lastmoment hinzufügen	338
	23.7.2 Zyklischen Antrieb hinzufügen	338
	23.7.3 Die Simulation	341
23.8	Variante mit Feder	342
	23.8.1 Festgelegte Bewegung aktivieren	342
	23.8.2 Feder einfügen	342
	23.8.3 Die Simulation	343
	23.8.4 Das Ausgabediagramm	344
23.9	Export nach FEM	345
	23.9.1 Die FE-Analyse der Kurbelwelle	345
	23.9.2 Die FE-Analyse des Kolbens	347
	Stichwortverzeichnis	349

Wie in fast jedem Buch zum Thema Simulation soll der klassische Hubkolben mit Kurbelwelle als letztes Beispiel auch in diesem Werk nicht fehlen. Sehr viel Neues bringt diese Anwendung zwar nicht, denn alle Funktionen, Variationen und Simulationen haben wir an den einfachen Übungen und leicht verständlichen Beispielen vorher bereits hinreichend behandelt und erklärt, aber dieser Mechanismus ist für Demonstrationen doch immer wieder hervorragend geeignet.

■ 23.1 Die Baugruppe

Auf die Vorstellung aller Einzelteile soll hier verzichtet werden. Die Einzelteile, die Baugruppe und die Explosionsdarstellung befinden sich ohnehin auf der beiliegenden DVD. Die folgenden Abbildungen zeigen anschaulich alle Komponenten, die auch als Baugruppe funktionsgemäß bewegt werden können.





Wichtig ist auch hier wieder, dass die 3D-Abhängigkeiten entsprechend ihrer Funktion genau vergeben werden, damit in der Simulationsumgebung möglichst wenig Nacharbeit anfällt.

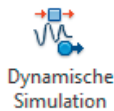
Im Objektbrowser der Baugruppe sehen Sie, dass die beiden Kurbelwellenlager und die transparente Zylinderlaufbuchse *fixiert* sind. Alle anderen Teile sollen beweglich sein.

Für die Unterbaugruppe **PLEUEL:1** ist die Eigenschaft **FLEXIBEL** eingeschaltet. Dies wäre, da diese Baugruppe in sich starr ist, d. h., im Kurbeltrieb nur als Ganzes bewegt wird und keine inneren Bewegungen stattfinden, für diese Simulation nicht unbedingt nötig.

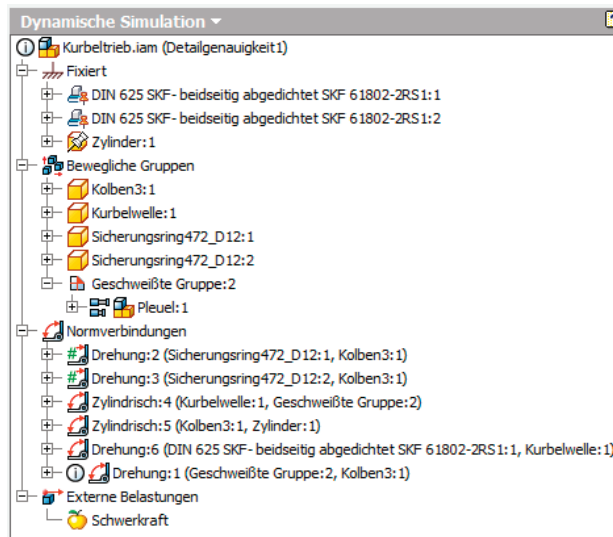


TIPP: Sollen jedoch in einer Simulation die Unterbaugruppen einer Baugruppe eigene funktionsgemäße Bewegungen ausführen, so ist dies nur möglich, wenn sie die Eigenschaft **FLEXIBEL** besitzen.

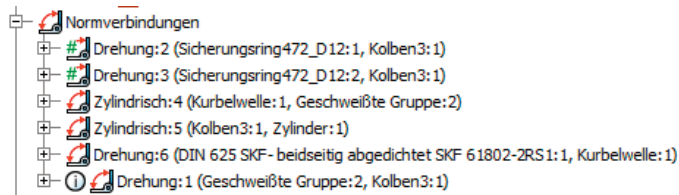
23.2 Die Simulationsumgebung



Der erste Blick in der Simulationsumgebung gehört dem Objektbrowser (siehe folgende Abbildung). Entsprechend der Fixierung in der Baugruppe sind die beiden Lager und der Zylinder auch dort dem Ordner **FIXIERT** zugeordnet. Im Ordner **BEWEGLICHE GRUPPEN** befinden sich der **KOLBEN3:1**, die **KURBELWELLE**, die beiden **Sicherungsringe im Kolben (DIN 472)** und die **GESCHWEISSTE GRUPPE:2** mit der Pleuel-Baugruppe (Kurbelwellenlager, Pleuel kompl., Kolbenbolzen). Die **NORMVERBINDUNGEN** wurden automatisch anhand der Abhängigkeiten erstellt.



Für die beiden Sicherungsringe (DREHUNG:1 und DREHUNG:2) wurden die Freiheitsgrade gesperrt, weswegen diese Gelenke mit grünen Doppelkreuzen dargestellt sind. Die beiden zylindrischen Gelenke und die Kurbelwellenlagerung (ZYLINDRISCH:4, ZYLINDRISCH:5 und DREHUNG:6) entsprechen genau den jeweiligen Funktionen.



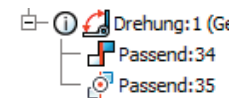
Das zuletzt angezeigte Gelenk, DREHUNG:1, zwischen der Pleuel-Baugruppe und dem Kolben, wird als *Redundant* (überbestimmt) angezeigt und soll deswegen näher untersucht werden.

■ 23.3 Untersuchung der Redundanz

Die Verbindung (Abhängigkeiten) zwischen der Pleuel-Baugruppe und dem Kolben wurde mit zwei Abhängigkeiten versehen.

