



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

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>3</b>
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
<b>2</b>	<b>Digital Prototyping und Produktdesign</b> .....	<b>11</b>
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

<b>3</b>	<b>Bauteilanalysen</b> .....	<b>17</b>
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
<b>4</b>	<b>Technische Mechanik, Festigkeitslehre und Inventor</b> .....	<b>27</b>
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
<b>5</b>	<b>Die Materialbibliothek</b> .....	<b>49</b>
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	<b>Problematische Materialien in der FEM</b>	58
5.4.1	Beispiel: Silentblock	58
5.4.2	Material ohne Kennwerte	59
5.5	<b>Nicht in der FE-Analyse verwendbare Werkstoffe</b>	62
5.5.1	Polymere Werkstoffe	62
5.5.2	Verbundwerkstoffe	63
5.6	<b>Bauteile mit großen Verformungen</b>	64

## **TEIL III Grundlagen und Anwendungsbeispiele der Finiten-Elemente-Methode**

<b>6</b>	<b>FEM</b>	<b>69</b>
6.1	FEM, allgemein	69
6.2	<b>Konvergenz</b>	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	<b>Das FEM-Netz</b>	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	<b>Abhängigkeiten, Spannungen</b>	80
6.5	<b>Lasten und Lastangriffsfälle</b>	81
6.5.1	Lastarten	81
6.5.2	Lastangriffsfälle	82
6.6	<b>Beispiel einer einfachen vollständigen FE-Analyse</b>	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
<b>7</b>	<b>Rückstoßkraft und Kraftermittlung über Verformungen .....</b>	<b>107</b>
7.1	Beispiel: Rückstoßkraft ermitteln .....	107
7.2	Verformungskraft ermitteln .....	108
7.3	Fehlerbetrachtung .....	110
<b>8</b>	<b>Parametrische FEM-Studien .....</b>	<b>111</b>
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
<b>9</b>	<b>FEM an dünnen Bauteilen .....</b>	<b>123</b>
9.1	Beispiel: Blechtraverse .....	123
9.2	Simulation als normaler Körper .....	124
9.3	Simulation als dünnwandiges Bauteil .....	125
<b>10</b>	<b>Modal- oder Eigenfrequenzanalyse .....</b>	<b>129</b>
10.1	Eine Modalanalyse durchführen .....	129
10.2	Ein zweites Beispiel .....	132
<b>11</b>	<b>Stimmgabel 440 Hz entwerfen .....</b>	<b>135</b>
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

<b>12</b>	<b>FEM an Schweißbaugruppen</b>	<b>143</b>
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**

<b>13</b>	<b>Einfache Bewegungssimulationen</b>	<b>161</b>
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

<b>14</b>	<b>Bauteil- bzw. Baugruppenvereinfachung</b>	<b>181</b>
14.1	Beispiel: Kurbeltrieb	182
14.2	Detailgenauigkeit erstellen	182
14.3	Bauteile mit vereinfachtem Bauteil ersetzen	184
<b>TEIL V Die dynamische Simulation anhand zahlreicher Beispiele</b>		
<b>15</b>	<b>Die dynamische Simulationsumgebung</b>	<b>189</b>
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
<b>16</b>	<b>Pendelklappe mit Schwerkraft .....</b>	<b>223</b>
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
<b>17</b>	<b>Das Ausgabediagramm .....</b>	<b>231</b>
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
<b>18</b>	<b>Fliehkraftregler .....</b>	<b>239</b>
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
<b>19</b>	<b>Spielerei mit einem Ball .....</b>	<b>267</b>
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
<b>20</b>	<b>Kurbelschwinge .....</b>	<b>277</b>
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

