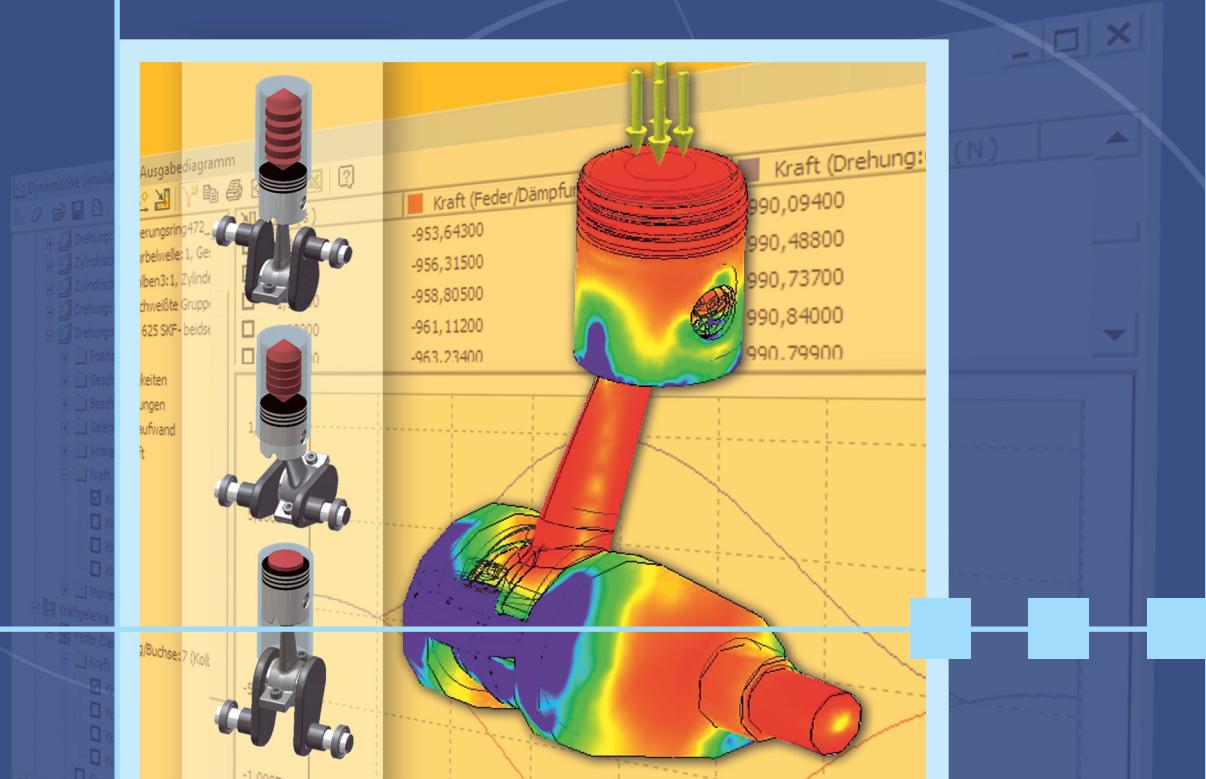


Simulationen mit Inventor

FEM und dynamische Simulation
Grundlagen und Beispiele ab Version 2013



Günter Scheuermann

Simulationen mit Inventor



BLEIBEN SIE AUF DEM LAUFENDEN!

HANSER Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

News für CAx-Anwender!



Der monatlich erscheinende Newsletter versorgt Sie mit News zu aktuellen Büchern aus den Bereichen CAD, CAM, CAE und PDM.

- Buchtipps – so entgeht Ihnen keine Neuerscheinung!
- Autorenportraits
- Blog-News – die wichtigsten Online-Portale und Social-Media-Gruppen der Branche
- Veranstaltungshinweise
- Fachartikel
- Umfragen

Gleich kostenlos anmelden unter:
www.hanser-fachbuch.de/newsletter



Günter Scheuermann

Simulationen mit Inventor

FEM und dynamische Simulation
Grundlagen und Beispiele ab Version 2013



HANSER

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz- Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Bibliografische Information der deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2012 Carl Hanser Verlag München

Gesamtlektorat: Julia Stepp

Sprachlektorat: Sandra Gottmann, Münster-Nienberge

Herstellung: Andrea Stolz

Umschlagkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Umschlagrealisation: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

ISBN 978-3-446-43333-5

E-Book-ISBN 978-3-446-43404-2

www.hanser-fachbuch.de

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Autodesk Inventor	1
1.2	Die Grenzen der Simulation	3
1.3	Was fehlt	3
1.4	Inventor-Schnittstellen	4
1.4.1	Importformate	4
1.4.2	Exportformate	4
1.5	Inventor für Schüler und Studenten	5
1.5.1	Inventor kostenlos?	6
1.6	Systemvoraussetzungen	6
1.6.1	Hinweise zur Installation	6
1.6.2	Hardware	6
1.6.3	Betriebssysteme	7
1.6.4	Sonstige Anforderungen	7
1.7	Voraussetzungen für Anwender	7
1.8	Übungsdateien und Videos auf DVD	7
1.9	Resümee	8
2	Digital Prototyping und Produktdesign	9
2.1	Virtuelle 3D-Modelle	9
2.2	Herstellung von Prototypen, Rapid Prototyping	10
2.3	Produktoptimierung	11
2.3.1	Flächen- bzw. Formoptimierung	11
2.3.2	Berechnungen	12
2.3.3	Dynamische Simulation	12
3	Bauteilanalysen	13
3.1	Zebra-Analyse	15
3.2	Entwurf, Verjüngungsanalyse	16

3.3	Fläche, Gauß-Analyse, Gauß'sche Flächenkrümmung	17
3.4	Schnitt, Querschnittsanalyse	19
3.5	Krümmungsanalyse, Krümmungskammanalyse	20

4 Technische Mechanik, Festigkeitslehre und Inventor 23

4.1	Statik	23
4.2	Freiheitsgrade	25
4.3	Freiheitsgrade überprüfen	26
4.3.1	Anzeige der Freiheitsgrade	26
4.3.2	Freiheitsgrad-Analyse	27
4.4	Gelenke	28
4.4.1	Inventor-Gelenke	29
4.5	Reibung	30
4.6	Kinematik	31
4.7	Dynamik	32
4.7.1	Schwerkraft, Gravitation	33
4.7.2	Masse, Gewichtskraft, Trägheitsmomente	33
4.7.3	Gelenkkräfte und -momente	33
4.7.4	Simulation	34
4.7.5	Export nach FEM	35
4.7.6	Schwingungen, Eigenfrequenz, Resonanz, Modalanalyse	35
4.8	Festigkeitslehre und FEM-Ergebnisse	37
4.8.1	Festigkeitshypothesen	38
4.8.2	Spannungen	39
4.8.3	Verformungen	40
4.8.4	Sicherheitsfaktoren, Belastung / Dehnung	40
4.8.5	Kontaktdruck	41
4.8.6	Knicken und Beulen	41
4.9	Grenzen der Inventor-Mechanik	42

5 Die Materialbibliothek 45

5.1	Der neue Materialien-Browser	45
5.2	Der „alte“ Stil- und Normen-Editor	46
5.3	Mit Materialien und Darstellungen arbeiten	46
5.3.1	Übersicht	46
5.4	Der Eco Materials Adviser	51
5.5	Eine eigene Bibliothek mit neuen Materialien erstellen	52
5.5.1	Eigene Bibliothek und eigene Kategorien erstellen	53
5.5.2	Ein neues Material definieren	54
5.6	Migration von Stilen älterer Versionen	56

5.7	Problematische Materialien in der FEM	58
5.7.1	Beispiel: Silentblock	58
5.7.2	Material ohne Kennwerte	59
5.8	Nicht in der FE-Analyse verwendbare Werkstoffe	62
5.8.1	Polymere Werkstoffe	62
5.8.2	Verbundwerkstoffe	62
5.9	Bauteile mit großen Verformungen	64
6	FEM	65
6.1	FEM, allgemein	65
6.2	Konvergenz	66
6.2.1	Maximale Anzahl der H-Verfeinerungen	67
6.2.2	Stopp-Bedingung	68
6.2.3	Schwellenwert für H-Verfeinerungen	68
6.2.4	Konvergenz-Plots	68
6.2.5	Beispiel: Konvergenzeinstellungen und Auswirkung	69
6.3	Das FEM-Netz	72
6.3.1	Netzeinstellungen	73
6.3.2	Lokale Netzsteuerung	75
6.3.3	Allgemeine Richtlinien für die Netzerstellung	76
6.3.4	Netzgenerierungen und Simulationen mit dünnen Bauteilen	78
6.4	Abhängigkeiten, Einspannungen	78
6.5	Lasten und Lastangriffsfälle	79
6.5.1	Lastarten	79
6.5.2	Lastangriffsfälle	80
6.6	Beispiel einer einfachen vollständigen FE-Analyse	88
6.6.1	Das Bauteil und seine Eigenschaften	88
6.6.2	Funktion des Bauteils	90
6.6.3	Die erste Simulation erstellen	90
6.6.4	Das Bauteil einspannen	91
6.6.5	Trennen von Bauteilflächen	91
6.6.6	Das Bauteil belasten	92
6.6.7	Das Bauteilnetz	93
6.6.8	Simulation ausführen	94
6.6.9	Anpassung der Gestalt (Gestaltfestigkeit)	97
6.6.10	Materialanpassung	98
6.6.11	Hauptspannungen	99
6.6.12	Verformung, Verschiebung	100
6.6.13	Rückstoßkräfte, Lagerkräfte	102
6.6.14	Ergebnisprotokoll	102
6.6.15	Bericht	103

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	118
8.4	Parametrische Ergebnisse	119
8.5	Das Modell anpassen	121
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	138
11.3	Frequenzermittlung iterativ	139
11.4	Frequenzermittlung mit parametrischer Tabelle	140
12	FEM an Schweißbaugruppen	145
12.1	Erstes Beispiel	145
12.1.1	Die Baugruppe	145
12.1.2	Die Schweißverbindung	146
12.1.3	Die Vorbereitung der Belastungssimulation	147
12.1.4	Kontakte überprüfen	148
12.1.5	Die Simulation	150

12.2 Zweites Beispiel.....	151
12.2.1 Die Schweißkonstruktion	151
12.2.2 Simulation vorbereiten.....	152
12.2.3 Kontakte kontrollieren	153
12.2.4 Die Simulation.....	154
12.2.5 Sicherheitsfaktor	156
12.3 Punktschweißen.....	156
12.3.1 Die Punktschweißung im Beispiel.....	157
12.3.2 Die Simulation vorbereiten.....	157
12.3.3 Kontakte bearbeiten	158
12.3.4 Die Simulation.....	158
13 Einfache Bewegungssimulationen.....	161
13.1 Baugruppen von Hand bewegen	161
13.2 Automatische Bewegung in der Baugruppe	162
13.3 Bewegung in der Präsentation	164
13.3.1 Eine Präsentation erstellen	164
13.3.2 Die automatische Explosionsmethode	165
13.3.3 Die manuelle Explosion.....	166
13.4 Die Präsentationsanimation von Schrauben.....	167
13.4.1 Eine neue Präsentation erstellen.....	168
13.4.2 Komponentenpositionen	168
13.4.3 Die Schraubenbewegung animieren – der Film geht ab.....	170
13.5 Bewegung im Inventor Studio	172
13.5.1 Die Inventor Studio-Arbeitsumgebung	173
13.6 Beispiel einer Studio-Animation	177
13.6.1 Vorbereitung der Animation	177
13.6.2 Abhängigkeit animieren	178
13.6.3 Die Ablaufsteuerung	180
13.6.4 Animation aufzeichnen	181
14 Bauteil- bzw. Baugruppenvereinfachung.....	183
14.1 Beispiel: Kurbeltrieb.....	183
14.2 Detailgenauigkeit erstellen	184
14.3 Bauteile mit vereinfachtem Bauteil ersetzen	186
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	192
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	194
15.3	Bewegliche Gruppen einfärben	196
15.4	Beschreibung der Gelenkkarten	197
15.4.1	Normgelenk.....	198
15.4.2	Abhängigkeiten und Gelenke.....	198
15.4.3	Vordefinierte Gelenke	200
15.5	Gelenkeinfügungsarten	202
15.5.1	Gelenkeinfügung von Hand: die Funktion Gelenk einfügen	202
15.5.2	Gelenk aus Abhängigkeit erzeugen: die Funktion Abhängigkeiten ableiten.....	207
15.5.3	Automatische Gelenkdefinition	208
15.6	Eigenschaften der Normverbindung bearbeiten	210
15.6.1	Registerkarte Allgemein	210
15.6.2	Registerkarte Freiheitsgrad x (R/T)	212
15.7	Gelenkkräfte, Steifigkeit und Dämpfung	213
15.7.1	Nichts ist starr – alles ist Gummi!	213
15.7.2	Steifigkeit und Dämpfung – der Sprungbretteffekt	213
15.7.3	Inventor ist ein Starrkörpersystem	214
15.7.4	Inventor ist elastisch?	214
15.7.5	Steifigkeit	215
15.7.6	Dämpfung	216
15.8	Gelenkeigenschaften.....	216
15.8.1	Anfangsbedingungen bearbeiten	217
15.8.2	Gelenkdrehmoment bzw. Gelenkkraft bearbeiten	218
15.8.3	Festgelegte Bewegung bearbeiten.....	219
15.9	Das Eingabediagramm.....	219
15.9.1	Die Diagrammfläche	220
15.9.2	Sektor-Optionen	220
15.9.3	Start- und Endpunkt	221
15.9.4	Funktionsdefinitionen speichern und laden	222
15.9.5	Referenzachsen bestimmen	222
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	234
17.5	Nullpunktverschiebung	236
17.6	Darstellungs- und Wertegenauigkeit	237
17.7	Diagramm und Werte nach Excel exportieren	237

18 Fliehkraftregler 239

18.1	Die Baugruppenabhängigkeiten	240
18.2	Baugruppe bewegen	243
18.3	Die dynamische Simulation	244
18.3.1	Überbestimmungen	244
18.3.2	Der Objektbrowser	245
18.4	Der Antrieb	245
18.4.1	Antriebsmoment	246
18.4.2	Dämpfung	247
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	252
18.8.2	Schwingungen untersuchen	253
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	261
18.12.4	Überbestimmte Bauteile heilen	262
18.12.5	In die Belastungsanalyse wechseln	263
18.12.6	Die Belastungsanalysen	264
18.12.7	Fazit	266

19	Spielerei mit einem Ball	269
19.1	Die Bauteile und die Konstruktion	269
19.2	Die Simulationsumgebung	271
19.2.1	Feder einfügen	271
19.2.2	Schwerkraft definieren	272
19.2.3	Der Ball benötigt Gelenke	272
19.2.4	Der Objektbrowser	274
19.3	Die Simulation	275
19.3.1	Starres Abprallen	276
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	285
20.9	Schwerkraft und Reibung	285
20.9.1	Schwerkraft	285
20.9.2	Reibungswerte und Kraftübertragung	286
20.9.3	Beidseitige Kraftübertragung an der Schwinge	286
20.9.4	Gelenkreibungen der Drehgelenke	287
20.9.5	Startposition	288
20.10	Die dritte Simulation und das Ausgabediagramm	289
20.10.1	Das Ausgabediagramm	289
20.11	Externe Kraft einfügen	291
20.12	Die vierte Simulation und das Ausgabediagramm	292
20.13	Spur aufzeichnen	294
21	Schiebevorrichtung	297
21.1	Die Bauteile	297
21.2	Die Funktion	298
21.3	Gelenke einfügen	299
21.3.1	Zylindrisches Schiebegelenk	299

21.3.2	Punkt-Ebene-Gelenk	300
21.3.3	Druckfeder	301
21.4	Die erste Simulation.....	303
21.5	Status des Mechanismus	303
21.6	Redundante Abhängigkeiten.....	305
21.6.1	Redundanz hinzufügen	305
21.6.2	Redundanz untersuchen	306
21.7	Gelenkdrehmoment aktivieren	307
21.8	Die zweite Simulation	308
21.9	Externe Belastung.....	310
21.9.1	Externe Kraft definieren	310
21.9.2	Antriebsmoment anpassen	311
21.9.3	Die dritte Simulation	311
21.9.4	Das Ausgabediagramm	312
21.10	Export nach FEM	313
21.11	Die FE-Analyse der Schwinge	313

22 Kurbelschwinge, die Dritte 317

22.1	Die Bauteile	317
22.2	Die Baugruppe	318
22.3	Die Simulationsumgebung	318
22.4	Gelenke einfügen	319
22.4.1	Räumliches Gelenk	319
22.4.2	3D-Kontakte	320
22.5	Reibung definieren.....	321
22.6	Die Simulation	322

23 Hubkolben-Triebwerk 323

23.1	Die Baugruppe	323
23.2	Die Simulationsumgebung	324
23.3	Untersuchung der Redundanz	325
23.3.1	Status des Mechanismus	326
23.3.2	Schwerkraft definieren.....	327
23.3.3	Gelenke überprüfen und bearbeiten	327
23.4	Die erste Simulation.....	332
23.5	Zweites Beispiel: Antrieb durch den Kolben.....	333
23.5.1	Externe Kraft wirken lassen.....	333
23.5.2	Externe Kraft definieren	334
23.5.3	Kraft im Eingabediagramm definieren	335
23.6	Die zweite Simulation	337
23.6.1	Das Ausgabediagramm	337

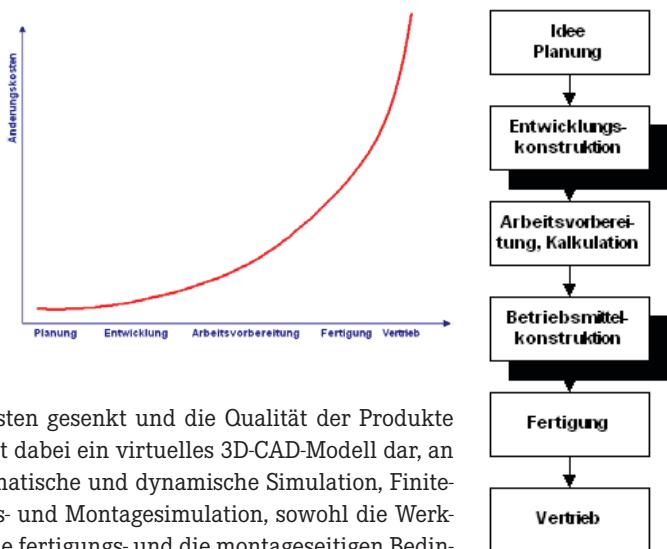
23.7 Beispiel: Verbrennungsmotor	338
23.7.1 Lastmoment hinzufügen.....	338
23.7.2 Zyklischen Antrieb hinzufügen.....	339
23.7.3 Die Simulation	341
23.8 Variante mit Feder	342
23.8.1 Festgelegte Bewegung aktivieren	342
23.8.2 Feder einfügen	342
23.8.3 Die Simulation	343
23.8.4 Das Ausgabediagramm	344
23.9 Export nach FEM	345
23.9.1 Die FE-Analyse der Kurbelwelle.....	346
23.9.2 Die FE-Analyse des Kolbens.....	347
Index	349

1

Einführung

Jeder Konstrukteur kennt die nebenstehende Grafik und den daraus ablesbaren Zusammenhang, dass Änderungskosten im Entwicklungsprozess eines Produktes immer höher zu Buche schlagen, je weiter die Produktentwicklung, von der Planung bis zum Vertrieb, fortgeschritten ist. Der triviale Umkehrschluss lautet also, dass die Produktoptimierung so früh wie möglich stattfinden muss.

Seit einigen Jahren heißt das Stichwort hierfür *Digital Prototyping*. Die Entwicklungszeiten sollen dadurch verkürzt, die Kosten gesenkt und die Qualität der Produkte verbessert werden. Die Grundlage dafür stellt dabei ein virtuelles 3D-CAD-Modell dar, an dem mit rechnerischen Methoden, wie kinematische und dynamische Simulation, Finite-Elemente-Methode, Visualisierung, Funktions- und Montagesimulation, sowohl die Werkstoff- und Festigkeitseigenschaften als auch die fertigungs- und die montageseitigen Bedingungen optimiert werden können.



■ 1.1 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor wird in drei Ausstattungsvarianten (Inventor LT, Inventor und Inventor Professional) ausgeliefert, die sich in den Grundlagen der 3D-Konstruktion nicht unterscheiden. Die *Professional Version* (AIP) beinhaltet alle Module.

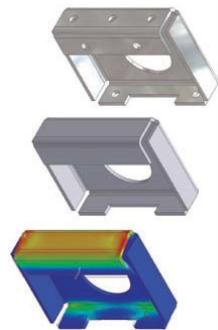
Autodesk bietet als komplette Branchenlösungen verschiedene Programm-Pakete (Suites) an, in deren Ultimate-Versionen i.d.R. die Professional Version enthalten ist.



Die Programmversion *Autodesk Inventor Professional* umfasst neben allen Funktionen der 3D-Konstruktion die verschiedenen Module für die Aufgaben der Simulations- und Festigkeitsanalysen.

Dieses Funktionspaket umfasst:

- die Belastungsanalyse für die Bauteil-, Baugruppen-, Gestell(Rahmen)- und Blechumgebungen
- die Analyse von Spannungen, Belastungen und Deformationen für statische und dynamische Lasten
- die Modalanalyse für die Ermittlung von Eigenfrequenzen und des Schwingungsverhaltens mechanischer Konstruktionen
- die Konvertierung aller Baugruppen-3D-Abhängigkeiten (Constraints) in Standardgelenke
- eine große Bibliothek mit Bewegungsgelenken
- die Möglichkeit, externe Kräfte und Momente zu definieren
- die Möglichkeit, Bewegungssimulationen anhand der Position, der Geschwindigkeit, der Beschleunigung und des Drehmoments als Funktion der Zeit erstellen
- die Möglichkeit, 3D-Bewegungen mithilfe von Spuren visuell darzustellen
- den Export vollständiger Ausgabedaten in Microsoft® Excel®
- die Möglichkeit, dynamische und statische Gelenke und Trägheitskräfte in die Autodesk Inventor-Simulation-Belastungsanalyse oder ANSYS Workbench zu übertragen
- die Möglichkeit, die Kraft zu berechnen, die erforderlich ist, um eine dynamische Simulation in einen Zustand des statischen Gleichgewichts zu versetzen
- die Möglichkeit, die Eigenschaften der Reibung, Dämpfung, Steifigkeit und Elastizität beim Definieren von Gelenken als Funktion der Zeit zu verwenden
- die Möglichkeit, die dynamische Bauteilbewegung interaktiv anzuwenden, um dynamische Kräfte auf die Gelenke zu simulieren
- ein umfangreiches Reportsystem, mit dem 3D-Volumenplots darzustellen sind, Berichte für alle Ergebnisse und parametrische Studien erstellt werden können
- und abschließend den Zugriff auf Inventor Studio, um beispielsweise ein realistisches oder veranschaulichendes Video der Simulation auszugeben oder fotorealistische Bilder oder Grafiken zu produzieren.



All diese Punkte, mit Ausnahme des Exports nach ANSYS, werden Gegenstand der Beispiele und Übungen in diesem Buch sein. Darüber hinaus werden sowohl die theoretischen Grundlagen für das Verständnis der Vorgänge als auch angrenzende Gebiete wie z.B. die Oberflächenanalyse ausreichend behandelt.

■ 1.2 Die Grenzen der Simulation

Die vielfältigen Möglichkeiten und vor allem die vermeintlich eindeutigen Ergebnisse der verschiedenen Simulations- und Berechnungsraten verführen dazu, die Resultate als absolute und richtige Folgen der Beanspruchungen zu interpretieren.

Man sollte jedoch bei aller Begeisterung über die Einfachheit, mit der man zu diesen Ergebnissen kommt, nicht vergessen, dass es sich um Näherungsverfahren handelt, die immer mehr oder weniger fehlerbehaftet sind.

Die aktuelle Aussage eines Simulationsfachmanns, dass sich „durch den rechtzeitigen Einsatz der modernen Simulationstechnik die Restfehlerquote einer Bauteile-Konstruktion inzwischen auf unter zehn Prozent senken lässt“, beschreibt treffend sowohl die revolutionären Möglichkeiten im Entwicklungsbereich, aber auch die Grenzen dieser Möglichkeiten. Zehn Prozent können den Konstruktionsprozess erheblich beeinflussen.

In vielen diesbezüglichen Kapiteln werden deshalb auch die Grenzen in Bezug auf die Genauigkeit und die möglichen Fehlerquellen genannt.

■ 1.3 Was fehlt

Die Inventor-Simulation ist eine rein mechanische Simulation, die Bewegungs- und Belastungsvorgänge untersucht.

In der Praxis sind diese Vorgänge jedoch häufig mit thermischen und strömungstechnischen Problemen befrachtet. Das Beispiel einer Turbolader oder einer Gasturbine zeigt die drei wesentlichen Problembereiche, die mit verschiedenen Simulationsarten untersucht werden müssen.

- Neben der Stress- und Kinematik-Analyse, die der Inventor recht gut beherrscht, sind
- die Strömungsmechanik und
- die thermische Simulation (CFD → Computational Fluid Dynamics)

ganz wichtige Bereiche, die in der Konstruktion häufig die mechanische Problematik überlagern.

Simulationspakete, die alle zurzeit möglichen Techniken beherrschen, sind jedoch nicht mehr an CAD-Systeme gekoppelt, sondern sind eigene sehr leistungsfähige und umfangreiche Programme.

■ 1.4 Inventor-Schnittstellen

Neben den AutoCAD- oder Mechanical-Desktop-Dateien können auch Zeichnungen und Modelle aus anderen CAD-Systemen importiert und im Inventor weiter bearbeitet werden. Je nach Importquelle werden Bauteile jedoch mitunter lediglich als Basisteile ohne den inneren Aufbau importiert.

1.4.1 Importformate

Als Importformate werden unterstützt:

- ACIS- bzw. SAT-Zeichnungen/-Modelle (*.sat-Dateien)
- STEP-Zeichnungen/-Modelle (*.ste-, *.stp- oder *.step-Dateien)
- IGES-Zeichnungen/-Modelle (*.igs-, *.ige-, *.iges-Dateien)
- DXF-Zeichnungen/-Modelle (*.dxf-Dateien)
- 3D-Daten vom Autodesk® Alias-Studio
- 3D-Punktkoordinaten von Excel
- Parasolid, CATIA V4 und V5, Pro/Engineer Granite/Neutral, SolidWorks
- UGS NS Files (*.prt), SAT, STEP, STL

1.4.2 Exportformate

a) Export in andere 3D-CAD Systeme:

Zum Speichern/Exportieren von Inventor-Zeichnungen/Modellen steht ebenfalls eine Reihe von Formaten zur Verfügung.

- Parasolid, CATIA V5, Pro/Engineer Granite/Neutral und SolidWorks

b) Export von Bauteilen und Baugruppen:

Inventor-Bauteile können in verschiedenen Formaten gespeichert werden, und zwar als:

Typ	Art	Anwendung
*.DWF	Vektor	3D, Internet, Browser, Viewer
*.BMP	Pixel	2D, Bilder
*.GIF	Pixel	2D, Bilder, Internet, Browser
*.IGES	Vektor	3D-Austauschformat, 3D-CAD-Programme, Flächen und Volumen
*.JPEG	Pixel	2D, Bilder, Internet, Browser
*.JT	Vektor und zusätzliche Daten	3D-Austauschformat, 3D-CAD-Programme, 3D-Produktdaten, Internet, Browser, Office-Programme, PLM-Systeme

Typ	Art	Anwendung
*.PNG	Pixel	2D, Bilder, Internet, Browser
*.SAT	Vektor, ACIS-Kernel	3D-Austauschformat
*.STEP	Vektor, ISO 10303	3D-Austauschformat, CNC
*.STL	Vektor	3D-Austauschformat, Stereolithografie
*.TIFF	Pixel	2D, Bilder, Office-Programme
*.XGL	Vektor	OpenGL
*.ZGL	Vektor	OpenGL

c) Export von Zeichnungen:

Inventor-Zeichnungen können ebenfalls in verschiedenen Formaten exportiert werden. Zeichnungsdaten sind dabei immer 2D-Daten.

Typ	Art	Anwendung
*.DWF	Vektor	Internet, Browser, Viewer
*.DWG	Vektor	AutoCAD
*.DXF	Vektor	Austauschformat, Autodesk®
*.BMP	Pixel	2D, Bilder
*.GIF	Pixel	2D, Bilder
*.JPEG	Pixel	2D, Bilder
*.PNG	Pixel	2D, Bilder
*.TIFF	Pixel	2D, Bilder

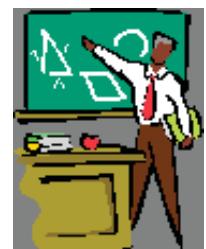
d) Export von Render-Dateien:

Sogenannte Render-Dateien werden im Inventor mithilfe des Inventor Studios erstellt und erzeugen fotorealistische Abbildungen von Bauteilen oder Baugruppen, die hervorragend z.B. für Publikationen, Dokumentationen etc. verwendet werden können. Inventor Studio kann diese gerenderten Darstellungen in die Dateiformate BMP, JPEG und PNG exportieren.



■ 1.5 Inventor für Schüler und Studenten

Für Lehrer, Schüler und Studenten bietet Autodesk die Version Inventor Professional (AIP) sehr günstig an. Für etwas über 100 Euro kann diese beim Inventor-Fachhändler bestellt und bezogen werden. Diese Version ist eine Vollversion, mit der uneingeschränkt gearbeitet werden kann, die jedoch nicht für gewerbliche Zwecke verwendet werden darf. Ähnlich günstig sind für Schulen Klassenraumlizenzen für zehn oder 20 Arbeitsplätze zu bekommen.



1.5.1 Inventor kostenlos?

Die günstigste, weil kostenlose Möglichkeit, als Schüler/Student mit dem Inventor arbeiten und lernen zu können, gibt's unter der Internetadresse:

<http://students.Autodesk.com>

Ist dort das unterrichtende Institut als Schule/Hochschule eingetragen, so können dessen Schüler/Studenten kostenlos eine Inventor-Version beziehen und registrieren lassen. Diese Registrierung hat laut Mitteilung auf dieser Seite eine Gültigkeitsdauer von 24 Monaten.

■ 1.6 Systemvoraussetzungen

1.6.1 Hinweise zur Installation



Die Installation für die Übungen dieses Buches wurde mit der Option **vollständige Installation** durchgeführt.

Sollten Sie Inventor mit anderen Optionen als den hier genannten installiert haben, so kann es bei verschiedenen Beispielen im Buch möglich sein, dass Sie diese auf Ihrem System nicht in jedem Detail eins zu eins nachvollziehen können. Auf die zentralen Aspekte, die mit den Beispielen vermittelt werden sollen, hat dies jedoch keinen Einfluss.

1.6.2 Hardware

Für die Konstruktion von Bauteilen und Zusammenbauten mit weniger als 1.000 Teilen:

- Prozessor 32 oder 64 Bit, 2 GHz oder mehr
- 2 GB RAM (Minimum, für Analysen und Baugruppensimulationen 4 bis 8 GB)
- Je nach Installationsumfang und Betriebssystem zwischen 3,5 und 5,5 GB freier Festplattenspeicher für die Programmdateien
- Für temporäre Dateien 13 bis 15 GB freier Festplattenspeicher
- Direct3D (9 oder 10) Grafikkarte mit mindestens 128 MB, Bildschirmauflösung 1.280 x 1.024 oder höher
- Inventor 2013 beinhaltet einige erweiterte Visualisierungsarten, die je nach Leistung der Grafikkarte mehr oder weniger vollständig ausgeführt werden können

1.6.3 Betriebssysteme

- Windows XP 32 Bit SP3 bzw. Windows XP 64 Bit SP2
- Windows Vista 32/64 Bit SP2
- Windows 7 32/64 Bit (unterstützte Systemversionen: Home Premium, Business, Ultimate, Enterprise)



1.6.4 Sonstige Anforderungen

- DVD-ROM-Laufwerk; Autodesk Inventor ist nur auf DVD erhältlich.
- Internet-Anschluss für Downloads und direkter Zugriff auf Serviceleistungen
- Microsoft Excel 2003 oder höher für Konstruktionen mit iParts, iFeatures, iAssemblies, Gewinde und tabellengesteuerte Konstruktion
- Adobe Flash Player 10 oder höher und Adobe Reader
- Microsoft .Net Framework 4.0 oder höher

■ 1.7 Voraussetzungen für Anwender

Das Buch baut auf den beiden Inventor-Grundlagenwerken (ISBN 978-3-446-42716-7 und ISBN 978-3-446-42364-0) aus der Workbook- und CADtogo-Reihe des Carl Hanser Verlags auf und setzt die dort beschriebenen Grundkenntnisse in den Bereichen Skizzenerstellung, Bauteilmodellierung und Baugruppenerzeugung weitgehend voraus.

■ 1.8 Übungsdateien und Videos auf DVD

Dem Buch liegt eine DVD bei. Alle Beispiele, Übungs- und Aufgabendateien, anhand derer im Buch FEM-Analysen und Simulationen beschrieben sind, befinden sich auf der DVD.

Durch die verschiedenen Simulationen im FE-Bereich und in der dynamischen Simulation werden die Simulationsdaten zusammen mit den Baugruppen gespeichert. Die auf der DVD vorhandenen geben daher nicht immer den Anfangszustand der ‚nackten‘ Baugruppe wieder. Gegebenenfalls müssen die Simulationsdaten entsprechend der Anleitungen geändert werden, damit der jeweils im Buch beschriebene Zustand erreicht werden kann.

Zu vielen Arbeitsschritten und Ergebnissen befinden sich außerdem Videosequenzen auf der DVD, welche das Beschriebene leichter verständlich machen sollen.

■ 1.9 Resümee

Inventor ist eines der leistungsfähigsten 3D-CAD-Systeme, und gerade die Analyse- und Simulationsfunktionen stellen hohe Anforderungen an die Anwender. Das sollte Sie aber nicht verunsichern, sondern eher dazu motivieren, diesen Programmteil zu Ihrem Nutzen einsetzen zu können.

Es ist nicht schwer! Zu Beginn ist vor allem die Vielfalt der gebotenen Möglichkeiten erschreckend groß; aber es ist hier wie so häufig der Fall, dass ca. 80 % der zu lösenden Aufgaben mit maximal 20 % der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten gelöst werden können.

Dies zu erkennen und damit rationell arbeiten zu können, dabei soll Ihnen dieses Buch die richtige Unterstützung bieten und eine Hilfe sein.

Ich wünsche Ihnen dabei viel Freude!

Günter Scheuermann



2

Digital Prototyping und Produktdesign

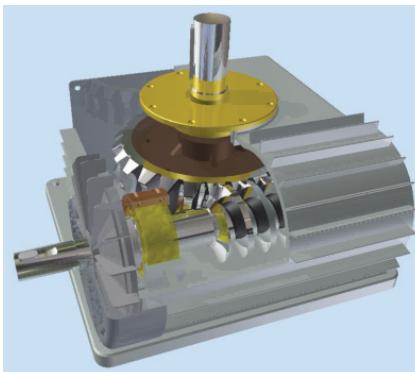
Bevor die eigentliche Arbeit mit dem Inventor beginnt, soll das Umfeld, in dem sich diese Anwendung befindet, und der Sinn und Zweck von Analysen und Simulationen etwas genauer betrachtet werden.

■ 2.1 Virtuelle 3D-Modelle

Digitale Prototypen sind zwar virtuelle 3D-Modelle von Bauteilen und Baugruppen, wären aber damit nur unzureichend beschrieben. Das 3D-Modell repräsentiert die Form, die Abmessungen und unter Umständen auch die Funktion eines Produktes. Digital Prototyping geht jedoch weiter, ist umfassender.

Voraussetzung für diese strukturierte Art der Produktentwicklung mit Digital Prototyping ist die Durchgängigkeit der Daten durch alle Phasen der Produktentstehung, von der Konzeptphase über die Konstruktion bis zur Fertigung, Montage und zum Vertrieb. Der Einsatz von Programmen zum Produktdatenmanagement (PDM) ist dabei unverzichtbar.

Als Beispiel mag hier angeführt werden, dass sich der Entwickler schon in der Entwurfsphase auch mit den Fragen der Umweltverträglichkeit, der Verpackung und möglichen Transportproblemen beschäftigen muss, damit späte Produktänderungen vermieden werden.



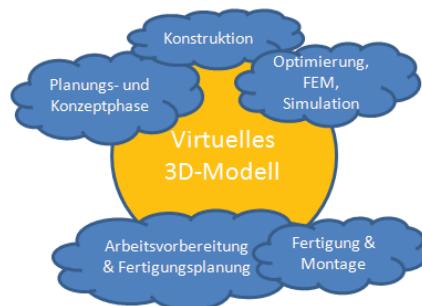
Schneckengetriebe, Autodesk Inventor



Das virtuelle 3D-Modell steht bei diesem Verfahren im Mittelpunkt. An ihm wird das Design bestimmt, es werden die werkstofflichen Eigenschaften und die Modellgeometrie mithilfe von Finite-Elemente-Methoden und kinematischen Simulationen optimiert.

In das Modell fließen Feedbacks der beteiligten Fertigungs-, Montage- und Vertriebsfachleute ein.

Das Modell wächst und gedeiht weitgehend ohne Material- oder Fertigungsaufwand. Änderungen und Optimierungen fließen direkt in die Konstruktion ein, und die entstehenden Daten stehen den folgenden Produktionsstufen sofort zur Verfügung.



■ 2.2 Herstellung von Prototypen, Rapid Prototyping



Bei aller Virtualität – wenn schon ein Bild mehr als tausend Worte sagt, so trifft dies erst recht auf ein greifbares Modell zu!

Weil das so ist und weil das Anfassen und Betrachten eines realen 3D-Körpers doch wesentlich mehr Sinne anspricht als das Computerbild, werden seit Jahren immer leistungsfähigere und preiswertere **3D-Drucker** hergestellt.

Die Verfahren sind ähnlich und unterscheiden sich vor allem durch die verwendeten Materialien. Es werden direkt aus dem CAD-Programm die Transferdateien erstellt, die in den **Fabbern** (Personal Fabricator, kurz Fabber) in Schichtenmodelle umgesetzt und Schicht für Schicht aus dem entsprechenden Material, zusammen mit Binder, Wärme oder Härter, übereinander aufgetragen werden. Die Genauigkeit der Bauteile wird von einigen Herstellern im Bereich von **0,1 mm** angegeben.



3D-Drucker der Fa. ZCorp, der weiße Gipsmodelle herstellt



Zu den Verfahren des Rapid Prototypings zählt man unter anderem
(Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Rapid_Prototyping):

Verfahren	Werkstoffe
Stereolithografie (STL oder SLA)	Flüssige Duromere oder Elastomere
selektives Lasersintern (SLS)	Thermoplaste: Polycarbonate, Polyamide, Polyvinylchlorid, Metalle und Keramik
Polyamidguss	Polyamide
Lasergenerieren	Metallpulver
Fused Deposition Modeling (FDM)	ABS, Polycarbonat
Laminated Object Modeling (LOM)	dünne Schichten aus Papier, Kunststoff, Keramik oder Aluminium
3D Printing	Kalkpulver mit Epoxid-Hülle
Contour Crafting (CC)	Beton
Multi Jet Modeling	Wachsartige Thermoplaste, UV-empfindliche Photopolymere
Space Puzzle Molding (SPM)-Verfahren	Kunststoffteile aus Originalmaterial in Serienqualität

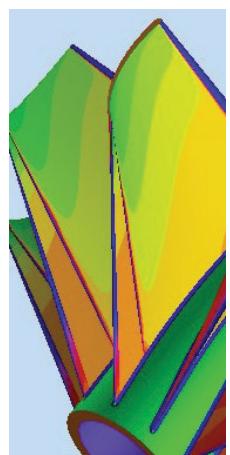
■ 2.3 Produktoptimierung

Unter Optimierung von Produkten soll in diesem Buch *nicht* die sicher notwendige und bestmögliche Formgebung in Bezug auf gefälliges Design oder Ergonomie beschrieben werden, sondern vor allem die **funktionelle Formgebung**, die Formgebung in Beziehung zur konstruktiven Festigkeit von Bauteilen und zum kinematischen und dynamischen Verhalten von Bauteilen und Baugruppen, der Bewegungssimulation.

2.3.1 Flächen- bzw. Formoptimierung

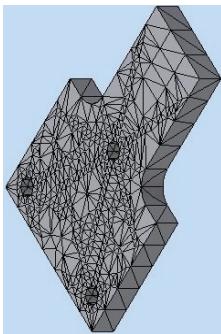
Zu diesen Arbeitsschritten, der funktionellen Formgebung, gehören die Flächen- und Querschnittuntersuchungen, mit denen die Qualität der Oberflächen und der Querschnittsverlauf untersucht werden können.

Krümmungen an Strömungsflächen oder Formschrägen für Gussteile, die Ebenheit oder die Übergänge an Flächenverbunden und Freiformflächen usw., all diese Probleme sollten gelöst sein, bevor eine aufwendige FE-Analyse mit der anschließenden festigkeitsmäßigen Optimierung und gegebenenfalls einer Bewegungssimulation das Formgebungsverfahren an Bauteilen und Baugruppen abschließt.



Der Inventor stellt für diese Tätigkeiten umfangreiche und leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung, mit denen nach verschiedenen mathematischen Verfahren die Probleme technischer Oberflächen leicht analysiert werden können. Die Umsetzung der Ergebnisse in problemfreie Zonen ist ein anderes Problem.

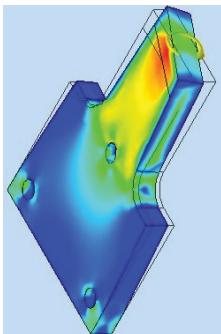
2.3.2 Berechnungen



Im Inventor sind auch alle Funktionen, die für optimierende Berechnungen nötig sind, integriert. Der **Dubbel** oder die **Hütte** kann im Regal bleiben. Die per Software erzielten Berechnungsergebnisse werden als kompletter Bericht mit allen Lastannahmen, Lagerbedingungen, Sicherheitsfaktoren und ermittelten Spannungen zusammen mit der Baugruppe gespeichert und dokumentiert, sie sind damit ein Teil des digitalen Prototyps.

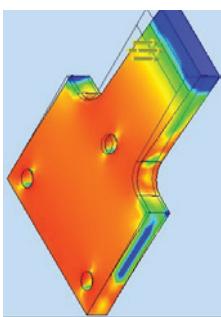
Die Berechnungen führen zu optimierten und sicheren Konstruktionen und helfen, überdimensionierte und damit kostspielige Konstruktionen zu vermeiden. Die FE-Analyse ist für diesen Bereich das unverzichtbare Werkzeug der Wahl.

2.3.3 Dynamische Simulation



Inventor beherrscht die Emulation dynamisch beanspruchter Maschinen um Geräte, einschließlich der Berechnung von externen und internen Kräften, Massenkräften, Lagerkräften oder Drehmomenten.

Die Simulation erspart den Entwicklern aufwendige Analysen an realen Systemen. Da die Ergebnisse sehr früh in der Entwicklung zur Verfügung stehen, lassen sich kostspielige Iterationen und Änderungen in späteren Phasen vermeiden.



Die Übernahme der 3D-Abhängigkeiten, mit denen Bauteilfunktionen in Baugruppen definiert sind, erfolgt weitgehend automatisch. Eine nochmalige Bestimmung von Gelenken oder Gleitflächen ist in vielen Fällen unnötig. Weitere Randbedingungen, wie Schwerkraft, Reibung, äußere Kräfte und Antriebe, können anschließend festgelegt werden.

Die Ergebnisse der Simulation (Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Kräfte und Momente) können in grafischer Form auf dem Bildschirm, einem Drucker oder in einer Excel-Datei ausgegeben werden. Die errechneten Kräfte können direkt an das FEM-Modul zur Festigkeitsanalyse weitergegeben oder in ein externes FEM-Programm (z.B. ANSYS-DesignSpace) exportiert werden.

3

Bauteilanalysen

Zu den Analysen gehören selbstverständlich auch die **Flächen- und Querschnittsanalysen**, mit denen die Qualität der Oberflächen und der Querschnittsverlauf untersucht werden können.



HINWEIS: In der Reihenfolge, in der Bauteile optimiert werden, sollten diese Analysearten noch vor der FE-Analyse und der Bewegungssimulation angewendet werden, weil Veränderungen an der Bauteilgeometrie natürlich auch immer Festigkeits- und Eigenschwingungsänderungen nach sich ziehen.

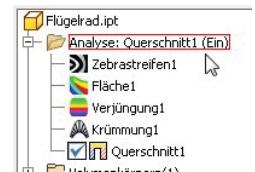
Diese Analysearten befinden auf der Registerkarte PRÜFEN und umfassen:

- Die **Zebrastreifanalyse** (Zebra-Analyse)
- die **Entwurfsanalyse** (Verjüngungsanalyse)
- die **Flächenanalyse** (Gauß-Analyse)
- die **Querschnittsanalyse** (Schnittanalyse)
- die **Krümmungsanalyse** (Krümmungskammanalyse)



Da der Schwerpunkt des Buches auf der FE-Analyse und der Bewegungssimulation liegt, wird dieser Abschnitt zwar nicht ganz so ausführlich behandelt, jedoch immer noch so intensiv, dass Sinn und Zweck sowie die praktische Anwendung der Möglichkeiten nachvollzogen werden können.

Sobald eine Analyse in der Bauteilumgebung angewendet wird, wird ein Ordner **Analyse** im Browser erstellt und die jeweilige Analyse in diesen eingefügt. Jede gespeicherte Analyse wird dem Browser in der Reihenfolge hinzugefügt, in der sie erstellt wurde. Der Name und die Sichtbarkeit der aktiven Analyse zusammen mit dem Namen des Analyseordners werden angezeigt.



Die Ansichtssteuerung

Das Kontextmenü des Analyseordners enthält die Schalterfunktion ANALYSESICHTBAR-KEIT, mit der die jeweiligen Darstellungen ein- und ausgeschaltet werden können.



HINWEIS: Nachdem die erste Analyse gespeichert wurde, kann im Kontextmenü des Objektbrowsers BEARBEITEN ausgewählt und die Einstellungen der Analyse können anschließend modifiziert werden.