- PASSEND:34: Mittenebene (XY) der Pleuel-Baugruppe mit Mittenebene (XY) Kolben
- PASSEND:35: Mittelachse des Kolbenbolzens und Mittelachse der Kolbenbolzenbohrung

Beide Abhängigkeiten sind funktionsgerecht und nötig, wobei auch die Wahl anderer Abhängigkeiten zielführend gewesen wäre, etwa über die Mittelachsen und den seitlichen Abstand vom Kolbenbolzen o.Ä. Um dies vorwegzunehmen: Alle anderen Abhängigkeitsvarianten führen ebenso zu Redundanz.



23.3.1 Status des Mechanismus

Die Schaltfläche STATUS DES MECHANISMUS in der Funktionsgruppe VERBINDUNG gibt mehr Aufschluss über mögliche Probleme bei der Gelenkdefinition. Im oberen Bereich des entsprechenden Dialogfensters werden allgemeine und bekannte Informationen angezeigt. Der untere Bereich zeigt die geschlossene Viergelenkkette mit den vier Gelenkteilen (siehe folgende Abbildung).

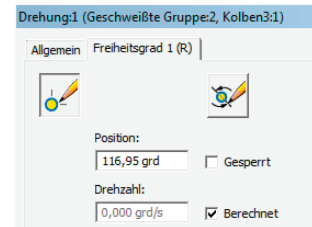
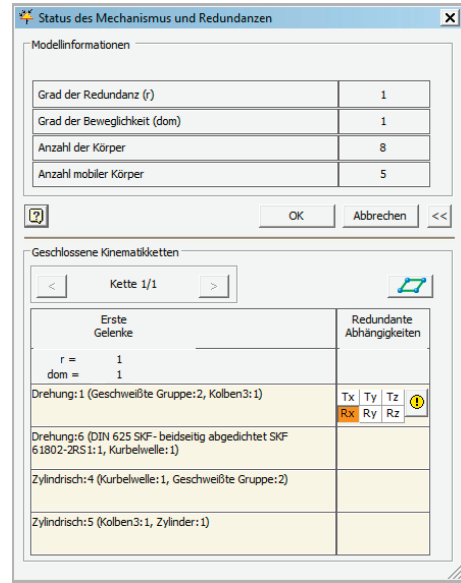


Im Gelenk DREHUNG:1 tritt die Redundanz auf und in der rechten Spalte werden die Freiheitsgrade (dreimal Translation und dreimal Rotation) zu diesem Gelenk angezeigt. Der Freiheitsgrad Rx (Rotation um die X-Achse) soll von der Redundanz betroffen sein und wird deswegen orange dargestellt.

Ein Blick in die **EIGENSCHAFTEN** dieses Gelenks zeigt uns, dass es nur diesen einen Freiheitsgrad (R) hat, und genau dieser Freiheitsgrad wird für die Funktion benötigt (siehe Abbildung).

Es bleibt also unklar, wieso und wo der Inventor eine Redundanz in diesem Gelenk feststellt. Möglicherweise ist eher der Kolben dafür verantwortlich. Dieser ist mit der Abhängigkeit **PASSEND:33** (senkrechte Mittelachse des Kolbens zur senkrechten Mittelachse des Zylinders) bestimmt, wodurch die Rotation des Kolbens um die Mittelachse des Kolbenbolzens verhindert wird. Dieser Umstand ist jedenfalls nicht praxiskonform, da Kolben in Zylinderlaufbuchsen etwas Spiel haben und somit kippen (was bei Motorenbauern häufig zu Problemen führt).

Als Fazit dieser Untersuchung können wir guten Gewissens feststellen, dass die angezeigte Redundanz keine schädlichen Auswirkungen auf die Simulation haben wird. Der Umstand des nicht kippenden Kolbens muss als Näherung im Simulationsprozess hingenommen werden, da das CAD-System keine andere Möglichkeit der Bestimmung zulässt.



23.3.2 Schwerkraft definieren

Bevor wir uns um die weiteren Gelenke kümmern, soll zunächst die Schwerkraft eingerichtet werden. Der Vorgang ist aus den vorherigen Übungen bekannt und somit eine vertiefende Wiederholung.

Als Definitionsobjekte für die Schwerkraft sollen die **VEKTORKOMPONENTEN** dienen. Die Y-Achse **G[Y]** ist die vertikale Achse in Bezug auf die Baugruppe, insofern wird in deren Eingabefeld die Erdbeschleunigung eingetragen. Da die Richtung der Schwerkraft nach unten definiert werden muss, ist der Wert mit negativem Vorzeichen zu versehen, also **9810 MM/S²**.



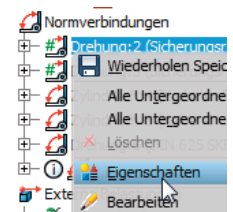
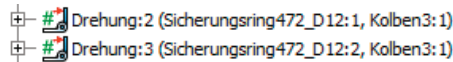
23.3.3 Gelenke überprüfen und bearbeiten

Die automatisch erzeugten Gelenke müssen auf ihre Funktionalität (Freiheitsgrade) hin überprüft und Reibungswerte sowie Antriebs- und Belastungskräfte müssen eingetragen werden.

23.3.3.1 Sicherungsringe

Von oben beginnend betrachten wir zuerst die beiden Drehgelenke, die der Inventor den Sicherungsringen zugeordnet hat. Sicherungsringe werden in ihrer Nut drehbar montiert, eine Funktion hat diese Drehbarkeit jedoch nicht, weswegen diese Freiheitsgrade gesperrt werden.

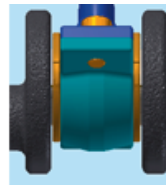
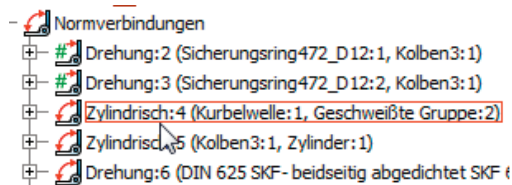
Das Dialogfeld **EIGENSCHAFTEN** dieser beiden Gelenke (**DREHUNG:2** und **DREHUNG:3**) zeigt uns, dass sie tatsächlich jeweils nur einen Freiheitsgrad der Rotation haben. Auf der ersten Registerkarte wird dieser Freiheitsgrad bei beiden Gelenken gesperrt.