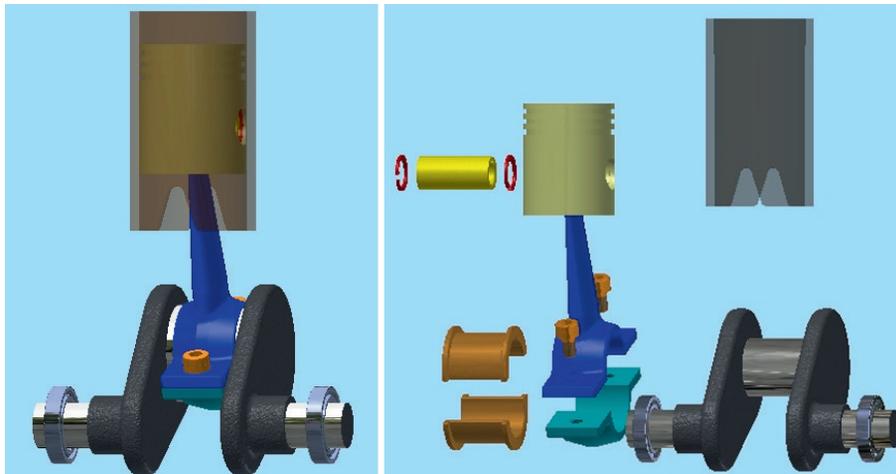
20.9.3	Beidseitige Kraftübertragung an der Schwinge	287
20.9.4	Gelenkreibungen der Drehgelenke	288
20.9.5	Startposition	288
20.10	Die dritte Simulation und das Ausgabediagramm	289
20.10.1	Das Ausgabediagramm	290
20.11	Externe Kraft einfügen	292
20.12	Die vierte Simulation und das Ausgabediagramm	293
20.13	Spur aufzeichnen	295
<b>21</b>	<b>Schiebevorrichtung</b>	<b>299</b>
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
<b>22</b>	<b>Kurbelschwinge, die Dritte</b>	<b>319</b>
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

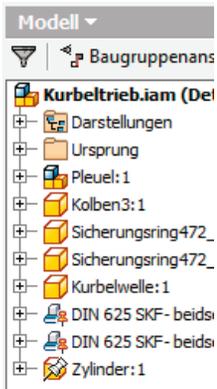
<b>23</b>	<b>Hubkolben-Triebwerk</b> .....	<b>325</b>
23.1	Die Baugruppe .....	325
23.2	Die Simulationsumgebung .....	326
23.3	Untersuchung der Redundanz .....	327
	23.3.1 Status des Mechanismus .....	327
	23.3.2 Schwerkraft definieren .....	328
	23.3.3 Gelenke überprüfen und bearbeiten .....	329
23.4	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
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>349</b>

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.

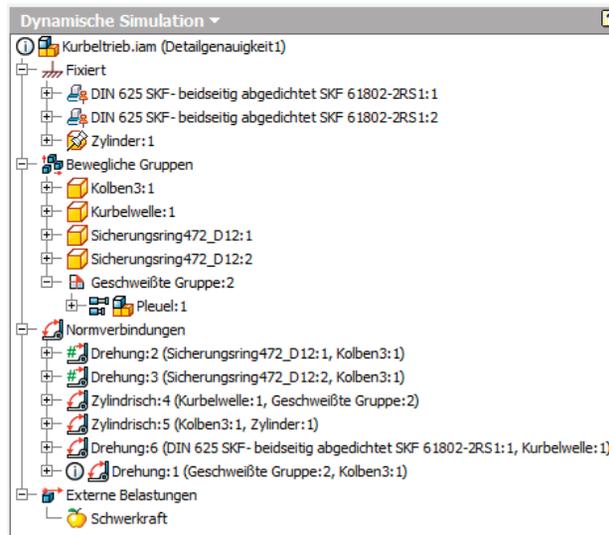


**TIPP:** Sollen jedoch in einer Simulation die Unterbaugruppen einer Baugruppe eigene funktionsgemäße Bewegungen ausführen, so ist dies nur möglich, wenn sie die Eigenschaft **FLEXIBEL** besitzen.

## 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.

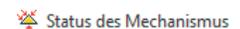
- PASSEND:34: Mittenebene (XY) der Pleuel-Baugruppe mit Mittenebene (XY) Kolben
- PASSEND:35: Mittelachse des Kolbenbolzens und Mittelachse der Kolbenbolzenbohrung

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).