Analysearten

Zunächst ein Überblick über die Möglichkeiten und Funktionen dieser Untersuchungsarten:



Zebrastreifen

- Zebrastreifen

Mit der Zebra-Analyse kann man die **Krümmungs- und Tangentenstetigkeit** überprüfen. Mit der Darstellungsrichtung und der erweiterten Präzision der Zebrastreifen eignet sie sich für die visuelle Bewertung kontinuierlich gekrümmter Übergangs- und Freiformflächen.



Entwurf

Diese unglücklich benannte Analyseart stellt die **Verjüngungen** an einem Bauteil quer zu einer anzugebenden Achse dar. Die Verjüngungswinkel werden farbig schattiert dargestellt und geben einen guten Überblick über den Formverlauf eines Bauteils.



Fläche

- Fläche

Die Flächenanalyse untersucht **Flächenkrümmungen**. Sie unterscheidet dabei drei Verfahren der Darstellung:

Die **Gauß-Analyse** ermittelt nach dem entsprechenden mathematischen Verfahren die Krümmungen an Flächen in einem definierbaren Bereich und stellt die Ergebnisse farbig dar.

Die **durchschnittliche Krümmung** stellt über Flächenteile gemittelt die entsprechende Krümmung dar.

Die **maximale Krümmung** stuft relativ fein die jeweiligen Krümmungsbereiche ab und zeigt deutlich die Fehler in der **Flächenkontinuität** auf.



Schnitt

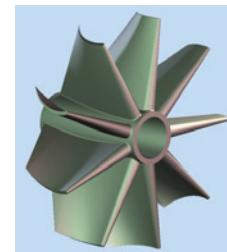
Die einfache Schnittanalyse stellt beliebige **Querschnitte** eines Bauteils frei.

In der erweiterten Schnittanalyse können Querschnittverläufe in bestimmten Abständen nach **Mindest- und Maximalwandstärken** bzw. Abständen untersucht werden.

- **Krümmung**

Die Krümmungsanalyse stellt den **Krümmungsverlauf** verschiedener Abschnitte einer Fläche mithilfe von maßstäblich dargestellten sogenannten Krümmungskämmen dar.

Für die Beschreibung der Funktionen und die Darstellung der Ergebnisse wurde u.a. ein Flügelrad benutzt, bei dem ein Flügel relativ einfach durch zwei Profilkizzen und eine Erhebung konstruiert wurde.



Krümmung



Das Flügelrad sieht in der normalen, schattierten Inventor-Darstellungsart recht gelungen aus, die verschiedenen Analysearten decken jedoch scho-
nungslos Flächenfehler bzw. Diskontinuitäten auf.

■ 3.1 Zebra-Analyse

Die Zebra-Analyse oder Zebrastreifenanalyse analysiert die Flächenkontinuität durch Projektion von parallelen Linien auf die Modellflächen. Die Ergebnisse zeigen, wie Licht auf der Fläche reflektiert wird. Als Ergebnisse werden Linienverläufe auf den Flächen angezeigt, die bei Ebenen parallel, bei gekrümmtem Flächen gebogen und bei nicht tangentia-
len Übergängen gezackt sind.

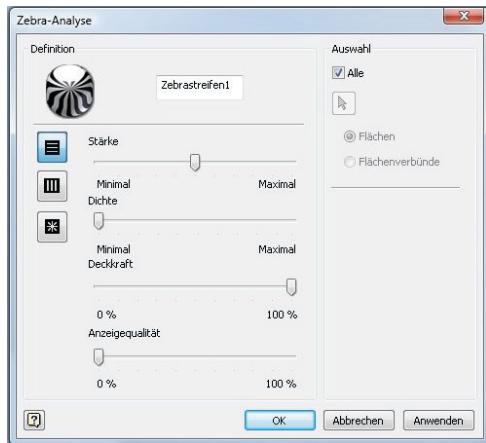


Zebrastreifen



HINWEIS: Die Streifen werden HORIZONTAL, VERTIKAL oder RADIAL auf die Flächen projiziert und behalten diese Richtung auch bei, wenn das Werkstück gedreht wird. Somit ergibt jede Bauteilposition ein anderes Streifenmuster, und es muss durch Variation der Darstellung das bestmög-
liche Ergebnis erreicht werden.





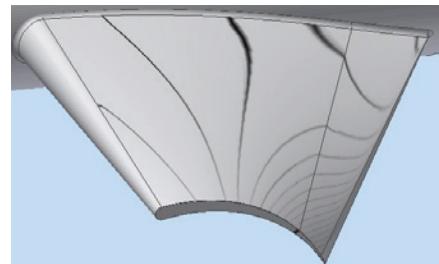
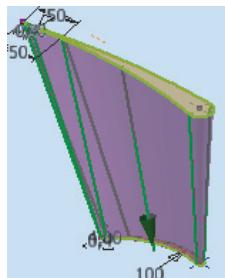
Über die Schieberegler werden die Stärke (Dicke) der Streifen, ihre Dichte, d.h. der Abstand, den sie zueinander haben, und ihre Deckkraft eingestellt.

Die Anzeige regelt die Auflösung. Mit niedriger Auflösung werden die Streifen sehr stufig angezeigt, mit hoher Anzeigequalität ergeben sich relativ glatte Streifen, die eine etwas längere Berechnungszeit benötigen.

Das Auswahlfeld ALLE übernimmt automatisch den ganzen Körper in die Analyse. Alternativ können auch nur einzelne Flächen selektiert werden.

Die beiden folgenden Bilder zeigen ein und dieselbe Stelle eines Flügels des Flügelrades in verschiedenen Positionen.

Im linken Bild sieht der Übergang an der Flügelhinterkante (Pfeil) noch relativ kontinuierlich aus, in der rechten Abbildung wurde das Bauteil etwas gedreht, und man sieht genau, dass sich an dieser Stelle deutliche Zacken in Kurven befinden.



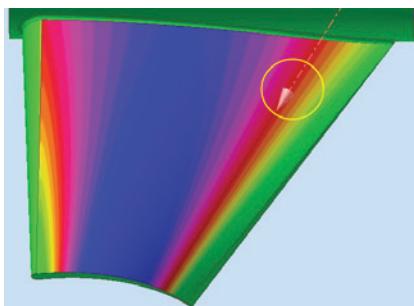
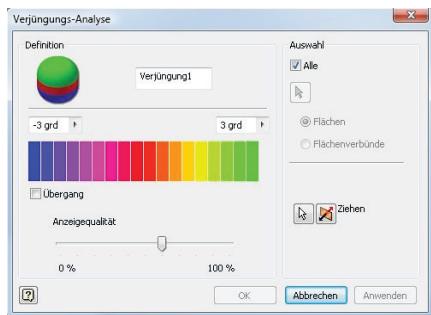
Am vorderen und am hinteren Ende des Flügels wurden die Skizzenabhängigkeiten TANGENTIAL vergeben. Der Übergangskörper wurde durch eine ERHEBUNG zwischen zwei Skizzen erstellt, die in diesem Fall offensichtlich nicht den optimalen Flächenverlauf finden konnte. Abhilfe wäre hier evtl. mit mehreren Zwischenskizzen, welche die Übergänge kontinuierlicher darstellen, zu schaffen.

■ 3.2 Entwurf, Verjüngungsanalyse



Die Entwurfs- oder Verjüngungsanalyse zeigt in ihrer Darstellung den Verjüngungswinkel einer Fläche mit Farbcodierung an. Letztendlich sind dies Winkelabweichungen von einer Ebene, die in Richtung eines anzugebenden Strahls ermittelt werden.

Bei Gussteilen, die Formschrägen benötigen, ist diese Analyse sinnvoll, um die Gleichmäßigkeit der Verjüngung sehen zu können. Ein Farbspektrum zeigt die Veränderungen des Verjüngungswinkels innerhalb eines festgelegten Bereichs an.



Das Auswahlfeld
ÜBERGANG
regelt die Farbanzeige
in allen Analysen mit
Farbverläufen.

Das Beispiel zeigt eine relativ gleichmäßige Verjüngung zu den vorderen und hinteren Flügelkanten hin.

Der Pfeil zeigt die Zugrichtung an, die zur Ermittlung der Verjüngung ausgewählt wurde.

■ 3.3 Fläche, Gauß-Analyse, Gauß'sche Flächenkrümmung



HINWEIS: Als Krümmung ist der Kehrwert des Radius einer Kurve an einem Punkt definiert: $K=1/r$

Die Gauß'sche Flächenkrümmung ist ein mathematisches Verfahren, das vor allem zum Beschreiben von Krümmungsverläufen eingesetzt wird. Hierzu werden jedem Punkt einer Fläche zwei Krümmungen mit den Radien r_1 und r_2 zugeordnet. Die Gauß'sche Krümmung ergibt sich dann zu:

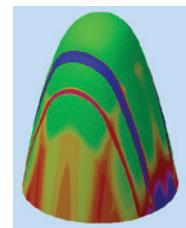
$$K = k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2}$$

Sonderfälle treten dann auf, wenn $r_1 = r_2 = 0$ ist, dann hat die Fläche keine Krümmung. Wenn dagegen $r_1 = r_2 = r$ ist, handelt es sich um eine kugelförmige Fläche.

Haben beide Krümmungen dieselbe Richtung, ist die Gauß'sche Krümmung **positiv**, liegen die Krümmungsradien auf unterschiedlichen Flächenseiten, dann wird die Gauß'sche Krümmung **negativ**, es handelt sich dann um eine sogenannte **Sattelfläche**.

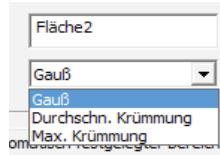


Fläche



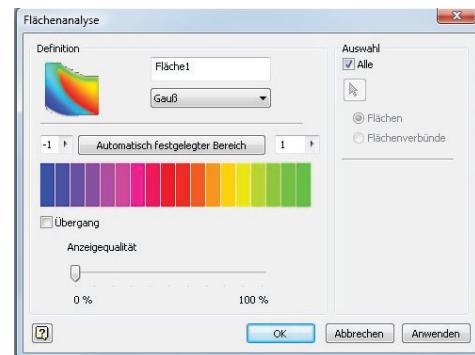
Die Gauß-Analyse im Inventor analysiert Bereiche unter Verwendung einer Farbabstufungsanzeige auf den Bauteiloberflächen. Die Farbabstufungsanzeige ist eine visuelle Anzeige der Oberflächenkrümmung, die nach der Gauß'schen Krümmungsanalyse berechnet wird.

Sie zeigt das Produkt der Hauptkrümmungen an, die durchschnittliche Krümmung, d.h. deren Mittelwert. Der Mittelwert ist das arithmetische Mittel der beiden Hauptkrümmungen.

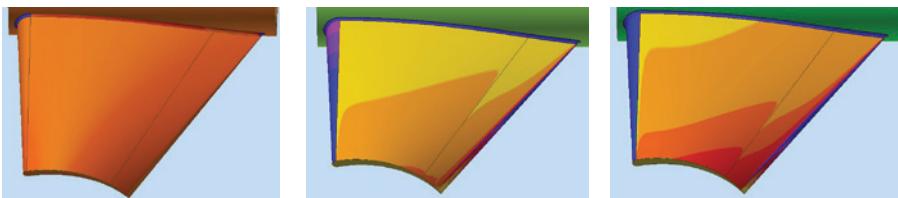


Im Dialogfenster kann mit der Abroll-Schaltfläche entweder die GAUSS-Analyse, deren Mittelwert (die DURCHSCHNITTLICHE KRÜMMUNG) oder die MAX. KRÜMMUNG ausgewählt werden.

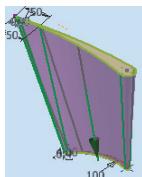
Im MIN.- und MAX.-Feld werden die minimalen bzw. maximalen Krümmungsverhältnisse eingegeben, die im Farbband angezeigt werden sollen. Die mittlere Schaltfläche ermittelt diese automatisch aus den Krümmungsverhältnissen am jeweiligen Bauteil.



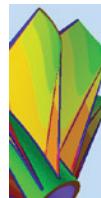
In den folgenden Abbildungen wurde wieder der Flügel des Flügelrades einer Flächenanalyse unterzogen.



Das linke Bild zeigt das Ergebnis der GAUSS-Analyse, in der mittleren Abbildung ist die DURCHSCHNITTLICHE KRÜMMUNG und rechts die MAXIMALE KRÜMMUNG dargestellt.



HINWEIS: In den beiden rechten Bildern ist der Flächenfehler deutlich zu sehen, den auch schon die Zebra-Analyse aufgedeckt hat und der, wie dort beschrieben, durch die Funktion ERHEBUNG zusammen mit dem nicht krümmungsstetigen Übergang der tangentialen Abhängigkeit in der Skizze verursacht wurde.



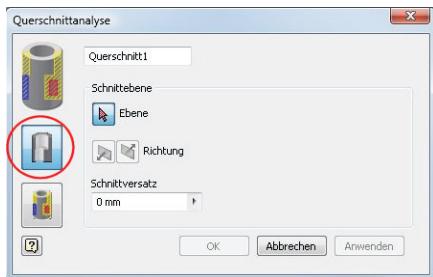
Im nebenstehenden Bild wurde am vollständigen Flügelrad die nach innen gewölbte Unterseite der Flügel untersucht, an der dieser Flächenfehler noch viel ausgeprägter auftritt und zu sehen ist.



HINWEIS: Noch einmal: In den beiden Randskizzen, an der Nabe und am Flügelende, sind die Übergänge absolut tangential, nur im Übergangskörper treten diese Fehler auf.

■ 3.4 Schnitt, Querschnittsanalyse

Die Querschnittsanalyse steht nur in der Bauteilumgebung zur Verfügung und umfasst zwei mögliche Verfahren.



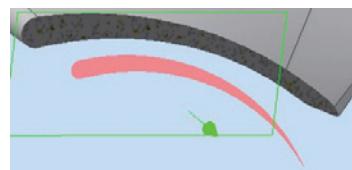
Schnitt

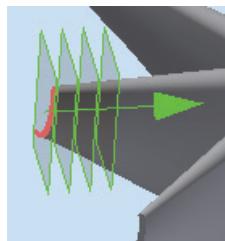
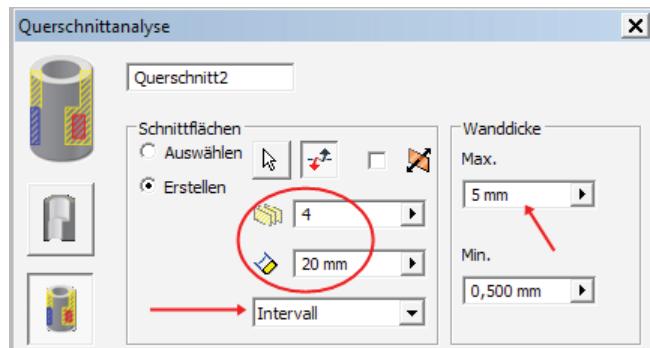
Oben ist die **einfache Analyse**, die nur Schnitte durch ein Bauteil legt, rechts die **erweiterte Analyse**, die darüber hinaus auch Wandstärken und Abstände überprüft und deren Grenzwerte überprüft und anzeigt, dargestellt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt eine einfache Schnittdarstellung, die mittels der Endfläche des Flügels (rosa) und einem **SCHNITTVERSATZ** von **20 MM** erzeugt wurde.

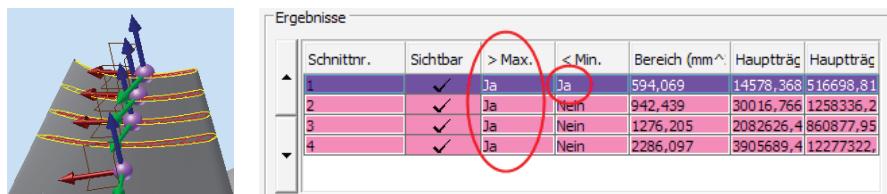
Im unteren Kurvenverlauf der Schnittfläche ist auch hier wieder der schon benannte Flächenfehler deutlich zu sehen, der in der Endfläche des Flügels noch nicht vorhanden ist.

Die folgenden Abbildungen zeigen die erweiterte Schnittanalyse, in der vier Querschnitte gleichzeitig untersucht werden.





Für diese vier Querschnitte wurde ein Abstand von 20 MM als INTERVALL eingegeben und die Flügelendfläche als Ausgangsebene selektiert. Der zulässige Wandstärkenbereich ist zwischen 0,5 MM und 5 MM angegeben.



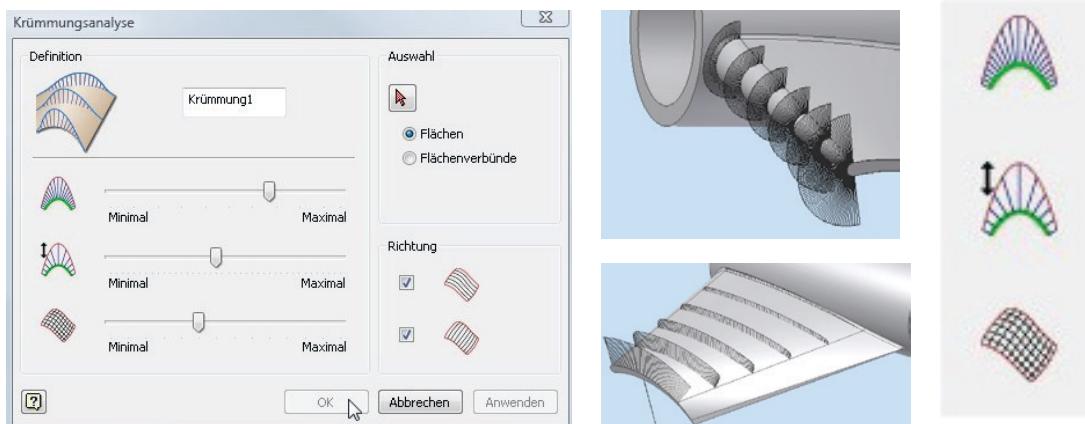
Die Ergebnisliste zeigt neben den Angaben des Flächeninhaltes (Bereich) und der Hauptträgheitsmomente (Flächenmomente 2. Grades) an, dass in den Querschnitten 1 bis 4 die maximalen Grenzen überschritten und im Querschnitt 1 auch der minimale Querschnitt unterschritten wurden, in den Querschnitten 2 und 3 wurden die minimalen Grenzen eingehalten.

■ 3.5 Krümmungsanalyse, Krümmungskammanalyse



Diese Art der Flächenuntersuchung stellt ebenfalls Krümmungen von Flächen und Kanten dar, im Unterschied zur Flächenanalyse werden diese Darstellungen der Krümmungen allerdings über sogenannte Krümmungskämme erzeugt und angezeigt.

Ein Krümmungskamm entsteht durch unterschiedlich lange, der Krümmung entsprechende und auf den Krümmungslinien lotrecht stehende Linien, deren Endpunkte mit einer Kammlinie verbunden sind. Je stärker die Krümmung ist, desto länger sind die Linien bzw. desto höher ist der Kamm.



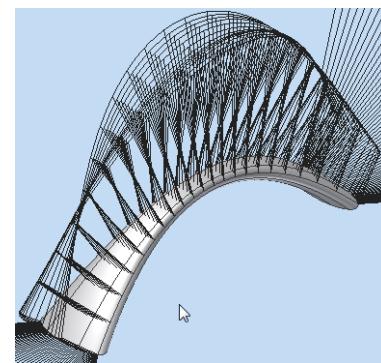
Die drei Schieberegler haben folgende Bedeutungen:

Mit dem obersten Regler stellt man die [Liniendichte](#), also den Abstand zwischen den Linien, ein.

Der mittlere Regler definiert den [Maßstab der Liniellängen im Verhältnis zur Krümmung](#).

Mit dem untersten Regler wird die [Dichte der Überprüfung](#) der Krümmung eingestellt. Eine höher gestellte Position bedeutet, dass mehr Punkte auf der Fläche berücksichtigt und mehr Kämme in engeren Abständen erzeugt werden.

Die Richtungsangabe bestimmt die Ausrichtung der Krümmungskämme quer oder längs zur gekrümmten Fläche, wobei beide Richtungen gleichzeitig gewählt werden können.



4

Technische Mechanik, Festigkeitslehre und Inventor

Die technischen Grundlagen und Inhalte der Technischen Mechanik und Festigkeitslehre sind für die Bearbeitung von Simulationsaufgaben mit 3D-CAD-Systemen unverzichtbar und müssen vorausgesetzt werden. Dass dieses Kapitel des Buches trotzdem geschrieben wurde, hat mehrere Gründe.

- Erstens liegt die Vermittlung der **theoretischen Fundamente** der Technischen Mechanik und Festigkeitslehre, die in der Regel in den Anfangssemestern eines technischen Studiums stattfindet, bei vielen Anwendern mehr oder weniger viele Jahre zurück, und das Wissen darüber ist seitdem einer gewissen Erosion ausgesetzt.
- Zweitens soll hier eine **Auffrischung** der Begriffe stattfinden, damit ein uneinheitlicher Sprachgebrauch nicht zu Verwirrungen führt.
- Drittens werden in diesem Kapitel auch die **Beschränkungen** aufgezeigt, die aufgrund von begrenzten Programmfunctionen und Rechnerkapazitäten bzw. von Näherungsannahmen zu Ungenauigkeiten bzw. zu Unmöglichkeiten in bestimmten Bereichen der Simulation führen.
- Und viertens sollen die Begriffe der Mechanik schon hier mit den Definitionen und Funktionen, wie sie im **Autodesk Inventor** verwendet werden, verglichen und erklärt werden.

Wiederholung tut gut

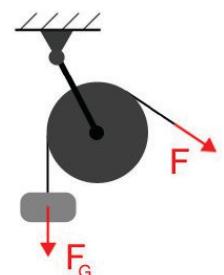
Grenzen der
3D-Simulation



HINWEIS: Alle Begriffe der Mechanik und der Festigkeitslehre werden in den folgenden Zusammenhängen ausschließlich dem Gebiet der **Festkörpermechanik** zugeordnet, d.h., Flüssigkeiten und Gase bleiben unberücksichtigt.

■ 4.1 Statik

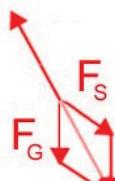
Die Statik beschäftigt sich mit ruhenden Systemen, die sich deswegen im Ruhezustand befinden, weil sie im Gleichgewicht sind (Statik = Gleichgewichtslehre). Weiterhin setzt die Statik (wie auch die Dynamik) **ideale Werkstoffe** mit homogener Molekularstruktur und **starre Körper** voraus.



Diese Annahme wird zwar für technische Systeme häufig getroffen, trifft jedoch nur selten wirklich zu, d.h., in den meisten Fällen wird bereits bei diesen Annahmen von Näherungen ausgegangen und Störgrößen (Vibrationen, veränderliche Kräfte, Verformungen, inhomogene Werkstoffe etc.) werden vernachlässigt.

Darauf basierende Festigkeitsberechnungen werden deshalb mit Betriebs- und Sicherheitsfaktoren ausgestattet, die diese Ungenauigkeiten ausgleichen sollen.

Die zentralen Begriffe der Statik im Inventor sind:



Bezeichnung	Inventor-Symbol	Zeichen	Einheit	Definition
Kraft		F	N (Newton)	Vektor, Richtung, Größe
Druck, Flächenlast		p	N/mm ² , MPa 1 MPa = 1 N/mm ²	Vektorfeld, Richtung, Größe
Moment		M, T	Nm, Nmm	Kraft x Abstand
Freiheitsgrade				3 x Translation, 3 x Rotation
Einspannung				eliminiert alle Freiheitsgrade
Fest				
Festlager				eliminiert einige Freiheitsgrade
Verankern				
Loslager				Auflage, lässt Bewegungen in einer Fläche zu, eliminiert drei Freiheitsgrade
Reibungslos				

■ 4.2 Freiheitsgrade

Die Freiheitsgrade, die in der Statik bereits zur Bestimmung eindeutiger Kraftsysteme definiert sein müssen, beschreiben die mathematisch erklärbaren Bewegungsmöglichkeiten eines Punktes im Raum und stellen damit auch schon den Übergang zur Kinematik dar.

Damit ein technisches System **statisch bestimmt** ist, d.h. eindeutig berechenbar, müssen seine Freiheitsgrade eingeschränkt werden.

Die Problematik beim Entzug von Freiheitsgraden liegt jedoch darin, dem System nicht mehr Freiheitsgrade zu nehmen, als es die **Eindeutigkeit** der Bestimmung zulässt. Solche Systeme wären dann statisch überbestimmt und nur noch mithilfe von Annahmen und Näherungen berechenbar.

Eindeutigkeit
Vollbestimmung
Überbestimmung



HINWEIS: Freiheitsgrade, d.h. die kinematischen Beziehungen zwischen Bauteilen, werden in Inventor-Baugruppen durch **3D-Abhängigkeiten** (Constraints) festgelegt. Im Bereich der Inventor-Simulation werden 3D-Abhängigkeiten in Baugruppen weitgehend durch entsprechende **Gelenke** ersetzt.

Im kartesischen Koordinatensystem sind die möglichen Bewegungen (Freiheitsgrade) wie folgt definiert:

- Verschiebung (Translation) in X-, Y- oder Z-Richtung
- Drehung (Rotation) um die X-, Y- oder Z-Achse



Inventor-Symbol
zum Anzeigen der
Freiheitsgrade

Mit diesen sechs Freiheitsgraden kann jede beliebige Bewegung im 3D-Raum mathematisch beschrieben werden.

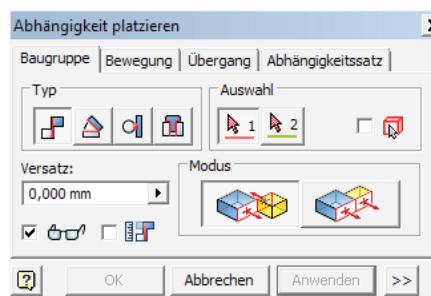
Je nach Bestimmungsgrad, d.h. je nach der Art, wie sich ein Bauteil in einer Baugruppe noch bewegen darf, müssen bei der Verbindung von Bauteilen in einer Baugruppe entsprechende Freiheitsgrade zwischen den Bauteilen entzogen werden.



Symbole, mit denen
Inventor die vorhandenen
Freiheitsgrade in
Bauteilen anzeigt

Beispiele:

- Die Welle, die auf einer Seite in einem Festlager gelagert ist, hat genau noch einen Freiheitsgrad, nämlich die Rotation um ihre Längsachse.
- Der Bär einer Spindelpresse (Mutterngewinde) hat ebenfalls nur noch einen Freiheitsgrad, nämlich die Translation in Richtung seiner Längsachse.
- Die Position des Greifers eines Universalroboters hat im Prinzip alle sechs Freiheitsgrade (alle Bewegungsmöglichkeiten). Tatsächlich werden diese aber mithilfe des Roboterarms und seiner Gelenke ermöglicht. Der Greifer selbst hat nur die Freiheitsgrade, die ihm das letzte Gelenk lässt (oft nur eine Rotation).
- Eine Computermaus hat drei Freiheitsgrade, die Translationen in X- und Y-Richtung und die Rotation um die Z-Achse. Wird sie in der Z-Richtung bewegt oder um X oder Y rotiert, funktioniert sie nicht mehr.



Eine funktionelle Baugruppe hat genau so viele Freiheitsgrade, wie ihre Funktion erfordert, nicht mehr und nicht weniger.

Freiheitsgrade werden durch das Vergeben von **3D-Abhängigkeiten** bestimmt bzw. entfernt. Die Definition von Bewegungsmög-

lichkeiten mithilfe der Vergabe von 3D-Abhängigkeiten ist Gegenstand beim Erzeugen von funktionellen Baugruppen und wird in entsprechenden Werken dort beschrieben.

■ 4.3 Freiheitsgrade überprüfen



Freiheitsgrade.avi

In Ergänzung zu diesem Abschnitt finden Sie das Video [Freiheitsgrade.avi](#) auf der DVD zum Buch.

Auch wenn die Freiheitsgrade und das Vergeben von 3D-Abhängigkeiten an sich nicht Hauptthema dieses Buches sein können, so soll doch ein Punkt besonders herausgegriffen werden, nämlich die Überprüfung der Freiheitsgrade.

In der dynamischen Simulation werden die 3D-Abhängigkeiten in der Regel weitgehend automatisch in Gelenke umgewandelt. Dieser Umstand und das entsprechende Vorgehen in der Simulationsumgebung werden in den späteren Kapiteln noch ausreichend beschrieben. Die Gelenke selbst werden bereits im folgenden Abschnitt grundlegend behandelt.



HINWEIS: Die automatische Umwandlung von 3D-Abhängigkeiten in Gelenke geschieht einzig und alleine aufgrund der Freiheitsgrade, die ein Bauteil innerhalb einer Baugruppe nach der Vergabe der 3D-Abhängigkeiten noch hat.

Wurden 3D-Abhängigkeiten jedoch unzureichend oder falsch vergeben, dann erzeugt der Inventor daraus auch entsprechend ‚falsche‘ Gelenke, die nicht zu der beabsichtigten Funktion passen und die Simulation scheitern lassen. Aufwendiges Nacharbeiten ist die Folge.



Im Inventor gibt es zum Erkennen und zur Vermeidung dieser Probleme zwei wichtige Funktionen:

- Die Anzeige der FREIHEITSGRADE, die über die Registerkarte ANSICHT und die Befehlsgruppe SICHTBARKEIT erreicht werden kann, und
- die Funktion FREIHEITSGRAD-ANALYSE, die sich auf der Registerkarte ZUSAMMENFÜGEN in der Befehlsgruppe PRODUKTIVITÄT befindet.

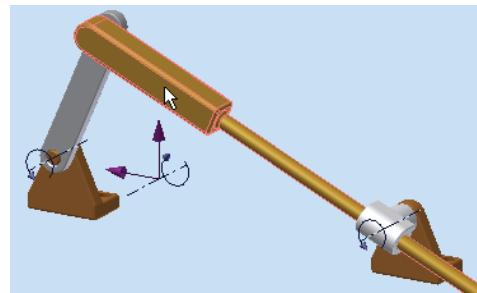


4.3.1 Anzeige der Freiheitsgrade

Schubstangengetriebe.iam

Die Baugruppen-Datei [Schubstangengetriebe.iam](#), die für diesen Abschnitt verwendet wird, finden Sie auf der DVD zum Buch.

Mit der Schaltfläche FREIHEITSGRADE werden alle an allen Bauteilen einer Baugruppe vorhandenen Freiheitsgrade in der Form von Achsenkreuzsymbolen angezeigt, Translationen als Koordinatenachsen und Rotationen als kreisförmige Pfeile und die jeweilige Achse. Die Schaltfläche schaltet nur die Anzeige an und aus.



Mitunter, insbesondere wenn mehrere Freiheitsgrade an einem Bauteil vorkommen, werden die Ursprünge der Freiheitsgradsymbole nicht direkt am Bauteil angezeigt. Die Bewegung eines Bauteils bewegt dann aber das Symbol mit, wodurch man die Zuordnung besser erkennen kann.

4.3.2 Freiheitsgrad-Analyse

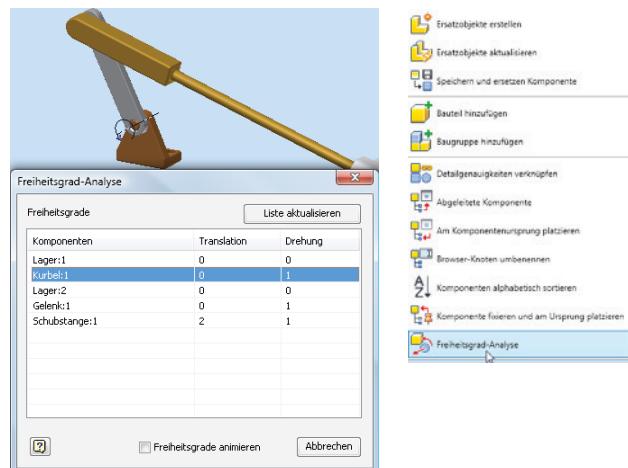
Die FREIHEITSGRAD-ANALYSE ist etwas schwerer zu finden, sie befindet sich an unterster Stelle im Abrollmenü der Befehlsgruppe PRODUKTIVITÄT. Wurde sie einmal aktiviert, dann stellt sie jedoch die Vorgabe in der Befehlsgruppe dar.

Im entsprechenden Dialogfenster werden sehr übersichtlich alle Komponenten einer Baugruppe aufgelistet und die Anzahl ihrer Freiheitsgrade, getrennt nach Translation und Rotation, angezeigt.

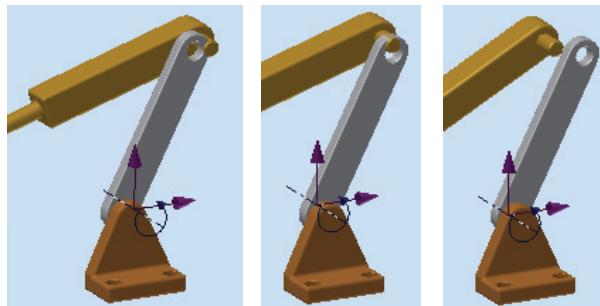
Wird ein Bauteil selektiert, so zeigt diese Funktion nur die Freiheitsgrade des ausgewählten Bauteils mit derselben Symbolik wie die vorher beschriebene Funktion an.

Eine besondere Aufmerksamkeit verdient das Auswahlfeld im unteren Bereich des Dialogfens-ters FREIHEITSGRADE ANIMIEREN. Ist dieses Feld aktiviert und wird jetzt ein Bauteil in der Liste ausgewählt, dann wird dieses Bauteil nacheinander um jeden Freiheitsgrad bewegt, den es besitzt.

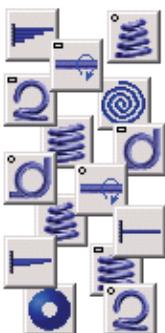
Gelenk:1	0	1
Schubstange:1	2	1



Als Beispiel wird in den folgenden Abbildungen die Animation der Schubstange gezeigt, die über drei Freiheitsgrade verfügt.



■ 4.4 Gelenke



Gelenke sind im weitesten Sinn Elemente von Mehrkörpersystemen (MKS), die für die Verbindungen und die Beweglichkeit derselben notwendig sind bzw. die Freiheitsgrade der MKS-Glieder einschränken. Technische Beispiele für MKS aus dem Maschinenbau sind:

- Simulation von Robotern
- Simulation von Fahrzeugen und Fördermaschinen
- Simulation von Motoren und Getrieben

In Simulationsumgebungen wird die Beweglichkeit von Gelenken ausschließlich über Freiheitsgrade definiert, so hat beispielsweise ein einzelnes Scharniergelenk nur einen einzigen Freiheitsgrad, nämlich den der Rotation um seine Gelenkkarze.

Durch Kopplungen mehrerer Elemente mit Scharniergelenken, man spricht von einer so genannten Gelenkkette, kann so ein System jedoch mehrere Freiheitsgrade zugewiesen bekommen. Im Beispiel des abgebildeten Scharniers wird durch vier Elemente eine Viergelenkkette erzeugt, die dafür sorgt, dass beim Fixieren der einen Gelenkplatte die andere eine ganz bestimmte Kurvenbahn (Kopplungskurve) durchlaufen kann.

Festkörpergelenke

Einen Sonderfall im Rahmen der Gelenkbetrachtungen stellen die **Festkörpergelenke** dar. Sie sind eigentlich keine Gelenke im herkömmlichen Sinn, sondern elastische Bauelemente, die aufgrund ihrer Elastizität eine Gelenkfunktion wahrnehmen können. Die bekanntesten Beispiele für Festkörpergelenke sind Federn in unterschiedlichsten Formen und Funktionen (Blattfedern, Winkelfedern, Drehstabfedern, Spiralfedern, Tellerfedern, Gummifedern u.a.).

In der Kunststoffspritzgusstechnik werden häufig sogenannte Scharniergelenke (Filmscharniere) als Festkörpergelenke zur beweglichen Verbindung von Teilen eingesetzt.



HINWEIS: Festkörpergelenke werden in Simulationsumgebungen nur begrenzt unterstützt und in der Regel über die Steifigkeit von Verbindungsteilen definiert.

Im Folgenden wird der Begriff Gelenk in der Regel nur für Verbindungen in Mehrkörper-systemen verwendet.

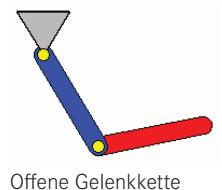
Gelenkketten, Getriebe

Neben Gelenken, die nur eine einzige Bewegungsfunktion erfüllen (z.B. einfaches Türscharnier, Klavierband), kommen in der Technik häufig Gelenkketten vor, die aus mehreren Elementen bestehen, welche durch Gelenke miteinander verbunden sind. Gelenkketten werden in der klassischen Mechanik auch als Getriebe bezeichnet, da sie sowohl die Bewegungsart als auch die Bewegungsgeschwindigkeit übersetzen können. Beispiele hierfür sind etwa Kurbeltriebe, Scheibenwischergestänge, Hebelübersetzungen, Kurvenscheiben-Mechanismen etc.

Unter den Gelenkketten werden offene und geschlossene Ketten unterschieden, wobei beide Arten auch in einem System gemischt vorkommen können.

Offene Gelenkketten

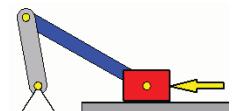
Bei einer offenen Gelenkkette sind alle Glieder seriell miteinander verbunden, und das letzte Glied ist an einem Ende frei. Die Einarm-Roboter sind typische Beispiele für offene Gelenkketten, und auch die menschlichen Extremitäten (Arme, Beine) können dieser Kategorie zugerechnet werden.



Offene Gelenkkette

Geschlossene Gelenkketten

Bei geschlossenen Gelenkketten ist jedes Glied der Ketten mindestens mit zwei anderen Gliedern der Kette verbunden. Der Dreigelenkbogen oder das Viergelenkgetriebe stellen geschlossene Gelenkketten dar. Eine Einzelradaufhängung am Pkw oder das Scheibenwischergestänge sind Beispiele dafür.

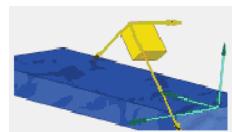


Geschlossene Gelenkkette

(Quelle: <http://www.tm-aktuell.de>)

4.4.1 Inventor-Gelenke

Die Inventor-Simulationsumgebung kennt zwei Arten der Gelenkdefinition: die sogenannten **Normgelenke**, die allerdings mit dem technischen Normsystem nichts zu tun haben, und die **automatisch generierten Gelenke**. Auf beide Gelenkartarten wird in Kapitel 15, **Die dynamische Simulationsumgebung**, intensiver eingegangen.



Normgelenk mit allen Freiheitsgraden

Automatisch generierte Gelenke

Wird in einer Baugruppe die Simulationsumgebung aktiviert und ist in den Simulations-einstellungen nichts anderes festgelegt, dann versucht der Inventor, aus den bereits defi-



Inventor-Symbol zum Einfügen eines Gelenks in eine Baugruppe

nierten 3D-Abhängigkeiten der Baugruppe bzw. aus den noch vorhandenen Freiheitsgraden einer Verbindung ein Gelenk, das genau dieselben Freiheitsgrade wie die Verbindung hat, zu generieren.

Beispiel: Die 3D-Abhängigkeit **Einfügen** (z.B. einer Schraube) lässt nur einen Freiheitsgrad offen, nämlich die Rotation um die Längsachse. Die Simulationsumgebung macht daraus ein **Drehgelenk**, das ebenfalls nur den Freiheitsgrad der Rotation besitzt.



Inventor-Symbol zur Auswahl eines Gelenks

Von Hand eingefügte Gelenke

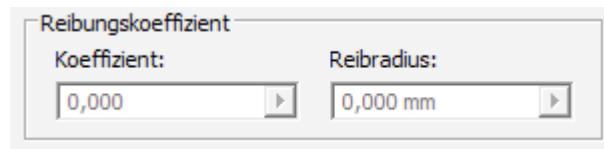
Mit der Funktion **GELENK EINFÜGEN** ist es möglich, alle typischen Verbindungsarten zwischen zwei Gelenkkettengliedern zu definieren. Dies können einfache Scharniere, Zahnrad- oder Schiebeverbindungen, freie 2D- oder 3D-Gelenke sein. Diese Gelenkkarten müssen von Hand als Verbindung eingefügt und mit Gelenkdaten versehen werden.

■ 4.5 Reibung

Auch die Reibung ist ein Übergangsproblem zwischen der Statik und der Kinematik und behandelt das Gleiten (Gleitreibung) bzw. die Haftung (Haftreibung) zwischen Bauteilflächen.

Reibungskoeffizienten, die die Stärke der Reibung zwischen Werkstoffpaarungen beschreiben, sind weitere Näherungen, die die Realität mehr oder weniger genau abbilden.

Reibung erzeugt Wärme



HINWEIS: Sogenannte Reibungsverluste, welche die Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärmeenergie beschreiben, werden in ihrer temperaturmäßigen Auswirkung auf die Festigkeit von Werkstoffen nicht berücksichtigt und können somit, insbesondere bei höheren Temperaturen, eine weitere bedeutungsvolle Fehlerquelle in Berechnungen darstellen.

Im Inventor ist es möglich, jeden einzelnen Freiheitsgrad mit einem Reibungskoeffizienten zu versehen. So können verschiedene Reibwerte für unterschiedliche Bewegungsrichtungen, für die Translation und die Rotation, angegeben werden.

■ 4.6 Kinematik

Die Kinematik untersucht die Bewegungen, die ein Körper im Raum ausführen kann (Kinematik = Bewegungslehre). Auftretende Kräfte und Trägheiten bleiben in der Kinematik unberücksichtigt.

Die zentralen Begriffe der Kinematik sind:

Bezeichnung	Zeichen	Einheit
Translation und Rotation		Längs- und Drehbewegung
Weg	s	m, mm
Winkel	α, β	°, Grad
Zeit	t	Sekunden
Geschwindigkeit	v	m/s
Winkelgeschwindigkeit	Ω	1/s, grd/s
Umfangsgeschwindigkeit	U	m/s
Drehzahl	n	1/min
Beschleunigung	a	m/s ²
Winkelbeschleunigung	α	1/s ² , grd/s ²



Im Inventor können Bewegungen in der Umgebung der dynamischen Simulation definiert werden, soweit sie nicht durch die Entfernung von Freiheitsgraden blockiert wurden.

Über die [Eigenschaften der Gelenke](#), die in der Simulationsumgebung im Objektbrowser aufgerufen werden können, erhält man beispielsweise die Möglichkeit, für einen Freiheitsgrad der Rotation eine Geschwindigkeit in grd/s bzw. eine Beschleunigung in grd/s² einzugeben.

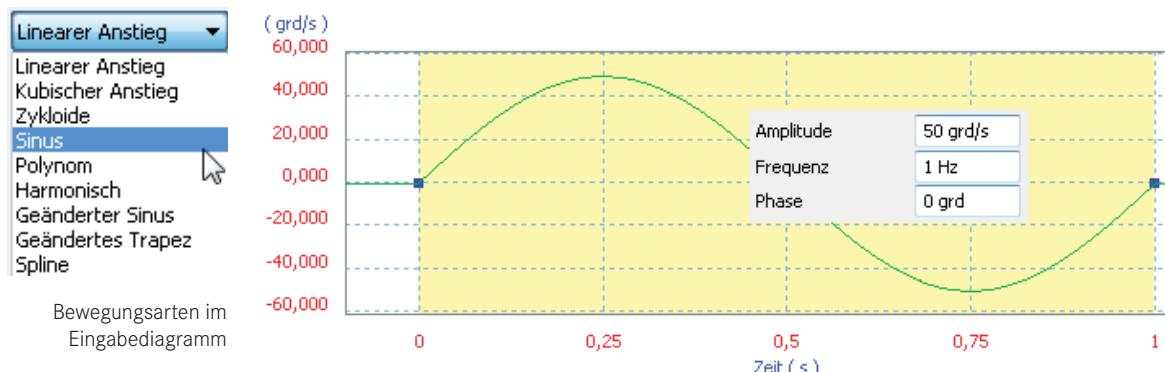
In der nebenstehenden Abbildung ist dies für eine Antriebswelle geschehen, die sich bei der Ausführung der Simulationsbewegung mit der konstanten Drehzahl von 90° pro Sekunde drehen soll.

Anstelle von konstanten Werten können über ein [Eingabediagramm](#) dynamische Bewegungen definiert werden.



Konstante oder dynamische Bewegungswerte





Im obigen Beispiel eines Eingabediagramms wurde für die Antriebswelle eine sinusförmige Bewegung festgelegt, die nach jeweils 0,5 Sekunden die Drehrichtung wechselt und bis zu einer Geschwindigkeit von ± 50 grd/s beschleunigt bzw. verzögert wird.

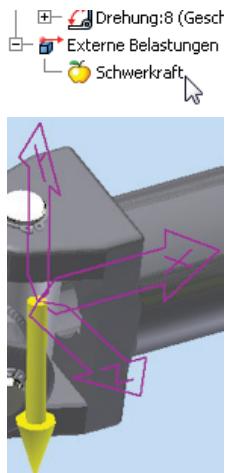
Neben linearen und sinusförmigen Bewegungsarten kann eine ganze Reihe verschiedener Definitionen, bis hin zu beliebig geformten Splines, eingegeben werden.

■ 4.7 Dynamik

Das Teilgebiet der Dynamik verbindet die vorher genannten Auswirkungen der Mechanik bzw. der Kinematik mit der Wirkung der Masse von Körpern.

Die Massenkräfte, die durch Trägheit und Gravitation hervorgerufen werden, bestimmt das dynamische Grundgesetz (Kraft = Masse x Beschleunigung, $F = m \times a$), der Energieerhaltungssatz beschreibt z.B. die Umwandlung von potenzieller in kinetische bzw. in Wärmeenergie, und die Begriffe Arbeit, Leistung und Wirkungsgrad runden in diesem Zweig der Mechanik die Berechnungsmöglichkeiten ab.

Die zentralen Begriffe der Dynamik sind:



Bezeichnung	Zeichen	Einheit
Masse	m	kg
Gravitation	g	N/s ²
Arbeit	W	J, Nm
Leistung	P	W, Nm/s
Wirkungsgrad	η	

3D-CAD-Systeme haben in den Bereichen der Dynamik nur eingeschränkte Möglichkeiten der Simulation und Berechnung.

4.7.1 Schwerkraft, Gravitation

Die Größe und die Richtung der Schwerkraft kann einem System hinzugefügt werden. Ihre Wirkung wird bei der Simulation über die Masse der Bauteile berücksichtigt.