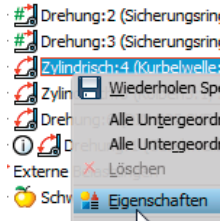


HINWEIS: Für die DIN-gemäße Darstellung in Zeichnungsableitungen werden Sicherungsringe häufig ausgerichtet (Öffnung unten) eingebaut, d. h., sie werden mit einer zusätzlichen Winkelabhängigkeit versehen, sodass sie per se keinen Freiheitsgrad mehr besitzen. Auch dieses Vorgehen wäre für die Simulation ohne Bedeutung.

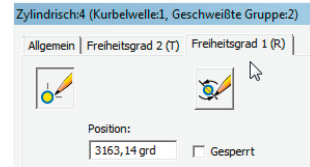
23.3.3.2 Pleuellager an der Pleuellager

Das Gelenk **ZYLINDRISCH:4** betrifft die Pleuellagerung auf der Pleuellager, die mit zwei Lagerschalen realisiert wurde. Wie uns die folgende Abbildung zeigt, hat das Pleuellager beidseitig ein Axialspiel, was funktionsgerecht ist, da die axiale Führung des Pleuels über den Pleuellager und den Pleuellager realisiert werden muss.



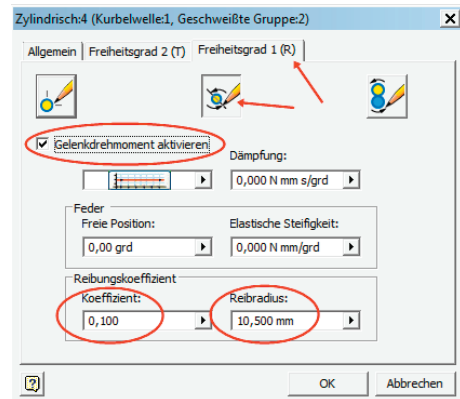


Das Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** dieses Gelenks zeigt folgerichtig auch zwei Freiheitsgrade an, nämlich die Translation (**FREIHEITSGRAD 2 (T)**) und die Rotation (**FREIHEITSGRAD 1 (R)**). Da sich in der Konstruktion bzw. der Simulation das Pleuellager axial nicht verschieben wird, kann der Freiheitsgrad der Translation unberücksichtigt bleiben.



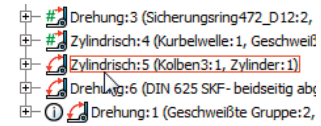
Das Rotationsgelenk ist dagegen direkt an der Simulation beteiligt und muss mit einem *Reibungskoeffizienten* ausgestattet werden.

Im Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** dieses Gelenks selektieren Sie die Registerkarte **FREIHEITSGRAD 1 (R)** und auf dieser den mittleren Button **GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN** (siehe Abbildung). Nun wählen Sie das Optionsfeld **GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN** aus und tragen als **KOEFFIZIENT** der Reibung z. B. den Wert **0,1** ein. Der Kurbelzapfen hat einen Durchmesser von 21 mm, weswegen Sie den **REIBRADIUS** mit **10,5 MM** angeben müssen. Die Eingaben bestätigen Sie mit **OK**.



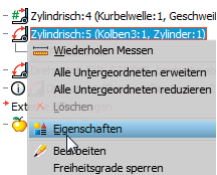
23.3.3.3 Der Kolben im Zylinder

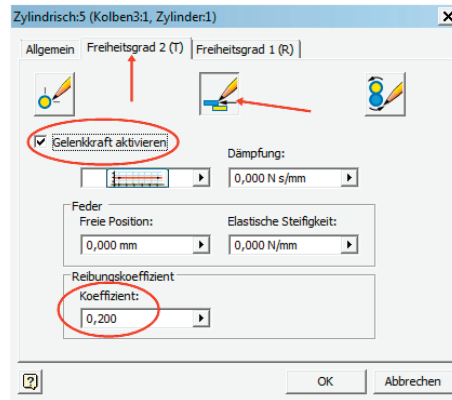
In der Reihenfolge des Objektbrowsers ist als nächstes Gelenk die zylindrische Führung des Kolben im Zylinders (**ZYLINDRISCH:5**) an der Reihe (siehe folgende Abbildung). Auch dieses Gelenk ist mit zwei Freiheitsgraden ausgestattet, der Translation (**FREIHEITSGRAD 2 (T)**), mit der sich der Kolben im Zylinder auf und ab bewegen kann, und der Rotation (**FREIHEITSGRAD 1 (R)**), mit der sich theoretisch der Kolben im Zylinder drehen könnte.



Die Rotationsmöglichkeit im Zylinder ist tatsächlich vorhanden, jedoch nur, wenn der Kolben ohne das Pleuel montiert werden würde. Für die Simulation ist dieser Fall jedoch irrelevant, weswegen der Freiheitsgrad der Rotation in diesem Gelenk unberücksichtigt bleiben kann.

Im Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** dieses Gelenks selektieren Sie also die Registerkarte **FREIHEITSGRAD 2 (T)** und auf dieser den mittlere Button **GELENKKRAFT BEARBEITEN** (siehe folgende Abbildung). Nun wählen Sie das Optionsfeld **GELENKKRAFT AKTIVIEREN** aus und als **KOEFFIZIENT** der Reibung tragen Sie z. B. den Wert **0,2** ein. Die Eingaben sind mit **OK** zu bestätigen, womit auch dieses Gelenk fertig bearbeitet ist.