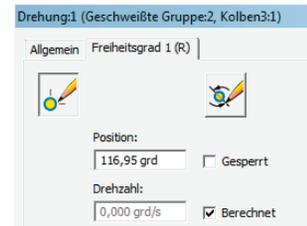
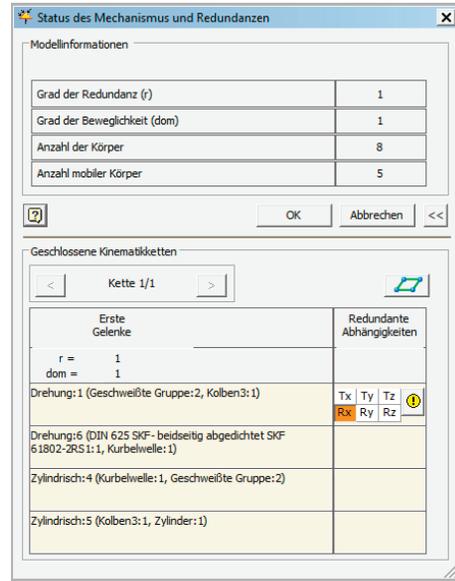


Im Gelenk DREHUNG:1 tritt die Redundanz auf und in der rechten Spalte werden die Freiheitsgrade (dreimal Translation und dreimal Rotation) zu diesem Gelenk angezeigt. Der Freiheitsgrad Rx (Rotation um die X-Achse) soll von der Redundanz betroffen sein und wird deswegen orange dargestellt.

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).

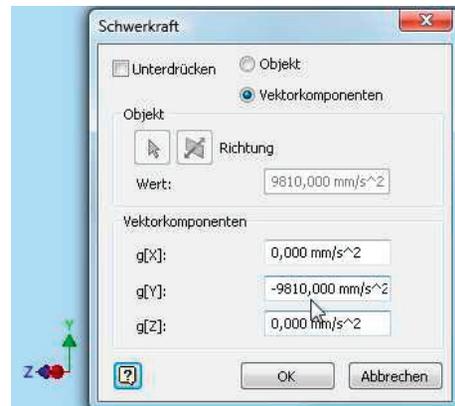
Als Fazit dieser Untersuchung können wir guten Gewissens feststellen, dass die angezeigte Redundanz keine schädlichen Auswirkungen auf die Simulation haben wird. Der Umstand des nicht kippenden Kolbens muss als Näherung im Simulationsprozess hingenommen werden, da das CAD-System keine andere Möglichkeit 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/S<sup>2</sup>**.



### 23.3.3 Gelenke überprüfen und bearbeiten

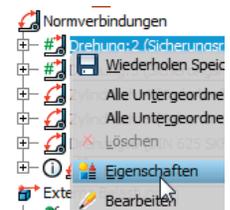
Die automatisch erzeugten Gelenke müssen auf ihre Funktionalität (Freiheitsgrade) hin überprüft und Reibungswerte sowie Antriebs- und Belastungskräfte müssen eingetragen werden.

#### 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.

 Drehung:2 (Sicherungsring472\_D12:1, Kolben3:1)  
 Drehung:3 (Sicherungsring472\_D12:2, Kolben3:1)



**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.

 Normverbindungen  
 Drehung:2 (Sicherungsring472\_D12:1, Kolben3:1)  
 Drehung:3 (Sicherungsring472\_D12:2, Kolben3:1)  
 Zylindrisch:4 (Kurbelwelle:1, Geschweißte Gruppe:2)  
 Zylindrisch:5 (Kolben3:1, Zylinder:1)  
 Drehung:6 (DIN 625 SKF - beidseitig abgedichtet SKF t