4.7.2 Masse, Gewichtskraft, Trägheitsmomente

Die Masse wird den Bauteilen bereits bei der Konstruktion über die physikalischen PROPERTIES mitgegeben.

Das dort definierte Bauteilmaterial wird von der dynamischen Simulationsumgebung direkt übernommen, und sie berücksichtigt die dafür eingetragenen bzw. aufgrund von Dichte und Volumen errechneten Werte.

Für die Simulation sind natürlich auch die Trägheitsmomente von Bedeutung. Diese Daten sind ebenfalls auf der PROPERTIES-Registerkarte eines Bauteils angegeben.

Die HAUPTTRÄGHEITSMOMENTE sind per Definition auf die Hauptträgheitsachsen und den Schwerpunkt des Bauteils bezogen, die DREHUNG NACH HAUPTTRÄGHEITSACHSEN gibt die Winkel an, um die das aktive Koordinatensystem zum Koordinatensystem der Hauptträgheitsachsen gedreht ist.

Die hinter dem Button GLOBAL versteckten sogenannten Massenmomente sind auf den Ursprung und die Achsen des aktiven Koordinatensystems des Bauteils bezogen.



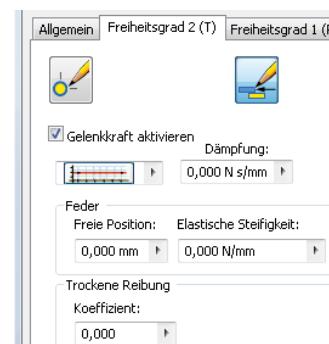
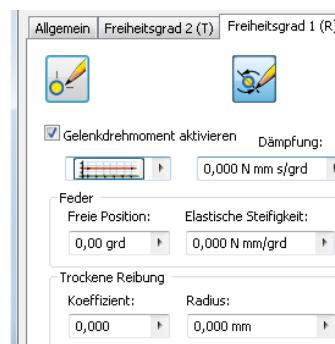
Dichte
7,840 g/cm³

		Schwerpunkt		Eigenschaften Trägheitsmomente					
Masse	1,477 kg (Relativer)	X	27,972 mm (Relativ)	Haupt	Global	Schwerpunkt			
Fläche	35871,156 mm ²	Y	0,016 mm (Relative)	Hauptträgheitsmomente					
Volumen	188391,609 mm ³	Z	-0,090 mm (Relativ)	I ₁₁	1206,467 kg mr	I ₂₂	1458,179 kg mr	I ₃₃	1962,568 kg mr
				Drehung nach Hauptträgheitsmomenten					
				R _x	-9,77 grd (Relat)	R _y	-0,16 grd (Relat)	R _z	0,00 grd (Relat)

4.7.3 Gelenkkkräfte und -momente

Neben den physikalischen Bauteildaten und den angreifenden Kräften können auch Gelenkkkräfte und -momente definiert werden.

Dies erfolgt über Objektbrowser → Gelenk → EIGENSCHAFTEN.

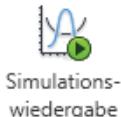


Für jedes Gelenk gibt es im Kontextmenü des Objektbrowsers die Option EIGENSCHAFTEN, die z.B. das oben abgebildete Dialogfenster aufruft. Im linken Bild ist ein Gelenk-Freiheitsgrad der Rotation (FREIHEITSGRAD 1 (R)) aktiv, und über die Schaltfläche GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN und das Auswahlfeld GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN erhält man sechs Möglichkeiten zur Einstellung des Momentenverhaltens.

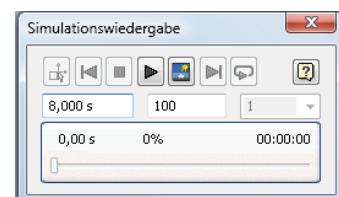
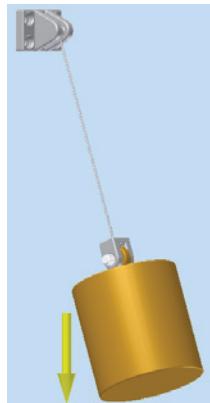


Im rechten Bild ist ein Gelenk-Freiheitsgrad der Translation (FREIHEITSGRAD 2 (T)) aktiv, und über die Schaltfläche GELENKKRAFT BEARBEITEN und das Auswahlfeld GELENKKRAFT AKTIVIEREN erhält man fünf Möglichkeiten zur Einstellung des Kraftverhaltens.

Alle Werte können als konstante Größen oder variabel über ein Eingabediagramm (siehe Abschnitt 4.6, „Kinematik“) bestimmt werden.



Die Simulation beginnt.



4.7.4 Simulation

Sind alle Material- und Bewegungsdaten eingegeben und wurden alle Gelenke eindeutig definiert, dann kann die eigentliche Simulation aufgerufen und durchlaufen werden.

Das abgebildete Pendel wurde im mittleren Bild mit einer Schwerkraftwirkung ausgestattet und im vorangegangenen rechten Bild ohne weitere Krafteinwirkung einfach losgelassen, d.h., die dynamische Simulation wurde ausgeführt. Werden Reibungs- und Dämpfungswerte eingegeben, dann schwingt das Pendel nach einigen Sekunden aus, ansonsten wäre es ein Perpetuum mobile.

Dieses Beispiel befindet sich als Video [Pendel.avi](#) auf der DVD zum Buch.



4.7.5 Export nach FEM

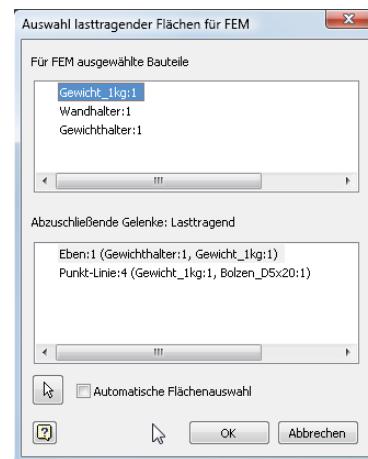
Eine sehr wichtige Funktion in diesem Zusammenhang ist die Möglichkeit des Exports der Simulationsdaten in FEM-Programme. In Abhängigkeit der Einstellung im Dialogfenster der Simulationseinstellungen werden die Daten entweder für die Inventor-Festigkeitsanalyse direkt oder für das eigenständige FEM-Programm ANSYS als Textdatei aufbereitet.

Vor dem Export der Simulationsdaten muss die aktuelle Simulation durchlaufen werden. Wird dann der Button **EXPORTIEREN NACH FEM** betätigt, dann wird man im ersten Schritt zur Auswahl derjenigen Bauteile aufgefordert, deren Daten an das FEM-Modul übergeben werden sollen. Im nebenstehend abgebildeten Beispiel wurden drei Bauteile ausgewählt.

Für jedes selektierte Bauteil müssen jetzt die **lasttragenden Kontaktgeometrien** angegeben werden. Außerdem sind im **Ausgabediagramm** die **Zeitschritte** zu selektieren, die in der FE-Analyse berechnet werden sollen. Um die relevanten Zeitschritte zu finden, gibt es im Ausgabediagramm die Funktionen **Suche Min** und **Suche Max**.

Nach dieser Prozedur kann die dynamische Simulation verlassen und die Belastungsanalyse aufgerufen werden.

Im FEM-Modul sind dann sowohl die Lasten als auch die Kontakte und Abhängigkeiten der Baugruppe verfügbar, und eine Belastungsanalyse kann ohne viel Vorarbeit gestartet werden.



Exportieren nach FEM

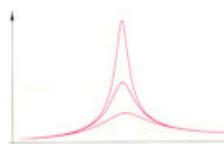


Belastungsanalyse

4.7.6 Schwingungen, Eigenfrequenz, Resonanz, Modalanalyse

Wird ein Bauteil mit einer Kraft, die ihre Größe und evtl. auch die Richtung ändert, angehobt, so fängt es an, in der Frequenz der Erregerkraft zu schwingen.

Jedes Bauteil hat, begründet durch sein Material und seine Form, eine sogenannte Eigenfrequenz.



Sogenanntes ‚Aufschaukeln‘ durch Anregungen in der Eigenfrequenz eines Bauteils mit unterschiedlichen Dämpfungen im System

Resonanzen entstehen, wenn Bauteile durch äußere Einflüsse in derselben Frequenz angeregt werden, die ihren **Eigenfrequenzen** entspricht. Auch wenn Vielfache der Eigenfrequenz als Erregung wirksam sind, tritt dieser Effekt abgeschwächt auf.

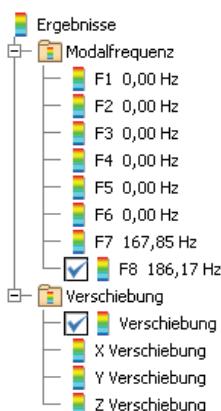
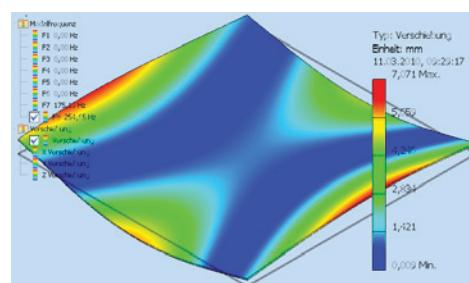
Resonanzschwingungen verstärken ihre Amplitude, ohne dass die Erregerkraft größer wird. Dies wirkt auf Bauteile extrem belastend und kann bis zur Zerstörung führen. In der Technik hat sich für diesen Effekt der Begriff des Aufschaukelns etabliert. Das Beispiel aus dem Kinofilm, in dem eine Sängerin mit einem extrem hohen Ton ein Glas zum Zerspringen bringt, kennt jeder und hat auch genau diesen Hintergrund.

Um solche Probleme zu vermeiden, ist es äußerst wichtig, bei dynamisch beanspruchten Bauteilen deren Eigenfrequenz zu kennen. Entweder kann dann die anregende Frequenz verändert oder durch Bauteilmodifikationen (Form, Material) die Eigenfrequenz verändert werden.

Der Inventor kennt zum Zweck der Ermittlung der Eigenfrequenz eines Bauteils die **Modalanalyse**. Diese liefert zwar Ergebnisse, welche eine Verschiebung in mm bei bestimmten Frequenzen anzeigen, diese Verschiebungen sind aber lediglich ein Synonym für die Empfindlichkeit des Bauteils in Bezug zu den angegebenen Frequenzen, sie können nicht als reale Verschiebungen interpretiert werden.

Das tatsächliche Verhalten von Bauteilen bei einer Fremderregung in der Eigenfrequenz kann in der derzeit aktuellen Programmversion nicht simuliert werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Modalanalyse einer 100 x 100 mm großen Blechtafel mit 0,5 mm Dicke.



Die Modi F1 bis F6 zeigen per Farbskala die relativen Verschiebungen in den sechs Bewegungsrichtungen mit 0 Hz, als nicht angeregte Verschiebungen, an. Die Modi F7 und F8 geben Hinweise auf das Gesamtverhalten des Bauteils in den angegebenen Frequenzbereichen.

Die Verschiebungen werden als relative Gesamtverschiebung sowie in Richtung der Achsen des Koordinatensystems angezeigt.



Auch der Gewichthalter des vorher abgebildeten Pendels zeigt deutlich die Bereiche an, in denen die Verformungen bei einer entsprechenden Anregung von ca. 160 bis 190 Hz auftreten werden.

In beiden abgebildeten Fällen kennt man aufgrund von Erfahrungen zwar die Art der auftretenden Verformungen, nicht jedoch die Frequenz, bei der sie auftreten. Insofern ist die Modalanalyse eine hilfreiche und unverzichtbare Methode im Umfeld der Formgebung von Bauteilen.

■ 4.8 Festigkeitslehre und FEM-Ergebnisse

Die Festigkeitslehre behandelt im Gegensatz zur Mechanik die in den Bauteilen wirkenden physikalischen Vorgänge, die durch äußere Einflüsse hervorgerufen werden.

Dieser Abschnitt ist insofern relevant, als die Ergebnisse insbesondere der FE-Analyse Spannungen, Verformungen und Sicherheitsfaktoren zurückgeben, die möglicherweise der einen oder anderen Erläuterung bedürfen.

Der Inventor verwendet für Spannungen die Einheit des Druckes, Pascal. Insofern wird die geläufige Spannungseinheit N/mm² zu Megapascal: 1 MPa = 1 N/mm².

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

Die zentralen Begriffe der Festigkeitslehre für metallische Werkstoffe sind:

Bezeichnung	Zeichen	Einheit
E-Modul	E	N/mm ² , MPa
G-Modul	G	N/mm ² , MPa
Zugfestigkeit	R _m	N/mm ² , MPa
Streckgrenze	R _e	N/mm ² , MPa
0,2%-Dehngrenze	R _{p0,2}	N/mm ² , MPa
Bruchdehnung	A	%
Normalspannung	σ (Sigma)	N/mm ² , MPa
Schubspannung	τ (Tau)	N/mm ² , MPa
Sicherheitsfaktor	S	
Spannungsverhältnis	κ (Kappa)	

Bei den Belastungen und insofern auch bei den Beanspruchungen eines Werkstoffes wird zwischen statischen und dynamischen Einflüssen unterschieden.

Da rein statische Beanspruchungen relativ selten vorkommen und die Art der Dynamik sehr vielfältig ist, unterscheidet man weiterhin die maximale Oberspannung $σ_o$ und die minimale Unterspannung $σ_u$ bei Spannungsschwankungen. Das Verhältnis dieser beiden Größen wird durch das Spannungsverhältnis $κ$ ausgedrückt, das zwischen den Werten 1 und -1 die Dynamik der Beanspruchung beschreibt.

Im Zusammenhang damit stehen die Begriffe der statischen, der Zeit- und der Dauerfestigkeit. Die in den Werkstofftabellen angegebenen Basisgrößen beschreiben dabei die statische Festigkeit eines Werkstoffes, während allgemein gilt, dass ein Bauteil dann als dauerfest bezeichnet wird, wenn es 10^7 Lastwechsel unbeschadet übersteht. Die Festigkeit von dynamisch beanspruchten Bauteilen wird in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses k aus Dauerfestigkeitsschaubildern (DFS) abgelesen.

4.8.1 Festigkeitshypothesen

Treten Spannungen nur als reine Normalspannungen (Zug, Druck, Biegung) oder nur als reine Schubspannungen (Abscheren, Torsion) auf, so können diese jeweils einfach addiert werden.

Beim gemischten Auftreten von Normal- und Schubspannungen müssen, um die Beanspruchungsgrößen mit den Werkstoffkennwerten vergleichen zu können, Vergleichsspannungen ermittelt werden.

Neben den einfachen überschlägigen Formeln zu deren Ermittlung haben sich vor allem drei Verfahren etabliert, mit denen sich, je nach Werkstoffart, eine genauere Ermittlung der Beanspruchungswerte durchführen lässt. Diese Hypothesen rechnen einen dreidimensionalen Spannungszustand in einen eindimensionalen um.

- Die **Normalspannungshypothese (NH)**,
- die **Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH)** und
- die **Schubspannungshypothese (SH)**.

NH	GEH	SH
Spröde Werkstoffe $\sigma_{\text{Grenz}}/\tau_{\text{Grenz}} = 1$ Maßgeblich ist die größte auftretende Normalspannung im Verhältnis zu R_m .	Duktile (zähe) Werkstoffe $\sigma_{\text{Grenz}}/\tau_{\text{Grenz}} = 1,73$ Maßgeblich ist die Energie, die für die elastische Verformung nötig ist, im Verhältnis zum werkstoffabhängigen Grenzwert.	Duktile (zähe) Werkstoffe mit ausgeprägter Streckgrenze $\sigma_{\text{Grenz}}/\tau_{\text{Grenz}} = 2$ Maßgeblich ist die größte auftretende Schubspannung bzw. die größte Hauptspannungsdifferenz im Verhältnis zur Streckgrenze des Werkstoffes.
Gute Werte bei einachsigen Spannungszuständen bzw. wenn ein Bauteilver sagen aufgrund hoher Normalspannungen zu erwarten ist	Gute Werte bei mehrachsigen Spannungszuständen; nicht anwendbar, wenn gleich große Spannungen in allen drei Raumrichtungen vorhanden sind	Gute Werte bei mehrachsigen Spannungszuständen; ergeben größer dimensionierte Bauteile mit höheren Sicherheiten.
Trennbruch	plastische Verformung	
Glas, Grauguss, gehärteter Stahl, Keramik	Maschinenbaustähle, Nichteisenmetalle, Messing, Aluminium, Stahlbau etc., Stähle mit ausgeprägtem Fließverhalten	

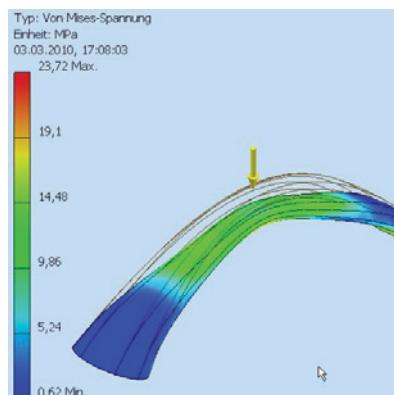
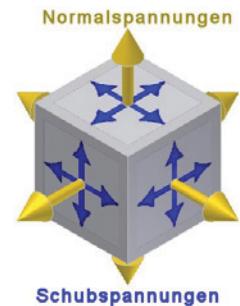
Der Inventor benutzt für seine Belastungsanalysen die **GEH** und stellt als Ergebnis die **Von-Mises-Spannung** [Richard Edler von Mises (1883-1953)] vorne an.

4.8.2 Spannungen

Die klassische Festigkeit von Werkstoffen wird über die Normal- und Schubspannungen ermittelt, die (z.B. im Inventor nach der GEH) zu Vergleichsspannungen umgerechnet werden.



HINWEIS: Eine Vergleichsspannung bezeichnet eine gedachte einachsige Spannung, die dieselbe Materialbeanspruchung bewirken würde wie der reale, mehrachsige Spannungszustand.



Die Von-Mises-Spannung ist die Vergleichsspannung, welche die gleiche Gestaltänderungsenergie hervorruft wie eine eindimensionale Spannung.



HINWEIS: Die Von-Mises-Spannung ist ein Skalar und hat keine Richtung.

Ergebnisse
Von Mises-Spannung
1. Hauptspannung
3. Hauptspannung
Verschiebung
Sicherheitsfaktor

Von-Mises-Spannung und Hauptspannungen

Spannung
Spannung XX
Spannung XY
Spannung XZ
Spannung YY
Spannung YZ
Spannung ZZ

Die unter der Von-Mises-Spannung angezeigten Hauptspannungen stehen senkrecht aufeinander und haben die Richtung, in denen die Schubspannungen null sind. Damit sind das die Richtungen der maximalen Normalspannungen, die allerdings mit dem geometrischen Koordinatensystem des Inventors nichts zu tun haben. Die Richtungen der Hauptspannungen ergeben sich aus den Größen der einzelnen Normal- und Schubspannungen. Die drei Hauptspannungen werden ihrer Größe nach geordnet.

Die 1. HAUPTSPANNUNG ist die maximale Normalspannung. Sie kann nach der NH auch für die Bemessung spröder Werkstoffe herangezogen werden.

Die 3. HAUPTSPANNUNG ist die kleinste Normalspannung, die häufig auch negative Werte annimmt.

Im Ordner SPANNUNG werden die Spannungen nach dem Inventor-Koordinatensystem geordnet angezeigt.

Die drei auftretenden Normalspannungen, SPANNUNG XX, SPANNUNG YY und SPANNUNG ZZ, und die drei Schubspannungen, SPANNUNG XY, SPANNUNG YZ und SPANNUNG XZ, definieren die Spannungszustände. Zug-Normalspannungen sind positiv, auftretende normale Druckbeanspruchungen sind negativ. Schubspannungen sind positiv, wenn sich ihre beiden definierenden positiven Achsen gegeneinander drehen (nach der Rechte-Hand-Regel).

4.8.3 Verformungen



Die VERSCHIEBUNG gibt die Verformung in mm an. Sie wird in der Belastungsanalyse als Näherung errechnet und gibt die ungefähren Werte als Gesamtverschiebung sowie in den drei Hauptachsen des Koordinatensystems zurück.

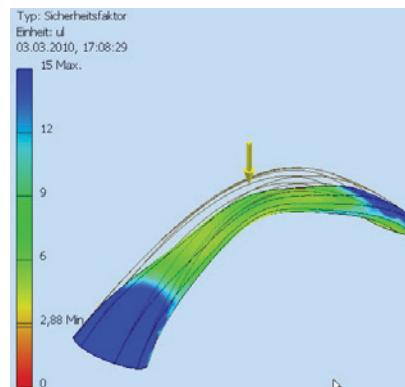
In der Modalanalyse, der Ermittlung der Eigenfrequenz eines Bauteils, gibt sie nur die Richtung der Verformung und die entsprechenden Frequenzen zurück, der Verformungsweg ist lediglich ein Anhaltswert und kann nicht als tatsächliche Verformung interpretiert werden.

4.8.4 Sicherheitsfaktoren, Belastung / Dehnung



Materialien zuweisen			
Komponente	Originalmaterial	Material der Überschreibung	Sicherheitsfaktor
Pendeltür_Angeln.iam			
Angelbuchse ohne Kerb	Stahl	Geschweißtes Aluminium	Zerreißfestigkeit
Angelbuchse mit Kerb	Stahl	(wie definiert)	Streckgrenze
Türblatt:1	Stahl	(wie definiert)	Streckgrenze

Im Dialogfenster der Materialzuweisung ist eingestellt, zu welchem Wert der Sicherheitsfaktor in Relation gesetzt wird.

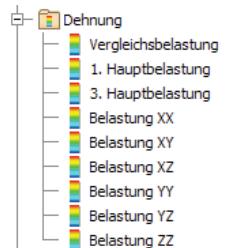


Bei Bauteilen wird der Sicherheitsfaktor entweder im Verhältnis zur Streckgrenze oder zur Zerreißfestigkeit des Werkstoffs angegeben.

Bei Baugruppen wird grundsätzlich jeweils eine Angabe für alle Bauteile gesetzt. Bekommen einzelne Bauteile in dieser Umgebung ein anderes Material per Überschreibung zugewiesen, dann kann diesen Teilen auch eine einzelne Relationsangabe zugewiesen werden.

Belastung = Dehnung! Der Übersetzer hat mal wieder zugeschlagen. Das, was im Objektbrowser als Belastung angezeigt wird, ist in Wirklichkeit die Dehnung ϵ , die sich über den E-Modul und die Spannung ergibt ($\sigma = \epsilon \times E$).

Die Werte $\epsilon = \Delta L / L_0$ sind proportional zu den entsprechenden Spannungen und ergeben somit auch dieselben grafischen Darstellungen. Die Bedeutung der verschiedenen Einträge im Ordner kann unter Spannungen nachgelesen werden, sie sind identisch. Die Dehnung hat keine Einheit bzw. wird in Prozent angegeben.



4.8.5 Kontaktdruck

Der Ordner KONTAKTDRUCK wird nur dann angezeigt, wenn eine Baugruppe mit mehreren verbundenen Teilen aktiv ist oder wenn ein Bauteil aus mehreren Volumenkörpern besteht, die per Kontakte miteinander verbunden sind.

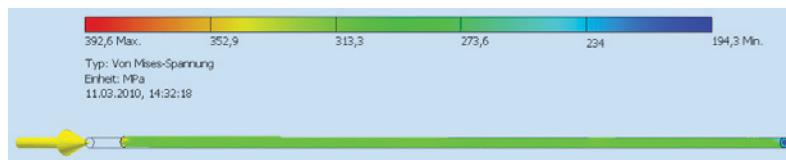
Er gibt den Druck in MPa an den Grenzflächen als Summe sowie in die drei Koordinaten- systemrichtungen zerlegt an.



4.8.6 Knicken und Beulen

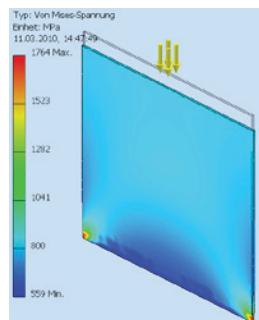
Es ist bekannt, dass die Belastungen Knicken und Beulen nicht zu den festigkeitsmäßigen Beanspruchungen, sondern zu den Stabilitätsproblemen gehören. Die in den Inventor eingebundene FEM-Berechnung beinhaltet die Berechnung dieser Bauteilanstrengungen nicht und berücksichtigt somit diese Gefahren bei der Analyse ebenfalls nicht.

Die beiden folgenden Beispiele, bei denen sicher zu vermuten ist, dass die entsprechenden Bauteile knicken oder ausbeulen, sollen dies verdeutlichen.



Das erste Beispiel zeigt eine irrgreiche Belastung eines knickgefährdeten Bauteils.

Ein Rundstahlstab mit dem Durchmesser 2 mm und einer Länge von 200 mm ist an der unteren Kreisfläche (Stirnfläche) festgelegt und wird mit einer Kraft von 10 kN, die auf die obere Kreisfläche (Stirnfläche) wirkt, auf Druck belastet. Die Von-Mises-Spannung wird mit über 300 N/mm² und die Verschiebung mit über 3 mm (Stauchung) angegeben, eine Knickung findet angeblich nicht statt. Diese Ergebnisse sind völlig irrelevant.



Ebenso das zweite Beispiel: Ein Stahlblech mit den Abmessungen 100 x 100 mm und einer Dicke von 1 mm wird an seiner einen Längsfläche (100 x 1 mm) mit einem Druck von 1000 MPa (1 kN/mm²) belastet. Die Von-Mises-Spannung wird zwischen 500 und 1500 N/mm² angegeben, und eine Stauchung wird mit 0,5 mm berechnet. Auch hier findet das Beulen angeblich nicht statt.

■ 4.9 Grenzen der Inventor-Mechanik

Alleskönner kontra
Spezialisten

Es ist halt wie im täglichen Leben: Es gibt Alleskönner und Spezialisten. Die Alleskönner können zwar viel, kommen aber meist über kurz oder lang an ihre Grenzen, an denen sie dann hängen und nicht mehr weiter wissen. Die Spezialisten dagegen können in der Regel nicht so umfassend viel, aber was sie können, das geht sehr in die Tiefe.

So ähnlich verhält es sich im Bereich der FEM und der dynamischen Simulation zwischen dem Alleskönner Inventor und speziellen FEM- bzw. Simulationsprogrammen.



HINWEIS: Die im Folgenden aufgezählten Begrenzungen im Inventor sind in der Inventor-Hilfe meist nicht dokumentiert, und insofern obliegt es dem Anwender selbst, deren Einflüsse auf die Festigkeit von Bauteilen und Baugruppen zu erkennen und in der praktischen Auslegung zu berücksichtigen.

Beulen und Knicken

Die Beul- und Knickgefahr wird weder erkannt noch behandelt. Diese Stabilitätsproblematik wurde in Abschnitt 4.8.6 dargelegt.

Temperatureinflüsse

Die Auswirkung von Wärme wird gleich mehrfach nicht berücksichtigt. Wärmewirkungen treten in mehreren Zusammenhängen auf.

- Betriebstemperatur, Umgebungstemperatur
- Erwärmung durch Schwingungen
- Wärmeausdehnungen
- Reibungswärme

Die folgenden Einflüsse von Temperaturen auf Bauteile sind ggf. von Hand zu berücksichtigen.

- Die Wärme verändert das Werkstoffgefüge und damit die zulässigen Spannungen.
- Bauteile verändern ihre Geometrie infolge von Erwärmungen.
- Wärme verändert in bewegten Baugruppen das Zusammenspiel der Teile und z.B. auch die Reibungskennwerte.

Grenzen der GEH

Die Gestaltänderungsenergiehypothese, nach der Inventor die Von-Mises-Spannung berechnet, geht davon aus, dass Werkstoffe einen einheitlichen E-Modul haben, d.h., die Querkontraktion von Werkstoffen muss in alle Richtungen gleich sein.

Sie ist somit nicht dafür geeignet, Faser- und bestimmte Verbundwerkstoffe (Glasfaser, Kohlefaser etc.) richtig zu berechnen.

Des Weiteren ist die GEH grundsätzlich nicht anwendbar, wenn gleich große Spannungen in allen drei Raumrichtungen vorhanden sind, da die Von-Mises-Vergleichsspannung dann gegen null geht.

FEM-Genauigkeit

Neben der systematischen Ungenauigkeit, die allen FEM-Systemen innewohnt und die an der endlichen Netzmashenanzahl liegt, gibt es noch eine Reihe anderer Ursachen, die zum Teil vermeidbar sind, jedoch immer wieder auch zu fehlerhaften Berechnungen führen.

Sollte mit der FEM ein genaues Ergebnis erzielt werden, so müssten die Netzmashen unendlich klein und die Knotenanzahl unendlich hoch sein. Die Rechenzeit dafür wäre unendlich lang. Dieses Problem ist zum Teil mit Korrekturfaktoren über Interpolation in den Griff zu bekommen.

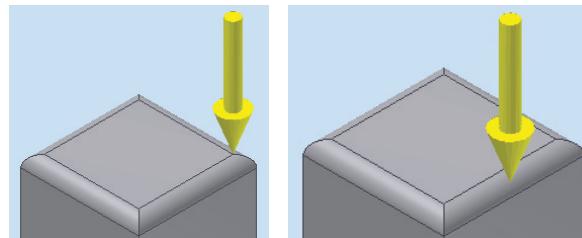
Im Inventor können teils Abhilfemaßnahmen ergriffen werden, indem Netze dort lokal verfeinert werden, wo es notwendig erscheint, und die Konvergenzeinstellungen optimiert werden.

In Kapitel 5 wird auf diese Zusammenhänge intensiver eingegangen.

Die Genauigkeit der Berechnungen ist jedoch auch von anderen, beeinflussbaren Ursachen abhängig, die unter Randbedingungen zusammengefasst werden können.

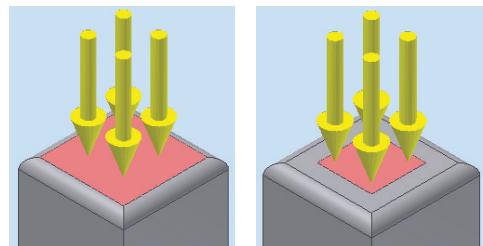
- Lastangriffsbedingungen bzw. -übergänge
- Lagerbedingungen, Einspannungen,
- Kontaktbedingungen
- Materialdaten
- usw.

Es ist in diesem Zusammenhang daran zu erinnern, dass z.B. Punktlasten und Punktauflager in der Realität niemals vorkommen. Es gibt nur elastische, verteilte Lagerungen und verteilte Lasten.



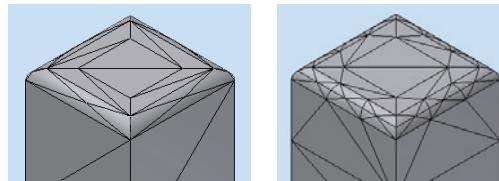
Abhängigkeiten und Kraftangriffe an Punkten oder an schmalen Kanten oder Radien, wie in den obigen Abbildungen gezeigt, sind nach Möglichkeit zu vermeiden, da sie häufig zu unrealistischen Ergebnissen führen.

Soll, wie im folgenden Beispiel gezeigt, ein Druck oder eine Kraft nicht auf eine ganze Fläche wirken, so kann in der Bauteilumgebung mithilfe der Funktion **TRENNEN** ein Flächenabschnitt definiert werden. Die Kraft kann dann auf diesen Flächenabschnitt positioniert sein.



Das Bauteil nimmt durch diese Flächenaufteilung keinen Schaden, es bleibt festigkeitsmäßig und geometrisch unverändert, d.h., die Ergebnisse einer Simulation werden dadurch nicht negativ beeinflusst.

Kommt es in bestimmten Bereichen eines Bauteils auf eine erhöhte Genauigkeit an, weil an diesen Stellen u.U. mit Gefährdungen zu rechnen ist, so empfiehlt sich, das Netz an diesen Stellen mittels der Funktion **LOKALE NETZSTEUERUNG** zu verfeinern.



Im obigen Beispiel wurden lediglich die Radien zur Verfeinerung der Maschengröße von 10 mm auf 3 mm ausgewählt. Die angrenzenden Bereiche werden als Übergang automatisch mit angepasst.



HINWEIS: Weitere Problemberiche, die zu Ungenauigkeiten in der FE-Analyse führen können, werden am Ende von Kapitel 5, [Die Materialbibliothek](#), in Abschnitt 5.7, [Problematische Materialien in der FEM](#), beschrieben.

5

Die Materialbibliothek

Da in die Ergebnisse einer FE-Analyse neben der Bauteilgeometrie vor allem auch die Werkstoffkennwerte einfließen, ist ein kurzer Ausflug in die Inventor-Materialverwaltung unabdingbar.

■ 5.1 Der neue Materialien-Browser

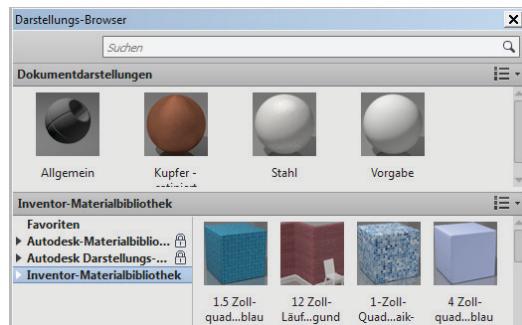
Der MATERIALIEN-BROWSER und -EDITOR wurden in der Inventor-Version 2013 völlig neu gestaltet. Die Materialverwaltung wurde aus dem Stil-Editor der früheren Versionen ausgegliedert und ist jetzt ein eigenständiger Programmteil, der mit einigen neuen Funktionen sehr viel übersichtlicher und intuitiv bedienbarer geworden ist.

Neu ist vor allem die Integration und Verwaltung verschiedener Bibliotheken. So gibt es neben der Inventor-Materialbibliothek die Autodesk-Materialbibliothek, Favoriten und die Möglichkeit, eigene Materialbibliotheken zu erstellen.

Materialien sind jetzt in Kategorien zusammengefasst, wodurch die Auswahl sehr viel übersichtlicher erfolgen kann. Sie können auch eigene Kategorien erzeugen.

Kombiniert ist die Materialverwaltung in der Funktionsgruppe MATERIAL UND DARSTELLUNG mit dem DARSTELLUNG-BROWSER, in dem Sie die optische Präsentation des Werkstoffs vielfältig anpassen können.

The screenshot displays the Inventor Material Browser interface. At the top, the 'Eigene Materialien' (Own Materials) window is open, showing a list of material categories: 'Autodesk-Materialbibliothek', 'Inventor-Materialbibliothek' (selected), and 'Eigene Materialien'. The 'Inventor-Materialbibliothek' section shows a material entry for 'SR 355 J2' with a lock icon. Below this, the 'Inventor-Materialbibliothek: Metall/Stahl' table lists various steel materials categorized by type (Beton, Flüssigkeit, Glas, Holz, Keramik, Kunststoff, Metall, Metall/Aluminium, Metall/Eisen, Metall/geschweißt, Metall/Stahl, physisches Material, Versch.) and properties (Name, Kategorie, Metall: Stahl). To the right, a context menu for the 'Inventor-Materialbibliothek' is shown, with 'Kategorie erstellen' (Create Category) highlighted. At the bottom, the 'Material und Darstellung' (Material and Representation) browser is visible, showing tabs for 'Allgemein' (General), 'Vorgabe' (Default), and 'Material und Darstellung' (Material and Representation).



■ 5.2 Der „alte“ Stil- und Normen-Editor



Den Stil-Editor gibt es es zwar noch, mit ihm werden im Inventor ab 2013 jedoch nur noch die Beleuchtungsstile bzw. in der Zeichnungsumgebung die Zeichnungsnormen verwaltet. Benutzer früherer Inventor-Versionen müssen deswegen nicht verzweifeln. Die meisten Funktionen der neuen Material- und Darstellungsoptionen existierten auch schon im alten Stil-Editor. Fast alle der nachfolgend erklärten Aktionen können Sie, mit etwas anderen Bedienelementen, auch im alten Stil-Editor durchführen.

Außerdem können Sie auch die Stildefinitionen älterer Inventor-Versionen in die neue Umgebung importieren. In Abschnitt 5.6 werden wir Ihnen diesen Vorgang beschreiben.

■ 5.3 Mit Materialien und Darstellungen arbeiten

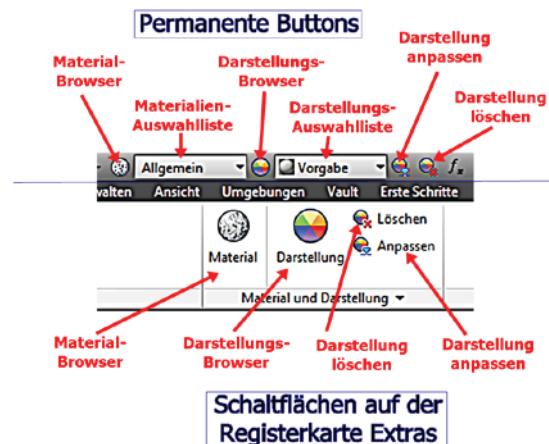
Da für die FE-Analyse die Materialeigenschaften am wichtigsten sind, soll auch mit diesen begonnen werden.

5.3.1 Übersicht

Im ersten Moment erscheint die Vielzahl der Buttons etwas verwirrend, bei genauerer Betrachtung erweist sie sich jedoch als recht sinnvoll.

In der oberen schmalen Menüleiste befinden sich die häufig benötigten Auswahllisten für die Materialien und deren Aussehen. Davor, dazwischen und dahinter sind die kleinen Schaltflächen für die nicht so häufig benötigten Funktionen der Browser und der Änderungs- bzw. Löschfunktion angebracht.

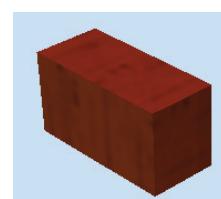
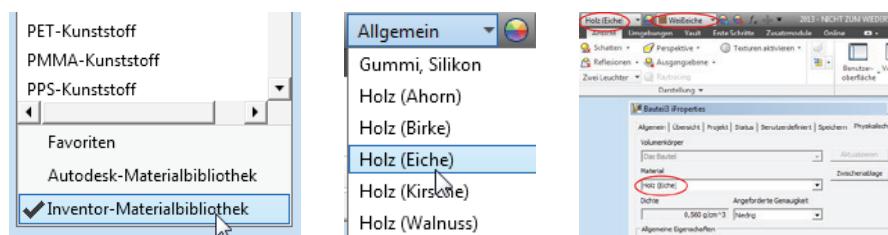
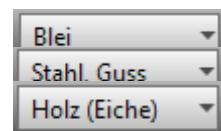
Diese Menüleiste ist in allen Arbeitsbereichen sichtbar, egal welche Registerkarte aktiv ist.



Auf der Registerkarte EXTRAS befindet sich die Funktionsgruppe MATERIAL UND DARSTELLUNG, in der Sie alle Funktionen – bis auf die Auswahllisten – ebenfalls anwählen können.

5.3.1.1 Material-Auswahlliste

Die MATERIAL-AUSWAHLLISTE wird die am häufigsten benötigte Funktion sein. Im unteren Bereich der Liste können Sie die zu verwendende Material-Bibliothek auswählen. In der Abbildung ist die INVENTOR-MATERIALBIBLIOTHEK aktiv. Die Werkstoffe der entsprechenden Auswahl erscheinen in der Auswahlliste.



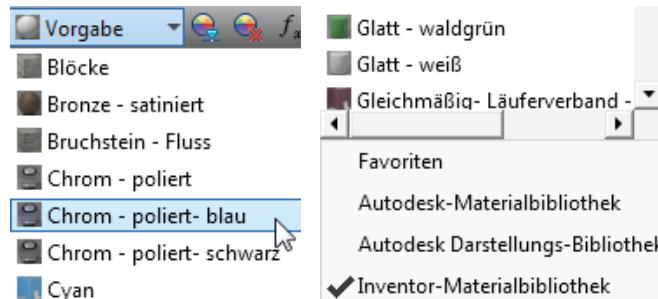
Wird ein Material selektiert, dann resultieren daraus mehrere Aktionen:

- Das Bauteil bekommt diesen Werkstoff zugewiesen, die Bauteilflächen werden entsprechend dargestellt.
- In der Darstellungs-Auswahlliste wird die zu diesem Material passende Darstellung automatisch selektiert und angezeigt.
- In die iProperties des Bauteils werden neben dem Namen auch die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffes eingetragen.

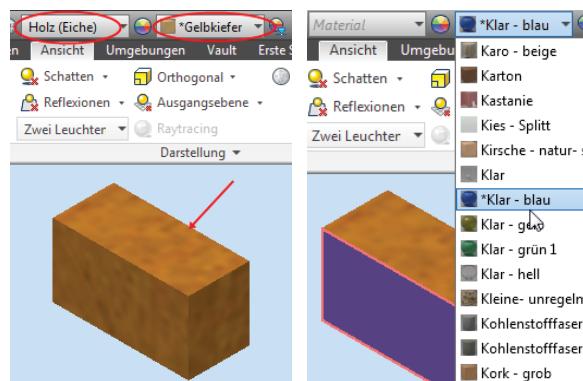


TIPP: Ist eine Fläche des Bauteils markiert, dann wird in der Material-Auswahlliste kein Werkstoff angezeigt. Einzelne Flächen können nur in ihrer Darstellung verändert werden.

5.3.1.2 Darstellungs-Auswahlliste



In der DARSTELLUNGS-AUSWAHLLISTE können Sie im unteren Bereich ebenfalls die zu verwendende Darstellungs-Bibliothek auswählen. In der Abbildung ist die INVENTOR-MATERIALBIBLIOTHEK aktiv. Die Darstellung der entsprechenden Auswahl erscheint in der Auswahlliste.



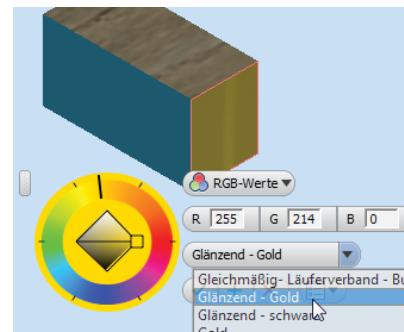
- Ist während der Selektion in dieser Liste kein Element (keine Fläche) des Bauteils markiert, dann wird, wie im vorangegangenen linken Bild zu sehen, das ganze Bauteil mit dieser Darstellung überzogen. Im Beispiel wurde der Quader, der die physikalischen Eigenschaften der Eiche zugewiesen bekam, mit der optischen Darstellung einer Gelbkiefer ausgestattet.
- Sind während der Selektion in dieser Liste ein oder mehrere Elemente (Flächen) des Bauteils markiert, dann erhalten, wie im vorangegangenen rechten Bild zu sehen, nur die markierten Elemente diese Darstellung.

5.3.1.3 Darstellung anpassen

Mit der Funktion DARSTELLUNG ANPASSEN erscheint eine komfortable Farbauswahl, in der Sie Farbwerte nach RGB oder HSL (Farbton | Hue, Sättigung | Saturation, Intensität | Luminanz) einstellen oder auch Darstellungsvarianten aus der Liste auswählen können. RGB- oder HSL-Werte können Sie auch direkt eingeben.



Ist kein Element am Bauteil aktiv, dann erscheint am Cursor eine Pipette, mit der ein Farbton am Bildschirm ausgewählt werden kann.



Anpassen

Der gewählte Farbton wird in der Farbauswahl eingestellt und kann danach beliebigen Elementen zugewiesen werden.



Sobald ein oder mehrere Elemente am Bauteil markiert sind oder mit der Pipette eine Auswahl getroffen wurde, erscheint am Cursor die Farbkanne, mit der Sie die entsprechenden oder zu selektierenden Elemente einfärben können.

5.3.1.4 Darstellung löschen



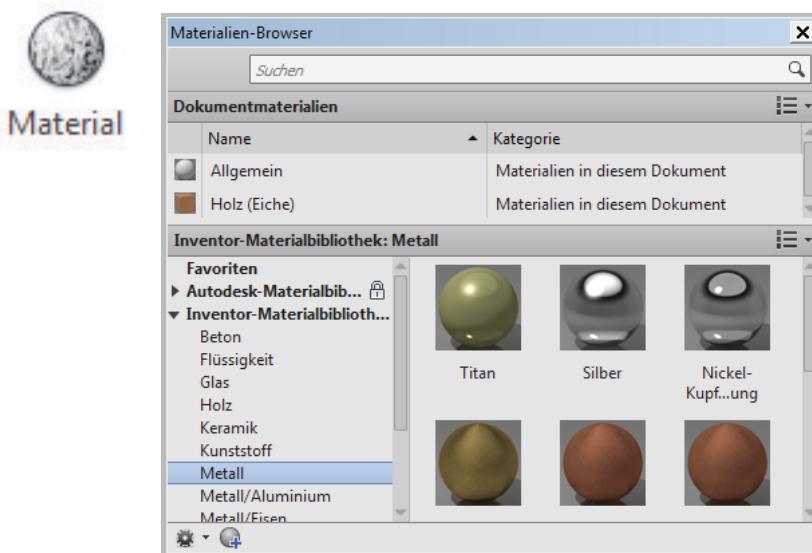
Mit dem Aufruf der Funktion DARSTELLUNG LÖSCHEN entfernen Sie die Darstellungszuweisungen von den ausgewählten Elementen.

Löschen



HINWEIS: Nach dem Löschen einer Darstellung bekommt das entsprechende Element wieder den Farbton zugewiesen, der dem Material zugeordnet ist.

5.3.1.5 Materialien-Browser



Der Aufruf des MATERIALIEN-BROWSERS ist vor allem dann sinnvoll, wenn Sie grund-sätzliche Änderungen an der Materialverwaltung vornehmen möchten.

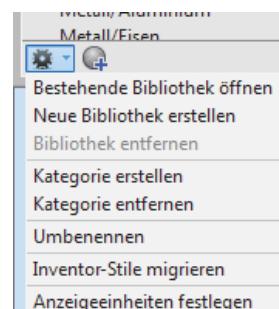
Die Anzeige umfasst im oberen Bereich die Materialien, die im geöffneten und aktiven Dokument verwendet werden bzw. dem Dokument zugeordnet sind.

Im linken Fensterbereich werden die zur Verfügung stehenden Bibliotheken und die diesen Bibliotheken zugeordneten Kategorien zur Auswahl angeboten.