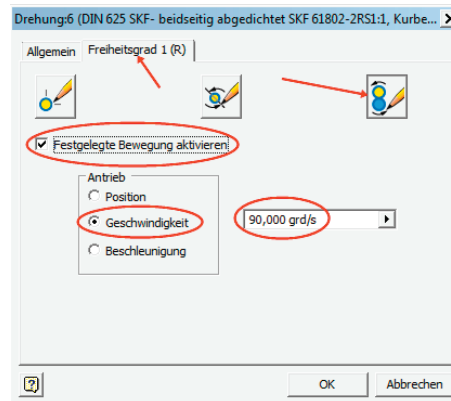


23.3.3.4 Kurbelwellenlagerung

An diesem Gelenk sind zwei Aktionen durchzuführen. Über die Kurbelwelle soll für die erste Simulation der Mechanismus angetrieben werden. Dies ist insofern für die Baugruppe realistisch, als es sich beispielsweise um eine Kolbenpumpe oder einen Kompressor handeln könnte. Außerdem ist auch dieses Gelenk reibungsbehaftet.

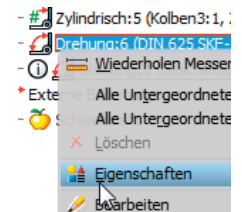
Der Antrieb

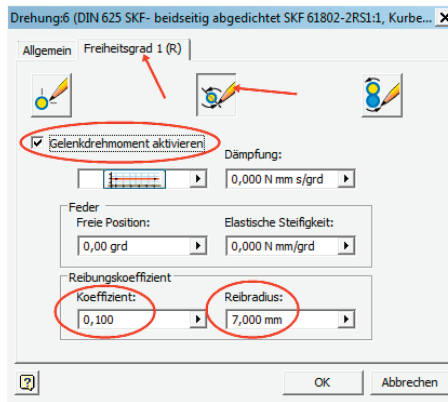
Im ersten Schritt versehen Sie im Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** über den rechten Button **FESTGELEGTE BEWEGUNG BEARBEITEN** das Auswahlfeld **FESTGELEGTE BEWEGUNG AKTIVIEREN** mit einem Haken. Nach der Selektion der Option **GESCHWINDIGKEIT** wird die Drehbewegung mit dem Wert **90 GRD/S** als konstante Größe eingegeben.



Die Reibung

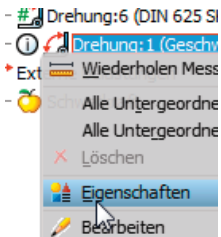
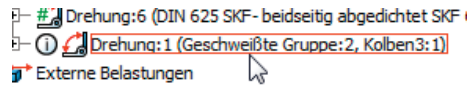
Die Definition der Reibung erfolgt prinzipiell wie bei den Gelenken vorher. Da es sich jetzt wieder um ein Drehgelenk handelt, ist der Radius der Reibkraft anzugeben (siehe folgende Abbildung). Der Lagerzapfen der Kurbelwelle hat einen Durchmesser von 14 mm, weswegen Sie hier den **RADIUS 7 MM** eingeben müssen. Der **KOEFFIZIENT** der Lagerreibung der Rillenkugellager soll beispielsweise 0,1 sein. Die Eingaben bestätigen Sie wieder mit **OK**.



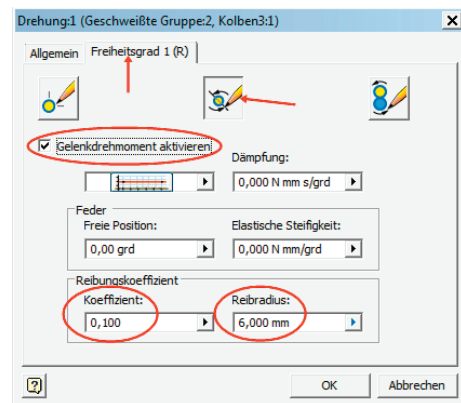


23.3.3.5 Pleuellager im Kolben

Den Umstand, dass dieses Gelenk als *Redundant* geführt wird, haben wir bereits zu Beginn des Kapitels behandelt. Dies soll jetzt keine Rolle mehr spielen. Ansonsten kommen bei diesem Gelenk, das nur einen Freiheitsgrad der Rotation besitzt, keine neuen Erkenntnisse dazu. Es wird wie die vorherigen Gelenke lediglich mit einem Reibwert ausgestattet.

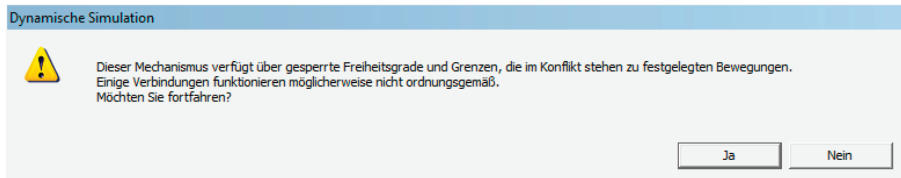


Im Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** dieses Gelenks selektieren Sie die Registerkarte **FREIHEITSGRAD 1 (R)** und auf dieser den mittleren Button **GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN**. Nun wählen Sie das Optionfeld **GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN** aus und tragen als **KOEFFIZIENT** der Reibung z.B. den Wert 0,1 ein. Der Kolbenbolzen hat einen Durchmesser von 12 mm, weswegen Sie den **REIBRADIUS** mit 6 MM angeben müssen. Die Eingaben bestätigen Sie mit **OK**.