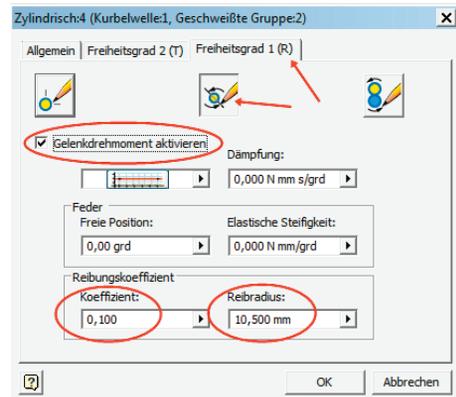


Das Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** dieses Gelenks zeigt folgerichtig auch zwei Freiheitsgrade an, nämlich die Translation (**FREIHEITSGRAD 2 (T)**) und die Rotation (**FREIHEITSGRAD 1 (R)**). Da sich in der Konstruktion bzw. der Simulation das Pleuellager axial nicht verschieben wird, kann der Freiheitsgrad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



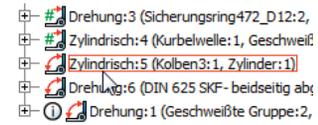
Das Rotationsgelenk ist dagegen direkt an der Simulation beteiligt und muss mit einem *Reibungskoeffizienten* ausgestattet werden.

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**.



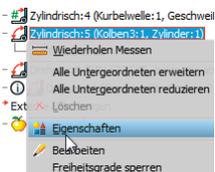
### 23.3.3.3 Der Kolben im Zylinder

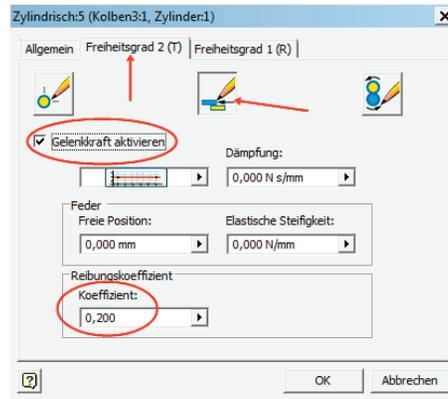
In der Reihenfolge des Objektbrowsers ist als nächstes Gelenk die zylindrische Führung des Kolben im Zylinders (**ZYLINDRISCH:5**) an der Reihe (siehe folgende Abbildung). Auch dieses Gelenk ist mit zwei Freiheitsgraden ausgestattet, der Translation (**FREIHEITSGRAD 2 (T)**), mit der sich der Kolben 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.



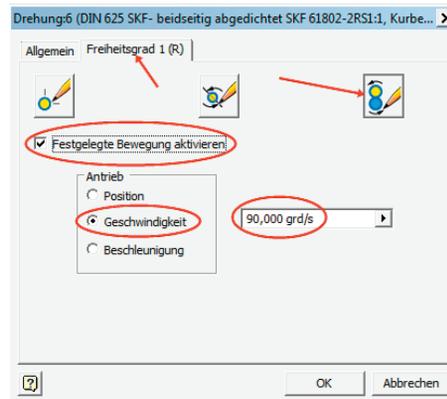


### 23.3.3.4 Kurbelwellenlagerung

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.

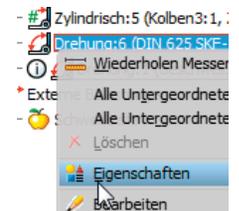
#### Der Antrieb

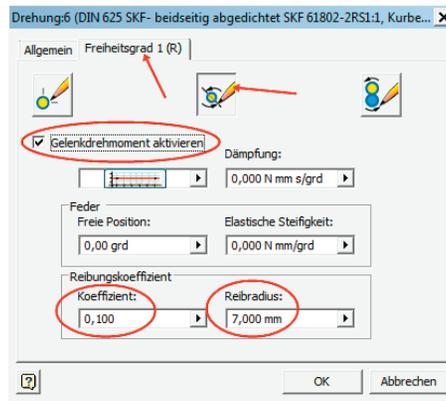
Im ersten Schritt versehen Sie im Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** über den rechten Button **FESTGELEGTE BEWEGUNG BEARBEITEN** das Auswahlfeld **FESTGELEGTE BEWEGUNG AKTIVIEREN** mit einem Haken. Nach der Selektion der Option **GESCHWINDIGKEIT** wird die Drehbewegung mit dem Wert **90 GRD/S** als konstante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