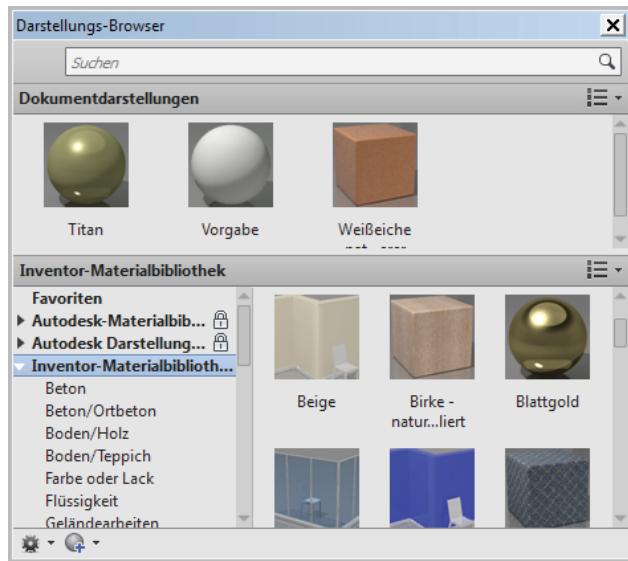
Im rechten Bereich sind die Materialien der selektierten Kategorie in Form einer Explorer-Liste dargestellt. Diese Liste können Sie mit Miniaturen oder als Listen- oder Textansicht aufrufen.

Zusätzlich mögliche Aktionen in diesem Fenster sind:

- Ein Doppelklick auf ein Material öffnet den MATERIAL-EDITOR, in dem Sie alle Eigenschaften des Werkstoffes, sowohl die technischen als auch die optischen, betrachten und ändern können.
- Die Schaltfläche in der unteren linken Ecke des Dialogfensters öffnet ein Abrollmenü, über das Sie u.a. eine **neue Bibliothek** oder eine **neue Kategorie** erstellen können. Außerdem können Sie hier Umbenennungen, Stil-Migrationen etc. durchführen.
- Mit der zweiten Schaltfläche in der unteren linken Ecke des Dialogfensters können Sie **neue Materialien erstellen** und der geöffneten Bibliothek hinzufügen.



5.3.1.6 Darstellungs-Browser



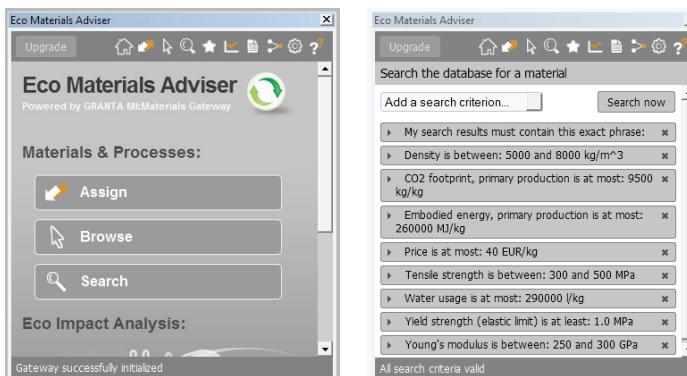
Der DARSTELLUNGS-BROWSER entspricht in seinem Aufbau dem Material-Browser, nur dass Sie hier anstelle der Werkstoffe die optischen Darstellungsmöglichkeiten, **unabhängig von Materialien**, betrachten, auswählen und ändern können.

Die Funktionen dieses Browsers sind ebenfalls mit denen des Material-Browsers identisch. Sie können zwischen verschiedenen Bibliotheken auswählen. Ein Doppelklick auf eine Darstellung öffnet den Darstellungs-Editor. Hier können Sie neue Bibliotheken und Kategorien anlegen oder vorhandene umbenennen.



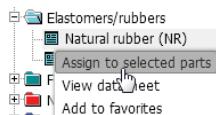
Darstellung

■ 5.4 Der Eco Materials Adviser



Eco Materials Adviser

Der seit der Inventor-Version 2012 integrierte ECO MATERIALS ADVISER arbeitet mit der neuen Materialverwaltung exzellent zusammen.



Während Sie im [Materialien-Browser](#) nur nach Materialbezeichnungen suchen können, sind die Material-Selektionskriterien im [Eco Materials Adviser](#) sehr viel umfangreicher. Vom CO₂-Ausstoß und Wasserverbrauch in der Herstellung bis hin zu den Festigkeitswerten können Sie alle wichtigen Kriterien von Werkstoffen sichten.

Mit der Funktion ASSIGN TO SELECTED PARTS wird ein ausgewähltes Material dem Bauteil zugewiesen.



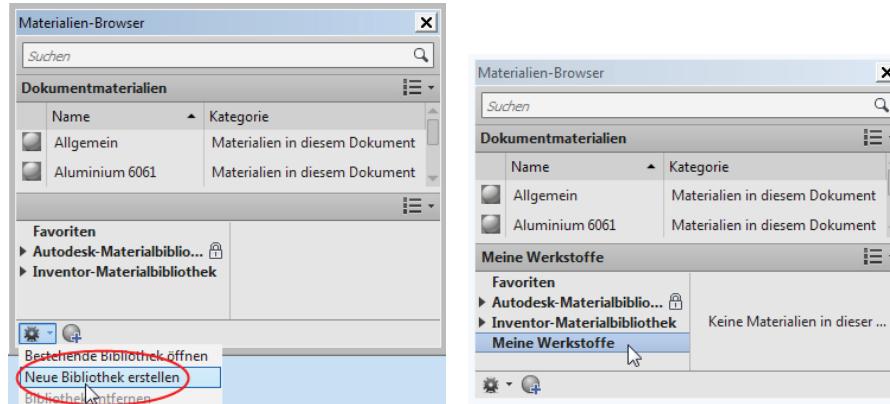
HINWEIS: Der Eco Materials Adviser korrespondiert direkt mit der Inventor-Materialverwaltung, d.h., nach einer Zuweisung ist das ausgewählte Material auch in der Inventor-Materialverwaltung aktiv und kann dort ggf. bearbeitet werden.

■ 5.5 Eine eigene Bibliothek mit neuen Materialien erstellen

Es gibt einige Gründe, die dafür sprechen, sich eine eigene Bibliothek mit eigenen Werkstoffen anzulegen.

- In Unternehmen, vor allem in deren Werkzeugbau, existieren häufig Materiallisten von Werkstoffen und Halbzeugen, die bevorzugt in Konstruktionen einzusetzen sind.
- Die Werkstofflieferanten haben in der Regel ein begrenztes Angebot.
- Die üblichen (nach DIN EN 10027-1) Werkstoffbezeichnungen, z.B. SR255JR+C, finden Sie in den Autodesk-Bibliotheken nicht. In Stücklisten sind jedoch in der Regel die Normbezeichnungen einzutragen.
- Auch die Werkstoffnummern (nach DIN EN 10027-2), z.B. 1.0144 für den S275J2+N, sind in diesen Bibliotheken nicht enthalten. In Stücklisten sind jedoch ggf. auch die Werkstoffnummern einzutragen.
- Weder im Eco Materials Adviser noch in den Inventor-Bibliotheken können Sie nach Normbezeichnungen suchen.
- Die technologischen Eigenschaften der Bibliotheks-Werkstoffe weichen von genormten Werkstoffen ab, was zu verfälschten Ergebnissen bei Simulationen führen kann.

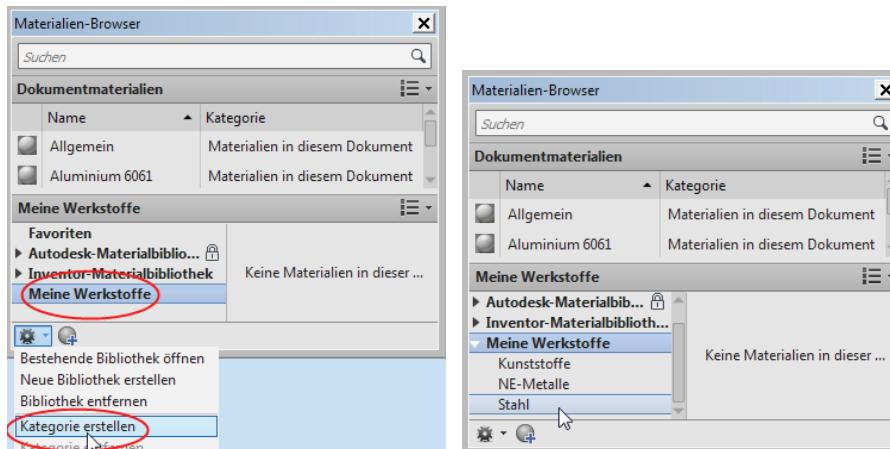
5.5.1 Eigene Bibliothek und eigene Kategorien erstellen



Der erste Schritt, das Erstellen einer neuen Bibliothek, wird über die Schaltfläche links unten im Material-Browser und mit der Auswahl im Abrollmenü NEUE BIBLIOTHEK ERSTELLEN gestartet.

Der Windows-Explorer öffnet sich und Sie vergeben einen Namen für diese Bibliothek, der den Windows-Dateinamenskonventionen entsprechen muss, weil gleichzeitig mit diesem Schritt eine neue Bibliotheksdatei mit der Endung ***.adsklib** (Autodesk Library) erstellt wird.

Da diese Bibliothek, die im beschriebenen Beispiel den Namen **Meine Werkstoffe** bekam, noch keine Kategorien enthält, besteht der zweite Schritt darin, dieser Bibliothek neue Kategorien zuzuweisen.



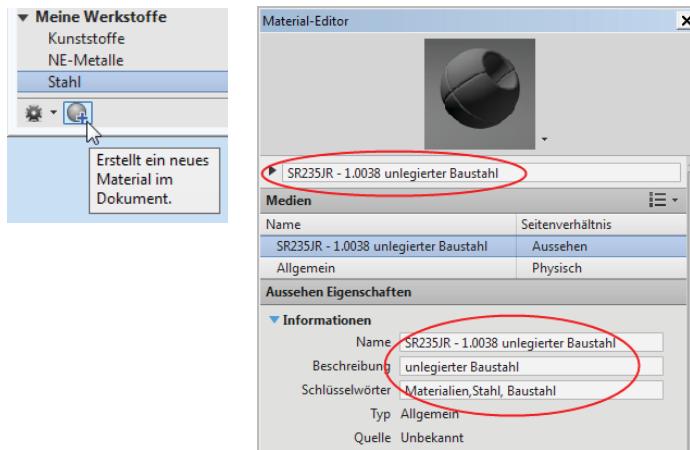
Die erstellten Kategorien werden sofort der selektierten Bibliothek zugeordnet und erscheinen im Material-Browser.

5.5.2 Ein neues Material definieren

Das Hinzufügen eines neuen Werkstoffes zu einer Bibliothek erfolgt in mehreren Schritten.

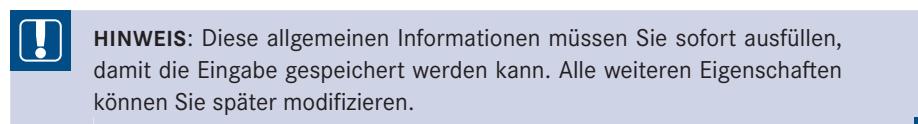
1. Sie benennen zuerst ein neues Material und weisen es dem geöffneten und aktiven Dokument zu.
2. Danach fügen Sie dieses Material einer Bibliotheks-Kategorie hinzu.
3. Abschließend definieren Sie die technologischen und die optischen Eigenschaften des neuen Materials.

5.5.2.1 Material erstellen

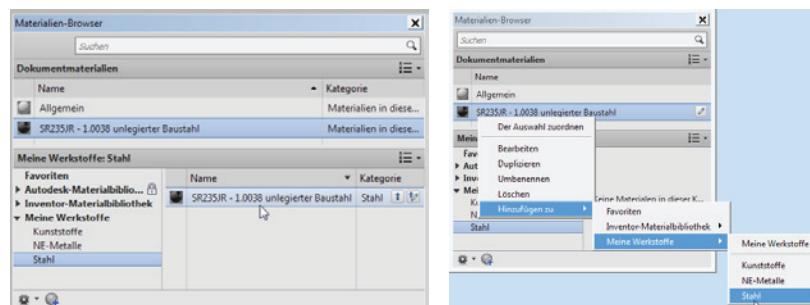


Nach dem Klick auf die Schaltfläche ERSTELLT NEUES MATERIAL IM DOKUMENT öffnet sich der Material-Editor, in dem Sie die Bezeichnung in der obersten Zeile und allgemeine Informationen eingeben müssen.

Im Beispiel haben wir die Bezeichnung, die auch als Name eingegeben wurde, **SR235JR - 1.0038 unlegierter Baustahl** gewählt, weil nach den Bestandteilen dieser Bezeichnung später auch gesucht werden kann. So ist es möglich, z.B. nur nach **SR** oder **235** oder **1.0038** oder **Baustahl** zu suchen, um diesen Werkstoff in einer umfangreichen Bibliothek schnell finden zu können.



5.5.2.2 Material der eigenen Bibliothek zuweisen

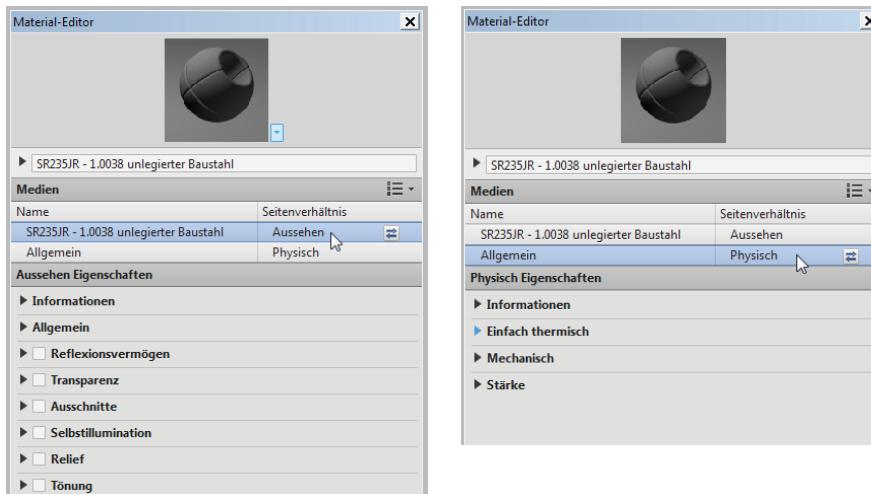


Der vorher gespeicherte Werkstoff wird den [Dokumentmaterialien](#), die im oberen Bereich des Materialien-Browsers angezeigt werden, zugewiesen und ist somit im aktiven Bauteil sofort verfügbar.

Mithilfe des Kontextmenüs dieses neuen Werkstoffes wird das Material über HINZUFÜGEN ZU → MEINE WERKSTOFFE → STAHL in der eigenen Bibliothek [Meine Werkstoffe](#) in der Kategorie [Stahl](#) gespeichert und ist ab nun auch generell verfügbar.

5.5.2.3 Eigenschaften des neuen Materials

Ein Doppelklick auf den Werkstoff-Eintrag im Materialien-Viewer öffnet den Material-Editor, in dem Sie jetzt alle weiteren Eigenschaften definieren können.



Der Material-Editor unterscheidet zwei Eigenschaftsbereiche: das AUSSEHEN (linkes Bild) und die physischen Eigenschaften (PHYSISCH, rechtes Bild).

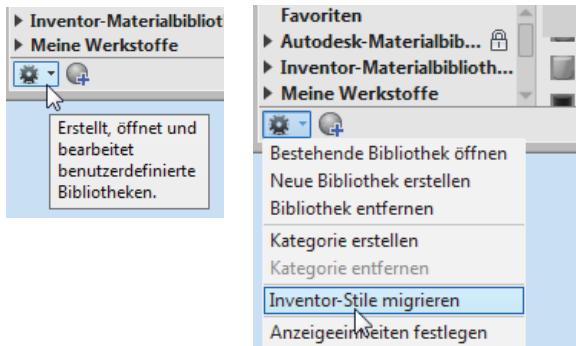
Je nach Auswahl werden im unteren Bereich des Dialogfensters die jeweiligen Eigenschaften, zu denen Sie vielfältige Angaben machen können, angezeigt.

Aufgrund des Umfangs der Definitionsmöglichkeiten und der begrenzten Erkenntnisse, die daraus gewonnen werden können, wurden für unser Beispiel nur die physikalischen Eigenschaften MECHANISCH und STÄRKE mit Einträgen versehen.

Diese Werte werden somit auch für nachfolgende Berechnungen im Abschnitt FE-Analysen und bei den dynamischen Simulationen herangezogen.



■ 5.6 Migration von Stilen älterer Versionen



Die früher vorhandene Export-Funktion für Stil-Definitionen existiert leider nicht mehr. Allerdings wird diese Funktion auch nicht mehr benötigt, denn alle Stile werden in eigenen Dateien gespeichert, die natürlich transportiert werden können.

Stil- bzw. Bibliotheksdateien werden mit der Dateiendung *.adsklib (für Autodesk Library) gespeichert. Die in Abschnitt 5.5 angelegte Bibliothek **Eigene Materialien** wird in der Datei **Eigene Materialien.adsklib** gespeichert, die sich standardmäßig im Ordner **C:\Users\Public\Documents\Autodesk\Inventor 2013\Design Data** befinden sollte.

Eine Migration starten Sie über das Verwaltungs-Icon im Materialien-Browser und den Eintrag **INVENTOR-STILE MIGRIEREN**.

Bezüglich der Einträge sollten Sie wissen, in welchen Ordnern der Inventor die Bibliotheken speichert. Die Dateinamen müssen Sie nicht angeben, denn die sucht das Migrationstool automatisch. Es ist jedoch von Vorteil, die Namen zu kennen, damit Sie im Bedarfsfall mit dem Windows-Explorer danach suchen können.

Betroffen sind folgenden Bibliotheken:

- **Materials.xml** und
- **Colors.xml**

Der Ordner, in dem auch frühere Inventor-Versionen diese Bibliotheken abgelegt haben, ist z.B. für die Version 2012 standardmäßig:

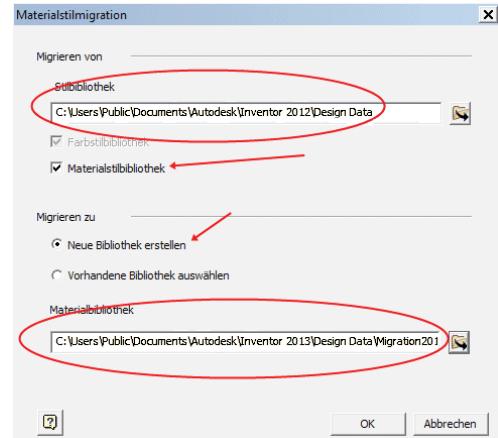
- **C:\Users\Public\Documents\Autodesk\Inventor 2012\Design Data**

Für die Version 2013 lautet der Ordner:

- **C:\Users\Public\Documents\Autodesk\Inventor 2013\Design Data**

Das folgende Vorgehen ist zielführend:

1. Für die Migration von Materialien müssen Sie das Auswahlfeld **MATERIALBIBLIOTHEK** mit einem Haken versehen.
2. In das Feld **MIGRIEREN VON → BIBLIOTHEK** tragen Sie den Ordner der zu migrierenden Bibliothek ein bzw. wählen ihn aus.
3. Danach selektieren Sie die Option **NEUE BIBLIOTHEK ERSTELLEN**.

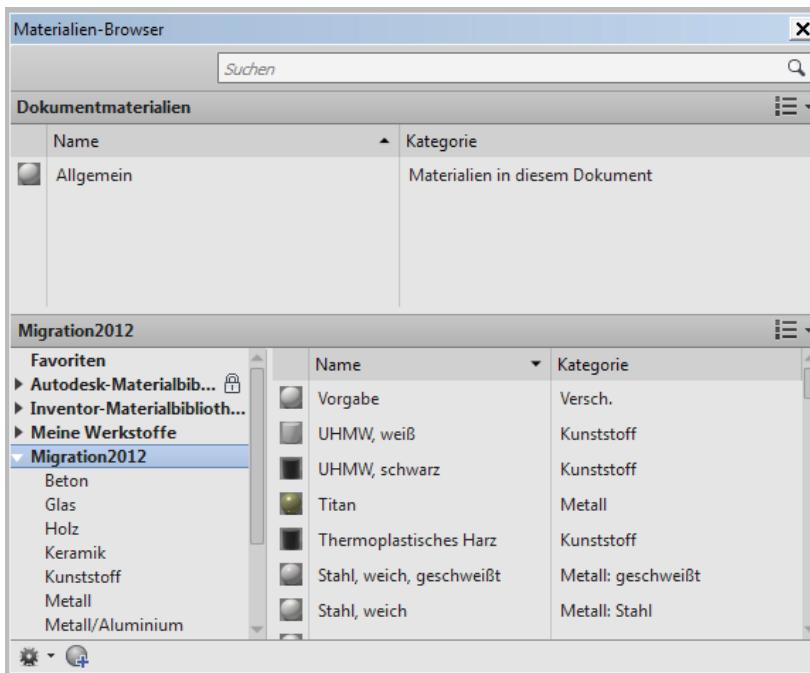
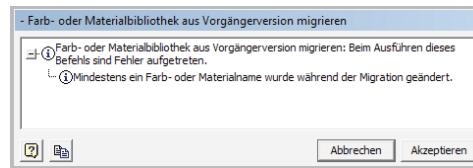


4. In das Feld MIGRIEREN ZU → MATERIALBIBLIOTHEK tragen Sie den Zielordner ein bzw. wählen ihn aus. Als neuen Bibliotheksname geben Sie z.B. MIGRATION2012 an.

Erst wenn das alles geschehen ist und das Migrationstool die „alte“ [Materials.xml](#) gefunden hat, wird der OK-Button aktiv und die Migration kann gestartet werden.

Entsprechend können Sie mit der „alten“ Datei [Colors.xml](#) verfahren, wenn Sie unter Punkt 1 das Auswahlfeld [Farbstilbibliothek](#) mit einem Haken versehen. Die Farbstile werden in die [Darstellungs-Bibliothek](#) übernommen.

Möglichweise tritt während des Migrationsvorgangs die abgebildete Fehlermeldung auf, die auf Inkonsistenzen einzelner Datensätze hinweist. Eine Abhilfe gibt es an dieser Stelle nicht, der Button **AKZEPTIEREN** führt jedoch die Migration auf den passenden Datensätze fort.



Im abgebildeten Beispiel wurde die Materialbibliothek der Version 2012 mit dem neuen Bibliotheksnamen [Migration2012](#) in den Materialien-Browser der Version 2013 eingetragen. Die Kategorien wurden richtig erstellt und die Materialien richtig zugeordnet.

■ 5.7 Problematische Materialien in der FEM



HINWEIS: In diesem Abschnitt werden Funktionen der FE-Analyse ange- sprochen, die erst in späteren Kapiteln genauer erklärt werden. Dies ist einerseits unvermeidbar, da das Thema zweifellos der Materialverwaltung angehört, andererseits aber auch unproblematisch, weil es lediglich um die Vermittlung der Grenzen der Materialverwendung geht und die Inhalte der FEM hier keine wesentliche Rolle spielen.

Wie verhält sich die FEM im Inventor, wenn in Baugruppen unterschiedliche Werkstoffe verwendet werden? Das Ergebnis ist erstaunlich korrekt.

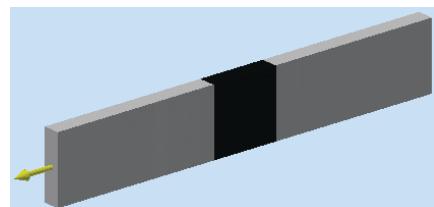
Das folgende kleine Beispiel soll dies belegen, aber auch die Grenzen der Machbarkeit aufzeigen.

5.7.1 Beispiel: Silentblock

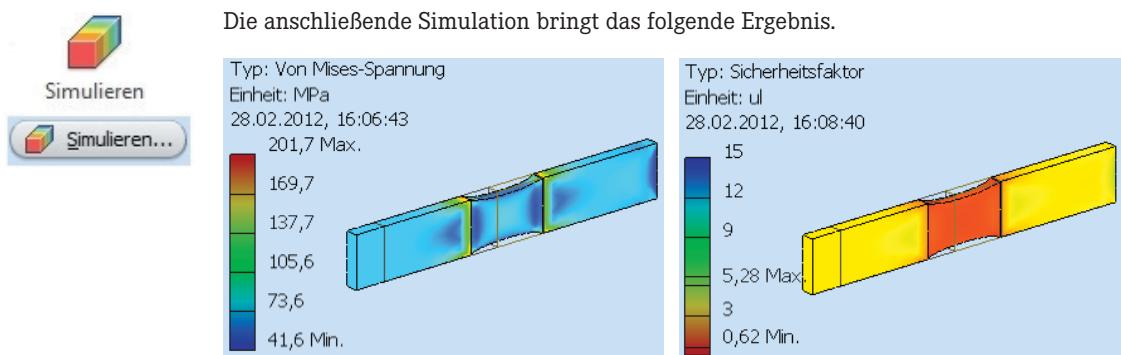


Silentblock.ipt

In der Baugruppe **Silentblock**, die sich auf der DVD zum Buch befindet, wurden zwei Flachstähle 5 X 20 X 50 MM mit einem Kunststoffblock des gleichen Querschnitts verbunden. Die hintere Stirnfläche wurde festgelegt, die vordere mit einer Zugkraft von 10 kN versehen.



Die anschließende Simulation bringt das folgende Ergebnis.

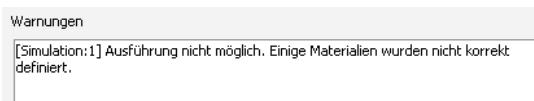


Der Kunststoffmittelteil wird so stark verlängert, dass auch die Einschnürung, die realistisch aussieht, deutlich zu sehen ist.

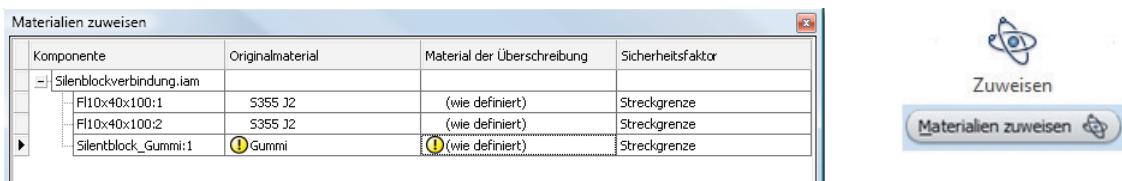
Die Darstellung des **Sicherheitsfaktors** in diesem Beispiel spricht dagegen eine unmissverständliche Sprache: Die Streckgrenze des Kunststoffs wurde deutlich überschritten.

Ob die Kräfte an den Verbindungsstellen von der Verbindungsart übertragen werden würden, bleibt ebenfalls offen. Gummi würde vulkanisiert, Kunststoff geklebt. Zumal Kleber sind in ihren zulässigen Spannungen eher im unteren Bereich angesiedelt. Man könnte ja in der Baugruppe noch jeweils eine dünne Klebeschicht zwischen dem Stahl und dem Kunststoff einbauen. An der grundsätzlichen Problematik dieses Werkstoffeinsatzes würde das aber auch nichts ändern.

5.7.2 Material ohne Kennwerte

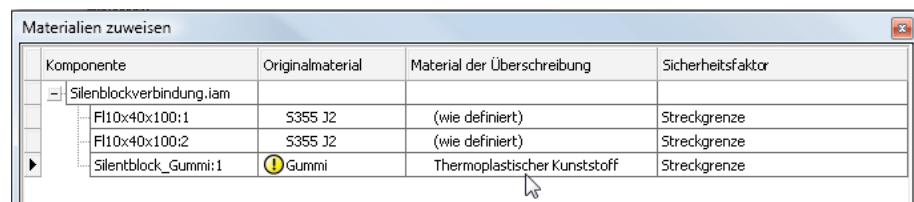


Mitunter erscheint bei Simulationen die Fehlermeldung, dass die Ausführung nicht möglich sei, weil einige Materialien nicht korrekt definiert seien. Der Hintergrund dieser Fehlermeldung, die ja bereits auf Materialprobleme hinweist, ist schnell gefunden, wenn Sie die Funktion MATERIAL ZUWEISEN aufrufen.



Als Originalmaterial wurde in der dritten Zeile **Gummi** ausgewählt, und das mag das FE-System offensichtlich nicht, was es mit dem gelben Ausrufezeichen deutlich signalisiert. Zunächst wählen wir als MATERIAL DER ÜBERSCHREIBUNG einen Werkstoff ohne Ausrufezeichen, der ähnliche Eigenschaften hat. Fündig werden wir beispielsweise beim thermoplastischen Kunststoff, den wir als neues überschriebenes Material deshalb auch auswählen.

Aus werkstofftechnologischer Sicht ist dies unverständlich, da beide Werkstoffe zwar ein unterschiedliches Elastizitätsverhalten haben, die molekulare Struktur und insbesondere die Querkontraktion sich aber durchaus ähneln.



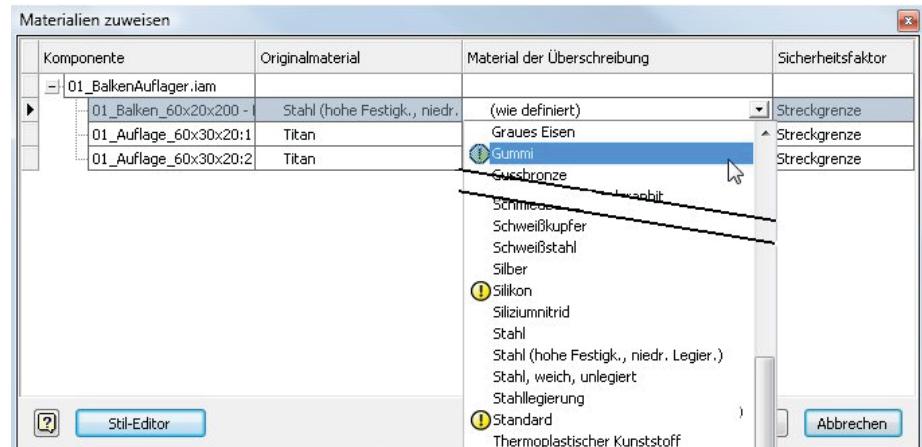
Mit diesem Material kann die Simulation problemlos durchgeführt werden.

Hintergrund des Problems

Gemäß der Voreinstellung versucht die FEM, mit den Bauteilwerkstoffwerten zu rechnen, die in den iProperties mit der Materialdefinition eingegeben wurden. Die Standardeinstellung in den iProperties ist jedoch ein Werkstoff namens **Standard** oder **Allgemein**, für den keinerlei Werkstoffdaten hinterlegt sind.



Mit der Funktion ZUWEISEN in der Befehlsguppe MATERIAL der Belastungsanalyse können Sie einem Bauteil temporär andere Werkstoffe zuweisen. Auch dieses Verfahren hat jedoch seine Grenzen, wie in der nachfolgenden Abbildung zu sehen ist.



Die Werkstoffe, die im Abrollmenü *Material der Überschreibung* mit einem Ausrufezeichen im gelben Kreis gekennzeichnet sind, können ebenfalls nicht in der FE-Analyse zum Einsatz kommen. Dies betrifft beispielsweise den schon angesprochenen Eintrag **Standard** sowie die Werkstoffe **Gummi** und **Silikon**. Die Daten dieser drei Materialien sind nachfolgend abgebildet.

Materialstil [Standard]

Als Schweißmaterial verwenden

1,000 g/cm ³	Dichte
0,000E+000 GPa	Elastizitätsmodul
0,000E+000	Poissonsche Konstante
0,000E+000 MPa	Streckgrenze
0,000E+000 MPa	Zerreißfestigkeit
0,000E+000 W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
0,000E+000 µm/(m °C)	Lineare Ausdehnung

Materialstil [Gummi]

Als Schweißmaterial verwenden

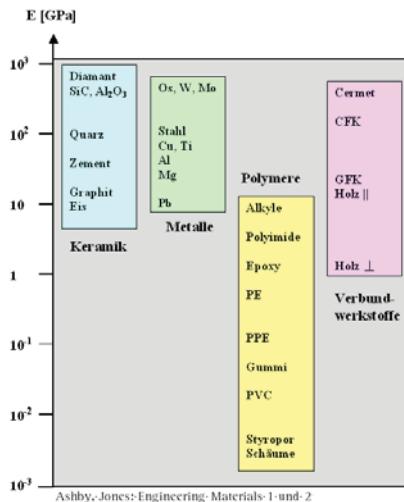
0,930 g/cm ³	Dichte
0,000E+000 GPa	Elastizitätsmodul
0,500	Poissonsche Konstante
0,000E+000 MPa	Streckgrenze
27,600 MPa	Zerreißfestigkeit
0,140 W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
0,000E+000 µm/(m °C)	Lineare Ausdehnung

Materialstil [Silikon]

Als Schweißmaterial verwenden

1,250 g/cm ³	Dichte
0,000E+000 GPa	Elastizitätsmodul
0,375	Poissonsche Konstante
10,340 MPa	Streckgrenze
3,920 MPa	Zerreißfestigkeit
0,228 W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
4,670 µm/(m °C)	Lineare Ausdehnung

Das Datenfeld, das bei keinem der drei Werkstoffe Werte enthält, ist der **Elastizitätsmodul**, der somit offensichtlich für diese Umstände verantwortlich ist.



Nun wäre es ja ein leichtes Unterfangen, im Stil- und Normen-Editor einfach E-Modul-Werte in diese Datenfelder einzutragen, und in der Tat würde sich der Inventor um die Sinnhaftigkeit dieser eingegebenen Daten überhaupt nicht scheren, sondern damit tatsächlich die FE-Berechnungen durchführen. Ashby und Jones geben dafür in *Engineering Materials*¹ durchaus Anhaltswerte. So liegt demnach der E-Modul von Gummi in etwa im Bereich von 5 bis 10 MPa.

¹ Michael Ashby/D.R.H. Jones: Engineering Materials 1. An Introduction to Properties, Applications and Design. Butterworth-Heinemann 2011 (ISBN 978-0750663809)

Wie gesagt, ob dieses Vorgehen zweckmäßig ist, das ist eine andere Frage. Dazu müssten wir uns über diese Werkstoffe, sprich Gummi und Silikon, weitergehende Gedanken machen.

■ 5.8 Nicht in der FE-Analyse verwendbare Werkstoffe

5.8.1 Polymere Werkstoffe

Polymere Werkstoffe (PE, PET, PP, PS, POM etc.), zu denen auch Gummi und Silikon aus der Untergruppe der Elastomere zählen, haben ein generell anderes elastisches Verhalten als die metallischen Werkstoffe. Einige problematische Gründe für eine FE-Anwendung im Inventor sind nachfolgend dargestellt.

- Beispielsweise ändert sich bei diesen Stoffen die Elastizität schon mit der Geschwindigkeit der Krafteinwirkung. Wird beispielsweise Gummi sehr schnell komprimiert, so setzt er der Verformung einen höheren Widerstand entgegen als bei einer langsamen Druckbelastung.
- Der Spannungs-Dehnungsverlauf, bei dem die FE-Analyse des Inventors von einer Linearität ausgeht, verläuft bei Polymeren häufig nichtlinear. Progressive, degressive und völlig unregelmäßige Kurvenverläufe kommen bei diesen Werkstoffen vor.
- Die Elastizität dieser Stoffe ist sehr stark temperaturabhängig, und sie verändern ihre Temperatur sehr schnell unter Belastungen.
- Die Verformungen sind sehr groß, wodurch sich meist Verschiebungen in der Krafteinleitung ergeben, die das Berechnungsergebnis ohnehin fraglich erscheinen lassen würden.



HINWEIS: Die Verwendung von Polymeren in einfachen FE-Analysen ist hochzweifelhaft und sollte nur dann stattfinden, wenn Sie sich dieser Problematik bewusst sind und genau wissen, was Sie tun.

5.8.2 Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe sind Materialien, die aus mindestens zwei verschiedenen Komponenten bestehen oder aus mehreren Schichten derselben Komponente mit verschiedenen Faserrichtungen.

Beispiele für Verbundwerkstoffe sind:

- Glasfaser- (GFK) oder Carbonfaser-Werkstoffe (CFK), bei denen die sehr reißfesten Fasern in Kunststoff eingebettet sind.
- Beton, ein Gemisch aus Kieselsteinen, Zement und eventuell Stahl, die alle sehr unterschiedliche Werkstoffeigenschaften haben.
- Metall-Kunststoff-Verbundwerkstoffe, die z.B. für sogenannte wartungsfreie Lagerungen eingesetzt werden, bestehen häufig aus schichtweise verklebten Stahl-, Bronze- und Kunststoffschichten.
- Holz ist zwar in seiner massiven Form kein Verbundwerkstoff, seine lange Zellulosefasern verlaufen jedoch alle in eine Richtung und sind seitlich relativ locker miteinander verbunden. Im Material-Editor ist zwar zu sehen, dass in den physikalischen Eigenschaften die **Faserrichtung** (irrtümlicherweise als **Körnung** bezeichnet) berücksichtigt ist. Eine sichere Berechnung ist dadurch jedoch nicht gegeben, zumal die Faserausrichtung in den Bauteilen eher zufällig festgelegt wird.



▼ Stärke	
Art	Quercus
Festigkeitsklasse	
Biegung	99,636 MPa
Kompression parallel zu Körnung	51,297 MPa
Kompression lotrecht zu Körnung	7,400 MPa
Schub parallel zu Körnung	13,800 MPa
Spannung parallel zu Körnung	0,000 MPa
Spannung lotrecht zu Körnung	5,500 MPa



Gegenüber idealen Verbundwerkstoffen haben die tatsächlichen Verbundmaterialien weitere Nachteile:

- Der Faserverlauf ist nicht gerade, sondern wellig oder gekurvt. Die Fasern sind beliebig angeordnet und auch nicht gleich lang.
- Anstelle von Fasern befinden sich irgendwelche dreidimensionale Körper im Material (Beton, Spanplatten etc.).

Bei diesen Werkstoffen treten zum Teil die gleichen problematischen Erscheinungen auf wie bei den Polymeren, zusätzlich jedoch noch die folgenden FE-Fehlerquellen:

- Beispielsweise der Effekt, dass der Elastizitätsmodul dieser Stoffkombinationen belastungsrichtungsabhängig ist, d.h., je nach Krafrichtung ändert sich ihre Elastizität.
- Mit der Belastungsrichtung ändert sich in der Regel auch die zulässige Belastungsgrenze.
- Das Faservolumen ist nicht homogen, d.h., sowohl die Festigkeits- als auch die Elastizitätswerte schwanken.
- Verbundwerkstoffe sind häufig porös.
- Die Längs- und Querkontraktionen sind unterschiedlich.

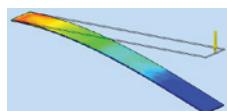
■ 5.9 Bauteile mit großen Verformungen



HINWEIS: Die in diesem Abschnitt beschriebenen Fehlerquellen gehören eigentlich ins Kapitel 4, in den Abschnitt 4.9, [Grenzen der Inventor-Mechanik](#). Weswegen sie hier beschrieben werden, liegt daran, dass die auftretenden Fehler stark materialabhängig sind und insbesondere bei den vorher beschriebenen Stoffen auftreten.

Das Problem besteht darin, dass die Stelle des Kraftangriffes bei großen Verformungsweisen häufig mit verformt wird und dadurch andere mechanische Zusammenhänge auftreten als die ursprünglich angenommenen.

Die Inventor FEM vernachlässigt diese Veränderungen nicht nur, sondern stellt in solchen Fällen die Verformung auch noch falsch dar, d.h., Bauteilverformungen werden in die laufende FE-Berechnung nicht mit einbezogen.



Zur Demonstration dieses Verhaltens soll ein einfaches dünnes Bauteil herhalten, das mit verschiedenen Werkstoffen und unterschiedlichen Belastungen der Simulation unterzogen wird.

Die optische Darstellung ist dabei immer ähnlich, gleichgültig wie groß die Kraft oder wie dick das Material ist. Auch wenn anstelle der Kraft ein Moment wirkt, wird zwar die Biegelinie eine andere, die dargestellte maximale Verformung bleibt jedoch gleich groß. Die Eigenschaft der Darstellung wäre an sich auch unproblematisch, da die Größe der Spannungen und der Verformungen in der Farbskala angegeben wird. Es gibt allerdings Grenzen, wie die folgenden Beispiele zeigen.



Das Bauteil ist einen Millimeter dick und 200 MM lang. Es wird im linken Bild mit einer tangentialen Kraft von 100.000 KN an der vorderen Stirnfläche belastet, dabei wird es laut Inventor um 24.000 KM (in Worten: vierundzwanzigtausend Kilometer) verformt. Interessant ist vor allem auch der Verformungsweg: das Bauteil wird dabei immer länger, vollzieht also nicht wie erwartet einen Kreisbogen bei der Verformung.

Ganz ähnliche Verhältnisse ergeben sich, wenn das Teil, wie im rechten Bild, mit einem reinen Drehmoment an der vorderen Stirnseite belastet wird, wodurch eine Verlängerung des Bauteils definitiv ausgeschlossen werden kann.



HINWEIS: Der Inventor bezieht also Verformungen, die während einer Simulation auftreten, nicht mit in die Belastungsanalyse ein.

6

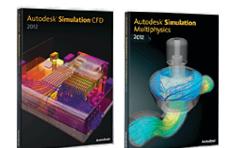
FEM

Die Finite-Elemente-Methode ist ein mathematisches Näherungsverfahren, das die inneren Auswirkungen von äußeren Einflüssen bei Bauteilen berechnet. Sie wird in der Technik in den unterschiedlichsten Bereichen wie in der Mechanik (Statik, Dynamik), der Thermodynamik (Wärmeübergang, -durchgang und -ausbreitung), der Fluidtechnik (Fließverhalten, Strömungssimulation) usw. eingesetzt.

Im [Autodesk Inventor Professional](#) stehen die mechanischen Aufgabenstellungen im Vordergrund, und die in diesem Programm installierten FEM-Module sind vor allem zum Lösen von Problemen der Statik, der Kinematik, der Dynamik und der Eigenfrequenzermittlung ausgelegt.

Mit den ergänzenden Autodesk-Programmen [Autodesk Simulation Mechanical](#), [Autodesk Simulation Multiphysics](#) und [Autodesk Simulation CFD](#) stehen drei weitere Produkte zur Verfügung, mit denen auch Problemstellungen im Bereich der Strömungs- und der Thermodynamik bearbeitet werden können, die der Inventor nicht mehr leisten kann.

Eines der marktführenden Unternehmen in diesem Bereich ist auch der Softwarehersteller ANSYS, der mit verschiedenen Programmpaketen den FEM-Bereich weitgehend abdeckt. Durch die Exportmöglichkeiten vom Inventor in die ANSYS-Programmmoduln ist eine weitgehende Flexibilisierung in diesen Bereichen möglich.

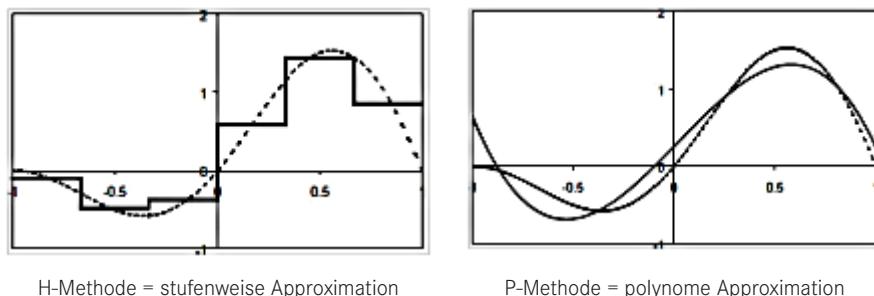


■ 6.1 FEM, allgemein

Die Methode der finiten Elemente (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen. Körper werden mit einem Gitternetz überzogen. Mit sogenannten iterativ arbeitenden Gleichungslösern (Solver) wird die Verschiebung der einzelnen Knoten errechnet. Um daraus die Spannungen zu erhalten, wird z. B. das Hookesche Gesetz angewendet.

Je nach Größe und Form der Gitterfelder wird das Ergebnis der Berechnung mehr oder weniger genau. Eine Genauigkeitssteigerung kann auf zwei möglichen Wegen erreicht werden:

- a) Die geradlinig begrenzten Gitterelemente werden verkleinert (H-Methode).
- b) Bei polynomförmigen Gitterelementen wird der Polynomgrad erhöht (P-Methode).



Da die H-Methode eine hohe Performance aufweist und universell einsetzbar ist, basieren die meisten FEM-Programme auf diesem Verfahren.

■ 6.2 Konvergenz

Die Konvergenz wird in der FEM als Annäherung des rechnerischen Verfahrens an die vermeintlich realen Gegebenheiten verstanden. In iterativen Rechenschritten wird versucht, die Abweichungen der Ergebnisse zu minimieren.

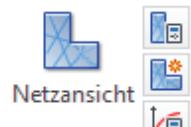
Die beiden vorher genannten Verfahren, das Verkleinern der Gitterelemente und die Erhöhung der Polynomzahl, werden lokal an den Bauteilstellen angewandt, an denen hohe Abweichungen vom vorherigen Rechenergebnis aufgetreten sind. Dieses Verfahren wird als [Konvergenzprozess](#) bezeichnet.

Der Inventor verwendet eine H-P-Verfeinerung, d.h. eine Kombination aus beiden Verfahren.

Durch eine H-Verfeinerung wird die Anzahl der Netzelemente in Bereichen erhöht, in denen die Ergebnisse verbessert werden müssen. Mit der P-Verfeinerung wird der Polynomgrad der ausgewählten Elemente in Bereichen mit hoher Belastung erhöht, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern.

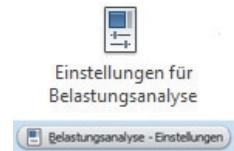
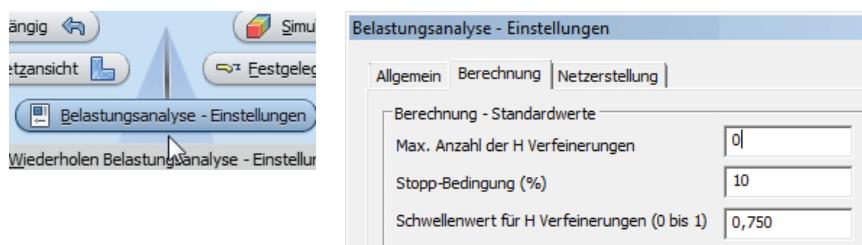
Im Inventor lassen sich die Parameter, die den Konvergenzprozess steuern, über verschiedene Funktionen beeinflussen:

- Die Funktion KONVERGENZEINSTELLUNGEN legt die Größen und Grenzen der Konvergenz direkt fest.