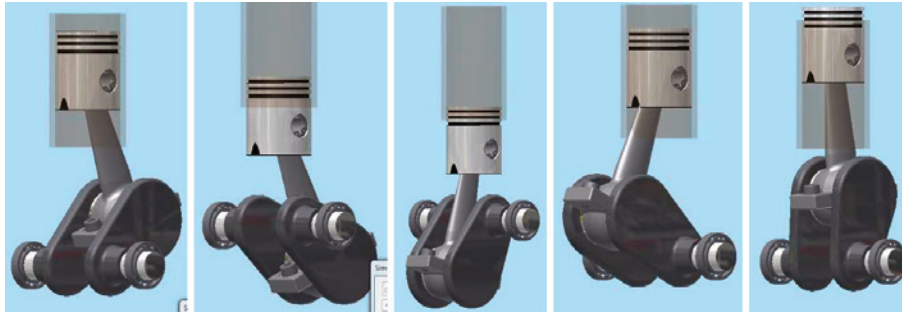


23.4 Die erste Simulation

Die erste Simulation kann jetzt stattfinden. Sie wird mit der definierten Antriebsdrehzahl von 90 grd/s über die Pleuellager durchgeföhrt. Die Simulationszeit wurde auf acht Sekunden eingestellt, damit zwei volle Umdrehungen des Pleuellagertriebs stattfinden. Die in der folgenden Abbildung dargestellte Meldung erscheint.



Sie ist durch die gesperrten Sicherungsringe begründet und kann mit JA bestätigt werden. Möchten Sie die Meldung verhindern, dann sind die Freiheitsgrade der Sicherungsringe einfach freizugeben.

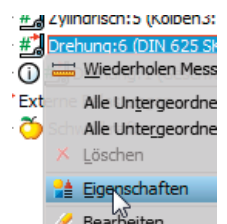


Animation auf der DVD

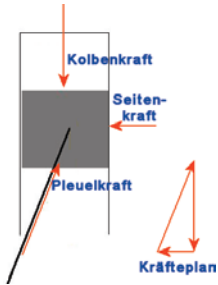
23.5 Zweites Beispiel: Antrieb durch den Kolben

Ähnlich wie bei einem Verbrennungsmotor soll in diesem Beispiel der Antrieb über den Kolben erfolgen.

Dazu ist natürlich zuerst der vorhandene Antrieb zu entfernen. Über die **EIGENSCHAFTEN** des Gelenks **DREHUNG:6** wählen Sie dazu im Dialogfenster zum **FREIHEITSGRAD 1 (R)** den rechten Button **FESTGELEGTE BEWEGUNG BEARBEITEN** und entfernen den Haken bei **FESTGELEGTE BEWEGUNG AKTIVIEREN**. Für evtl. spätere Aktionen bleibt dabei der vorher eingegebene Bewegungswert erhalten und kann jederzeit wieder reaktiviert werden.



23.5.1 Externe Kraft wirken lassen



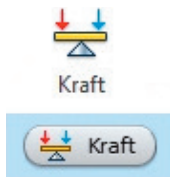
Die Kolbenkraft kann durch zwei unterschiedliche Maßnahmen simuliert werden. Entweder

- Sie definieren eine externe Kraft, die auf den Kolben wirkt, oder
- Sie definieren über die Eigenschaften des Gelenks **ZYLINDRISCH:5**, das die Translation des Kolbens im Zylinder ermöglicht, eine Gelenkkraft.

Die Entscheidung für die externe Kraft erfolgt aus drei Gründen:

- Erstens ist die Art der Belastung realistischer, denn beim Verbrennungsmotor wird die Kolbenkraft durch die Verbrennung ebenfalls extern erzeugt.
- Zweitens erzeugt die externe Kraft die schräge Kraftkomponente durch das Pleuel, die dadurch im Gleichgewicht gehalten wird, dass eine zweite Kraftkomponente den Kolben gegen die Zylinderlaufbahn drückt. Dieser Vorgang entspricht ebenfalls der Realität und sorgt in der Praxis für ein ovales Auslaufen der Zylinderlauffläche (Verschleiß).
- Zum Dritten sind es auch didaktische Gründe, da mit Gelenkkraften schon häufiger gearbeitet wurde und eine externe Kraft an dieser Stelle gut in diese Übung passt.

23.5.2 Externe Kraft definieren

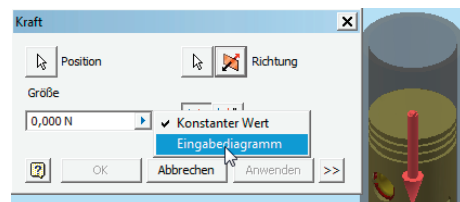
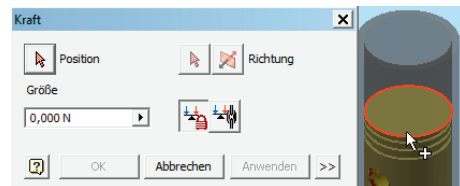


Die externe **KRAFT** rufen Sie über das Markierungsmenü oder die entsprechende Schaltfläche in der Befehlsgruppe **LADEN** auf.

Über das Dialogfenster geben Sie zuerst die **POSITION** der Kraft an. Als Positionsgeometrie kann der obere Kolbendurchmesser gezeigt werden, durch den das Zentrum dieses Kreises als Angriffspunkt für die Kraft übernommen wird. Der Kraftangriff wird als kleine rote Kugel am Angriffspunkt symbolisiert.

Im nächsten Schritt ist die **RICHTUNG** der Kraft zu bestimmen. Die Kraft soll exakt senkrecht wirken, weswegen die Zylinderlaufbuchse als Richtungszeiger genau richtig ist.

Die Krafrichtung soll natürlich nach unten gerichtet sein und kann bei Bedarf mit dem Richtungsbutton umgekehrt werden. Als **GRÖSSE** der Kraft soll diesmal kein konstanter Wert, sondern ein Kraftverlauf über das **EINGABEDIAGRAMM** eingegeben werden.

