

# 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, Einspannungen</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 Gelenkart	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>