Netz

- Mit der Funktion EINSTELLUNGEN FÜR BELASTUNGSANALYSEN können u. a. die folgenden Werte permanent festgelegt werden.



6.2.1 Maximale Anzahl der H-Verfeinerungen

Diese Option legt die maximale Anzahl der H-Verfeinerungszyklen für den **Konvergenzprozess** fest.

Die Anzahl gibt an, wie oft der Rechenprozess zwischen Berechnen und Netz verfeinern wiederholt wird. Bei einer zu hohen Netzverfeinerung können einzelne Netzelemente so klein werden, dass eine sinnvolle Berechnung nicht mehr möglich ist. Zunehmende Verfeinerungen erhöhen zudem die Rechenzeit und könnten sehr zeitintensive Auswirkungen haben.



HINWEIS: Bei Werten über 5 wird eine Warnung angezeigt, die darauf hinweist, dass die Möglichkeit einer Singularität besteht. Singularitäten sind Effekte, die durch die Vereinfachung des Modellsystems entstehen. Beispiele hierfür sind punktförmige Lasteinleitung und scharfkantige Geometriänderungen, die im Kraftfluss liegen. Die Spannung im Bereich einer Singularität ist unbrauchbar.

Singularitäten liefern unbrauchbare Ergebnisse!

6.2.2 Stopp-Bedingung

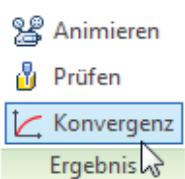
Dieser Wert ist eine ganzzahlige Prozentangabe, die bestimmt, bis zu welcher minimalen Abweichung der letzten beiden Rechenergebnisse eine weitere H-Verfeinerung der Bedingungen stattfindet. Wird die Differenz zwischen den letzten beiden Ergebnissen kleiner als der angegebene Prozentwert, dann wird die Verfeinerung nicht mehr weiter geführt. Kleine Prozentwerte erhöhen die Rechenzeit und könnten sehr zeitintensive Auswirkungen haben.

6.2.3 Schwellenwert für H-Verfeinerungen

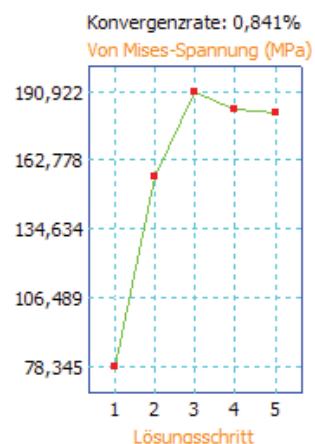
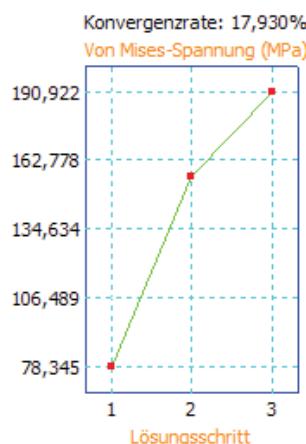
Diese Einstellung gibt den Schwellenwert für Verfeinerungen an (zwischen 0 und 1). Beim Wert null werden alle Elemente eines Bauteils in die Verfeinerung eingeschlossen. Dies stellt die maximale Verfeinerung dar. Der Wert 1 bedeutet, dass keine Elementverfeinerung stattfindet. Der Standardwert 0,75 bedeutet, dass von den Elementen mit entsprechenden Fehlern (siehe Stopp-Bedingung) 25 % einer Verfeinerung unterzogen werden.

Je näher der Wert Richtung 0 geht, desto größer ist die Zahl der verfeinerten Netzbereiche, was mehr Performance, Rechenzeit und auch Arbeitsspeicher benötigt. In Modalanalysen ist diese Einstellung nicht anwendbar.

6.2.4 Konvergenz-Plots



Die Darstellung der KONVERGENZ-Plots zeigt die Auswirkung der beschriebenen Einstellungen deutlich auf.



...

Der Konvergenz-Plot zeigt auf der Abszisse die Anzahl der Verfeinerungen (Lösungsschritte) an, die zum Konvergieren der Lösung erforderlich waren, bis die Abweichung der Ergebnisse der Iteration unter dem eingegebenen Stopp-Wert liegt oder die maximale Anzahl der Verfeinerungen erreicht ist.

Die Ordinate gibt die den einzelnen Verfeinerungen zugewiesenen Spannungswerte an.

Die Konvergenzrate sagt aus, wie schnell die Fehlergröße der iterativen Berechnungsschritte mit Netzverfeinerung gegen null strebt.

Wie es zu den beiden abgebildeten Plots kam, zeigt das folgende Beispiel.

6.2.5 Beispiel: Konvergenzeinstellungen und Auswirkung

Ein Vierkantstab mit den Abmessungen 10 x 10 x 100 mm, dessen untere Stirnfläche festgelegt wurde und an dessen oberer Stirnfläche ein Moment von 10 Nm angreift, soll auf Torsion belastet werden.



Animation auf DVD

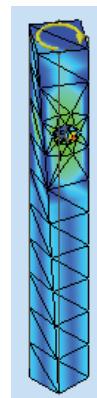
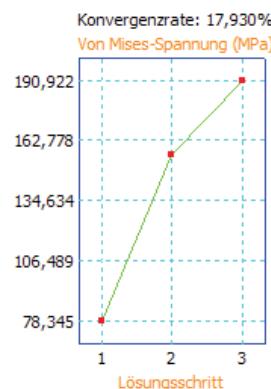
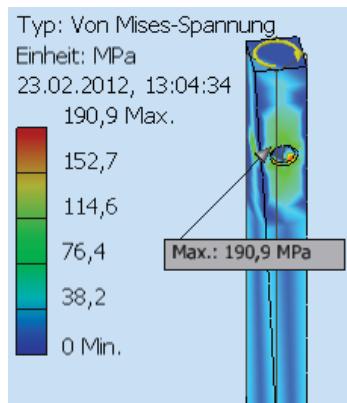


4kt-Stab_Torsion_Konvergenz.avi

6.2.5.1 Erste Simulation mit Standardeinstellungen

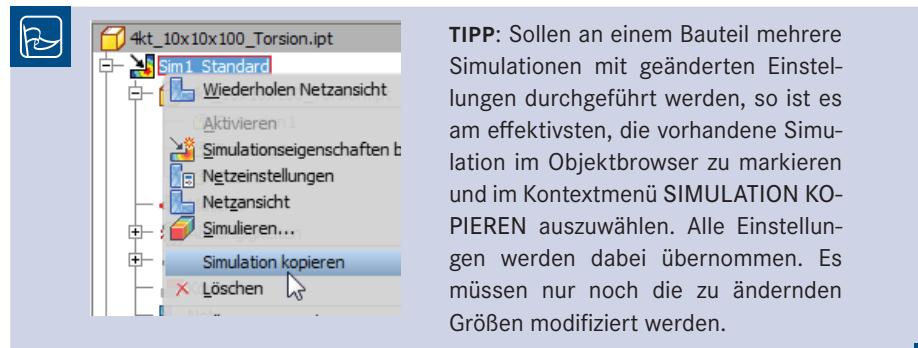
Die Standardeinstellung sieht keine H-Verfeinerung vor und es werden bis zu 10 % Abweichung in den iterativen Rechenergebnissen zugelassen.

Die erste Simulation wird mit dieser Standardeinstellung durchgeführt und bringt die folgenden Ergebnisse.



6.2.5.2 Zweite Simulation mit geänderten Konvergenzeinstellungen

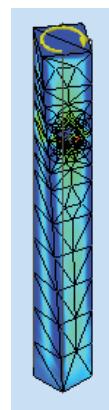
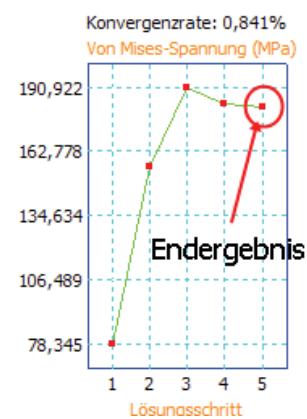
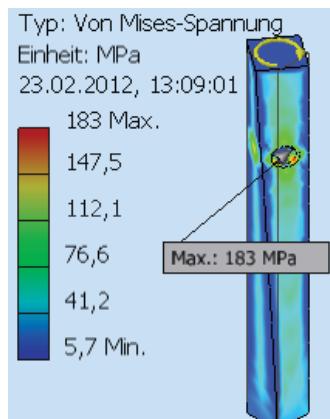
Die zweite Simulation wurde als Kopie der ersten Simulation erstellt.



Die Konvergenzeinstellung MAX. ANZAHL DER H-VERFEINERUNGEN wurde von 0 auf 3 angehoben und die STOPP-BEDINGUNG wurde von 10 auf 3 % reduziert.

Diese neue Einstellung lässt maximal drei H-Verfeinerungen zu und es werden nur noch 3 % Abweichung in den iterativen Rechenergebnissen zugelassen.

Die zweite Simulation wird mit dieser Einstellung durchgeführt und bringt die folgenden Ergebnisse.



6.2.5.3 Diskussion der Ergebnisse

Spannung

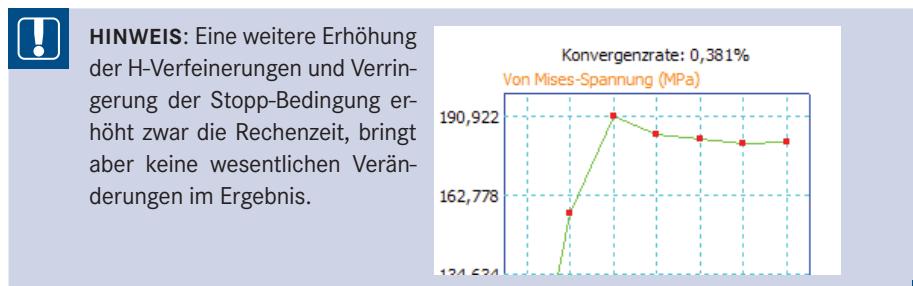
Die maximale Von-Mises-Spannung der zweiten und aufwendigeren Simulation wurde mit **183 MPa** ermittelt und liegt damit deutlich (**über 4 %**) niedriger als die der ersten Simulation, die mit **190,9 MPa** errechnet wurde.

Konvergenz

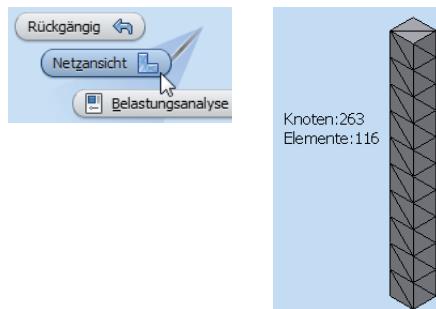
Die Konvergenz-Plots zeigen im ersten Fall die schnelle und einfache Iteration in drei Schritten und im zweiten Fall die aufwendigere Berechnung in fünf Schritten, bei der in den letzten beiden Berechnungsschritten die maximale Spannung deshalb reduziert wurde, weil die Stopp-Bedingung von 3 % noch nicht erreicht wurde.

FEM-Netz

In den Netzdarstellungen ist sehr deutlich zu sehen, dass im zweiten Fall sowohl insgesamt als auch insbesondere im Bereich der Bohrung ein sehr viel engeres Netz generiert wurde. Diese Modifikation ist durch die Angabe der Anzahl der H-Verfeinerungen zustande gekommen.

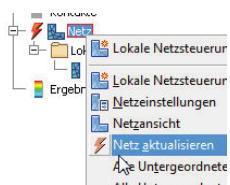
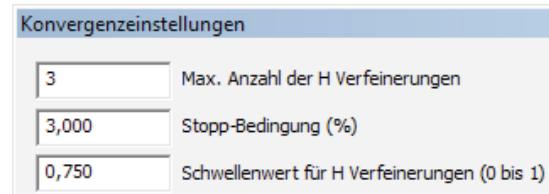


■ 6.3 Das FEM-Netz



Über das Markierungsmenü oder die Schaltfläche NETZANSICHT bekommen Sie das generierte FEM-Netz am Bauteil angezeigt.

Für den Vierkantstab (10 x 10 x 100 mm, diesmal ohne Bohrung) aus dem vorherigen Beispiel wird mit den Standardeinstellungen das gleichförmige Netz mit 116 Elementen und 263 Knoten generiert.



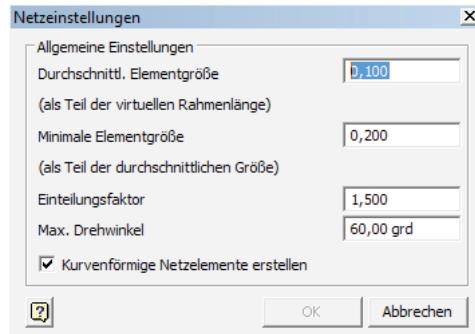
TIPP: Eine Veränderung der Konvergenzeinstellungen wirkt sich erst nach einer erneuten Simulation auf das Netz aus, eine Netzaktualisierung allein zeigt keine Veränderung am Netz.

Nach der Veränderung der Konvergenzeinstellungen auf 3 H-VERFEINERUNGEN und 3 % STOPP-BEDINGUNG sowie einer erneuten Simulation hat sich das Netz allerdings deutlich verändert. Es besteht jetzt aus 3910 Elementen und 6480 Knoten. Entsprechend länger ist die Rechenzeit zur Ermittlung der Simulationsergebnisse.

6.3.1 Netzeinstellungen



Die Schaltfläche NETZEINSTELLUNGEN führt zu den Größen, aus denen ein FEM-Netz berechnet wird. Die angezeigten und veränderbaren Werte sind allerdings erklärungsbedürftig.



Vorbereiten

Netzeinstellungen

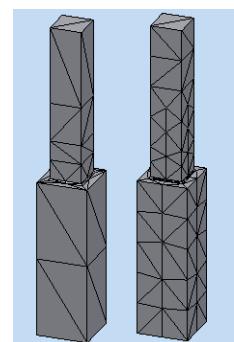


HINWEIS: Die [Netzeinstellungen](#) in diesem Dialogfenster verändern nur die Netzgenerierung der aktuellen Simulation. Wird eine neue Simulation erstellt, so werden die Netzeinstellungen aus den [Einstellungen für die Belastungsanalyse](#) übernommen. Die nachfolgend erklärten Begriffe sind jedoch für beide Dialogfenster gültig.

Durchschnittliche Elementgröße

Diese Zahl gibt den relativen durchschnittlichen Abstand zwischen Netzelementknoten an. Der Wert ist ein Bruchteil der längsten Modellbemaßung in X-, Y- oder Z-Richtung. Die Angabe kleinerer Werte hat kleinere Netzelemente und mehr Netzknoten zur Folge.

Die Größe 0,100 entspricht 10% der längsten Modellbemaßung. Im vorherigen Beispiel des Vierkantstabes, der 100 mm lang ist, ergibt das (im Bild nachzählbare) zehn Netzelemente über die Stablänge. Autodesk empfiehlt, sofern keine anders lautenden Anforderungen vorliegen, einen Wert zwischen 0,100 und 0,050.



Minimale Elementgröße

Dieser Eintrag ergibt den Mindestabstand zwischen den Netzknoten als Bruchteil des Wertes der durchschnittlichen Elementgröße.

Hierbei handelt es sich um einen in hohem Maße sensiblen Parameter. Wenn dieser Wert erhöht wird, nehmen die Knotendichte und die Netzqualität des Netzes ab. Wird dieser Wert verringert, dann verbessert sich zwar die Netzqualität, die Anzahl der Netzelemente nimmt jedoch drastisch zu.

Autodesk empfiehlt, sofern keine anders lautenden Anforderungen vorliegen, einen Wert zwischen 0,100 und 0,200.

Im abgebildeten Beispiel wurde die durchschnittliche Elementgröße auf den Wert 0,2 und die minimale Elementgröße auf den Wert 0,4 verändert. Rechts wurde die Standardeinstellung, links die modifizierte Einstellung zur Netzgenerierung angewandt.

Einteilungsfaktor

Der Einteilungsfaktor, der zwischen den Werten 1 und 10 liegt, gibt das maximale Verhältnis aneinander angrenzender Netzkanten für den Übergang zwischen groben und feinen Bereichen an. Mit einem kleineren Einteilungsfaktor wird ein einheitlicheres Netz erzeugt.

Autodesk empfiehlt, sofern keine anders lautenden Anforderungen vorliegen, einen Wert zwischen 1,500 und 3,000.

Max. Drehwinkel

Unter dem maximalen Drehwinkel wird der Winkel für bogenförmige Netzelemente verstanden. Der Wert kann von 1 bis 90° variiert werden. Je kleiner der Winkelwert, desto kleiner werden die Netzelemente, ihre Anzahl wird dadurch erhöht.

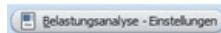
Autodesk empfiehlt, sofern keine anders lautenden Anforderungen vorliegen, einen Wert zwischen 30 und 60 Grad.

Die beiden Angaben [Kurvenförmige Netzelemente für Bauteile/Baugruppen erstellen](#) und [Kleine Geometrie übergehen](#) sind weitgehend selbsterklärend. Es werden entweder nur gerade oder eben kurvenförmige Elemente für die Netzkonstruktion eingesetzt, und sehr kleine geometrische Formen an Bauteilen werden wahlweise übergangen oder nicht.

Globale Einstellungen



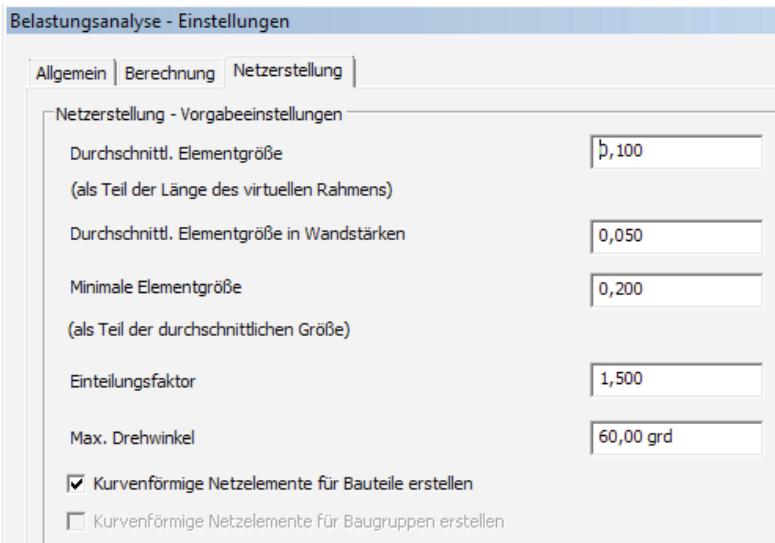
Einstellungen für
Belastungsanalyse



Netzparameter
global einstellen



IHINWEIS: Im Gegensatz zur Funktion *Netzeinstellung* haben diese Einstellungen eine globale Gültigkeit, d.h., jede neu erstellte Simulation wird mit diesen Einstellungen gestartet.



Die Einstellungsmöglichkeiten und Parameter sind dieselben wie bei der Funktion *Netzeinstellungen* und wurden in den vorherigen Abschnitten bereits erklärt.

6.3.2 Lokale Netzsteuerung



Eine sehr sinnvolle Variante der Beeinflussung des FE-Netzes bietet die lokale Netzsteuerung, mit der Sie an ganz bestimmten Stellen eines Bauteils das Netz entweder verfeinern oder vergrößern können.

Sobald das Dialogfenster **LOKALE NETZSTEUERUNG** aufgerufen wurde, können Sie Flächen oder Kanten auswählen, in deren Umgebung das Netz verändert werden soll.

In das Eingabefeld **ELEMENTGRÖSSE** geben Sie, im Unterschied zu den Netzeinstellungen, die tatsächliche Größe der Netzelemente in mm an. Der Wert legt die durchschnittliche Netzgröße für die ausgewählten Elemente fest.

Als Vergleichswert für die Eingabe muss die Angabe bei den Netzeinstellungen dienen, auch wenn diese in relativer Größe zur Bauteilgröße angegeben ist.

Im folgenden Beispiel steht die Netzeinstellung auf den Standardwerten. Die selektierte Fläche soll in ihrer Umgebung eine durchschnittliche Elementgröße von 2 MM haben.



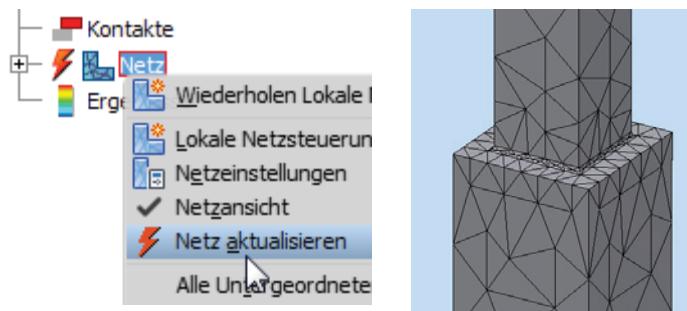
Lokale Netzsteuerung



Lokale Netzsteuerung.avi auf DVD



Sobald die Auswahl mit OK quittiert wurde, erscheint im Objektbrowser ein **roter Blitz** neben dem Netzeintrag. Zudem ist im Markierungsmenü der Button **NETZ AKTUALISIEREN** aktiv, und der Unterordner **Lokale Netzsteuerungen** wird angelegt, in dem sich die eben definierte Netzveränderung befindet.



Nachdem Sie über das Markierungsmenü oder über das Kontextmenü des Netzeintrages im Objektbrowser die Funktion **NETZ AKTUALISIEREN** ausgewählt haben, erscheint nach der erneuten Netzberechnung das modifizierte FE-Netz am Bauteil.

Zur Netzverfeinerung wurden in diesem Beispiel sowohl die quadratische Absatzfläche als auch die Abrundungen ausgewählt. Beachtenswert ist dabei, dass zwar die durchschnittliche Elementgröße mit 2 mm für die Absatzfläche eingehalten wurde, die Abrundungen, die einen Radius von 0,5 mm haben, wurden jedoch mit wesentlich kleineren Elementen versehen, da 2 mm hierfür viel zu groß gewesen wären.

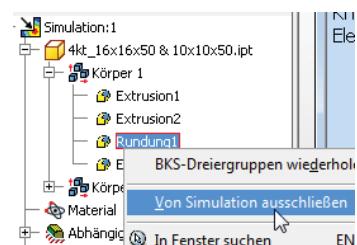
6.3.3 Allgemeine Richtlinien für die Netzerstellung

FE-Netze erfordern integere Bauteile, d.h., alle Oberflächen müssen eindeutig sein, es dürfen keine Singularitäten, keine Überlappungen etc. auftreten. Ist das trotzdem der Fall, dann können Netzberechnungen fehlerbehaftet sein und mit einer Fehlermeldung abgebrochen werden.

Haben Modelle eine zu komplexe Geometrie, dann helfen mitunter Vereinfachungen oder Bereinigungen im Modellbereich, um zu effektiveren Berechnungsergebnissen zu kommen. Hilfreich können auch die folgenden Hinweise zur Anwendung der FEM sein.

Unterdrückung von Modellelementen

Bei Baugruppen haben einige Bauteile möglicherweise keinen oder keinen großen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Solche Bauteile können unterdrückt werden, um den Berechnungsprozess zu beschleunigen. Im Kontextmenü von Bauteil-Features befindet sich hierzu die Funktion **VON SIMULATION AUS-SCHLIESSEN**.



Bauteile enthalten mitunter sehr kleine oder für die FEM unwesentliche Elemente, wie z.B.:

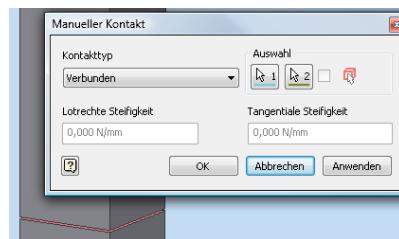
- sehr kleine Bohrungen mit einem Durchmesser unter 1/100 der Bauteillänge
- äußere konvexe Rundungen mit kleinem Radius
- Druck- und Prägungselemente für Beschriftungen

Solche Elemente können evtl. ebenfalls von Simulationen ausgeschlossen werden.

Modell- und Netzvereinfachung

Ein sehr komplexes Bauteil kann u. U. in zwei oder mehrere Bauteile aufgeteilt werden. Die Teile können im Simulationsbereich mit dem Kontakt VERBUNDEN wieder zusammengefügt werden. Es werden dann unabhängige Netze für jedes Teil generiert, das Bauteil verhält sich jedoch wie ein Teil.

Im Objektbrowser werden die KONTAKTE angezeigt.



Netzeinstellungen

Auch verschiedene der vorher beschriebenen Einstellmöglichkeiten an FE-Netzen können Vereinfachungen bringen bzw. Fehler ausschließen.

Bei Bauteilen mit komplexen Krümmungen ist es ratsam, die Option KURVENFÖRMIGE NETZELEMENTE ERSTELLEN zu deaktivieren. Stattdessen kann im Bereich der Krümmung über die LOKALE NETZSTEUERUNG eine Verfeinerung des Netzes erreicht werden, welche die herabgesetzte Genauigkeit der Berechnung wieder erhöht.

Können problematische Bauteilbereiche nicht vereinfacht werden, so kann auch die LOKALE NETZSTEUERUNG weiterhelfen. Durch Verringerung der Netzgröße in diesen Bereichen kann ggf. ein funktionierendes Netz generiert werden.

Alle in den bisherigen Abschnitten zu den Netzeinstellungen beschriebenen Möglichkeiten lassen sich in jeweils eigenen Simulationsvarianten zu einem Bauteil oder einer Baugruppe speichern.



6.3.4 Netzgenerierungen und Simulationen mit dünnen Bauteilen

In der Inventor-Version 2013 wurden in den Arbeitsbereich der Belastungsanalyse die neuen Funktionen DÜNNE KÖRPER SUCHEN, MITTELFÄLÄCHE und VERSATZ integriert.



Diese eigenständige Funktionsgruppe ermöglicht es, Blech- oder dünne Kunststoffteile mit einem vereinfachten FE-Netz zu überziehen. Die Funktion DÜNNE KÖRPER SUCHEN bestimmt aus dem Verhältnis der Abmessungen, ob ein Körper im Sinne dieser Funktion als „dünn“ zu bezeichnen ist.

Findet die Funktion einen dünnen Bauteilkörper, dann besteht die Möglichkeit, entweder die Mittenebene oder eine zur Mittenebene versetzte Ebene als die Fläche zu definieren, auf der das FE-Netz generiert wird.

Anstelle eines Körpernetzes wird dadurch ein Flächennetz erstellt, das die FE-Simulation deutlich vereinfacht und schneller ablaufen lässt.

Zu dieser Funktion wird im Kapitel 9 eine eigene Übung an einem Blechteil vorgestellt.

■ 6.4 Abhängigkeiten, Einspannungen

Ein mit einer Belastung zu simulierendes Bauteil muss, damit die Gleichgewichtsbedingungen der Statik vorliegen, festgehalten werden. In der Praxis wird das durch Einspannungen bzw. durch Kopplungen mit anderen Bauteilen realisiert.

Bei den Definitionen der Abhängigkeiten ist streng darauf zu achten, dass die ausgewählten Abhängigkeiten so realitätsnah wie möglich ausgewählt und angesetzt werden.

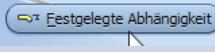
Würde ein Bauteil analysiert, das Bestandteil einer Baugruppe und dort entsprechend verbaut ist, so könnten die entsprechenden Abhängigkeiten aus der Baugruppe übernommen werden. In späteren Beispielen wird das auch der Fall sein.



TIPP: Häufig ist es sehr einfacher und weniger zeitaufwendig, die Randbedingungen durch Abhängigkeiten und Belastungen an einem freigestellten Bauteil zu simulieren anstatt eine Baugruppe zu untersuchen.



Ein einzelnes Bauteil muss dann jedoch an dieser Stelle „von Hand“ festgelegt werden. In der Funktionsgruppe ABHÄNGIGKEITEN befinden sich die dazu zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, deren Anwendung jedoch gut durchdacht werden muss, da sie die reale Situation bzw. die Funktion des Teils wiedergeben sollen.

Abhängigkeit	Erklärung
 Fest 	Die Abhängigkeit FEST entfernt alle Freiheitsgrade der ausgewählten Flächen, Kanten oder Scheitelpunkte. Das entsprechende Element ist festgelegt, im Raum fixiert und kann Reaktionskräfte aufnehmen.
 Reibungslos	Die Abhängigkeit REIBUNGSLOS kann nur auf Flächen angewendet werden und verhindert alle Bewegungen, die nicht in der Flächenebene selbst oder tangential dazu liegen, also alle Bewegungen lotrecht zur ausgewählten Fläche. Gleitverbindungen oder Führungen können damit simuliert werden, etwa eine Passfeder in einer Nut.
 Verankern	Das sogenannte VERANKERN oder auch die PIN-ABHÄNGIGKEIT wird bei zylindrischen Flächen, die einen Freiheitsgrad der Rotation behalten sollen, angewendet. Die Rotation um eine Zylinderachse simuliert z.B. eine Welle.

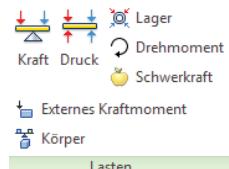
■ 6.5 Lasten und Lastangriffsfälle

6.5.1 Lastarten

Mit den Lasten, also den Kräften, die auf das Bauteil einwirken, wird so ähnlich verfahren wie bei den Abhängigkeiten.

Bei den Definitionen der Belastungen ist streng darauf zu achten, dass der ausgewählte Belastungsfall so realitätsnah wie möglich ausgewählt und angesetzt wird.

Lastart	Erklärung
 Kraftbelastung	Eine KRAFT kann auf Flächen, Kanten und Scheitelpunkte einwirken. Sie wird über das ausgewählte Element verteilt. Bei Flächen wird sie zentrisch und lotrecht, bei Kanten parallel angeordnet. Bei Scheitelpunkten müssen, ansonsten können Vektorkomponenten zur Richtungsangabe verwendet werden. Bei Auswahl mehrerer Eingaben müssen alle Eingaben denselben Objekttyp aufweisen.
 Druck	Ein DRUCK kann nur auf eine Fläche angewendet werden und wirkt immer gleichmäßig und lotrecht auf die Fläche.
 Lagerbelastung	Die LAGERBELASTUNG kann nur auf zylindrische Flächen einwirken. Mit der Angabe von Vektorkomponenten kann die Richtung der Lagerbelastung angegeben werden.



Lastart	Erklärung
	Ein DREHMOMENT kann nur auf eine Fläche angewendet werden. Mit der Angabe von Vektorkomponenten wird die Richtung des Momentes angegeben.
Drehmoment	
	Für die Definition der SCHWERKRAFT kann eine Fläche oder eine Kante ausgewählt werden. Die Schwerkraft wirkt unabhängig davon immer im Schwerpunkt. Mit der Angabe von Vektorkomponenten wird die Richtung des Momentes angegeben.
Schwerkraft	
	Ein EXTERNES KRAFTMOMENT besteht aus der Angabe des Angriffspunktes und der Kraftrichtung. Der Angriffspunkt wird durch die Auswahl einer Fläche sowie durch Koordinaten angegeben. Mit der Angabe von Vektorkomponenten wird die Richtung der Kraft angegeben.
Externes Kraftmoment	
	Mit der BELASTUNG DES KÖRPERS sind lineare Beschleunigungs Kräfte sowie Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen gemeint, z.B. Fliehkräfte durch Rotation. Über die Auswahl von Flächen und Positionskoordinaten und ggf. von Vektorkomponenten wird deren Position und Richtung bestimmt.
Belastung des Körpers	



HINWEIS: Kraftangriffe an Punkten oder Kanten sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Sie bewirken Punkt- oder Linienbelastungen, die wegen $\sigma = F/A$ bei sehr kleinen Flächen unrealistisch hohe Spannungen zur Folge haben.

Belastungen und Abhängigkeiten können auf dasselbe Objekt angewendet werden, solange sie sich nicht widersprechen. Werden sich widersprechende Belastungen und Abhängigkeiten angegeben (z. B. eine feste Fläche in Z-Richtung und Zuweisung einer Belastung in Z-Richtung zur selben Fläche), werden die Kräfte ignoriert und mit den festen Abhängigkeiten überschrieben.

6.5.2 Lastangriffsfälle

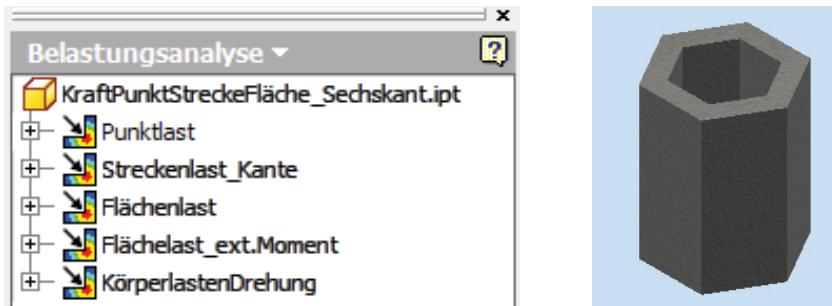
Von zentraler Bedeutung für die Simulation ist die richtige bzw. realitätsnahe Platzierung der Belastung eines Bauteils. Insbesondere beim Anbringen einer **KRAFT** existieren mehrere Möglichkeiten und damit auch Fehlerquellen.

Eine Kraft kann, wie in der vorher gezeigten Tabelle beschrieben, auf eine **Fläche**, auf einer **Kante** oder auch auf einem **Punkt** angreifen. Sie kann aber auch außerhalb des Bauteils wirken und somit ein **externes Kraftmoment** darstellen oder im Bauteil selbst wirken, wie beispielsweise **Flieh- oder Eigengewichtskräfte**.

Diese fünf Lastangriffsfälle sollen im Folgenden genauer unter die Lupe genommen werden.

Auf der DVD zum Buch befindet sich die Bauteil-Datei [KraftPunktStreckeFläche_Sechskant.upt](#), in der alle fünf Varianten als eigene Simulationen durchgeführt und gespeichert sind.

Öffnen Sie diese Datei im Inventor, aktivieren Sie die Registerkarte UMGEBUNG und starten Sie die BELASTUNGSANALYSE.



Datei: KraftPunkt-Strecke-Fläche_Sechskant.upt



Belastungsanalyse

Registerkarte: Umgebung – Belastungsanalyse

Das Bauteil besteht aus einem Sechskantrohr, an dem die verschiedenen Varianten des Kraftangriffes gezeigt werden. Sobald die Arbeitsumgebung der Belastungsanalyse aktiv ist, werden im Objektbrower fünf gespeicherte Simulationen angezeigt.

6.5.2.1 Punktlast



HINWEIS: Einer punktförmigen Belastung ist vorauszuschicken, dass sie, von wenigen Ausnahmen abgesehen, eigentlich unsinnig ist. Die Spannung im Bauteil errechnet sich bekanntlich aus dem Quotienten von Kraft durch Fläche – geht die Größe der Fläche gegen null, dann wird die Spannung unendlich groß.

Unabhängig davon, errechnet der Inventor trotzdem einen realen Spannungswert, dessen Größe jedoch wenig Aussagekraft hat.

Eine Punktlast kann nur an Scheitelpunkten existierender Körperkanten definiert werden.

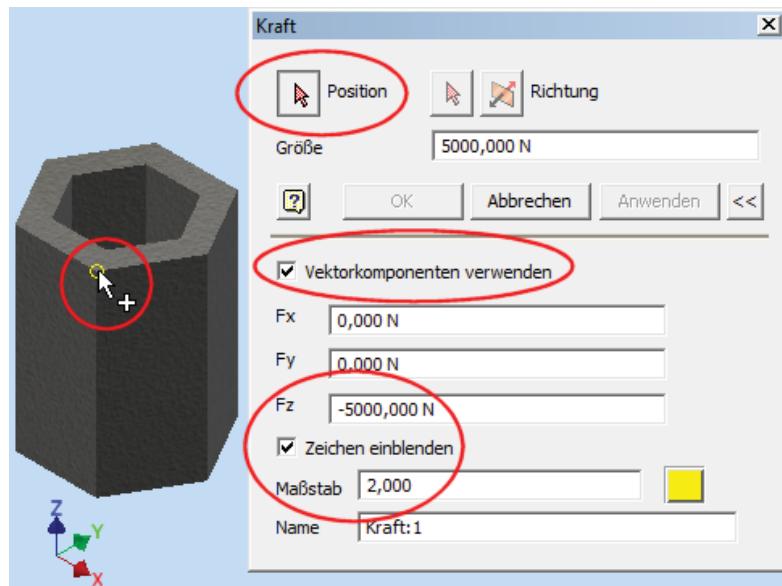


TIPP: Existiert an der Stelle des gewünschten Kraftangriffes kein Scheitelpunkt, dann müssen Sie in der Bauteil-Arbeitsumgebung eine Fläche mit dem Befehl TRENNEN so teilen, dass der gewünschte Kraftangriffspunkt entsteht.



Der Befehl KRAFT zum Anbringen einer Kraft wird entweder über das Icon- oder das Markierungs-menü aufgerufen.

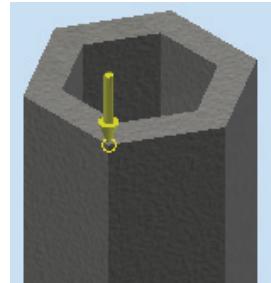




Im Dialogfenster stellen Sie Folgendes ein:

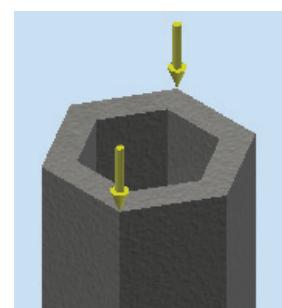
- Vektorkomponenten verwenden
- Fz = -5000 N eintragen
- Zeichen einblenden aktivieren
- Maßstab = 2,0 eintragen
- POSITION anklicken
- einen Scheitelpunkt am Bauteil anklicken

Im Ergebnis sehen wir den Kraftvektor am Bauteil.



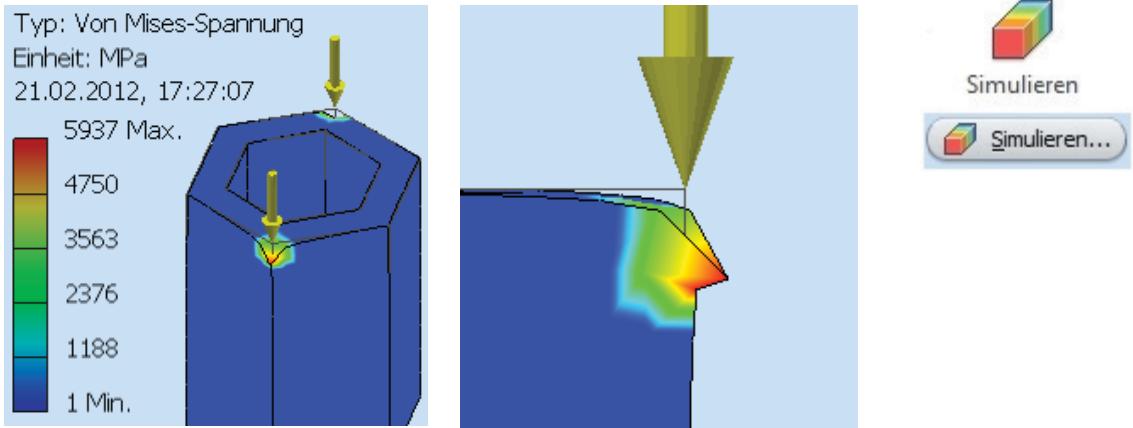
Fügen Sie nun an der gegenüberliegenden Ecke des Bauteils eine identische Kraft ein.

Natürlich muss dem Bauteil vor der Simulation mindestens eine Abhängigkeit zugewiesen werden. Die Unterseite des Sechskantrohres soll die Abhängigkeit FEST bekommen, d.h., diese Fläche wird als feste Aufstandfläche (fixiert) betrachtet, die Reaktionskräfte aufnehmen bzw. ableiten kann.



Ebenso muss das Material vor einer Simulation kontrolliert werden. Wurde dem Bauteil während der Konstruktion noch kein Werkstoff zugewiesen, dann kann dies mit dem Befehl ZUWEISEN auch in der Simulationsumgebung geschehen. Mit dieser Funktion kann aber auch ein bereits vergebener Werkstoff zu Testzwecken mit einem anderen überschrieben werden.





Die Simulation zeigt erwartungsgemäß sehr hohe und natürlich unzulässige Spannungen und entsprechend hohe Verformungen am Kraftangriffspunkt.

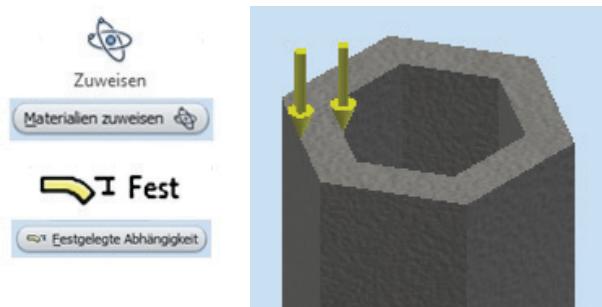
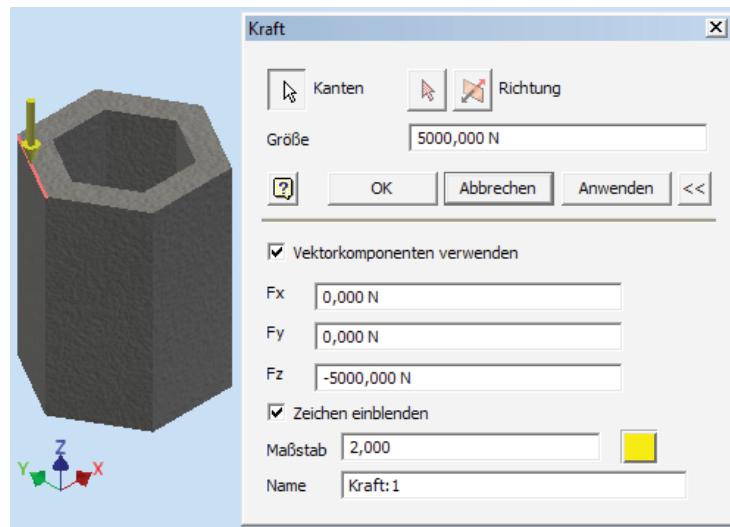
6.5.2.2 Belastung einer Kante



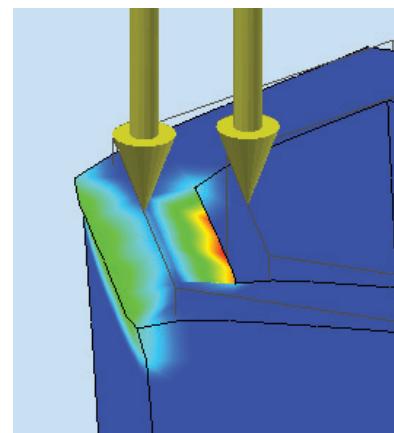
HINWEIS: Für den Kraftangriff an einer Kante gilt dasselbe wie bei der Punktlast, da auch eine Kante keine flächige Ausdehnung hat.

Auch das Vorgehen zum Aufbringen der Kraft entspricht dem der Punktlast. Im Dialogfeld sind die folgenden Einstellungen vorzunehmen:

- Vektorkomponenten verwenden
- $F_z = -5000 \text{ N}$ eintragen
- ZEICHEN EINBLENDEN aktivieren
- Maßstab = 2,0 eintragen
- POSITION anklicken
- eine **Kante** am Bauteil anklicken



Fügen Sie an der parallelen Kante eine gleich große Kraft in derselben Richtung ein. Für die Randbedingungen (Abhängigkeit, Material) gilt das vorher Gesagte.



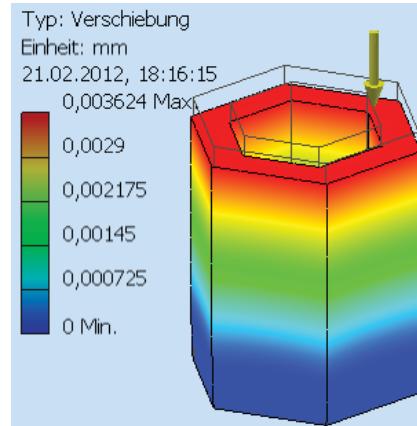
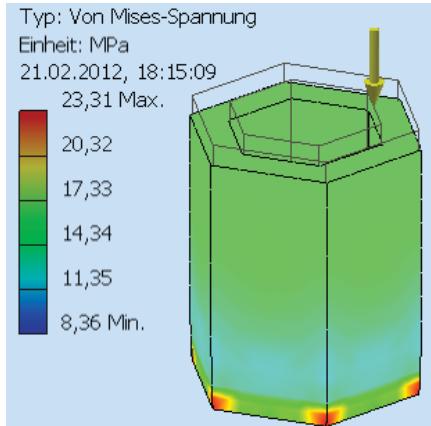
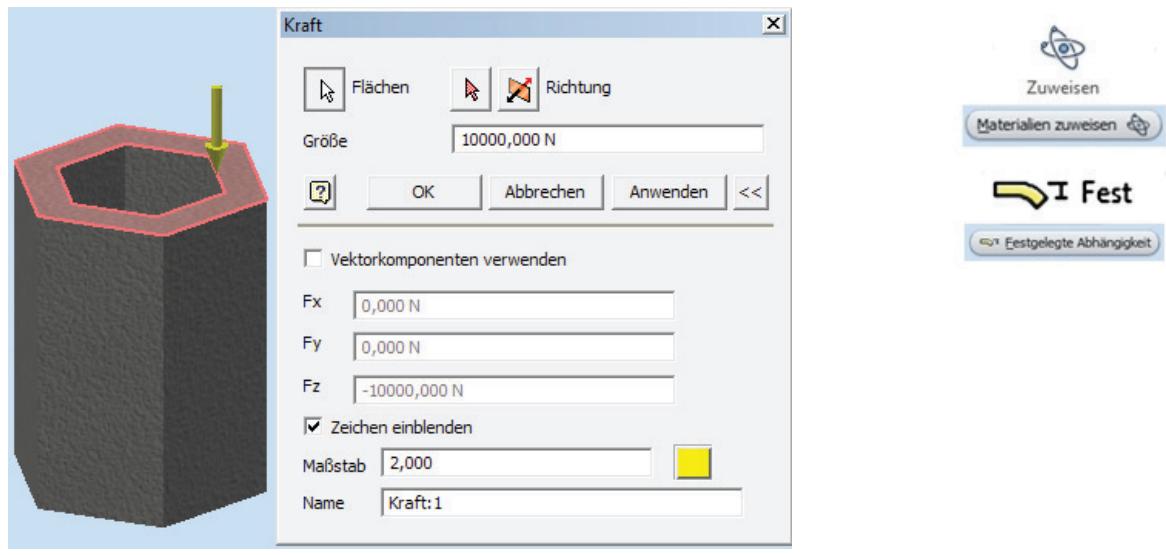
6.5.2.3 Flächenlast

Die Flächenlast stellt den Normalfall dar.