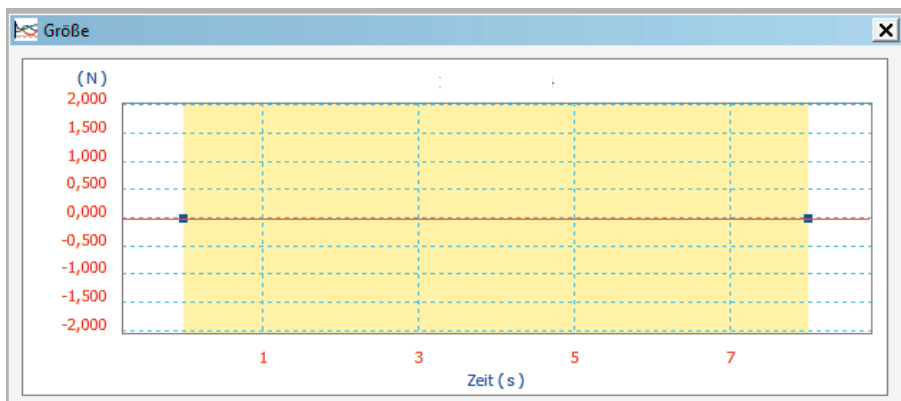


23.5.3 Kraft im Eingabediagramm definieren

Im pV-Diagramm eines Verbrennungsmotors erfolgt der Druckanstieg kurz nach dem oberen Totpunkt des Kolbens explosionsartig in einer sehr kurzen Zeit. Beispielsweise dauert der Verbrennungsvorgang bei einer Drehzahl von 3000 U/min und einer Brenndauer von 60 Grad Kurbelwinkel gerade mal 0,003 Sekunden.

Da unser Beispiel lediglich eine Demonstration der Möglichkeiten darstellt und an dieser Stelle keinen Anspruch auf naturgetreue Abläufe stellt, soll im Eingabediagramm der Kraftverlauf nur sehr ungefähr dargestellt werden.

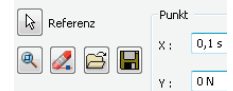
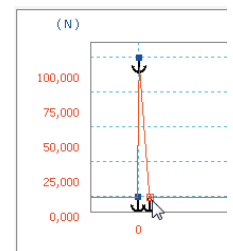
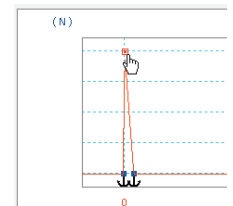
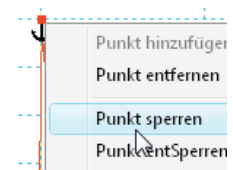
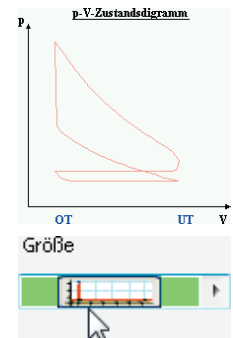
Im noch offenen Dialogfenster wird das Eingabediagramm über die entsprechend symbolisierte Schaltfläche aufgerufen. Das noch leere Diagrammfeld zeigt bereits den Anfangs- und Endpunkt über der definierten Simulationszeit von acht Sekunden an (siehe folgende Abbildung). Mittels je eines Doppelklicks können neue Punkte in die Diagrammfläche eingetragen und mit Zeit- (X-Achse) und Kraftwerten (Y-Achse) versehen werden.

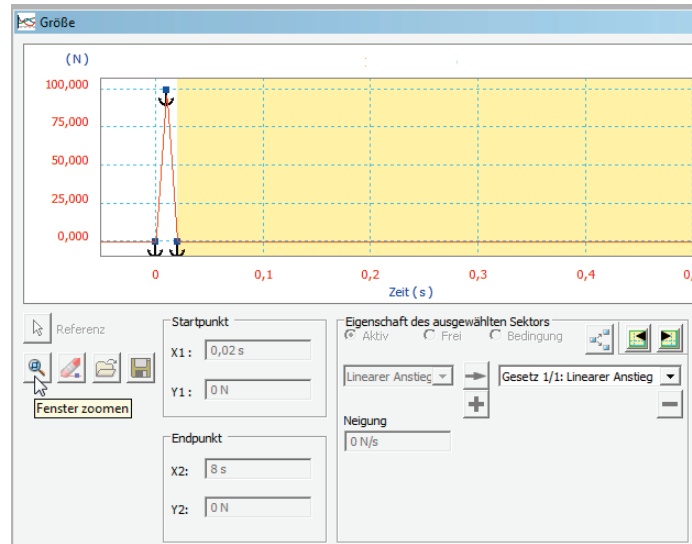


Es empfiehlt sich sehr, die eingetragenen Punkte sofort zu sperren, da sich sonst beim Verändern eines Punktes die anderen meist mit verstellen. Die Kontextmenüfunktion eines Punktes, **PUNKT SPERREN**, versieht den betreffenden Punkt im Diagramm mit einem Anker-Symbol, lässt aber weiterhin zu, die Zeit- und Kraftwerte dieses Punktes über die Eingabefelder zu definieren.

Wurde ein Punkt per Klick selektiert, dann erscheinen im unteren Bereich die Eingabefelder für die X- und die Y-Achse. Für den im Beispiel ausgewählten Punkt sind für die Zeit X: der Wert 0,01 S und für die Kraft Y: der Wert 100 N eingetragen. Im darauffolgenden Punkt sind für die Zeit X: der Wert 0,02 S und für die Kraft Y: der Wert 0 N eingetragen, d. h., die Kraft steigt in 0,01 Sekunde auf ihren Maximalwert und fällt dann in 0,01 Sekunden wieder auf null ab.

Für die Simulationszeit von acht Sekunden ist nur dieser eine Impuls definiert. Die gelb unterlegte Fläche in der folgenden Abbildung zeigt den Auslauf zwischen Punkt 3 und dem Ende, in dem keine Kraft mehr wirksam ist.





TIPP: Mit der Funktion *Fenster zoomen* wurde der Ausschnitt, in dem der Impuls stattfindet, vergrößert.



HINWEIS: Bei einem Verbrennungsmotor würden je nach seiner Drehzahl laufend solche Impulse auftreten. Beim vorherigen Beispiel mit 3000 U/min wären das 50 U/Sekunde. Bei einem Otto-Motor, der bei jeder zweiten Umdrehung zündet, würde das bedeuten, dass nach jeweils 1/25 Sekunde (0,04 Sekunden) schon die nächste Zündung erfolgen würde.