#### Die Reibung

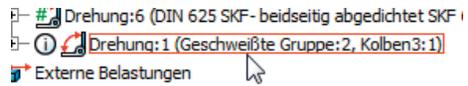
Die Definition der Reibung erfolgt prinzipiell wie bei den Gelenken vorher. Da es sich jetzt wieder um ein Drehgelenk handelt, ist der Radius der Reibkraft anzugeben (siehe folgende Abbildung). Der Lagerzapfen der Kurbelwelle hat einen Durchmesser von 14 mm, weswegen Sie hier den **RADIUS 7 MM** eingeben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



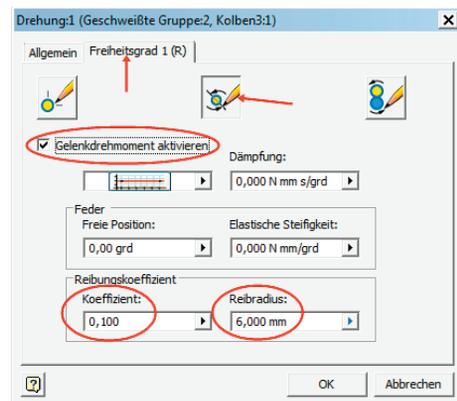


### 23.3.3.5 Pleuellager im Kolben

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.

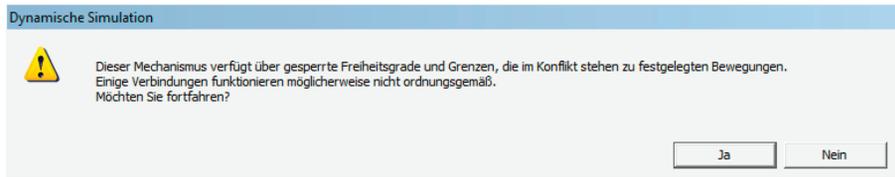


Im Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** dieses Gelenks selektieren Sie die Registerkarte **FREIHEITSGRAD 1 (R)** und auf dieser den mittleren Button **GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN**. Nun wählen Sie das Optionfeld **GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN** aus und tragen als **KOEFFIZIENT** der Reibung z.B. den Wert 0,1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

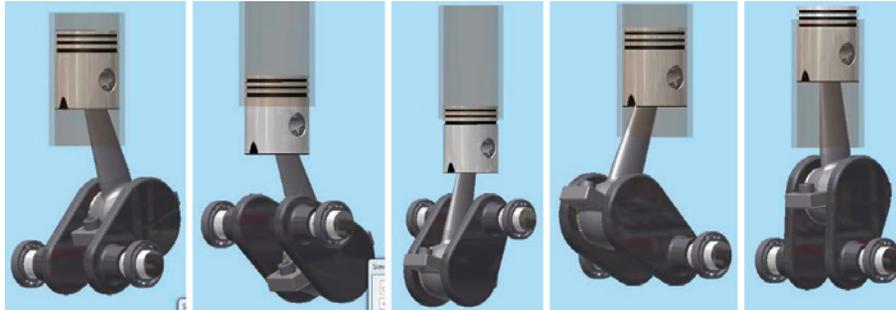


## 23.4 Die erste Simulation

Die erste Simulation kann jetzt stattfinden. Sie wird mit der definierten Antriebsdrehzahl von 90 grd/s über die Pleuellager durchgeführt. Die Simulationszeit wurde auf acht Sekunden eingestellt, damit zwei volle Umdrehungen des Pleuellagertrags 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.