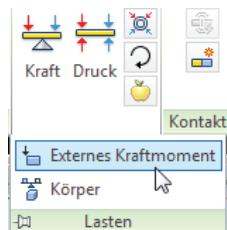
HINWEIS: Wird eine Kraft auf eine selektierte Fläche aufgebracht, so wird sie automatisch lotrecht auf der Fläche positioniert. Die Anzeige des Kraftpfeiles macht zwar den Eindruck einer punktförmigen Belastung, tatsächlich wird die Kraftwirkung jedoch gleichmäßig über die ganze Fläche verteilt.

Die Vektorkomponenten müssen in diesem Fall nicht verwendet werden.



Das Ergebnis der Simulation ist jetzt einigermaßen real. Der gleichmäßige Flächendruck ist deutlich zu sehen. Sowohl die Spannung als auch die Verformung bewegen sich im akzeptablen Bereich.

6.5.2.4 Externer Kraftangriff

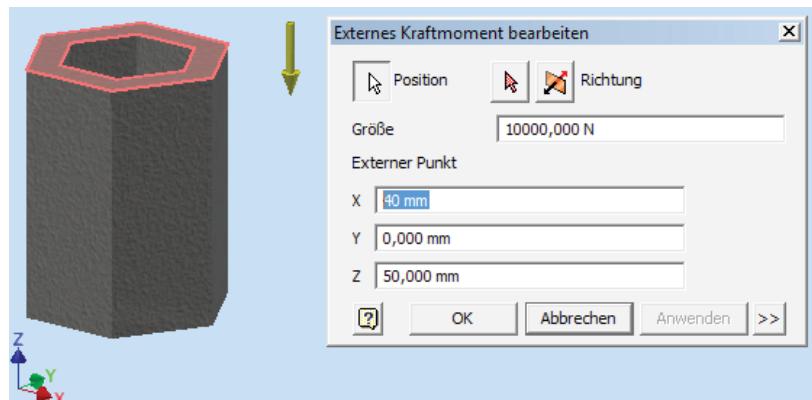


Ein externer Kraftangriff, d.h. eine Kraftwirkung, die außerhalb des Bauteils auftritt, wirkt als Moment auf das Bauteil.

Eine externe Kraft kann nicht mit der Funktion *Kraft*, sondern muss mit dem Befehl EXTERNES KRAFTMOMENT definiert werden. Dieser Befehl befindet sich entweder als kleines Icon in der Icon-Leiste oder in der ausklappbaren Funktionsgruppe LASTEN.

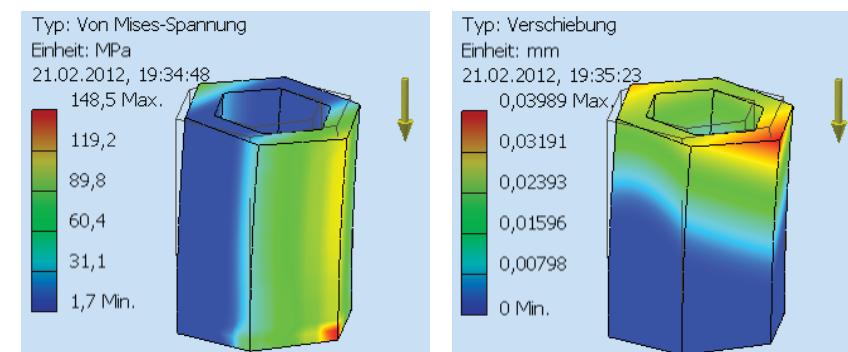
Im Dialogfeld wird wie bei der Flächenlast vorgegangen, zusätzlich müssen jetzt aber die Koordinaten des Kraftangriffspunktes eingetragen werden.

Der Kraftpfeil wird an der definierten Stelle angezeigt.



Nachdem die Randbedingungen (Abhängigkeit, Material) gesetzt sind und die Simulation durchgeführt wurde, ergibt sich das erwartete Ergebnis.

Durch die externe Kraft wirkt auf das Bauteil zusätzlich zur Druckkraft ein Biegemoment, das die einseitige Beanspruchung und eine entsprechende Verformung verursacht.



6.5.2.5 Innere Kräfte, Körperlasten

Innere Kräfte entstehen als Massekräfte durch Beschleunigungen. Im Inventor werden diese Körperlasten genannt.

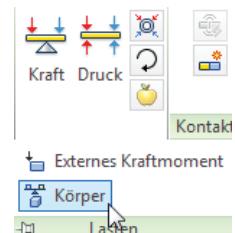
Zu den Körperlasten gehören:

- lineare Beschleunigung
- gleichförmige Drehbewegung (Kreisbeschleunigung)
- beschleunigte Drehbewegung

Eine Körperlast kann ebenfalls nicht mit der Funktion *Kraft*, sondern muss mit dem Befehl **KÖRPER** definiert werden. Dieser Befehl befindet sich entweder als kleines Icon in der Icon-Leiste oder in der ausklappbaren Funktionsgruppe **LASTEN**.



TIPP: Als Position der Bewegung können Sie eine Körperkante oder ein Fläche des Bauteils auswählen. Bei der Selektion einer Kante findet die Bewegung entweder in Richtung der Kante (linear) oder als Rotation um diese Kante statt. Wurde eine Fläche bestimmt, dann ist dies die Ebene, in der die Bewegung stattfindet.



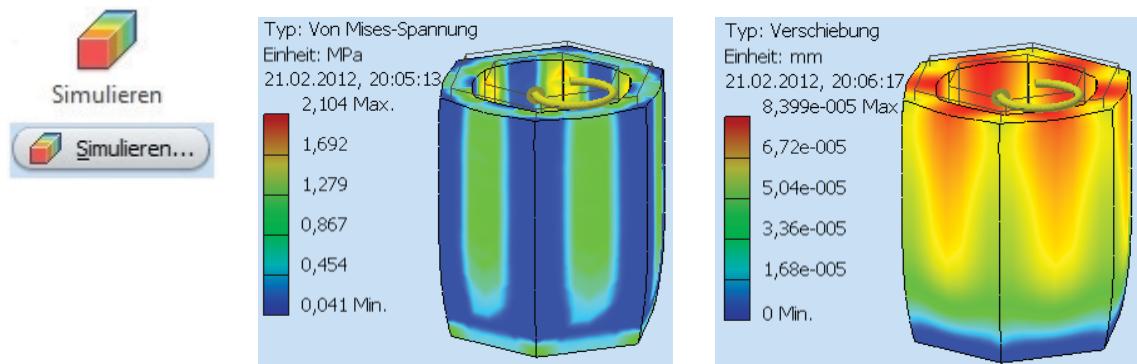
Im folgenden Beispiel wurden die folgenden Einstellungen vorgenommen:

- Art der Bewegung = **WINKEL**, d.h. Drehbewegung
- Art der Drehbewegung = **GESCHWINDIGKEIT**, d.h. gleichförmige Drehzahl
- **GRÖSSE** = 36000 GRD/SEK., d.h. 100 U/Sek. Oder 6000 U/Min.
- **POSITION** = obere Stirnfläche

Mit diesen Einstellungen und nach der Zuweisung der Randbedingungen wird die Simulation durchgeführt.



Das Ergebnis der Simulation ist zumindest optisch beeindruckend, sowohl was die Spannung als auch die Verformung anbelangt, die berechneten Werte sind jedoch minimal.



■ 6.6 Beispiel einer einfachen vollständigen FE-Analyse

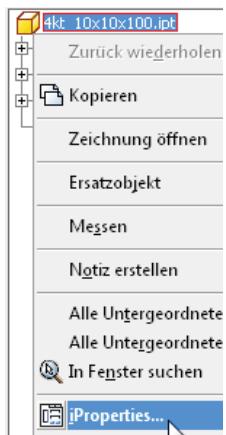


Die folgenden Arbeitsschritte sollen an einem ganz einfachen Bauteil demonstriert werden, da bei diesem Vorgehen alle Phasen der Durchführung sehr leicht nachvollzogen und gegebenenfalls nachgerechnet werden können.

Dies trifft auch auf die folgenden Abschnitte zu, in denen verschiedene Materialzuweisungen, Abhängigkeiten und Lasten beschrieben werden. So ist es möglich, zu einem Bauteil oder einer Baugruppe eine ganze Reihe verschiedener Analysen zu erstellen und zu speichern.

Datei:
4kt_10x10x100.ipt

Die zu diesem Beispiel gehörende Datei mit der Bezeichnung [4kt_10x10x100.ipt](#) befindet sich auf der DVD zum Buch.



6.6.1 Das Bauteil und seine Eigenschaften

Als erstes Bauteil dient ein **4kt-Stab** aus **Stahl** mit den Maßen **10 x 10 x 100 mm**.

Die Angabe des Materials ist natürlich besonders wichtig, denn Sicherheitsfaktoren oder Verformungen können z.B. nur dann berechnet werden, wenn der E-Modul des Werkstoffes bekannt ist.

Bereits im Bauteilbereich sollten deswegen über das Kontextmenü des Bauteils die

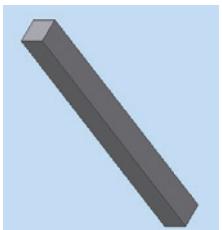
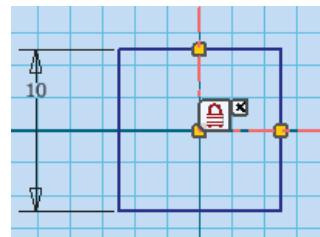


IPROPERTIES aufgerufen und in den PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN das Material bestimmt werden.

Im Beispiel wurde also ein allgemeiner Stahl ausgewählt, dessen Dichte, Masse, Schwerpunkt usw. direkt nach der Eingabe abzulesen sind.

Im selben Fenster sind weiter unten auch die Eigenschaften der **Trägheitsmomente** angegeben, welche auf die Achsen, die durch das Querschnittszentrum laufen, bezogen sind.

Der nebenstehend abgebildete Stahlstab mit den Maßen 10 mm x 10 mm x 100 mm wurde aus einer 10 x 10 mm großen Quadrat-Skizze auf die Länge von 100 mm extrudiert.



TIPP: Das Quadrat wurde mit der Funktion RECHTECK MITTE MIT ZWEI PUNKTEN (ab Inventor 2013) erstellt, wobei der Mittelpunkt genau auf dem Ursprung des Koordinatensystems platziert wurde. Dadurch sind beispielsweise die Schwerpunktkoordinaten im Fenster der PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN (siehe vorangegangene Abbildung), die mit 0,0,-50 angegeben sind, zu erklären und zu überprüfen.

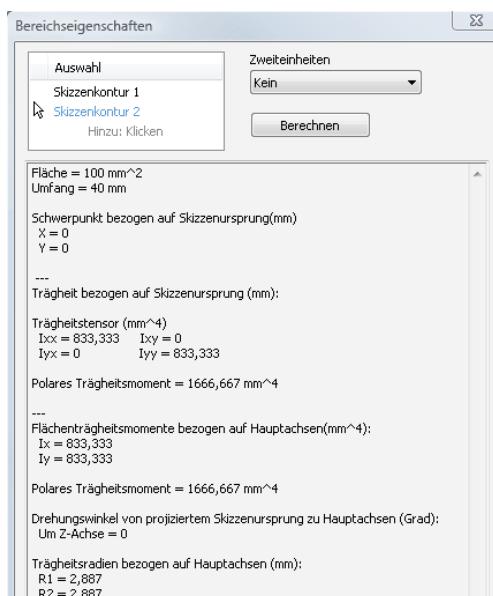
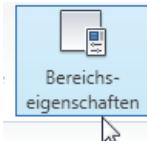
Wer mehr über z.B. die Flächen-Eigenschaften erfahren möchte, kann dies allerdings nur im Skizzenbereich erledigen. Dort ist auf der Registerkarte PRÜFEN die Schaltfläche BEREICHSEIGENSCHAFTEN aktiv.

Wird im entsprechenden Dialogfenster die vollständige und geschlossene Skizze ausgewählt und anschließend der Button BERECHNEN geklickt, dann werden alle dieser Skizzenfläche zugeordneten Eigenschaften angezeigt.

Die Fläche und der Umfang können bei einer 10x10 mm Kontur im Kopf nachgerechnet werden.

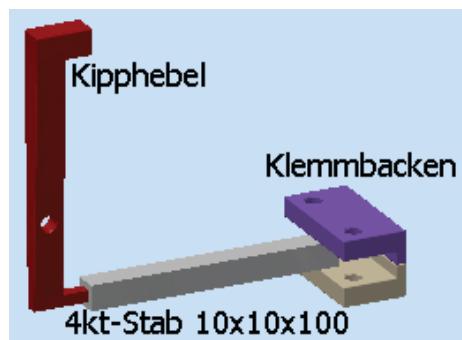
Der Schwerpunkt mit den Koordinaten 0,0 wurde schon erwähnt.

Der Trägheitstensor entspricht bei diesem nach den Koordinatenachsen ausgerichteten Bauteil dem Flächenträgheitsmoment, das sich aus der Formel $A^4/12$ zu 833,333 mm⁴ ergibt.



Die Trägheitsradien R_1 und R_2 , die sich mit der eigentlich üblichen Bezeichnung i aus der Formel errechnen, ergeben nach dieser Formel den Wert 8,33 mm und weichen damit aus mir unerklärlichen Gründen ab.

6.6.2 Funktion des Bauteils



Der 4kt-Stab ist, wie jedes Bauteil, in eine Funktionskette eingebunden. In diesem Beispiel ist es eine stark vereinfachte Klemmvorrichtung, die mittels der zwei Klemmbacken den 4kt-Stab festhält. An der gegenüberliegenden Stirnseite wird der Stab durch den Kipphebel auf Druck belastet.



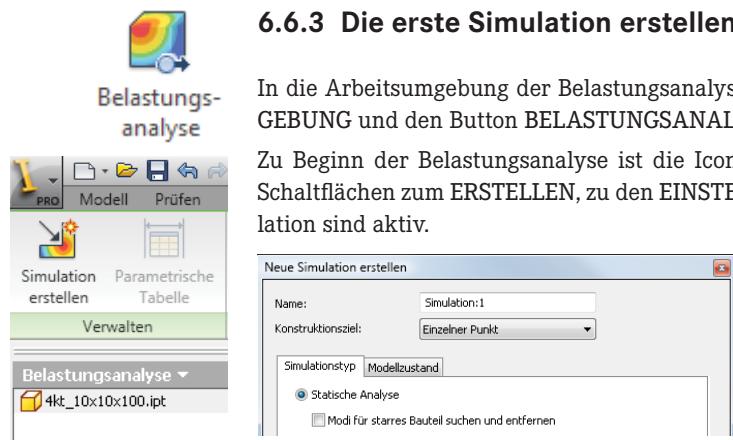
HINWEIS: Der erste und wichtigste Schritt einer Belastungsanalyse ist die [Funktionsanalyse](#) des zu überprüfenden Bauteils. Die FEM liefert nur dann annähernd richtige Ergebnisse, wenn neben den Materialeigenschaften sowohl die Einspannungen ([Abhängigkeiten](#)) als auch die Belastungen ([Kräfte, Momente](#)) bekannt sind und möglichst realitätsnah simuliert werden.

Die Tiefe der Einspannung zwischen den beiden Klemmbacken beträgt [8 mm](#). Die Kipphebelfläche, die den Druck auf den Stab ausübt, ist quadratisch und hat eine Kantenlänge von [5 mm](#).

6.6.3 Die erste Simulation erstellen

In die Arbeitsumgebung der Belastungsanalyse kommt man über die Registerkarte **UMGEBUNG** und den Button **BELASTUNGSANALYSE**.

Zu Beginn der Belastungsanalyse ist die Icon-Leiste weitgehend ausgeblendet, nur die Schaltflächen zum **ERSTELLEN**, zu den **EINSTELLUNGEN** und zum **BEENDEN** einer Simulation sind aktiv.



Die Simulationserstellung beginnt mit dem Dialogfenster **NEUE SIMULATION ERSTELLEN** und erwartet für eine einfache Bauteilanalyse keine weiteren Eingaben.

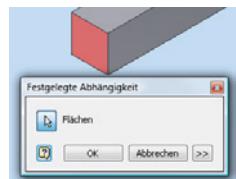
Sobald dieses Fenster mit OK verlassen wurde, erscheint die vollständige Icon-Leiste für die Belastungsanalyse. Nur die Funktionen, die erst nach einer durchlaufenen Analyse ausgeführt werden können, sind noch ausgeblendet.



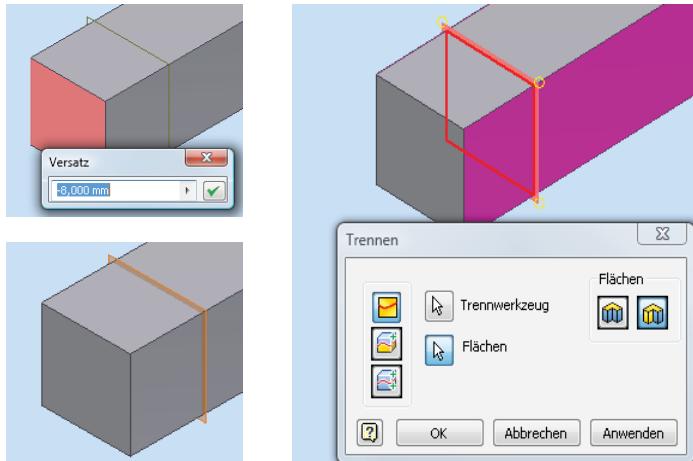
6.6.4 Das Bauteil einspannen

In unserem Beispiel wäre es sehr einfach, beispielsweise die untere Stirnfläche mit der Abhängigkeit FEST zu fixieren. Der Realität käme das aber nur nahe, wenn das Bauteil stirnseitig an einem anderen anschlägt und ausschließlich auf Druck belastet wird. Gemäß unserer Funktionsanalyse entspricht das aber nicht der Realität.

Die Baugruppenansicht am Anfang dieses Beispiels zeigt, dass dieses Teil schraubstockartig eingespannt ist, und zwar von zwei Seiten auf eine Tiefe von 8 MM. Es müssten also zwei gegenüberliegende Flächen am Bauteilende mit jeweils 8 mm Höhe festgelegt werden. Diese Flächen gibt es jedoch (noch) nicht.

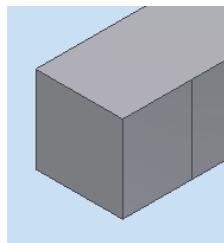


6.6.5 Trennen von Bauteilflächen



Erreicht wird dies relativ einfach in zwei Schritten, zu deren Ausführung jedoch kurz der Bereich der FE-Analyse verlassen werden muss.

Eine ARBEITSEBENE wird in 8 MM Entfernung von der unteren Stirnfläche parallel zu ihr erzeugt.



Fest

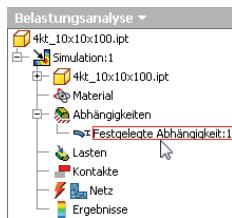
Festgelegte Abhängigkeit

Mit dem Werkzeug TRENNEN und der Auswahl FLÄCHEN TRENNEN werden die beiden gegenüberliegenden Längsflächen mit dem TRENNSWERKZEUG der ARBEITSEBENE getrennt.

Die senkrechte Linie auf beiden Seiten zeigt die erfolgreiche Trennung der Oberfläche an, die jedoch weder die Homogenität des Materials noch die Bauteilgeometrie und -festigkeit in irgendeiner Weise beeinflusst.

Jetzt werden die beiden 8x10-mm-Flächen mit der Abhängigkeit FEST versehen.

Sobald dies geschehen ist, wird im Objektbrowser unter der Abteilung ABHÄNGIGKEITEN die definierte **Festgelegte Abhängigkeit:1** angezeigt.

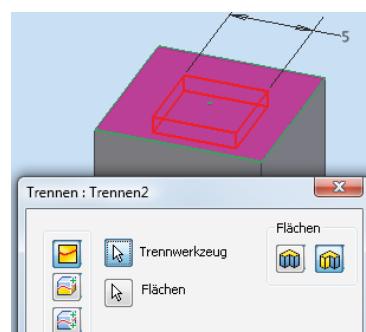


HINWEIS: Diese Abhängigkeit entspricht jetzt zwar der Einspannung zwischen den beiden Klemmbäckern, allerdings nur dadurch, dass in diesen Bereichen alle Freiheitsgrade entfernt wurden. Eine Druckkraft wird durch diese Abhängigkeit nicht erzeugt – es ist sozusagen eine kraftlose, starre Einspannung.

6.6.6 Das Bauteil belasten



Auch bei der Definition des Kraftangriffs muss auf die Funktion der Baugruppe geachtet werden. Die Kraft wird durch den Kipphebel übertragen und somit nicht über die ganze Fläche verteilt. Der Kipphebel hat eine Berührungsfläche von 5 x 5mm, die im Zentrum der Stirnfläche die Kraft überträgt.



Nochmals muss also der FEM-Bereich verlassen und eine Skizze mit dem 5x5 mm Quadrat gezeichnet werden. Am einfachsten gelingt dies im Skizzierbereich mit dem Befehl VERSATZ und einer Bemaßung.

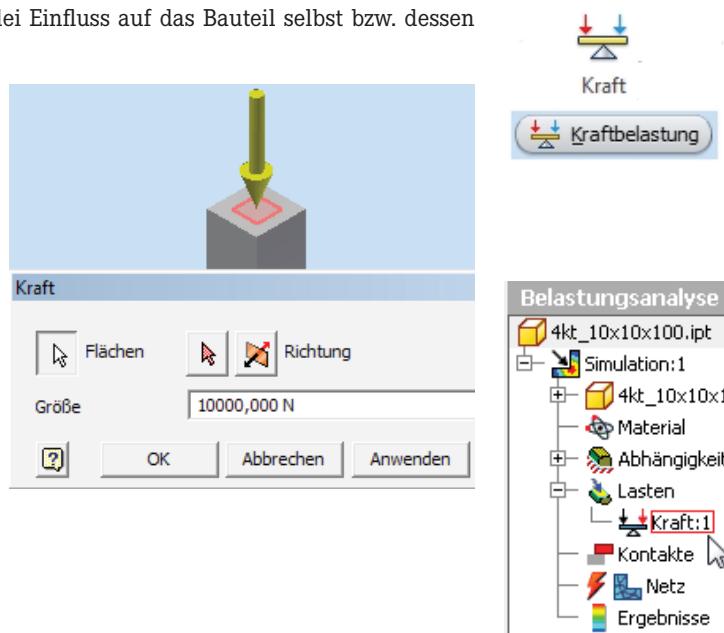
Mit der Funktion TRENNEN und der Auswahl der Stirnfläche wird jetzt mit dem Trennwerkzeug der Skizze die Stirnfläche in einen äußeren Rechteckring und in ein inneres 5x5 mm Quadrat zerlegt.

Auch dieser Vorgang hat natürlich keinerlei Einfluss auf das Bauteil selbst bzw. dessen Festigkeit.

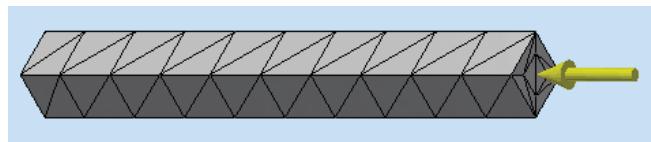
Jetzt wird wieder in der FEM-Umgebung die KRAFT definiert. In unserem Beispiel soll zu Beginn eine einfache Druckkraft von 10.000 N wirken. Als Angriffsfläche wird die kleine Quadratfläche ausgewählt.

Die KRAFTRICHTUNG wird umgekehrt, damit eine Zugbeanspruchung zustande kommt. Eine schräge Kraftrichtung, die im erweiterten Dialogfenster über die VEKTORKOMPONENTEN definiert werden könnte, soll nicht erstellt werden.

Sobald die Belastungseingabe mit OK abgeschlossen wurde, wird im Objektbrowser unter der Abteilung LASTEN die Kraft:1 angezeigt.



6.6.7 Das Bauteilnetz



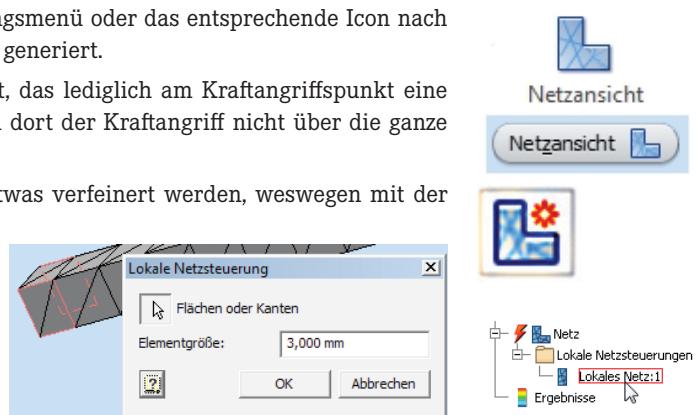
Bei diesem einfachen Bauteil wäre der folgende Schritt eigentlich nicht erforderlich. Der Vollständigkeit halber und weil er bei komplexeren Bauteilen durchaus anzuraten ist, soll er trotzdem kurz erläutert werden.

Die NETZANSICHT wird über das Markierungsmenü oder das entsprechende Icon nach den Angaben in den Belastungseinstellungen generiert.

Es wird ein einfaches grobes Netz berechnet, das lediglich am Kraftangriffspunkt eine Verkleinerung der Netzmaschen aufweist, da dort der Kraftangriff nicht über die ganze Fläche geht.

Im Bereich der Einspannung soll das Netz etwas verfeinert werden, weswegen mit der Funktion LOKALE NETZSTEUERUNG für diese Fläche eine Elementgröße (Maschengröße) von 3 MM bestimmt wird.

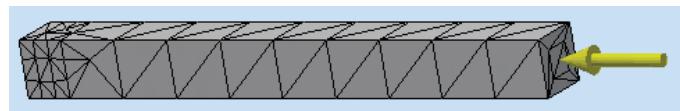
Da sich die Einspannungen auf beiden Seiten des Bauteils befinden, muss diese Verfeinierung auch auf beiden Seiten mittels



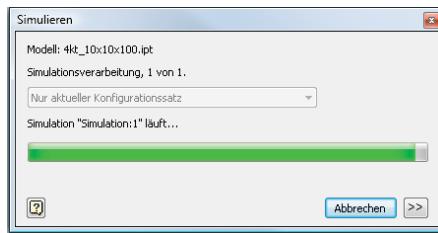
der betroffenen Flächen angegeben werden. Nach dem Abschluss wird dieser Vorgang durch einen weiteren Eintrag im Objektbrowser unter NETZ → LOKALE NETZSTEUERUNG → LOKALES NETZ:1 angezeigt.



Der ROTE BLITZ neben dem Netzordner weist darauf hin, dass das angezeigte Netz am Bauteil nicht mehr aktuell ist und mit der Funktion NETZ AKTUALISIEREN auf den neuen Stand gebracht werden muss.

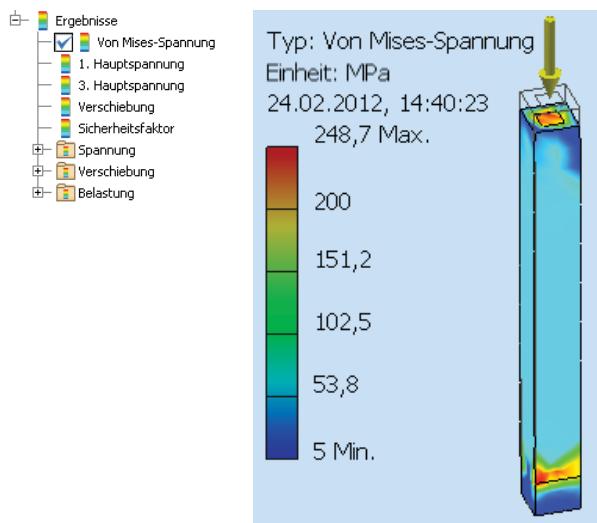


6.6.8 Simulation ausführen



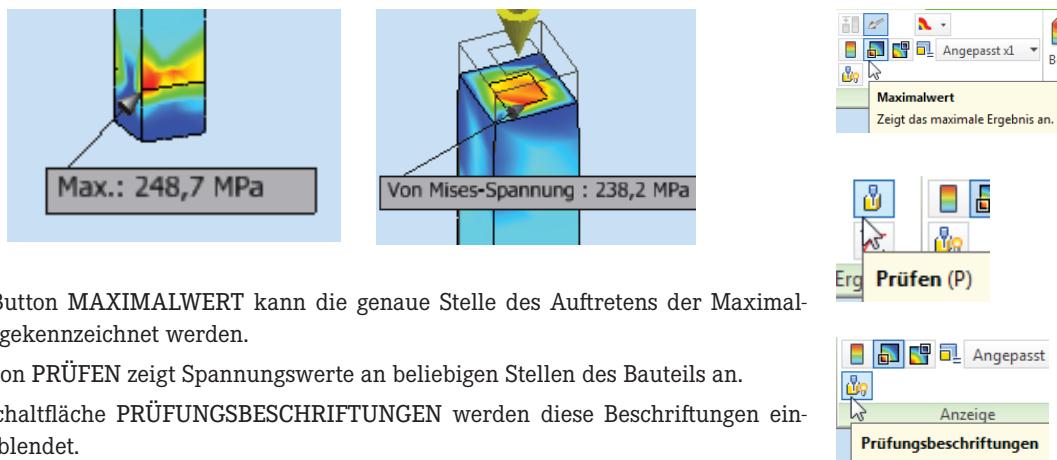
Die Vorbereitung der FE-Analyse ist jetzt abgeschlossen. Zur Durchführung der Festigkeitsberechnung müssen Sie nur noch die Schaltfläche SIMULIEREN anklicken. Das dazugehörige Dialogfenster zeigt den, bei komplexeren Teilen durchaus langwierigeren, Berechnungsprozess mit dem grünen Balken an. Sobald dieser durchgelaufen ist und weder Fehler noch Warnungen angezeigt werden, verschwindet das Fenster von selbst.

Von-Mises-Spannung



Zur Ergebnisanzeige schaltet Inventor auf die Farbschattierung um. Über die Farbskala können Sie die Von-Mises-Spannungswerte in der Einheit MPa (N/mm²) direkt ablesen.

Im Legendentext wird auch die maximal auftretende Spannung von etwa 248 MPa wiedergegeben, die im Bereich des Kraftangriffes und über der Einspannstelle auftritt. Eine Spannung von ca. 55 MPa tritt im mittleren Bereich des Druckstabs auf.



Mit dem Button MAXIMALWERT kann die genaue Stelle des Auftretens der Maximalspannung gekennzeichnet werden.

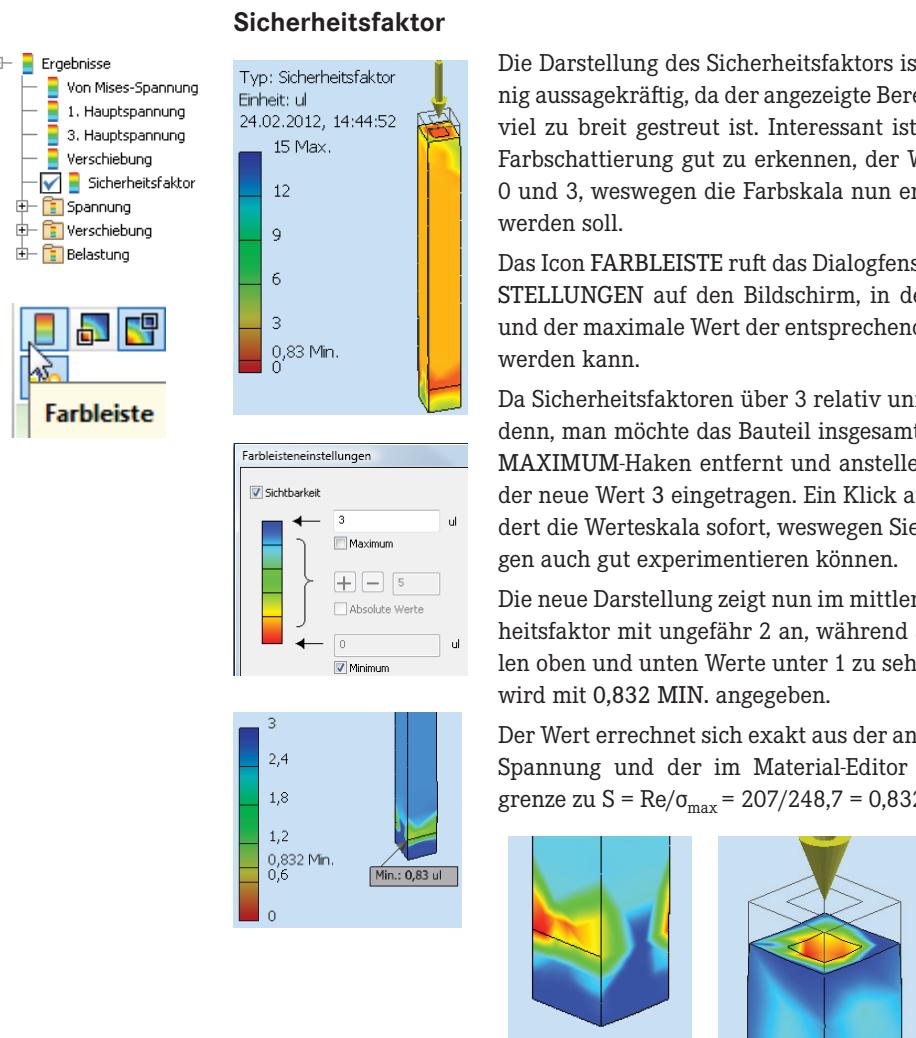
Die Funktion PRÜFEN zeigt Spannungswerte an beliebigen Stellen des Bauteils an.

Mit der Schaltfläche PRÜFUNGSBESCHRIFTUNGEN werden diese Beschriftungen ein- und ausgeblendet.

Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, ist die Von-Mises-Spannung eine Vergleichsspannung, welche die gleiche Gestaltänderungsenergie hervorruft wie eine eindimensionale Spannung. Sie ist ein Skalar und hat keine Richtung, kann aber in Bezug zur Streckengrenze des Werkstoffes gesetzt und gut zur Ermittlung des Sicherheitsfaktors bei zähen Werkstoffen herangezogen werden.

Verhalten	Isotrop
Elastizitätsmodul (Young)	210,000 GPa
Poissonsche Zahl	0,30
Schubmodul	80000,000 MPa
Dichte	7,850 g/cm ³
Dämpfungsgrad	0,00
Streckspannung	207,000 MPa
Reduktionsfaktor für Schub	1,00
Zugfestigkeit	345,000 MPa

Laut den Materialkonstanten im [Material-Editor](#) (in früheren Versionen im [Stil- und Normen-Editor](#)), auf den in Kapitel 5 bereits eingegangen wurde, hat unser Stahl eine Streckengrenze von **207 MPa** und eine Bruchspannung ([Zerreißfestigkeit](#)) von **345 MPa**. Er ist damit an den kritischen Stellen, sowohl an der Einspannstelle als auch am Kraftangriff, überlastet. Diese Bereiche müssen also genauer untersucht werden.



Die Darstellung des Sicherheitsfaktors ist in dieser Ansicht wenig aussagekräftig, da der angezeigte Bereich zwischen 0 und 15 viel zu breit gestreut ist. Interessant ist, das ist aufgrund der Farbschattierung gut zu erkennen, der Wertebereich zwischen 0 und 3, weswegen die Farbskala nun entsprechend angepasst werden soll.

Das Icon FARBLEISTE ruft das Dialogfenster FARBLEISTENEINSTELLUNGEN auf den Bildschirm, in dem u. a. der minimale und der maximale Wert der entsprechenden Anzeige eingestellt werden kann.

Da Sicherheitsfaktoren über 3 relativ uninteressant sind (es sei denn, man möchte das Bauteil insgesamt optimieren), wird der MAXIMUM-Haken entfernt und anstelle der eingetragenen 15 der neue Wert 3 eingetragen. Ein Klick auf ANWENDEN verändert die Werteskala sofort, weswegen Sie mit diesen Einstellungen auch gut experimentieren können.

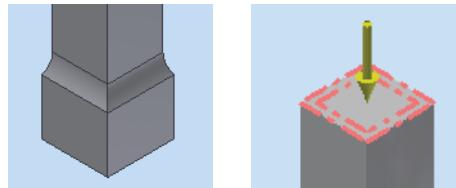
Die neue Darstellung zeigt nun im mittleren Bereich den Sicherheitsfaktor mit ungefähr 2 an, während an den kritischen Stellen oben und unten Werte unter 1 zu sehen sind. Das Minimum wird mit 0,832 MIN. angegeben.

Der Wert errechnet sich exakt aus der angegebenen maximalen Spannung und der im Material-Editor eingetragenen Streckgrenze zu $S = R_e / \sigma_{max} = 207 / 248,7 = 0,83$.

Die Einspannstelle (linkes Bild) zeigt den typischen Spannungsverlauf bei scharfkantigen Übergängen bzw. Absätzen. Die Kraftangriffsstelle (rechtes Bild) wird aufgrund der kleinen Kraftangriffsfläche überlastet.

Die Abhilfe würde z.B. darin bestehen, den Bereich der Einspannstelle auf einen größeren Querschnitt auszuformen, mit Übergangsradien zu versehen und den Bereich des Kraftan- griffs zu vergrößern.

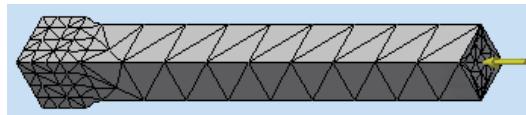
6.6.9 Anpassung der Gestalt (Gestaltfestigkeit)



Datei:
4kt_10x10x100_an-
gepasst.ipt

Der neue angepasste Zugstab mit dem Dateinamen [4kt_10x10x100_anangepasst.ipt](#) befindet sich auf der DVD zum Buch.

In der abgebildeten Druckstabausführung wurde die Einspannstelle mit dem Querschnitt 12 x 12 mm erweitert und mit **Übergangsradien 1 mm auf 3,5 mm** versehen. Die Kraftangriffsstelle wurde auf **7,5 x 7,5 mm** vergrößert. Diese Veränderungen sollten die Festigkeitsprobleme am Druckstab weitgehend beheben.

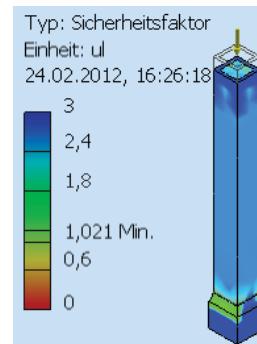
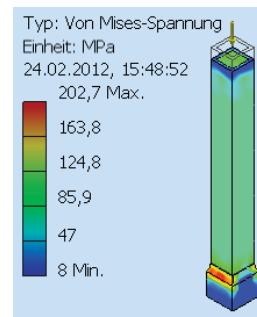


Auch das Netz wurde mittels der LOKALEN NETZSTEUERUNG an den kritischen Stellen wieder auf eine Elementgröße von 3 MM eingestellt.

Eine erneute Simulation mit denselben Belastungswerten, bei der lediglich die festgelegte Abhängigkeit der Einspannung angepasst wurde, brachte die folgenden Ergebnisse.

Die maximale Von-Mises-Spannung beträgt an der Einspannstelle jetzt nur noch 202,7 MPa (vorher 248,7 MPa), die mittlere Spannung im Zugstab ist weiterhin zwischen 40 und 60 MPa, die Kraftangriffsstelle ist vollkommen entlastet (ca. 30 bis 40 MPa).

Auch die Sicherheitsfaktoren befinden sich jetzt ganz knapp im „grünen“ Bereich. Sie liegen durchschnittlich zwischen 2 und 3, erreichen aber im Bereich der Übergangsabrundung immer noch ein Minimum von ca. 1,021, das einen Konstrukteur kaum beruhigt schlafen lässt. Sie könnten also überlegen, ob und wie man die Einspannstelle noch etwas besser ausgebildet werden könnte.



6.6.10 Materialanpassung

Eine andere Vorgehensweise, um die Festigkeitsprobleme in den Griff zu bekommen, wäre eine neue Materialzuweisung.



HINWEIS: Zu beachten ist dabei, dass ein wesentlicher Effekt durch einen Werkstoff mit höheren Festigkeiten nur bei statischen Belastungen zu erwarten ist.

Bei dynamischen Belastungen spielt die Formgebung in der Regel eine erheblich bedeutendere Rolle als die Festigkeitswerte des Materials.

Wir gehen also von einer statischen Belastung aus und kehren zu unserem ursprünglich glatten Zugstab mit der kleinen Kraftangriffsfläche zurück.

Im *Stil- und Normen-Editor* suchen wir einen Werkstoff mit höherer Festigkeit und werden beim *Stahl (hohe Festigk., niedr. Legier.)* fündig.

Dieser Werkstoff hat eine STRECKGRENZE von 275,8 MPa und eine Bruchspannung (ZERREISSFESTIGKEIT) von 448 MPa und dürfte somit knapp die Anforderungen, die wir aus der ersten Simulation ermittelt haben, erfüllen.

Der E-MODUL ist mit 200000 MPa zwar etwas kleiner als der des ersten Materials von 210000 MPa, was aber für diesen Belastungsfall vollkommen unerheblich ist.

Um innerhalb einer Simulation gegebenenfalls mehrere verschiedene Werkstoffe ausprobieren zu können, gibt es die Möglichkeit, das Ursprungsmaterial für die Simulation mit einem anderen Material temporär zu überschreiben.

Verhalten	Isotrop
Elastizitätsmodul (Young)	200,000 GPa
Poissonsche Zahl	0,29
Schubmodul	128700,000 MPa
Dichte	7,840 g/cm ³
Dämpfungsgrad	0,06
Streckspannung	275,800 MPa
Reduktionsfaktor für Schub	1,66
Zugfestigkeit	448,000 MPa

Die Funktion ZUWEISEN erfüllt diesen Wunsch über das abgebildete Dialogfenster.



Materialien zuweisen			
Komponente	Originalmaterial	Material der Überschreibung	Sicherheitsfaktor
4kt_10x10x100_anangep	Stahl	(wie definiert)	Streckgrenze

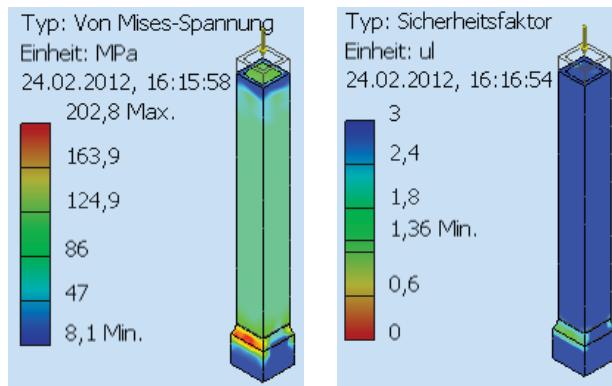
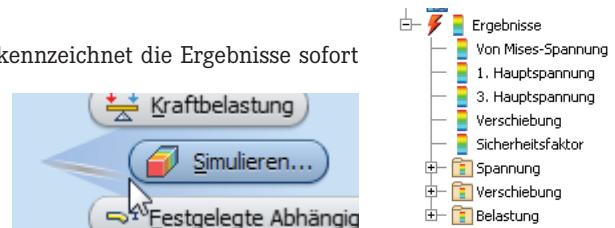
Hier wird der Ursprungszustand des Bauteils angezeigt. In die Spalte *Material der Überschreibung* muss noch der Definitionswerkstoff eingetragen werden.

Materialien zuweisen			
Komponente	Originalmaterial	Material der Überschreibung	Sicherheitsfaktor
4kt_10x10x100_anangep.ipp	Stahl	Stahl, hochfest, niedrig legier	Streckgrenze

Der vorher genannte Stahl hoher Festigkeit wird jetzt als neuer Werkstoff ausgewählt und damit der ursprüngliche Wald- und Wiesenstahl überschrieben. Anzumerken ist noch kurz, dass in diesem Fenster auch der Bezug zum Sicherheitsfaktor (hier die Streckgrenze) eingestellt werden kann.

Der Inventor bemerkt diesen Vorgang natürlich und kennzeichnet die Ergebnisse sofort mit einem **roten Blitz**, der signalisiert, dass die Ergebnisse nicht mehr stimmen und durch eine erneute SIMULATION aktualisiert werden müssen.

Im Kontextmenü des Ergebniseintrages können Sie diesen Vorgang ebenfalls schnell anstoßen.



Die Von-Mises-Spannung bleibt natürlich weitgehend im selben Größenbereich, da die tatsächlich auftretende Spannung nicht viel mit dem Werkstoff zu tun hat, sondern sich aus Kraft und Querschnitt errechnet.

Der Sicherheitsfaktor liegt jetzt mit seinem Minimum von 1,36 im positiven Bereich.

In der Praxis würde diese Entscheidung, wenn keine funktionellen Gründe dagegen sprechen, bei höheren Stückzahlen eine Kostenkalkulation herbeiführen.

6.6.11 Hauptspannungen

Eine kurze Betrachtung der SPANNUNGEN soll in diesem Beispiel nicht fehlen.