Nun gut, 3000 U/min lassen sich auch in der Inventor-Simulation schlecht beobachten, deshalb soll es bei diesem einen Impuls bleiben.

23.6 Die zweite Simulation

Alle Einstellungen aus der ersten Simulation bleiben erhalten. Die Animation bzw. die Simulation zeigt das erwartete Verhalten. Der Kolben wird durch den Impuls sehr stark nach unten beschleunigt. Schon vor dem unteren Totpunkt ist der Impuls zu Ende, sodass die Beschleunigung und die Schwungmasse der Kurbelwelle eine relativ hohe Drehzahl erreichen, die nur durch die Reibungskräfte langsam gebremst wird.

Stichwortverzeichnis

Symbole

0,2%-Dehngrenze 41
2D-Kontakt 200
3D-Abhängigkeiten 29, 155
3D-Kontakt 200, 271
3D Printing 13

A

Abhängigkeiten 29, 80, 224
Abhängigkeitsnamen 147
Abhängig machen 207
Abscheren 42
Achsenintervalle 233
Aktualisierung 139
Analysearten 17
Analyse der Bewegungsdaten
263, 316
Anfangsbedingungen 211, 248
Anfangsbedingungen bearbeiten
247, 289
Animationsablaufprogramm 178
Animationsoptionen 178
ANSYS 14, 69
Anwendungsoptionen 147
Anzahl der wichtigen Ziffern 233
Approximation 70
Arbeit 36
Ausgabediagramm 290
Automatische Kontaktkonvertie-
rung 146
AVI-Rate 163

B

Baugruppe bewegen 242
Baugruppenvereinfachung 181
Bauteilanalysen 17
Bauteilparameter 111
Beanspruchung 42
Begrenzungsbedingungen
anzeigen 317

Belastung des Körpers 82
Berechnet 216
Bereichsangaben 114
Beschleunigung 35
Bestimmung 28
Betriebssystem 8
Betriebstemperatur 46
Beulen 46
Bewegliche Gruppen 194, 224
Bewegungsbahn 295
Bewegungslehre 34
Bewegungsschraube 200
Bewegungssimulationen 161
Biegung 42
Blechtraverse 123
Bruchdehnung 41
Buchse 195

C

CC 13
Constrains 29
Contour Crafting 13

D

Dämpfung 213ff., 256
Darstellungs-Browser 50
Daten nach Excel exportieren
238
Dauerfestigkeit 42
DesignSpace 14
Diagrammachsen 233
Diagrammoptionen 232
Dokumentparametertabelle 121
Drahtradius 255, 257
Drehbuch 165
Drehmoment 82, 195
Drehung 194, 198, 255
Drehzahl 35, 211, 216, 247
Druck 28, 42, 81
Duktile (zähe) Werkstoffe 42

Dünne Körper suchen 125
Durchdringung 242
DVD 9
Dynamik 36
Dynamisches Grundgesetz 36
Dynamische Simulation 224

E

Eben 194
Ebene 195, 199
Einfügen 198
Eingabediagramm 35
Einspannung 28, 47, 80
Elastizität 62, 213
Elastomere 62
E-Modul 41
Energieerhaltungssatz 36
Ergebnisparameter 121
Ersatzfläche 125
Erwärmung 46
Excel 238
Explosionsdarstellung 325
Exponentendarstellung 233
Externe Belastungen 195
Externe Einwirkungen 195
Externes Kraftmoment 82

F

Fabber 12
Facetten 255f.
Farbskala 132
Fasern 64
FDM 13
Feder 195
Feder/Dämpfung/Buchse 195,
201
Federn 32
FEM-Genauigkeit 47
FEM, parametrisch 111
FEST 81

Festgelegte Bewegung 211
Festgelegte Bewegung bearbeiten
282
Festigkeithypothesen 42
Festlager 28
Fixiert 194, 224
Flächenabschnitt 48
Flächenanalysen 17
Flächenaufteilung 48
Flächenfehler 22
Flächenlast 28, 86
Flächenpressung 157
Flächenträgheitsmoment 91
Flächentrennung 123
Fliehkraftregler 239
Freie Länge 255f.
Freiheitsgrad-Analyse 31
Freiheitsgrade 28, 302
Freiheitsgrade animieren 31
Freiheitsgrade sperren 224
Frequenzermittlung iterativ 138
Führungen 81
Funktionelle Bewegungen 161
Funktionsanalyse 91
Fused Deposition Modeling 13

G

GEH 42
Gelenkdrehmoment 211
Gelenkdrehmoment aktivieren
229
Gelenkdrehmoment bearbeiten
229, 288
Gelenke 29
Gelenk einfügen 202
Gelenkkette 307
Gelenkkraft 211
Gelenkkraft bearbeiten 248
Gelenkkraftvektor 257
Genauigkeitssteigerung 69
Gesamte Geometrie 113