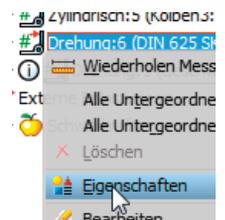


Animation auf der DVD

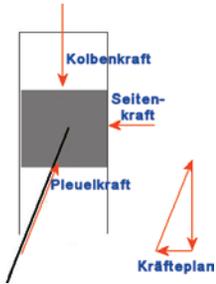
## ■ 23.5 Zweites Beispiel: Antrieb durch den Kolben

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



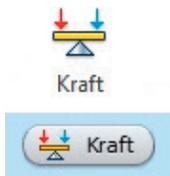
Die Kolbenkraft kann durch zwei unterschiedliche Maßnahmen simuliert werden. Entweder

- 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

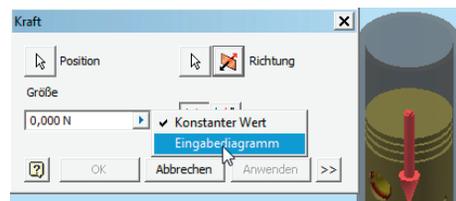
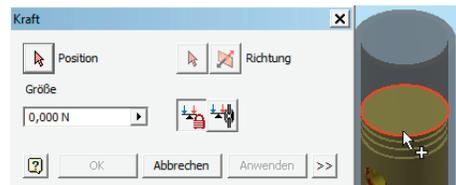


Die externe **KRAFT** rufen Sie über das Markierungsmenü oder die entsprechende Schaltfläche in der Befehlsgruppe **LADEN** auf.

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 Kraftrichtung 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.

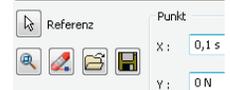
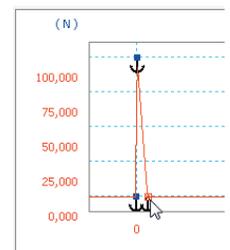
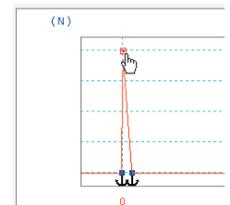
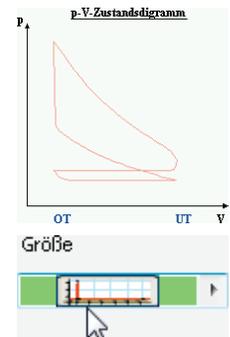
Im noch offenen Dialogfenster wird das Eingabediagramm über die entsprechend symbolisierte Schaltfläche aufgerufen. Das noch leere Diagrammfeld zeigt bereits den Anfangs- und Endpunkt über der definierten Simulationszeit von acht Sekunden an (siehe folgende Abbildung). Mittels je eines Doppelklicks können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

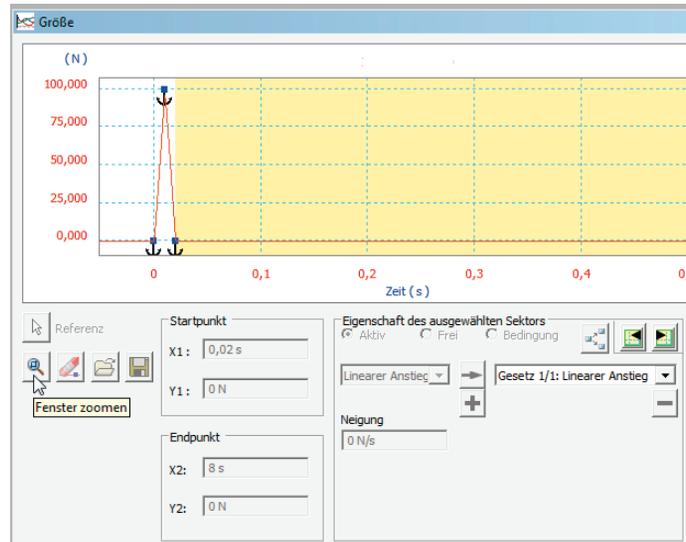


Es empfiehlt sich sehr, die eingetragenen Punkte sofort zu sperren, da sich sonst beim Verändern eines Punktes die anderen meist mit verstellen. Die Kontextmenüfunktion eines Punktes, **PUNKT SPERREN**, versieht den betreffenden Punkt im Diagramm mit einem Anker-Symbol, lässt aber weiterhin zu, die Zeit-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