Nach der einfachen Festigkeitsrechnung ergibt sich die Normal-Zugspannung in diesem 10x10-mm-Zugstab zu:

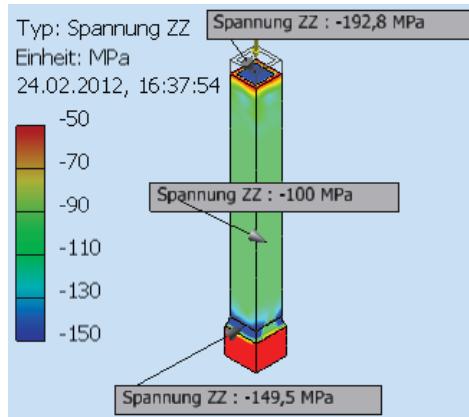
$$\sigma_z = F/A = 10.000N/100mm^2 = 100 \text{ MPa} \quad (6.1)$$

$$\sigma_z = F/A = 10.000N/(7,5 \times 7,5)mm^2 = 177,8 \text{ MPa am Kraftangriff}$$

Betrachten wir das Ergebnis der SPANNUNG ZZ, die ja die Spannungen in Druckrichtung repräsentiert und die, nachdem unser Bauteil nach dem Koordinatensystem ausgerichtet



ist, die tatsächlichen Druckspannungen weitgehend anzeigt, so können wir sehen, dass diese im Mittel tatsächlich dem Wert von 100 MPa entsprechen.



Der Maßstab der Farbskala wurde für diese Darstellung entsprechend gedehnt.



HINWEIS: Allerdings kann man auch sehr deutlich erkennen, wie oberflächlich und fehlerbehaftet die Sichtweise der einfachen Festigkeitsrechnung ist. Sie berücksichtigt keinerlei Abnormitäten der Spannungsverteilung an markanten Stellen des Bauteils, wie sie hier die Einspannstelle (192 gegenüber 177 MPa) und die Krafteinleitungsstelle (149 gegenüber 100 MPa) darstellen, an denen Spannungsspitzen auftreten.

Diesen Abweichungen gegenüber ist die Fehlerbehaftung des Näherungssystems FEM zu vernachlässigen.

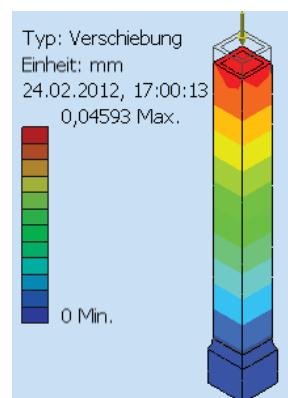
6.6.12 Verformung, Verschiebung



Die Verformungen eines Bauteils werden in der Ergebnisaufstellung der FE-Analyse unter VERSCHIEBUNG dargestellt. Diese Formulierung nimmt Bezug auf das FEM-Gittermodell, in dem tatsächlich die Verschiebungen der Netzknoten berechnet werden.

Für die bessere Beurteilung wurde hier die Ansicht der ANZEIGE von GLATTSCHATTIERUNG auf KONTURSCHATTEN umgestellt.

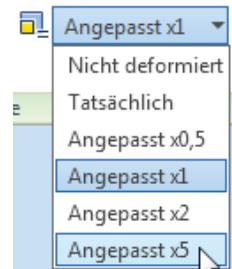
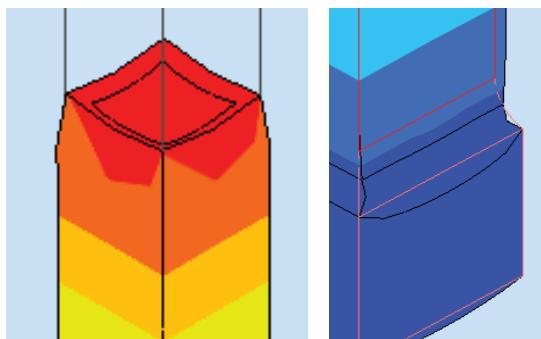
Die Verformung des Druckstabes unter Belastung wird von der Einspannstelle aus berechnet, da dort keine Verformung stattfindet. Bis zum Kraftangriff steigt die Verformung in einem konstanten Querschnitt gleichförmig an,



was an der kontinuierlichen Veränderung der Farbwerte gut zu sehen ist. Die maximale Verformung von ca. 0,046 MM tritt natürlich an der Stelle des Kraftangriffs auf.

Interessant ist hier aber auch eine detaillierte Betrachtung der charakteristischen Stellen der Einspannung und der Krafteinleitung.

In der Funktionsgruppe ANZEIGE befindet sich das Abrollmenü MASSSTAB, mit dem u. a. ein Maßstab 1:5 eingestellt werden kann.



Die Größe der Verformung spielt bei diesem Bauteil wahrscheinlich keine praxisrelevante Rolle, interessant ist aber schon die Art der Verformung, die bei hochgenauen Bauteilen durchaus auch zum Problem werden kann.

Die überdimensional dargestellte Stauchung des Druckstabes im linken Bild kann als normal betrachtet werden. Aufgrund der Krafteinleitung bildet sich jedoch am oberen Ende eine Delle heraus, die wahrscheinlich nicht der Realität entspricht, da der Kipphebel eine ebene Druckfläche hat. Möglicherweise würde hier eine Baugruppen-FE-Analyse bessere Ergebnisse bringen.

Die Formveränderung am Fuß des Bauteils (rechtes Bild) ist dagegen diskussionswürdig. Die Verdickung des Hauptkörpers (die roten Linien zeigen den Ursprungszustand) ist normal, auch die Stauchung der Übergangsradien. Dass aber, wie an der rechten Kante zu sehen, unmittelbar über dem Radius eine Verschlankung auftreten soll, ist so nicht normal. Die Verformung dieses Bereiches müsste durch die Einspannung zwischen die Klemmbacken ganz anders ausfallen. Sie kommt nur dadurch zustande, weil, wie vorher schon erwähnt, die Einspannung selbst durch die festgelegte Abhängigkeit kraftlos stattfindet, während eine reale Einspannung in Form eines Schraubstockes eine Druckkraft verursacht.

Möchte man also diese Stelle realitätsnäher simulieren, dann müsste der Stab am oberen Ende festgelegt und die Druckkräfte im Einspannbereich müssten als Kräfte auf die Flächen aufgebracht werden. Dann allerdings würde die Druckkraft in Stablängsrichtung fehlen.

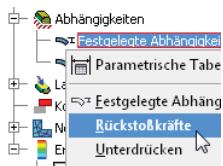
Eine Simulation des Stabes als Element einer Baugruppe würde insgesamt bessere Ergebnisse bringen.

6.6.13 Rückstoßkräfte, Lagerkräfte

Die vergebenen Abhängigkeiten, egal ob festgelegt, reibungslos oder verankert, entsprechen letztendlich den Lagerstellen, welche die Aufgabe haben, die auf das Bauteil einwirkenden Lasten in angrenzende Teile oder in Fundamente abzuleiten.

Die Gleichgewichtsbedingungen der Statik bzw. die Bedingungen zum Freimachen eines Körpers sagen aus, dass für jeden Freiheitsgrad f die Summe aller Kräfte gleich null sein muss.

In Bezug auf die Lagerkräfte bedeutet das: $\Sigma \text{Lagerkräfte}_f = \Sigma \text{Lasten}_f$



Zwei getrennte Abhängigkeiten, gegenüberliegende Einspannseite

Möchte man die Lagerkräfte einer FA-Analyse zur Kenntnis nehmen, dann muss man zum einen die schlechte Übersetzung als Rückstoßkraft kennen und zum anderen wissen, wo man diese findet. Den Eintrag RÜCKSTOSSKRÄFTE findet man im Kontextmenü der vergebenen Abhängigkeiten versteckt.

Verfügbar sind die sogenannten Rückstoßkräfte immer, wurde jedoch noch keine Simulation durchgeführt, dann werden alle Werte mit 0,000 angezeigt.

Für unser Beispiel, den mit 10.000 N belasteten Druckstab, ergibt sich aufgrund seiner Ausrichtung zur Z-Achse pro Einspannseite tatsächlich eine Lagerkraft von jeweils etwas über 5.000 N in Z-Richtung, da der Stab ja auf beiden Seiten festgehalten wird.

In X-Richtung wirken die Einspannungen, und hier ermittelt der Inventor (wie auch immer ...) ohne Angabe eines Reibwertes auf jeder Seite etwas über 2000 N, die sich aber gegenseitig über ihre Vorzeichen aufheben.

Die angegebenen RÜCKSTOSSMOMENTE zeigen die Kraftmomente in Bezug zum Schwerpunkt des Bauteils an.

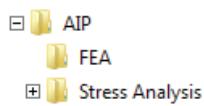
Eine einzige Abhängigkeit an beiden gegenüberliegenden Flächen

Vergibt man die beiden Einspannflächen in einem Schritt als festgelegte Abhängigkeit, dann zeigen die Werte der Rückstoßkräfte in X- und Y-Richtung 0 an, und die Gesamtkraft von 10.000 N wirkt in Z-Richtung.

	Rückstoßkraft	Rückstoßmoment
Insgesamt	5398 N	1050 N mm
X	2040 N	-19,92 N mm
Y	0 N	1050 N mm
Z	-4997 N	0 N mm

	Rückstoßkraft	Rückstoßmoment
Insgesamt	1e+04 N	0 N mm
X	0 N	0 N mm
Y	0 N	0 N mm
Z	-1e+04 N	0 N mm

6.6.14 Ergebnisprotokoll



Wurde eine Simulation durchgeführt, so werden die markanten Daten dieses Vorgangs mit einigen Einstellungen in einer LOG-Datei (Textdatei) gespeichert.

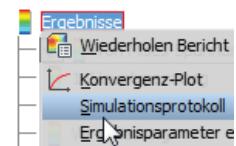
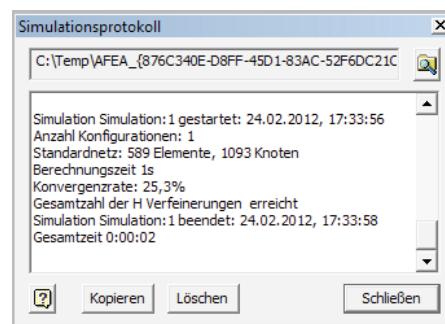
Der Speicherort befindet sich im selben Ordner, in dem sich auch das Bauteil befindet, dort allerdings in der Unterordnerstruktur AIP\FAE\...

Die Datei, die immer **Simulation.log** heißt, kann mit jedem Texteditor geöffnet, gelesen und ausgedruckt werden. Sie wird, sooft eine Simulation an diesem Bauteil durchgeführt oder wiederholt wird, automatisch fortgeschrieben.

Name	Änderungsdatum...	Typ	Größe
a8s3xpmdd.fres	24.02.2012 16:26	FEAFilesHandler.D...	90 KB
Simulation.log	24.02.2012 16:26	Textdokument	1 KB
a8s3xpmdc.fmsh	24.02.2012 16:06	FEAFilesHandler.D...	77 KB
a8s3xpmao.fins	24.02.2012 16:06	FEAFilesHandler.D...	6 KB

Wird im Kontextmenü der Ergebnisse im Objektbrowser der Eintrag **SIMULATIONSprotokoll** selektiert, dann erscheint das abgebildete Fenster mit den Inhalten des Protokolls.

Es werden das Datum und die Startzeit sowie die Dauer und die Endzeit protokolliert. Außerdem werden die Netzdaten (Elemente und Knoten), die Konvergenzrate und die H-Verfeinerungen aufgezeichnet.

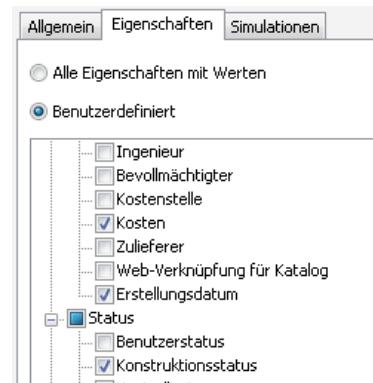
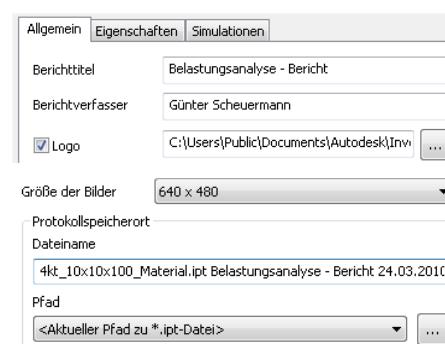


6.6.15 Bericht

Sehr viel umfangreicher und mit allen Ergebnissen ausgestattet ist der Simulationsbericht, der nicht automatisch erzeugt wird. Die abgebildete Schaltfläche *Bericht* bereitet nur die letzte, aktuelle Simulation für einen Report vor.

Die Vorbereitung geschieht im Dialogfenster **BERICHT**. Dieses enthält im oberen Bereich die allgemeinen Berichtsdaten. Auf derselben Registerkarte können unten die **GRÖSSE DER ABBILDUNGEN**, die **DATEINAMEN** und die Pfade eingestellt werden.

Die zweite Registerkarte *Eigenschaften* enthält die Auswahlmöglichkeiten zu fast allen iProperties-Daten, die mit dem Bauteil gespeichert werden. Um diese Datenauswahl verändern zu können, muss die Optionsschaltfläche *Benutzerdefiniert* ausgewählt sein.



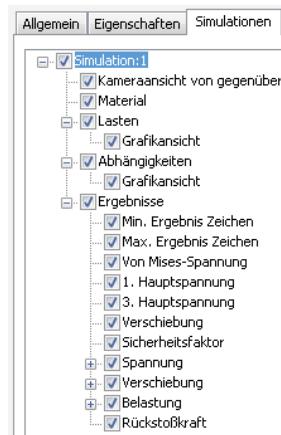


Die physikalischen Eigenschaften des Bauteils sind als Vorgabe bereits mit Haken versehen und für einen Simulationsbericht unverzichtbar.

Die dritte Registerkarte **SIMULATION** ist die interessanteste, denn hier werden alle möglichen Simulationsdaten ausgewählt. Standardmäßig sind auch alle möglichen Optionen selektiert, was allerdings einen sehr langen Bericht zur Folge hat.

Die Berichtsdatei wird als HTML-Datei geschrieben und direkt nach der Erzeugung im Standard-Internet-Browser geöffnet und angezeigt.

Ein Beispiel eines älteren Berichtes zeigen die folgenden Abbildungen in Auszügen.



Bildbreite (Pixel):

Belastungsanalyse - Bericht

Autodesk®

Analysierte Datei:	4kt_10x10x100_Material.ipt
Autodesk Inventor-Version:	2010 SP1 (Build 140253100, 253)
Erstellungsdatum:	24.03.2010, 10:57
Simulationsersteller:	Günter Scheuermann
Übersicht:	

□ Projektinfo

□ Physische Eigenschaften

Material Stahl

□ Simulation:1

Allgemeines Ziel und Einstellungen:

Konstruktionsziel	Einzelner Punkt
Simulationstyp	Statische Analyse
Letztes Änderungsdatum	24.03.2010, 10:11
Modi für starres Bauteil suchen und entfernen	Nein
Belastungen über Kontaktflächen hinweg separieren	Nein
Analyse der Bewegungslasten	Nein

Erweiterte Einstellungen:

Durchschnittl. Elementgröße (als Teil des Modeldurchmessers)	0,1
Min. Elementgröße (als Teil der durchschn. Größe)	0,2
Einteilungsfaktor	1,5
Max. Drehwinkel	60 grd
Kurvenförmige Netzelemente erstellen	Ja
Kleine Geometrie übergehen	Nein
Bauteilbasierte Messung für Baugruppennetz verwenden	Ja

□ Material(ien)

Name	Stahl (hohe Festig., niedr. Legier.)	
Allgemein	Massendichte	7,84 g/cm ³
	Streckgrenze	275,8 MPa
	Zerreißfestigkeit	448 MPa
Spannung	Elastizitätsmodul	200 GPa
	Poissonsche Zahl	0,287 oE
	Schubmodul	0 GPa
Thermospannung	Dehnungskoeffizient	0,000012 oE/°C
	Wärmeleitfähigkeit	47 W/(m K)
	Spezifische Wärmekonstante	420 J/(kg °C)
Bauteilname(n)	4kt_10x10x100_Material.ipt	

□ Betriebsbedingungen

□ Kraft:1

Belastungstyp	Kraft
Vektor X	0,000 N
Vektor Y	0,000 N
Vektor Z	-10000,000 N

Ergebnisse

Rückstoßkraft und -moment an Abhängigkeiten

Name der Abhängigkeit	Rückstoßkraft		Rückstoßmoment	
	Größe	Komponente (X,Y,Z)	Größe	Komponente (X,Y,Z)
		0,1157 N		-0,00005875 N m
Festgelegte Abhängigkeit:1	10000,9 N	0,0589042 N	0,00358828 N m	0,000806 N m
		10000,9 N		-0,00349609 N m

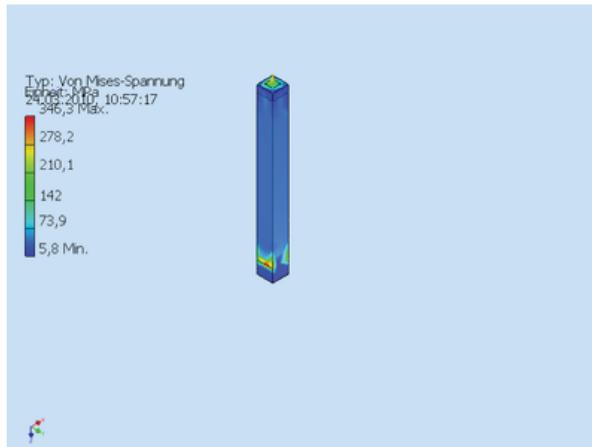
Ergebniszusammenfassung

Name	Minimum	Maximum
Volumen	10000 mm ³	
Masse	0,0784 kg	
Von Mises-Spannung	5,75198 MPa	346,25 MPa
1. Hauptspannung	-3,53374 MPa	373,067 MPa
3. Hauptspannung	-168,012 MPa	126,989 MPa
Verschiebung	0 mm	0,052265 mm
Sicherheitsfaktor	0,796534 oE	15 oE



Zahlen

Von Mises-Spannung



1. Hauptspannung



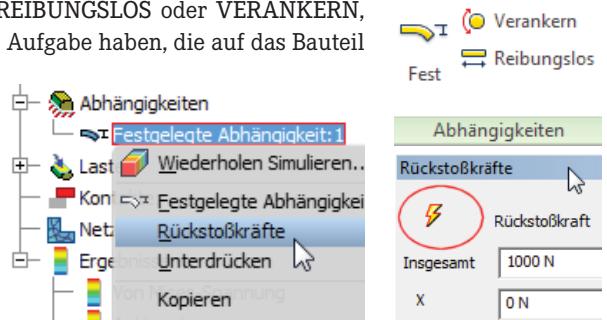
7

Rückstoßkraft und Kraftermittlung über Verformungen

Die vergebenen ABHÄNGIGKEITEN, egal ob FEST, REIBUNGSLOS oder VERANKERN, entsprechen letztendlich den Lagerstellen, welche die Aufgabe haben, die auf das Bauteil einwirkenden Lasten in angrenzende Teile oder in Fundamente abzuleiten.

Die Gleichgewichtsbedingungen der Statik bzw. die Bedingungen zum Freimachen eines Körpers sagen aus, dass für jeden Freiheitsgrad f die Summe aller Kräfte gleich null sein muss.

In Bezug auf die Lagerkräfte bedeutet dies: Σ Lagerkräfte_f = Σ Last_f



■ 7.1 Beispiel: Rückstoßkraft ermitteln

Die Datei [Kraftermittlung durch Verformung.ipt](#), deren Bauteil für dieses Beispiel verwendet wird, finden Sie auf der DVD zum Buch.



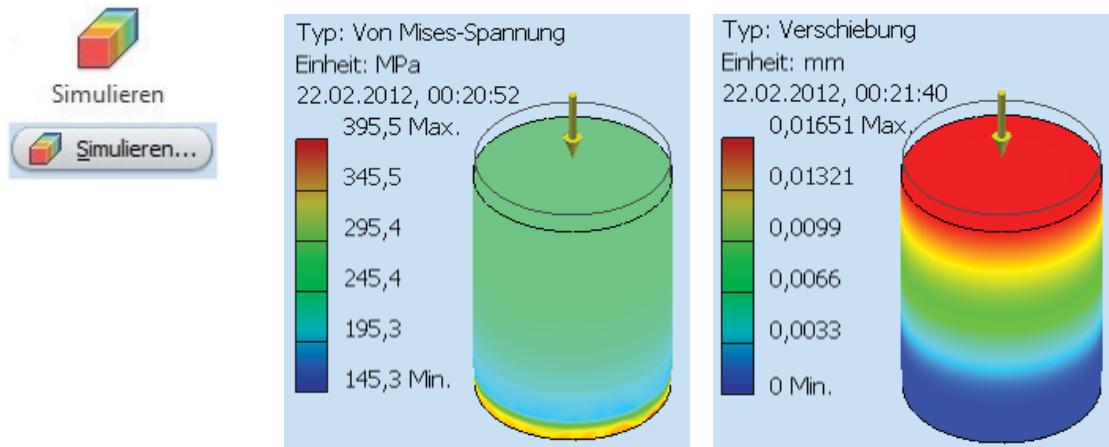
Datei: Kraftermittlung durch Verformung.ipt



Materialien zuweisen

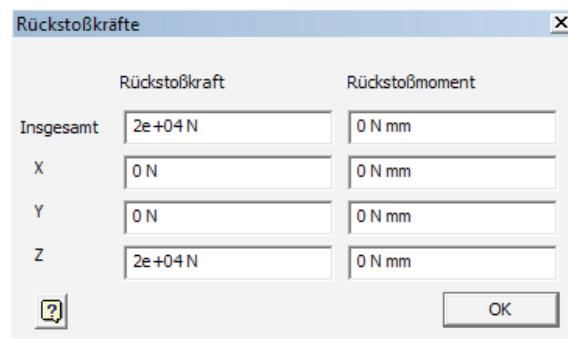
Die Kraft wirkt auf die obere Stirnfläche mit 20.000 N. Nachdem die Abhängigkeit FEST an der unteren Fläche definiert und das Material des Bauteils bestimmt wurde, ergibt die Simulation das folgende Ergebnis.





Interessant für den folgenden Abschnitt 7.2 ist weniger die relativ hohe Spannung, sondern die im rechten Bild dargestellte maximale Verformung von ca. 0,0165 mm.

Die Rückstoßkraft von 20.000 N in Z-Richtung erstaunt wenig, da diese exakt die Reaktionskraft zur Beanspruchung darstellt.



■ 7.2 Verformungskraft ermitteln



Kraftermittlung
durch
Verformung.avi

Dieses Beispiel ist im Video [Kraftermittlung durch Verformung.avi](#) auf der DVD zum Buch festgehalten.

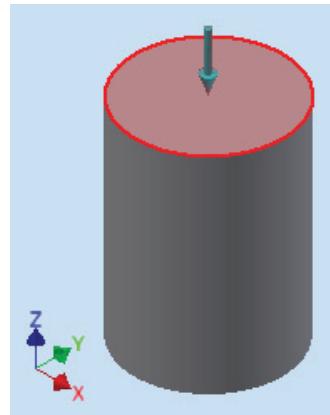
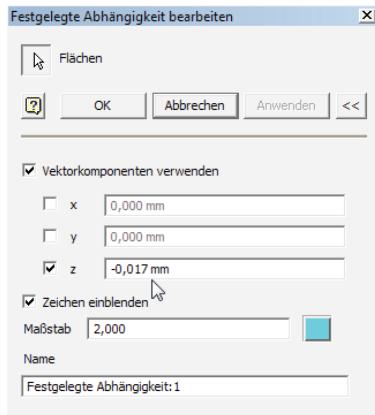
Anhand dieses Beispiels soll jetzt die Kraft ermittelt werden, die nötig ist, um das Bauteil um ca. 0,165 mm zu verformen. Dazu müssen Sie die folgenden Schritte durchführen:

- Löschen Sie die ggf. aufgebrachten Lasten (Kraft).
- Bringen Sie eine zusätzliche Abhängigkeit FEST an deren Stelle an der oberen Stirnfläche an.

Im Gegensatz zur Abhängigkeit an der unteren Fläche wird diese Abhängigkeit mit VEK-TORKOMPONENTEN definiert.

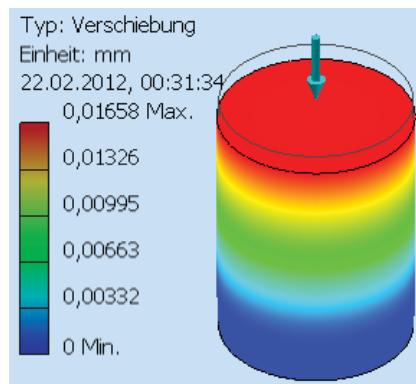
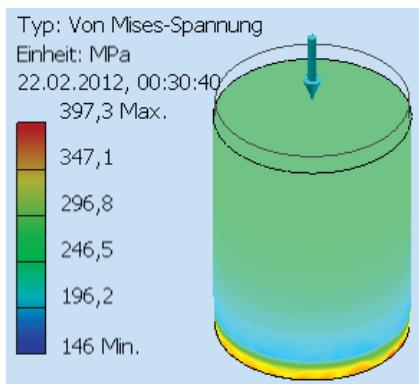
In Z-Richtung geben Sie nun den negativen Wert -0,0165 MM ein, damit diese Abhängigkeit in Richtung der beabsichtigten Verformung wirkt. Inventor runden die Anzeige auf -0,017 mm.

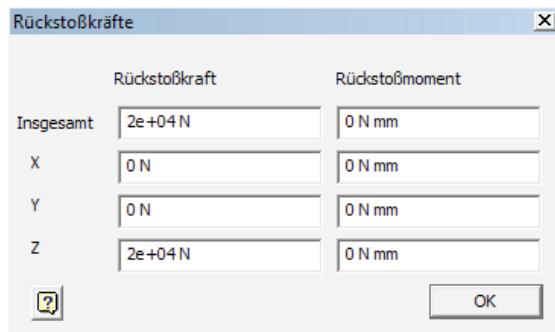
Im Gegensatz zu Kräften werden Abhängigkeitsvektoren grün dargestellt.



Die anschließende SIMULATION, die jetzt auch ohne definierte Kraft ausgeführt werden kann, ergibt ziemlich genau dieselben Spannungs- und Verformungswerte, wie sie bei der Kraft-Simulation auftraten.

Die Rückstoßkräfte beider Abhängigkeiten ergeben exakt die Kraft, die zur Verformung aufgebracht werden muss und die im ersten Beispiel mit 20.000 N angegeben wurde.





So ist es möglich, aufgrund einer vorgegebenen Verformung auf die dafür notwendige Kraft zurückzuschließen.

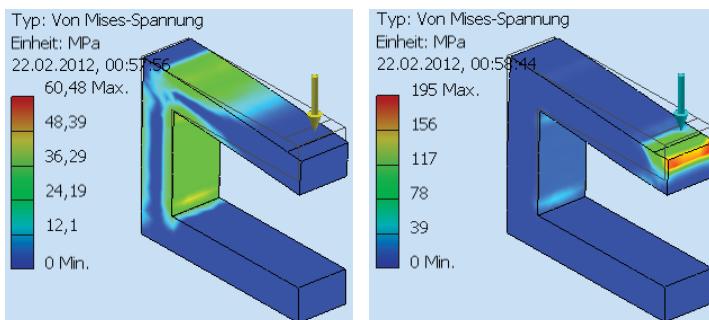
■ 7.3 Fehlerbetrachtung



HINWEIS: Das beschriebene Verfahren zur Kraftermittlung ergibt nur bei einfachen Bauteilen mit linearen Spannungen (Zug, Druck) verlässliche Ergebnisse. Sobald Biegespannungen auftreten oder komplexe Bauteilgeometrien vorliegen, sollten Sie unbedingt eine Gegenprobe mit der aus der Verformungsspannung errechneten Kraft durchführen.

Ein weiteres Beispiel, das sich unter der Bauteilbezeichnung [Rückstoßkraft.upt](#) ebenfalls auf der DVD befindet, zeigt, wie groß die Abweichungen beim Auftreten von Biegemomenten werden können.

Bei gleichem Verformungsweg, links durch eine Kraft (gelber Pfeil), rechts durch eine Vektorkomponente der Abhängigkeit (grüner Pfeil), ergeben sich bei diesem Bauteil völlig unterschiedliche Spannungsverläufe und Spannungswerte.



8

Parametrische FEM-Studien

Bereits im konstruktiven Entwurfsprozess ist es wichtig und mitunter von ausschlaggebender Bedeutung, ein Bauteil festigkeitsmäßig zu optimieren. Auch oder gerade wenn noch nicht alle Anschlussmaße und Belastungsgrößen detailliert bekannt sind, kann mit den angenommenen Werten ein Bauteil vorab die vermeintlich günstigste Geometrie erhalten. In späteren Simulationsprozessen können diese Ergebnisse verfeinert und weiter optimiert werden.



TIPP: Der Inventor bietet Ihnen hier die Möglichkeit, mit den Bauteilparametern in der FE-Analyse zu experimentieren und so zu den momentan optimalen Bauteilabmessungen zu kommen.

Eine Voraussetzung dafür ist, dass das Bauteil mit den notwendigen Parametern bemäht bzw. erstellt wurde. Eine Skizzenbemaßung ist dabei in den meisten Fällen unerlässlich.

Auf der DVD zum Buch befindet sich die Datei [4kt_10x10x100_parametrisch.ckpt](#), mit der wir das nachfolgende Beispiel bearbeitet haben.

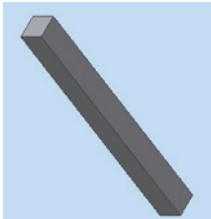
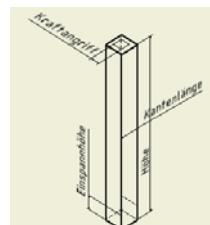


Datei: [4kt_10x10x100_parametrisch.ckpt](#)

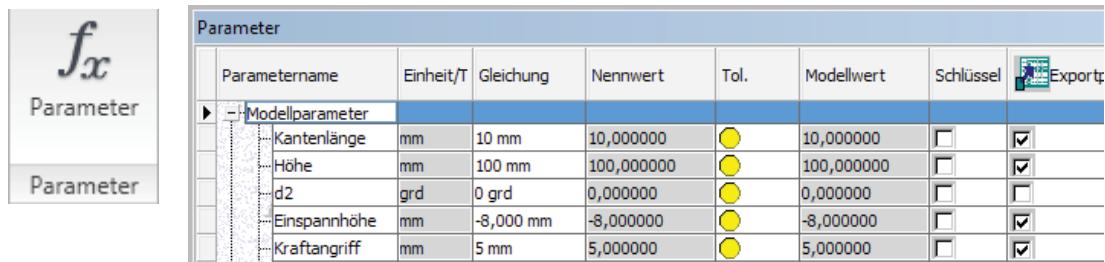
■ 8.1 Das parametrische Bauteil

Im folgenden Beispiel werden wir dieses Verfahren am einfach nachzuvollziehenden Zugstab aus Kapitel 6 darstellen.

Das Bauteil wurde aus einer 10X10-MM-Skizze auf die Höhe von 100 MM extrudiert. Für die Einspannung wurden die vordere und die hintere Seitenfläche mittels einer Arbeitsebene beim Abstand 8 MM, auf der oberen Stirnfläche wurde eine 5X5-MM-Quadratfläche per Skizze getrennt.



Die 8-MM-Seitenflächen dienen der Einspannung, das 5X5-MM-Quadrat dem Kraftangriff.



Parametername	Einheit/T	Gleichung	Nennwert	Tol.	Modellwert	Schlüssel	Export
Modellparameter							
Kantenlänge	mm	10 mm	10,000000	●	10,000000	□	✓
Höhe	mm	100 mm	100,000000	●	100,000000	□	✓
d2	grd	0 grd	0,000000	●	0,000000	□	□
Einspannhöhe	mm	-8,000 mm	-8,000000	●	-8,000000	□	✓
Kraftangriff	mm	5 mm	5,000000	●	5,000000	□	✓

Die Parameterliste wurde insofern angepasst, als die möglichen Experimentparameter mit sprechenden Namen versehen und zusätzlich als EXPORTPARAMETER gekennzeichnet wurden. Es handelt sich dabei um die **Kantenlänge**, die **Höhe**, die **Einspannhöhe** und die Fläche des **Kraftangriffes**.

■ 8.2 Vorbereitung der parametrischen FE-Analyse



Belastungsanalyse

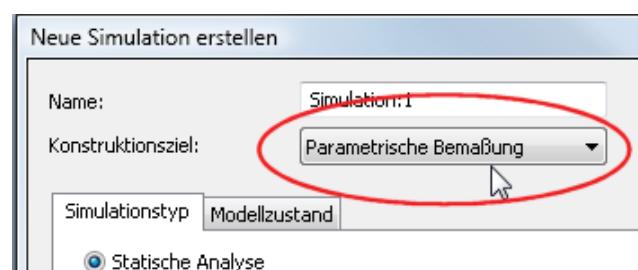


Nach dem Wechsel von der Modellumgebung in die **BELASTUNGSANALYSE** muss wie immer zuerst eine **NEUE SIMULATION** erstellt werden.

Wie auch beim Beispiel aus Kapitel 6 bleiben die Vorgaben im Dialogfenster **NEUE SIMULATION ERSTELLEN** weitgehend unverändert, lediglich im Abrollmenü **KONSTRUKTIONSZIEL** wird jetzt **PARAMETRISCHE BEMASSUNG** eingestellt.



Simulation erstellen



8.2.1 Die parametrische Tabelle

In der Funktionsgruppe **VERWALTEN** befindet sich die Schaltfläche **PARAMETRISCHE TABELLE**, mit der im nächsten Schritt das gleichnamige Dialogfenster aufgerufen wird.

8.2.1.1 Konstruktionsabhängigkeit hinzufügen

In diesem Fenster gibt es einen Bereich für die **Konstruktionsabhängigkeiten** und einen Bereich für die **Parameter**.

Die Konstruktionsabhängigkeiten sind in diesem Fall die Ergebnisgrößen einer FE-Analyse, wie z.B. die Spannungen, die Verformungen, die Sicherheitsfaktoren usw.

Die **Parameter** sind wie im Bauteilbereich die Modellparameter, allerdings sind diese hier mit zusätzlichen Fähigkeiten ausgestattet.

Wenn Sie in der parametrischen Tabelle im Bereich der **KONSTRUKTIONSAHÄNGIGKEITEN** mit dem Zeigegegen in die noch leere Zeile klicken, dann öffnet sich das Auswahlfenster für die **KONSTRUKTIONSAHÄNGIGKEITEN**.

Für unser Beispiel soll hier nur der **SICHERHEITSFAKTO** ausgewählt werden, der bei der Selektion automatisch mit den Optionen **MINIMALER WERT** und **GESAMTE GEOMETRIE** versehen wird.

Nach dem Abschluss der Auswahl wird der Sicherheitsfaktor mit dem Eintrag **MIN. SICHERHEITSFAKTO** in die parametrische Tabelle eingetragen.



Parametrische Tabelle

Parametrische Tabelle

Konstruktionsabhängigkeiten			
Name der Abhängigkeit	Abhängigkeitstyp	Grenze	Sicherheitsfaktor
► Min. Sicherheitsfaktor	Wert anzeigen		ul

Konstruktionsabhängigkeit auswählen

Ergebniskomponente	Geometrieauswahl
<input type="radio"/> Maximaler Wert <input checked="" type="radio"/> Minimaler Wert <input type="radio"/> Wertebereich Sicherheitsfaktor (highlighted with a red circle) <input type="checkbox"/> Spannung <input type="checkbox"/> Verschiebung <input type="checkbox"/> Dehnung <input type="checkbox"/> Kontaktdruck <input type="checkbox"/> Masse <input type="checkbox"/> Volumen	<input type="radio"/> Gesamte Geometrie <input checked="" type="radio"/> Ausgewählte Geometrie einbeziehen <input type="radio"/> Ausgewählte Geometrie ausschließen

Parametrische Tabelle

Konstruktionsabhängigkeiten					
Name der Abhängigkeit	Abhängigkeitstyp	Grenze	Sicherheitsfaktor	Ergebniswert	Einheit
► Min. Sicherheitsfaktor	Wert anzeigen			ul	

8.2.1.2 Abhängigkeitstyp bearbeiten

Der **ABHÄNGIGKEITSTYP** in diesem Tabellenbereich umfasst verschiedene Einträge, von denen jeder ein spezifisches Verhalten aufweist.

Abhängigkeitstyp	Erklärung
Wert anzeigen	gibt einen genauen Grenzwert an
Untere Grenze	gibt einen unteren Grenzwert an, der tatsächliche Wert kann höher sein

Abhängigkeitstyp	Erklärung
Obere Grenze	gibt einen oberen Grenzwert an, der tatsächliche Wert kann kleiner sein
Minimieren	macht das Ergebnis so klein wie möglich
Innerhalb des Bereichs	definiert einen Grenzbereich, der zwischen zwei Werten liegen muss
Bereich umgehen	definiert einen Ausschlussbereich, in dem das Ergebnis nicht liegen darf

In der Spalte **Grenze** werden die Werte oder Bereiche, für die der **Abhängigkeitstyp** gilt, eingetragen.

Die Spalte **Sicherheitsfaktor** hat mit dem festigkeitsmäßigen Sicherheitsfaktor nichts zu tun. Es handelt sich hier vielmehr um einen Toleranzfaktor, der angibt, um welchen prozentualen Wert die Grenzangaben über- oder unterschritten werden dürfen.

In der Spalte **Ergebniswert** wird letztendlich per Ampel und Wertdarstellung angezeigt, ob das Simulationsergebnis im grünen oder im roten Bereich liegt, also zulässig ist oder nicht.

Für unser Beispiel des Zugstabes soll der Sicherheitsfaktor in einem bestimmten Bereich liegen, weswegen der Eintrag **INNERHALB DES BEREICHES** selektiert wird.

Der Bereich wird, wie in der nächsten Abbildung zu sehen ist, in der Spalte **Grenze** von 1,5-3 angegeben.

Parametrische Tabelle			
Konstruktionsabhängigkeiten			
Name der Abhängigkeit	Abhängigkeitstyp	Grenze	
► Min. Sicherheitsfaktor	Innerhalb des Ber.	2 - 4	
		Wert anzeigen	
		Obere Grenze	
		Minimieren	
		Untere Grenze	
	Komponenten	Elementn	Innerhalb des Bereichs
			Bereich umgehen

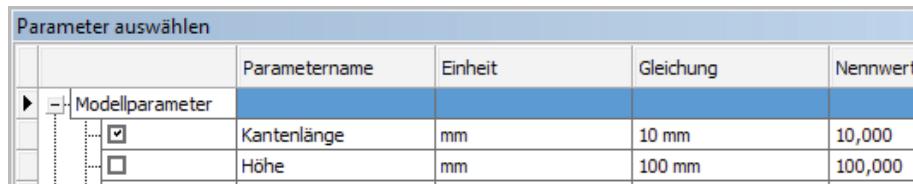
Parametrische Tabelle					
Konstruktionsabhängigkeiten					
Name der Abhängigkeit	Abhängigkeitstyp	Grenze	Sicherheitsfaktor	Ergebniswert	Einheit
► Min. Sicherheitsfaktor	Innerhalb des Bereichs	1,5 - 3	1	ul	

Für die Wert- bzw. die Bereichsangaben sind in der Spalte **Grenze** verschiedene Eingabeformate möglich:

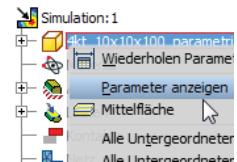
- Ein **einzelner Wert** wird als einzelne Zahl eingetragen.
- Ein **Bereich** wird durch eine kleinere Zahl, einen Gedankenstrich und eine größere Zahl definiert, z.B. 5-10 oder 1,5-3. Die Werte müssen Sie in **aufsteigender Reihenfolge** eingeben.

8.2.1.3 Bauteil-Parameter auswählen

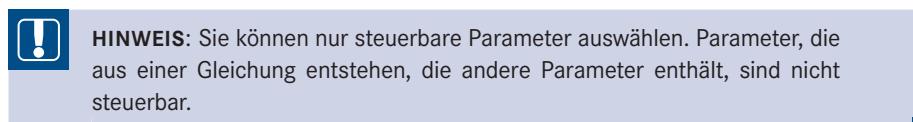
Um die Bauteil-Parameter in den unteren Bereich der parametrischen Tabelle eingeben zu können, müssen Sie im Objektbrowser im Kontextmenü des Bauteils oder seiner Eigenschaften den Eintrag **PARAMETER ANZEIGEN** auswählen.



	Parametername	Einheit	Gleichung	Nennwert
► Modellparameter				
► Kantenlänge	mm	10 mm	10,000	
► Höhe	mm	100 mm	100,000	



Es werden dann entweder alle Parameter (bei der Bauteilauswahl) oder nur die Eigenschaftsparameter der mit dem Kontextmenü ausgewählten Eigenschaft angezeigt.



Im Beispiel soll von der Zugstab-Extrusion nur die **KANTENLÄNGE**, die 10 MM beträgt, ins Parameterfeld übertragen werden, weswegen nur dieser Parameter einen Haken bekommt.

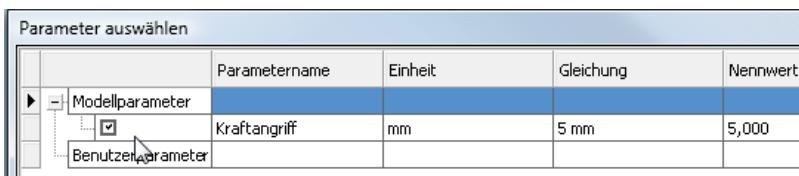


Konstruktionsabhängigkeiten					
Name der Abhängigkeit	Abhängigkeitstyp	Grenze	Sicherheitsfaktor	Ergebniswert	Einheit
► Min. Sicherheitsfaktor	Innerhalb des Bereichs	1,5 - 3	1		ul

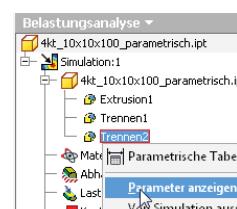
Parameter					
Komponentenname	Elementname	Parametername	Werte	Aktueller Wert	Einheit
► 4kt_10x10x100_par	Extrusion1	Kantenlänge	10	10	mm

In der parametrischen Tabelle wird diese Auswahl im Bereich der Parameter sofort einge tragen. Die Varianten, die über diesen Wert erzielt werden können, werden später definiert.

Mit demselben Verfahren wird der Parameter *Kraftangriff* der Bauteileigenschaft *Trennen2* ausgewählt. Dieser Parameter repräsentiert die Größe der Kraftangriffsfläche und beträgt zurzeit noch 5 MM.



	Parametername	Einheit	Gleichung	Nennwert
► Modellparameter				
► Kraftangriff	mm	5 mm	5,000	
► Benutzerparameter				



Wurde auch diese Auswahl abgeschlossen, stehen die beiden Bauteil-Parameter im entsprechenden Bereich der parametrischen Tabelle.

Parametrische Tabelle						
Konstruktionsabhängigkeiten						
Komponentenr.	Elementname	Parameternam	Werte		Aktueller Wert	Einheit
► Min. Sicherheitsfaktor	Innerhalb des Bereich 1,5 - 3	1			ul	
Parameter						
Komponentenr.	Elementname	Parameternam	Werte		Aktueller Wert	Einheit
► 4kl_10x10x100	Extrusion1	Kantenlänge	10	10	10	mm
4kt_10x10x100	Trennen2	Kraftangriff	5			mm

8.2.1.4 Wertbereiche und Stufensprünge festlegen

Sind alle benötigten Parameter in die Tabelle eingetragen, werden die Werte, welche diese Parameter annehmen dürfen, in die Spalte *Werte* geschrieben.

Parameter						
Komponentenr.	Elementname	Parameternam	Werte		Aktueller Wert	Einheit
4kl_10x10x100	Extrusion1	Kantenlänge	10 - 20:6		10	mm
► 4kt_10x10x100	Trennen2	Kraftangriff	5 - 7,5:5		5	mm

In der Spalte *Werte* sollten Sie die Wertebereiche und die Stufensprünge gemäß der nachfolgenden Erläuterungen eintragen:

- Für die Kantenlänge: 10-20:6
- Für den Kraftangriff: 5-7,5:5

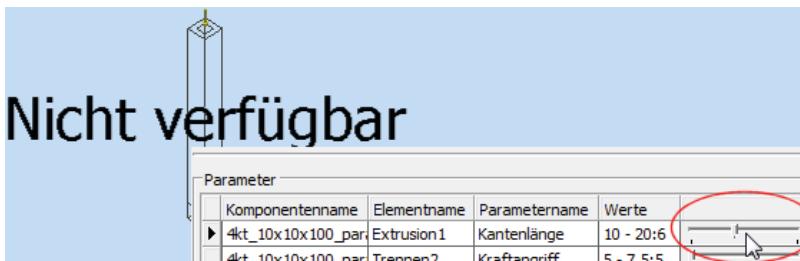
Für die Werte bzw. die Bereichsangaben sind verschiedene Eingabeformate möglich:

- Ein einzelner Wert wird als einzelne Zahl eingetragen.
- Ein Bereich wird durch eine kleinere Zahl, einen Gedankenstrich und eine größere Zahl definiert, z.B. 5-10 oder 1,5-3.
- Nach einem Doppelpunkt wird die Anzahl der Stufenschritte, in denen der Bereich durchlaufen werden soll, angegeben. Die Angabe 10-20:6 bedeutet also, dass der Bereich in den Stufen 10, 12, 14, 16, 18 und 20 durchlaufen wird.
- Für den vorherigen Fall wäre auch die Angabe 10-20/2 möglich, mit der das Inkrement des Stufensprungs angegeben wird. Inventor wandelt diese Art der Eingabe jedoch auch in die Doppelpunktvariante um.
- Die letzte Möglichkeit besteht aus dem Eintrag von dezidierten Werten, etwa 10, 14, 17, 20, die durch Kommas getrennt geschrieben werden können.



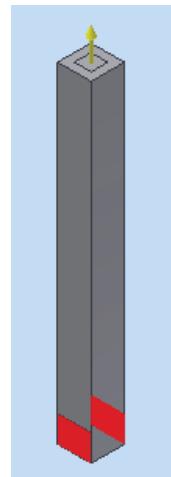
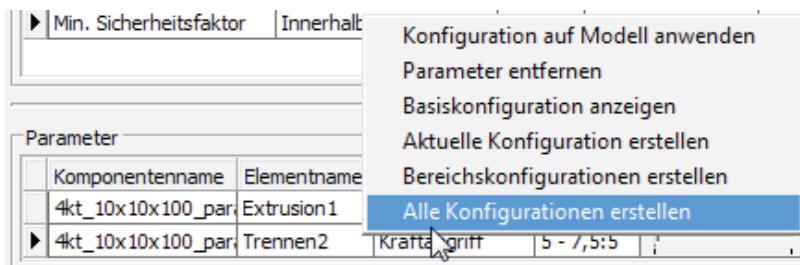
HINWEIS: Alle Werte müssen in aufsteigender Reihenfolge eingegeben werden.