- Geschweißte Gruppe 196, 249
 Geschwindigkeit 34, 211, 216
 Gesperrt 216
 Gestaltänderungsenergie 43
 Gestaltänderungsenergie-
 hypothese 42, 47
 Gestaltfestigkeit 97
 Getrennt 152
 Gitternetz 69
 Glasfaser 47
 Gleichgewichtsbedingungen 80
 Gleitverbindungen 81
 G-Modul 41
 Gravitation 36
 Grenze 141
 Grenzen der GEH 47
 Grundfrequenzen 137
 Gummi 268
- H**
- Halbschnitt 152
 Hauptträgheitsmomente 37
 H-Methode 70
 Holz 63
 Hookesche Gesetz 69
- I**
- Impuls 336
 In FEM exportieren 260
 Inkrement 163
 In Skizze exportieren 297
 Intelligenter Konfigurationssatz
 118
 Inventor Studio 161, 171
 iProperties 37
 Iterative Frequenzermittlung 138
- K**
- Kamerafahrt 167
 Kantenlast 85
 Kegel 200
 Kinematik 34
 Knicken 46
 Knickung 154
 Knotenanzahl 47
 Kohlefaser 47
 Kollisionserkennung 163
 Konfiguration simulieren 119
 Konstanter Wert 218
 Konstruktionsabhängigkeiten
 112
 Kontakt bearbeiten 146
 Kontaktbedingungen 47
 Kontaktgelenke 195
 Kontakttyp getrennt 147
- Konvergenzeinstellungen 47
 Kraft 28, 81, 195, 313
 Kraftangriffspunkt 83
 Kraftfluss 241, 287
 Kraftverbindungen 195
 Krümmungsanalyse 18
 Krümmungsverhältnisse 22
 Kugelförmig 198
 Kurve 195, 200
 Kurveigenschaften 258
 Kurvenförmige Netzelemente
 erstellen 79
- L**
- Lagerbedingungen 47
 Lagerbelastung 81
 Laminated Object Modeling 13
 Länge 256
 Lasersintern 13
 Lastangriffsbedingungen 47
 Lastwechsel 42
 Leistung 36
 Linie-Ebene 199
 Lokale Aktualisierung 139
 Lokale Netzsteuerung 48, 79
 LOM 13
 Loslager 28
- M**
- Massenkräfte 36
 Massenmomente 37
 Materialanpassung 98
 Materialbeanspruchung 43
 Materialdaten 47
 Materialien-Browser 49
 Material und Darstellung 49
 Max. 247
 Megapascal 41
 Mehrachsiger Spannungszustand
 43
 Min. 247
 Minimaler Wert 113
 Mittelfläche 125
 Modalanalyse 140
 Moment 28
 MPa 41
 Multi Jet Modeling 13
 Multiplikator 258
- N**
- Nach Excel exportieren 238
 Netzeinstellungen 75
 Netzmaschenanzahl 47
 NH 42
 Normalspannung 41
- Normalspannungshypothese 42
 Normverbindungen 194, 224
- O**
- Oberflächenqualität 17
 Oberspannung 42
 Objektbrowser 224
- P**
- Parametrische Bemaßung 140
 Parametrische FEM 111
 Parametrische Tabelle 138
 Pascal 41
 Passend 198
 Perpetuum mobile 226
 Personal Fabricator 12
 Pin-Abhängigkeit 81
 Plastische Verformung 43, 154
 P-Methode 70
 Polymere Werkstoffe 62
 Polynomgrad 70
 Position 211, 216
 Positionsveränderung 166
 Präsentation 164
 Präsentationsanimation 169
 Präsentationsumgebung 161
 Prismatisch 198
 Problematische Materialien 48,
 58
 Problembereiche 48
 Punktaufleger 47
 Punkt-Ebene 199
 Punktlast 83
 Punktlasten 47
 Punkt-Linie 199
 Punktschweißen 154
- Q**
- Querkontraktion 47
 Querschnittsanalysen 17
- R**
- Radius 255f.
 Rapid Prototyping 12
 Räumlich 199
 Redundanz 194
 Referenz 221
 Reibung 249, 287, 323
 Reibungslos 81
 Reibungsverluste 34
 Riemen 194, 200
 Rollgelenk 194, 200
 Rollverbindungen 194
 Rotation 34
- S**
- Scheitelpunkt 83
 Schiebegelenk 200
 Schieberverbindungen 195
 Schiebervorrichtung 299
 Schneckengetriebe 200
 Schneckenrad 194, 200
 Schraube 194, 200
 Schubspannung 41f.
 Schubspannungshypothese 42
 Schwerkraft 82, 195, 225
 Schwerpunkt 90
 Schwingung 212
 SH 42
 Sicherheitsfaktor 41, 113
 Sichtbarkeit 148, 150
 Simulationen mit dünnwandigen
 Teilen 125
 Simulation kopieren 73
 Simulationsumgebung 161
 Simulieren 139
 Singularität 71
 Sinusförmige Bewegung 35
 SLA 13
 SLS 13
 Snapshots 166
 Space Puzzle Molding 13
 Spannungen 100
 Spannungsschwankungen 42
 Spannungsspitzen 149
 Spannungsverhältnis 41
 Spatialverbindung 194
 Spiralfeder 255
 Splines 35
 SPM 13
 Spröde Werkstoffe 42
 Spur 295
 Starrkörpersystem 268
 Statische Beanspruchungen 42
 Steifigkeit 213f., 248, 256
 Stereolithografie 13
 Stirnrad 200
 STL 13
 Streckgrenze 41f.
 Streifenmuster 19
- T**
- Tangential 198
 Temperatureinflüsse 46
 Torsion 42
 Trägheit 36
 Trägheitstensor 91
 Translation 34
 Transparenz 257
 Trennbruch 43
 Trockene Reibung 249, 288
 Typ 256

U

Überbestimmt 29
Überbestimmung 195, 261, 287
Umfangsgeschwindigkeit 35
Umgebungstemperatur 46
Ungenauigkeiten 48
Ungenauigkeiten, Unmöglich-
keiten 27
Unterspannung 42
Ursprung 203

V

Verankern 81
Verbunden 152

Verbundwerkstoffe 47
Vereinfachungsfunktionen 181
Vergleichsspannung 42f.
Versatz 125
Verschleißt 199
Videoausgabe 171
Viergelenkkette 307
Von Hand bewegen 161
von-Mises-Spannung 43

W

Wärmeausdehnungen 46
Wärmeenergie 36
Wärmewirkungen 46
Weg 34

Werkstoffkennwerte 42
Wertetabelle 233
Windungen 256
Winkel 34
Winkelbeschleunigung 35
Winkelgeschwindigkeit 34
Wirkungsgrad 36

X

X-Achse 203

Z

Zahnstange 200
Zeichen 233

Zeichnungsansicht erstellen 167
Zeit 34
Zeitachse 290
Zeitfestigkeit 42
Zeitschritt 316
Zug 42
Zugfestigkeit 41
Zusammenfügen 207
Zylinder 195, 200
Zylindrisch 194, 198