Wird nach dieser Festlegung einer der Schieberegler betätigt, dann versucht der Inventor, die entsprechenden Simulationsergebnisse abzurufen. Da diese zu diesem Zeitpunkt natürlich noch nicht vorliegen, kommt stattdessen die folgende Meldung.

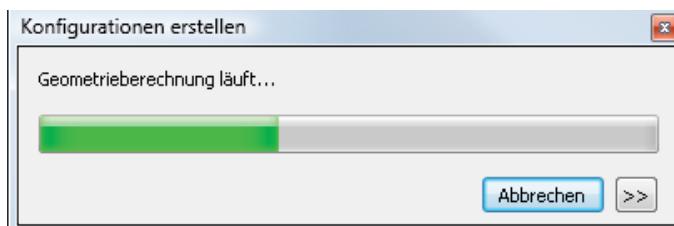


Bevor also mit den Ergebnissen gerechnet werden kann, sind noch einige Schritte notwendig.

8.2.1.5 Alle Konfigurationen erstellen



Im Kontextmenü einer Zeile des Parameterbereiches in der parametrischen Tabelle wird jetzt der Eintrag ALLE KONFIGURATIONEN ERSTELLEN ausgewählt.

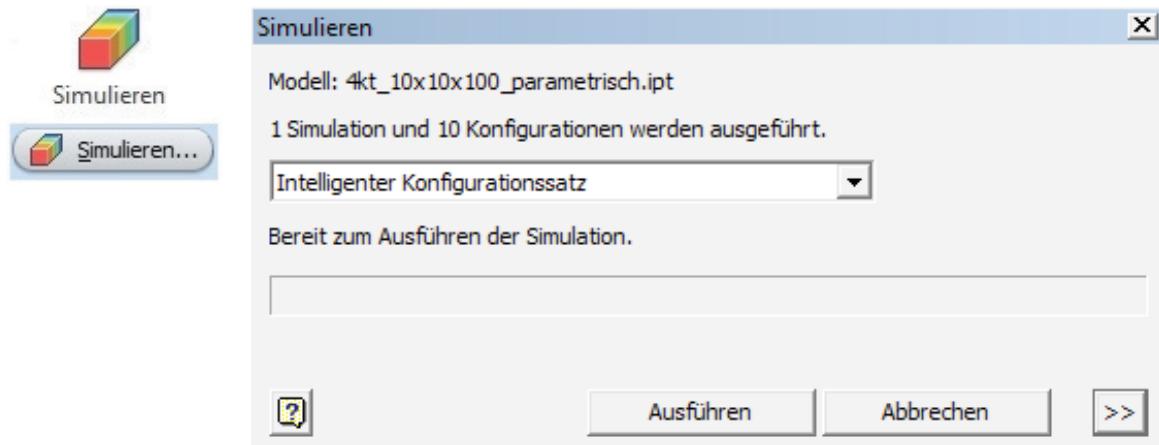


Das Ergebnis ist eine mehr oder weniger lange Rechenzeit, in der die Simulationen, die später durchlaufen werden sollen, vorbereitet werden.

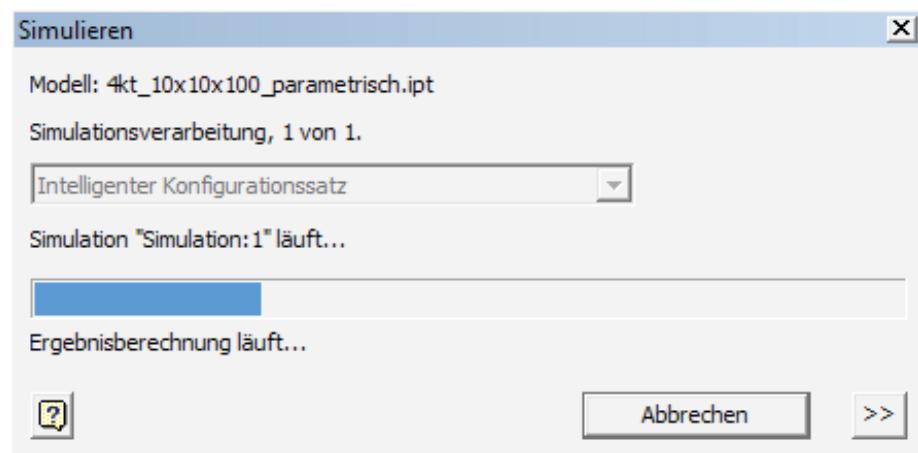
Ebenso könnten Sie natürlich Einzel- oder Bereichskonfigurationen erstellen.

■ 8.3 Die parametrische Simulation

Jetzt ist es so weit: Die parametrische FE-Analyse kann beginnen. Ausgelöst wird sie wie alle Simulationen mit der entsprechenden Funktionsauswahl. Jetzt erscheinen aber mehrere Einträge im Abrollmenü der Simulationsart.



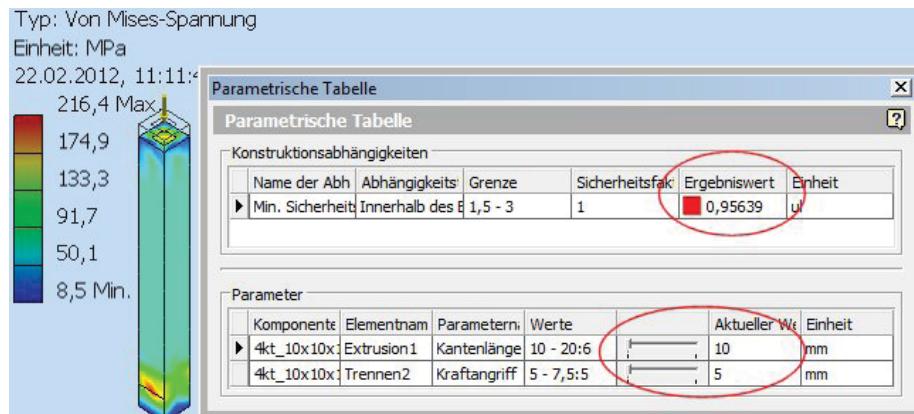
Wählen Sie nun den schön formulierten Eintrag INTELLIGENTER KONFIGURATIONSSATZ aus und klicken Sie auf AUSFÜHREN.



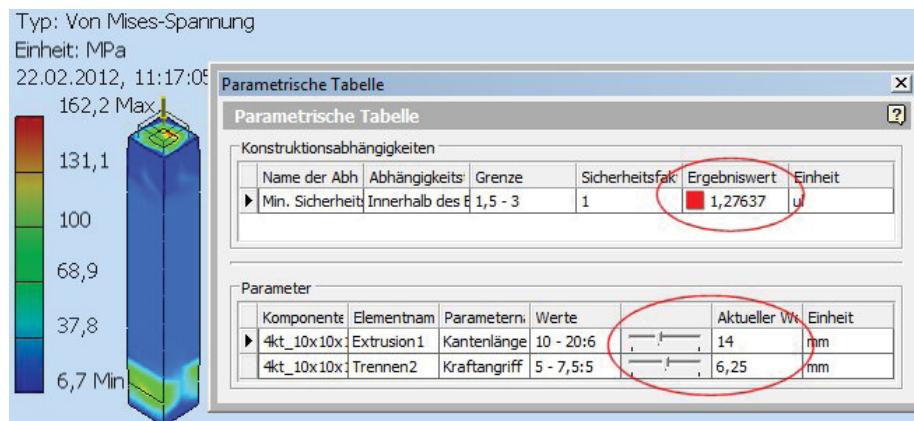
Die Folge ist diesmal eine etwas längere Rechenzeit, da nun alle möglichen Konfigurationen, unter Umständen mit jeweils neuen FE-Netzgenerierungen, berechnet werden müssen. Die Ergebnisse entlohnen dafür jedoch die Wartezeit.

8.4 Parametrische Ergebnisse

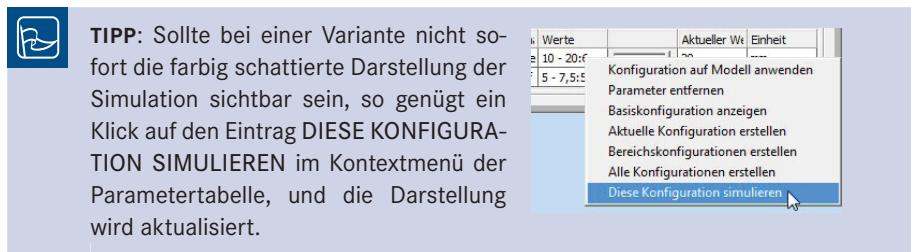
Es folgt eine Anzahl von Abbildungen der Simulationsergebnisse mit den verschiedenen Einstellungen der Schieberegler.



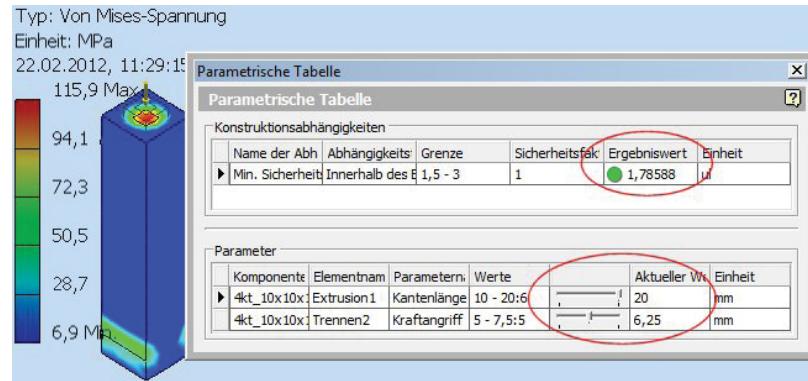
Im ersten Fall wurden die beiden Schieberegler der Bauteilparameter nicht bewegt. Das Ergebnis ist ein **Sicherheitsfaktor von 0,956**, also unzulässig und rot.



Im zweiten Fall wurden beide Schieberegler betätigt und die Kantenlänge auf 14 MM und die Kraftangriffsfläche auf 6,25 MM eingestellt. Das Ergebnis ist jetzt zwar ein **Sicherheitsfaktor von 1,276**, der jedoch noch nicht den Bereichsanforderungen von 1,5-3 entspricht und deswegen ebenfalls rot dargestellt wird.

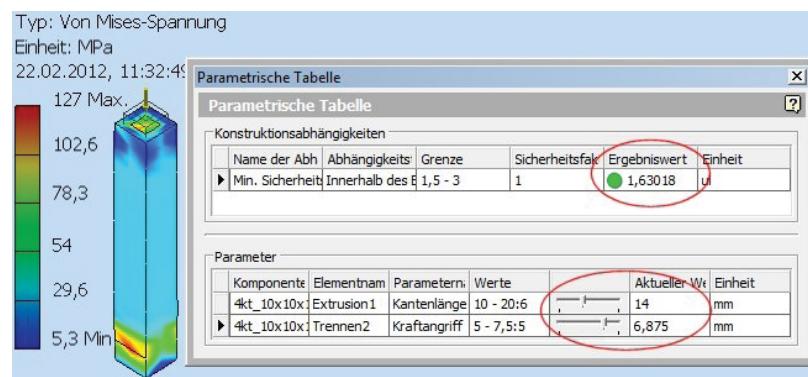


Der dritte Fall zeigt eine Einstellung mit der Kantenlänge von 20 MM und einer Kraftangriffsfläche von 6,25 MM.



Das Ergebnis ist jetzt ein grüner Sicherheitsfaktor von 1,786, der an sich akzeptabel wäre, wenn das Bauteil nicht eine maximale Kantenlänge von 20 mm haben müsste.

Infofern findet eine vierte Einstellung mit der Kantenlänge 14 MM und einem Kraftangriff von 6,875 MM endlich ihr Ziel – und zwar einen Sicherheitsfaktor von 1,63.

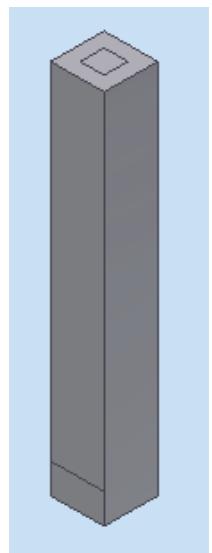
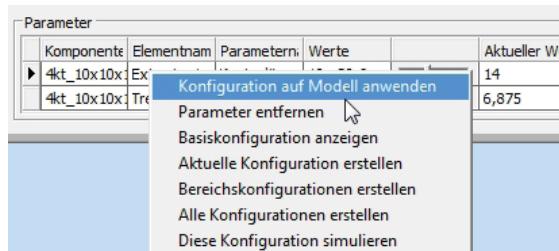


Diese Lösung wird als die endgültige akzeptiert.

■ 8.5 Das Modell anpassen

Der letzte Schritt in diesem Prozess – das Modell an die gefundenen optimalen Abmessungen anzupassen – ist nur noch eine Kleinigkeit.

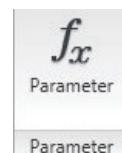
Im Kontextmenü der Parametertabelle wird wieder der Eintrag KONFIGURATION AUF MODELL ANWENDEN aufgerufen.



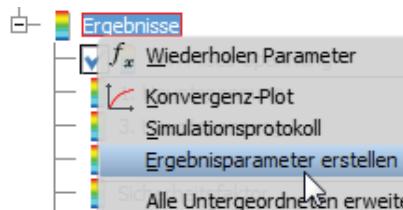
Die Folge ist eine eigentlich überflüssige Warnung, da die Folgen einer automatischen Modellanpassung jedem Anwender klar sein müssten. Aber sicher ist sicher – und so bestätigen Sie diese Warnung mit JA.

Wechseln Sie jetzt in die Modellumgebung oder rufen im Bereich VERWALTEN die Bauteilparameter auf, so sind die veränderten Werte der Kantenlänge und der entsprechend größere Bereich des Kraftangriffes bereits eingetragen, und das Modell ist auf dem aktuellen Stand.

A screenshot of a software interface showing a table titled 'Parameter'. The table has columns for 'Parametername', 'Einheit/I', 'Gleichung', 'Nennwert', 'Tol.', and 'Modellwert'. A tree view on the left shows 'Modellparameter' expanded, with 'Kantenlänge' and 'Höhe' listed under it. The 'Kantenlänge' row shows '14,00000000 mm' in the 'Gleichung' column and '14,000000' in the 'Modellwert' column. The 'Höhe' row shows '100 mm' in the 'Gleichung' column and '100,000000' in the 'Modellwert' column. Other parameters listed are 'd2', 'Einspannhöhe', and 'Kraftangriff'.



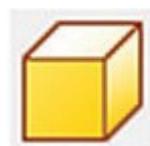
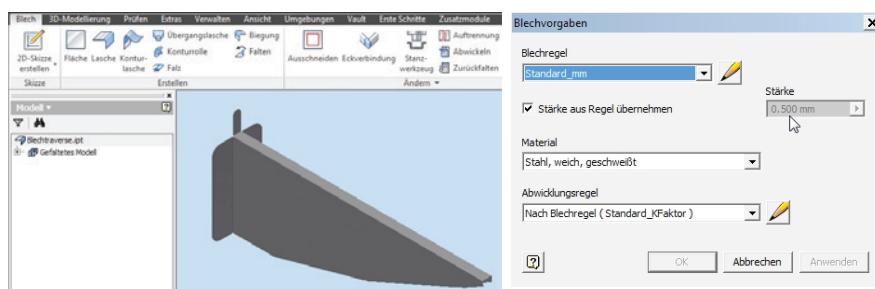
Um ggf. auch die Ergebnisparameter einer Simulation in die Parametertabelle eines Bauteils zu übertragen, können Sie im Kontextmenü der Ergebnisse die Funktion ERGEBNISPARAMETER ERSTELLEN aufrufen. Sie gibt die Simulationsergebnisse in die Dokumentparametertabelle aus.



Dünnwandige Bauteile, wie Blech- oder Kunststoffteile, machen Probleme bei der Netzerzeugung. Die kleinsten Bauteilabmessungen definieren die durchschnittliche Maschenweite des Netzes, weswegen sehr engmaschigen Netze für dünne Bauteile generiert werden, die sehr lange Berechnungszeiten verursachen.

Die ab Inventor Version 2013 integrierte Funktion zur Erkennung dünnwandiger Bauteile erzeugt aus einem dünnwandigen Bauteil ein Flächenmodell, entweder aus dessen Mittebene oder einer Versatzebene. Anschließend generiert sie auf dieser Fläche ein einfacheres 2D-Netz, das eine sehr schnelle Berechnung zur Folge hat.

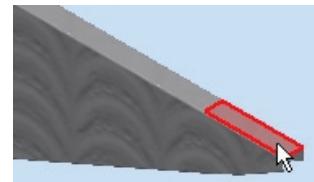
■ 9.1 Beispiel: Blechtraverse



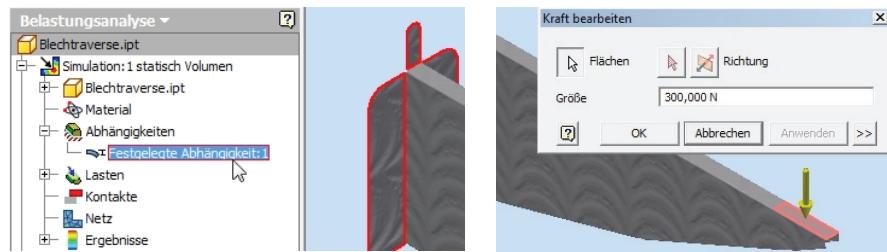
Blechtraverse.ipt

Die Blechtraverse wurde als Blechteil mit einer Wandstärke von **0,5 mm** konstruiert und soll einer Belastungsanalyse unterzogen werden.

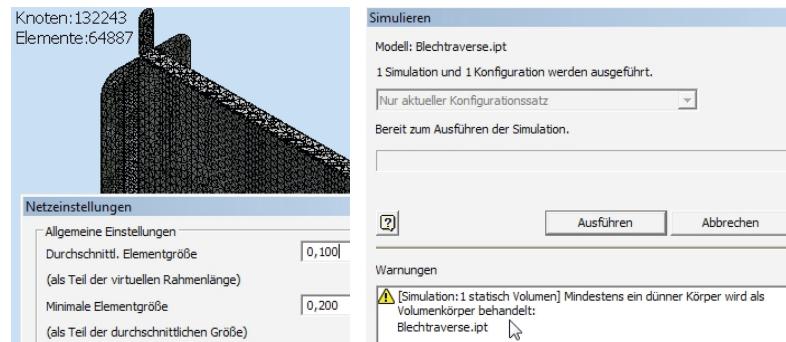
Der Kraftangriff soll im vorderen Teil der Traverse erfolgen, weswegen dieser Teil der oberen Fläche mit der Funktion TRENnen als eigene Fläche definiert wurde. Das Vorgehen der Flächentrennung zur Begrenzung der Kraftangriffsfläche wurde in vorhergehenden Beispielen schon erläutert.



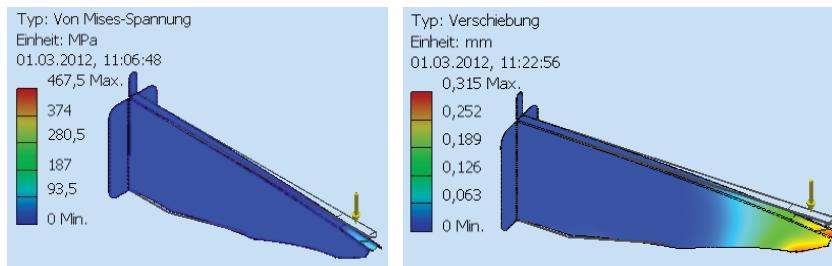
■ 9.2 Simulation als normaler Körper



In der Simulationsumgebung werden die drei hinteren Laschen mit der Abhängigkeit FEST versehen und auf die abgetrennte Fläche wird eine KRAFT von 300 N aufgebracht.

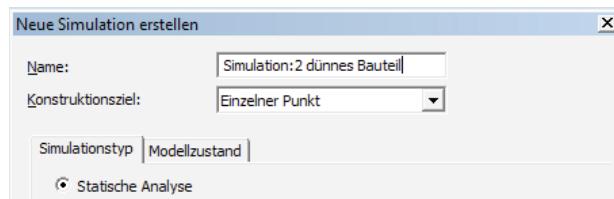


Die Netzeinstellungen, mit denen das FE-Netz generiert wird, sind das Problem dieser Simulation. Mit einer durchschnittlichen Elementgröße von 0,1 wird ein sehr enges Netz erzeugt – entsprechend lang dauern sowohl die Netzgenerierung als auch die Simulation. Wird die Simulation ausgeführt, dann erkennt das Programm, dass es sich bei diesem Bauteil um ein dünnwandiges Teil handelt. Daraufhin gibt es eine entsprechende Meldung aus, die besagt, dass dieses Teil als Volumenkörper behandelt wird.



Bis zum Ergebnis der Simulation kann man eine kleine Kaffeepause einlegen.

■ 9.3 Simulation als dünnwandiges Bauteil



Um beide Verfahren gegenüberzustellen, erstellen wir für die dünnwandige Simulation eine neue Simulation. Dass es sich bei der Blechtraverse um ein dünnwandiges Teil handelt, erkennt der Inventor, wie wir bei der vorherigen Simulation gesehen haben, selbstdäig.



HINWEIS: Bei der Dünnwand-Simulation wird aus einem dünnwandigen Teil ein Flächenverbund erstellt, der mit einem zweidimensionalen Netz überzogen wird.

Die Schaltflächen für die Behandlung dünnwandiger Teile befinden sich in der Befehlsgruppe **VORBEREITEN**, in der die folgenden Funktionen verfügbar sind.

Icon	Funktion	Beschreibung
	Dünne Körper suchen	Bei dünnwandigen Bauteilen überflüssig. Bei Baugruppen werden einzelne dünnwandige Teile erkannt.
	Mittelfläche	Wandelt ein dünnwandiges Bauteil in eine Ersatzfläche um, die der Mittenebene des Bauteils entspricht (biegeneutrale Ebene).
	Versatz	Ermöglicht die Platzierung der Ersatzfläche um einen beliebigen Versatz.

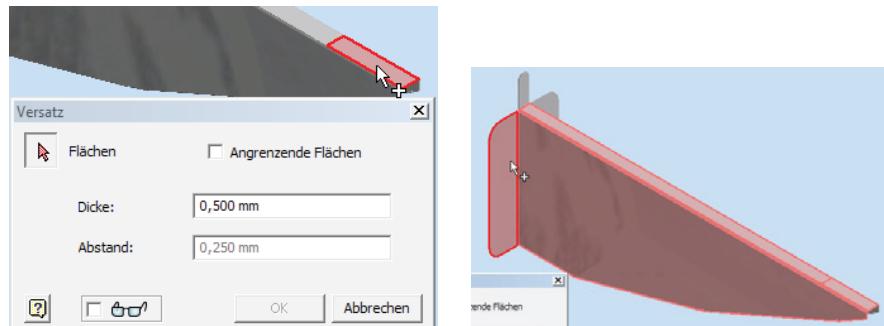




HINWEIS: Die folgenden Probleme können bei der Verwendung der Vorbeireitungsfunktionen auftreten:

- Werden Ersatzflächen gebildet (MITTELFÄLLE oder VERSATZ), dann werden schon vergebene Abhängigkeiten und Belastungen dieses Bauteils ungültig.
- Bei Simulationen mit dünnwandigen Teilen sind **zuerst die Ersatzflächen** zu definieren und danach die Abhängigkeiten und Belastungen aufzubringen.
- Haben Sie in der Bauteilumgebung Flächenabschnitte mit der Funktion TRENnen abgeteilt, damit die Belastung durch Kräfte nur auf bestimmte Flächenteile wirkt, dann können diese Flächenteile nach einer Umwandlung in eine Mittelfläche **nicht mehr selektiert** werden. In diesen Fällen müssen Sie die Funktion VERSATZ wählen und die automatische Erkennung der **ANGRENZENDEN FLÄCHEN** ausschalten. Alle Flächenteile müssen dann **„von Hand“ selektiert** werden.

Versatz

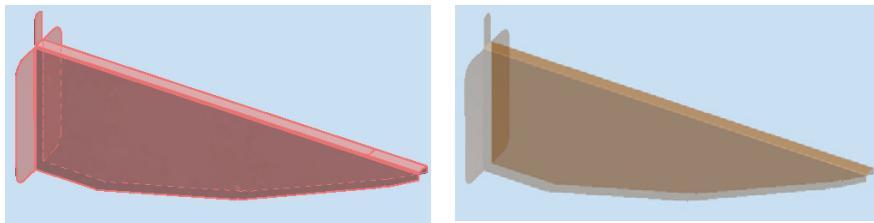


In unserem Beispiel sollten Sie gemäß dem vorigen Hinweis die Funktion VERSATZ aufrufen und im Dialogfenster die Auswahl **ANGRENZENDE FLÄCHEN** deaktivieren.

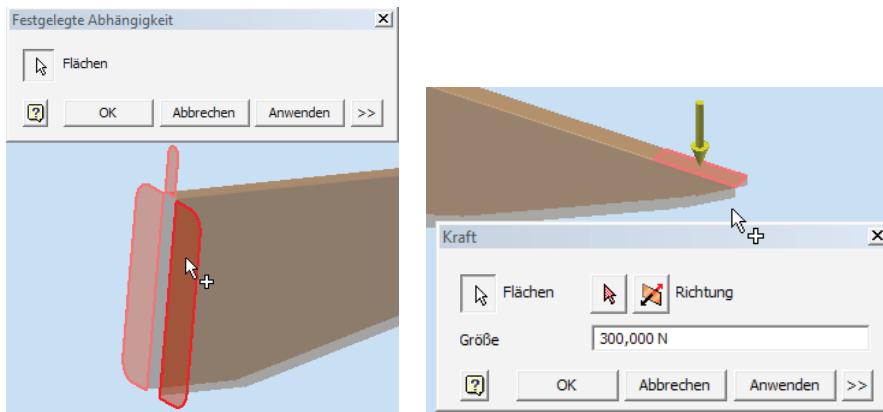
Als Dicke des Materials wählen Sie 0,5 mm, der Abstand zur Mittenebene wird automatisch eingetragen.

Alle Flächen des Bauteils müssen jetzt selektiert werden, wobei mit dem abgetrennten Flächenteil begonnen und dann immer mit angrenzenden Flächen weiter selektiert wird.

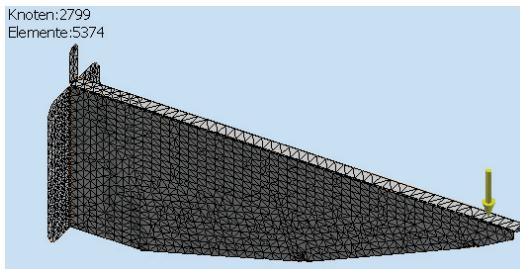
Sind alle Flächen ausgewählt, wird das ganze Bauteil rot dargestellt. Nach dem Klick auf OK wird das Bauteil im Flächenmodell angezeigt.



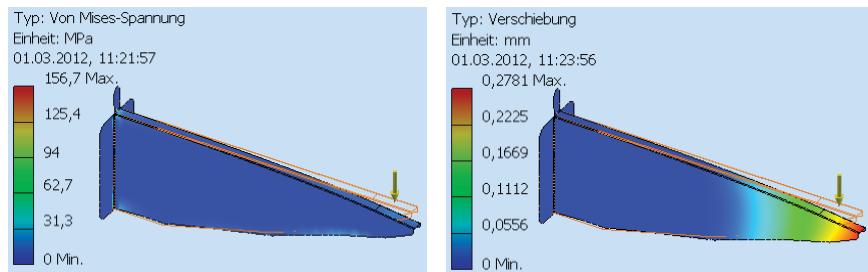
Jetzt erst können ABHÄNGIGKEITEN und KRÄFTE definiert werden.



Wie vorher werden nun die drei Laschen mit der Abhängigkeit FEST versehen und die KRAFT von 300 N kann auf dem Flächenabschnitt positioniert werden.



Im Gegensatz zur Simulation als Volumenkörper hat das Netz bei denselben Netzeinstellungen nur noch 2799 Knoten (anstelle von 132.243 Knoten).



Die Simulation verläuft im Vergleich zum Volumenkörper jetzt atemberaubend schnell durch, zeigt aber aus völlig unverständlichen Gründen deutlich andere Werte an.

Während die maximale Von-Mises-Spannung beim Volumenkörper noch mit 267,5 MPa und die maximale Verformung mit 0,315 mm berechnet wurden, beträgt jetzt die maximale Von-Mises-Spannung nur noch 156,7 MPa (Diff. > 40%) und die maximale Verformung 0,279 mm.

10

Modal- oder Eigenfrequenzanalyse

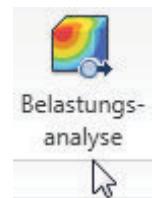
Sinn und Zweck der Modal- oder Eigenfrequenzanalyse ist es, die Frequenzen des Schwingungsverhaltens eines Bauteils zu ermitteln, bei denen gegebenenfalls Resonanzerscheinungen auftreten.

Als Resonanzschwingung bezeichnet man die Schwingung eines Bauteils, die mit der Eigenfrequenz des Bauteils zusammenfällt. Wird diese Resonanzschwingung durch eine Fremdeinwirkung angeregt, kann es bis zur Zerstörung des Bauteilmaterials führen. Bei Resonanzfrequenzen spricht man auch vom Aufschaukeln. Auch ganzzahlige Vielfache der Erregerfrequenz können zu abgeschwächten Resonanzerscheinungen führen.

In bestimmten Bereichen sind Resonanzschwingungen allerdings auch erwünscht, etwa bei Musikinstrumenten. Eine Gitarrensaite schwingt in ihrer Eigenfrequenz, eine Orgelpfeife versetzt die Luftsäule in ihr in die Eigenfrequenzschwingung. Eine Rückkopplung im Mikrofon-Lautsprecher-System ist die akustische Konsequenz einer elektromagnetischen Resonanzerscheinung.

Das Ultraschallschweißen ist in der Technik eine Anwendung in diesem Bereich.

Die Eigenfrequenzen von Bauteilen werden durch ihre Form und ihr Material bestimmt und können mittels FE-Analysen näherungsweise ermittelt werden.



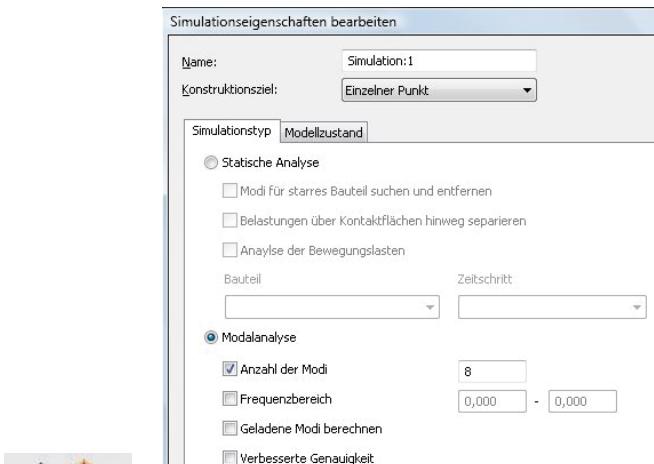
■ 10.1 Eine Modalanalyse durchführen

Als erstes Beispiel für eine Eigenfrequenzanalyse soll auch hier wieder ein einfaches Bauteil verwendet werden. Jeder kennt das große Blechfass, das beim Anschlagen so schöne dumpfe Töne von sich gibt.

In der Karibik spielen Steelbands moderne und klassische Stücke auf lackierten Öl-Tonnen und Blechfässern.

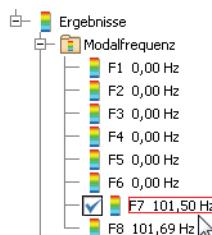
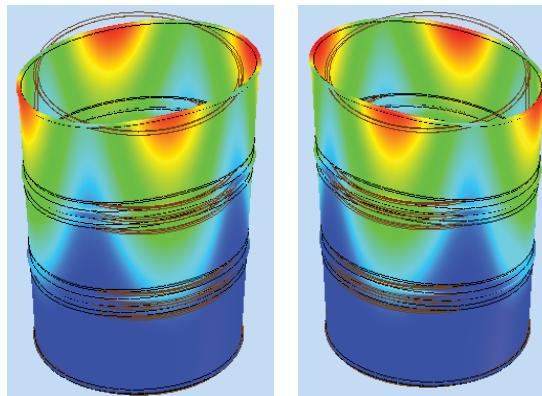
Über die Registerkarte UMGEBUNG, die Schaltfläche BELASTUNGSSANALYSE und ggf. mit dem Button SIMULATION ERSTELLEN kommen wir in das Dialogfenster SIMULATIONSEIGENSCHAFTEN BEARBEITEN.





Als SIMULATIONSTYP ist jetzt die MODALANALYSE einzustellen.

Die ANZAHL DER MODI steht auf 8 und kann auch so stehen bleiben. In dieser Anzahl werden für die verschiedenen Bewegungsmöglichkeiten die Resonanzfrequenzen gesucht.



Für sogenannte freie Bauteile, auf die keine Kraft einwirkt und die auch nicht mit Abhängigkeiten versehen bzw. festgelegt sind, und bei denen kein FREQUENZBEREICH angegeben wurde, werden die ersten sechs Modi entsprechend der sechs Freiheitsgrade bei 0 Hz berechnet. Das bedeutet, die erste Eigenfrequenz wird im Modus 7 (MODALFREQUENZ F7) angezeigt und bei symmetrischen Bauteilen in der Richtung einer Hauptachse des Koordinatensystems. Die zweite Eigenfrequenz im Modus 8 (MODALFREQUENZ F8) zeigt die Schwingung in der Richtung einer anderen Hauptachse des Koordinatensystems.

Da unser Blechfass rotationssymmetrisch ist, sind alle Schwingungen in den verschiedenen Richtungen in etwa gleich groß.

Frequenzbereich

Modalanalyse

Anzahl der Modi

Frequenzbereich -

Geladene Modi berechnen

Verbesserte Genauigkeit

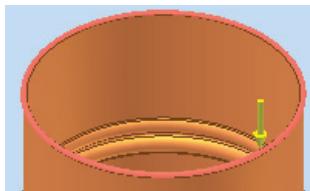
Die Angabe eines Frequenzbereichs bestimmt, in welchem Bereich nach Eigenfrequenzen gesucht werden soll.

Wurde, wie im obigen Beispiel, ein FREQUENZBEREICH von 50–200 Hertz angegeben, so findet die Frequenzanalyse auch nur die beiden Modi (MODALFREQUENZ F1 UND F2), in denen die Eigenfrequenz von ca. 100 Hertz auftritt, obwohl acht zu untersuchende Modi angegeben sind. In den ersten sechs Modi tritt aber der angegebene Frequenzbereich nicht auf, weswegen sie ignoriert werden.



Geladene Modi berechnen

GELADENE MODI BERECHNEN bedeutet laut der Inventor-Hilfe-Erklärung, dass wie bisher zuerst die unbelasteten Eigenfrequenzen ermittelt werden, im Anschluss aber eine vorhandene Vorspannung (Belastung) berücksichtigt wird und das Ergebnis die Resonanzfrequenz unter einer Belastung anzeigt.



Modalanalyse

Anzahl der Modi

Frequenzbereich -

Geladene Modi berechnen

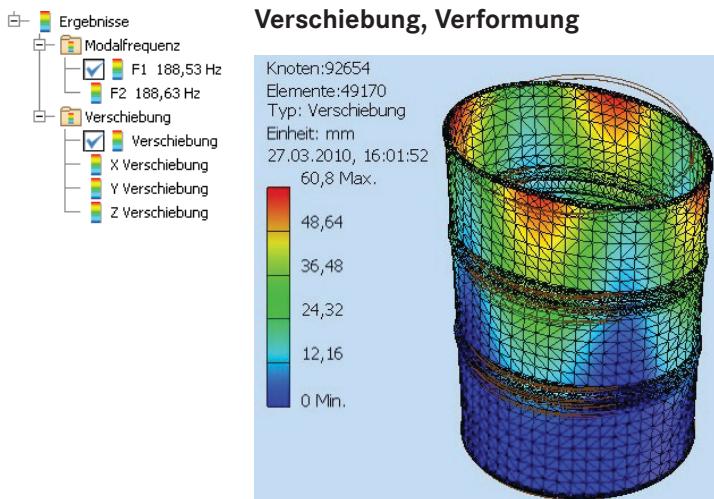
Verbesserte Genauigkeit

Im Beispiel wurde der Fassboden mit der Abhängigkeit FEST versehen, und der obere Rand nimmt eine KRAFT von 1000 N auf. Die Ergebnisse zeigen jetzt die Resonanzfrequenz von ca. 189 HERTZ an.



Wird allerdings der Haken bei den geladenen Modi entfernt, dann wird genau dasselbe Ergebnis, nur viel schneller, ermittelt, was die Bedeutung dieser Option relativ unklar erscheinen lässt.

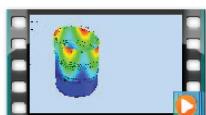
Die Auswahl VERBESSERTE GENAUIGKEIT führt eine um den Faktor von ungefähr 10 genaueren Berechnungen durch.



In der Farbskala einer durchgeföhrten Modalanalyse, in der Darstellung des Bauteils selbst und auch in der Ergebnisleiste werden Verschiebungen in Millimeter angezeigt.



HINWEIS: Die Größenordnung dieser angegebenen Verformungen hat mit der Realität nichts zu tun, das sind rein fiktive Angaben, die lediglich die Schwingungsform, also die grundsätzliche Formveränderung des Bauteils im erregten Zustand und deren Empfindlichkeit für Verformungen darstellen sollen.

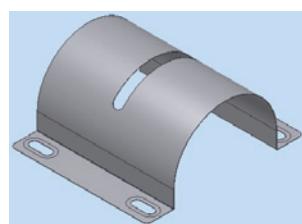


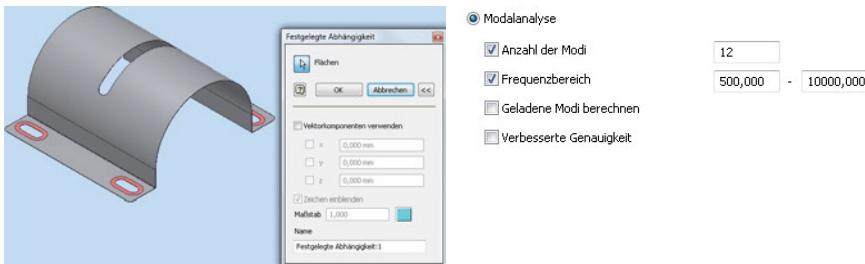
Animation auf DVD

Die tatsächlich auftretende Verformung könnte nur dann berechnet werden, wenn sowohl die erregende Kraft mit ihrer Einwirkungsfrequenz als auch die Dämpfung berücksichtigt werden würde. Dies ist jedoch bei einfachen statischen Bauteilen nicht möglich.

■ 10.2 Ein zweites Beispiel

Für das zweite Beispiel wird eine Abdeckung aus einem 0,8 MM dicken Stahlblech mit vier Langlöchern und einer langlochförmigen Revisionsöffnung am Umfang benötigt. Die Abdeckung soll an einer Schleifeinrichtung als Hand- und Spritzschutz dienen und wird über einer Kupplung zwischen einem Elektromotor und einem Getriebe angeordnet. Die Drehzahlen der Kupplung variieren zwischen 3000 und 30000 1/Min.



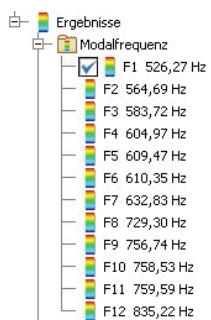
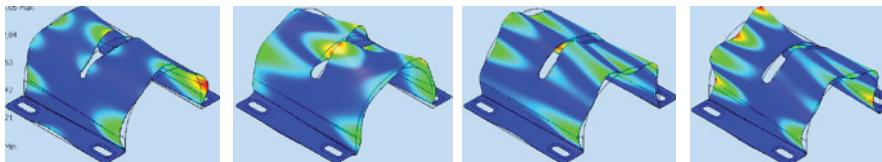


Die Abdeckung wird an den vier Langlöchern festgeschraubt. Da nicht die jeweils ganze Laschenfläche befestigt ist, wurde die Oberfläche mit dem Befehl TRENNEN im Bereich der Konturen um die Langlöcher herum aufgetrennt. Nur diese Ringflächen wurden mit der Abhängigkeit FEST festgelegt.

Die Einstellungen der Modalanalyse wurden wie folgt gewählt.

3000 1/Min. entsprechen einer Frequenz von 500 Hertz ($3000/60$), 30000 1/Min sind dementsprechend 5000 Hertz.

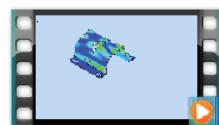
Damit auch der Bereich nach oben sicher abgedeckt ist, wurde ein Frequenzbereich von 500 BIS 10.000 HERTZ für die Analyse festgelegt. Da das Bauteil festgelegt ist, werden die ersten sechs Modi bei 0 Hertz nicht aufgeführt, sondern vom ersten Modus an werden echte Frequenzen ermittelt. Die Anzahl der Modi umfasst mit zwölf einen sehr breiten Bereich.



Die visuellen Ergebnisse der ersten vier Modi sind oben dargestellt. Probleme können, wie nicht anders zu erwarten, nur in den Randbereichen auftreten.

Die Ergebnisse der zwölf Modi liegen trotz des sehr großen untersuchten Frequenzspektrums alle im Bereich zwischen 500 UND 800 HERTZ, also in relativ niedrigen Bereichen.

Zu erwarten wäre, dass eine größere Blechdicke diesen Frequenzbereich weiter absenkt, sodass, wenn die höchsten Modi unter 500 liegen, keinerlei Probleme mit Schwingungen, Geräuschen etc. auftreten würden. Weitere Untersuchungen wären dafür nötig.



Animation auf DVD

In diesem Beispiel soll eine Stimmgabel für den Kammerton A mit 440 Hz entworfen werden. Der Kammerton A wurde zwar 1971 durch die Delegierten des Rates der Europäischen Union für die EU auf 440 Hz festgelegt, in Deutschland wird jedoch der Kammerton A überwiegend auf 439 Hz gestimmt. Für das folgende Beispiel ist das jedoch unerheblich.

Die Zinken einer Stimmgabel schwingen beim Anschlagen gegensinnig, sie verbiegen sich nach innen (zusammen) und nach außen (auseinander). Beim Nach-innen-Schwingen wird die Luft zwischen ihnen verdichtet, beim Nach-außens-Schwingen wird sie verdünnt. Die sinusförmig verlaufenden Druckunterschiede ergeben die Schallwellen, die als Ton wahrnehmbar sind.

Die Problemstellung an sich steht bei diesem Beispiel im Vordergrund, sie wird nämlich, im Gegensatz zu den meisten Modalfrequenzermittlungen, umgekehrt. Nicht die Ermittlung der Eigenfrequenz einer festgelegten Konstruktion ist hier das Ziel, sondern die Ermittlung der Konstruktionsdaten für eine ganz bestimmte Eigenfrequenz.



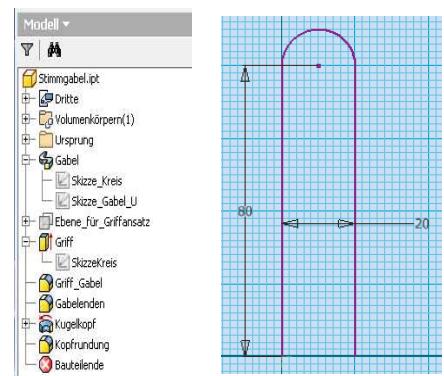
■ 11.1 Die Konstruktion

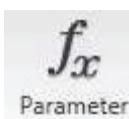
Die Konstruktion ist relativ einfach: Ein kleiner Kreis mit dem Durchmesser 5 MM auf der XY-EBENE und senkrecht dazu, auf der XZ- oder der YZ-Ebene, das U-Profil der Gabel, wobei der Anfang des U-PROFILELLS im Zentrum des 5-mm-Kreises liegen soll.

Mit dem Befehl SWEEPING, der Pfadextrusion, wird die Gabel als Element erzeugt.

Im abgebildeten Objektbrowser ist der vollständige Aufbau zu sehen, und da alle Features mit sprechenden Bezeichnungen versehen sind, kann man die Zuordnungen gut erkennen.

Die Arbeitsebene für den Griffansatz befindet sich genau am obersten Punkt des Gabelradius (in der Skizze im Abstand 80 + 10 = 90) und ist





Parameter

parallel zur XY-Ursprungsebene. Da die letztendliche Länge der Zinken noch nicht feststeht, muss der Abstand der Ebene variabel bzw. von der Länge der Zinken abhängig sein.

Im Parameterfenster sollten Sie für die spätere Verwendung einige sinnvolle Eintragungen vornehmen. Die relevanten Parameter versehen Sie auch hier mit sprechenden Bezeichnungen, und den Abstand der eben genannten Arbeitsebene (D4) geben Sie mit einer Gleichung in Abhängigkeit von der Länge der Zinken und des Radius ein.

Da einerseits die Schwingung einer Stimmgabel auch von deren Masse abhängt und andererseits die FE-Analyse nur mit definierten Materialien durchgeführt werden kann, müssen Sie der Stimmgabel schlussendlich ein Material zuweisen.

Im Prinzip ist die Wahl der Werkstoffes völlig frei, damit die Ergebnisse jedoch vergleichbar sind bzw. in ihren Größenordnungen nachvollzogen werden können, sollten Sie bei der Übung ebenfalls den STAHL (HOHE FESTIGK., NIEDR. LEGIER.) verwenden.

Das Ergebnis der Konstruktion ist die abgebildete Stimmgabel mit den Abrundungen, dem Griff und dem Kugelkopf, dargestellt im Inventor Studio.

Parameter			
Parametername	Einheit	Gleichung	Nennwert
- Modellparameter			
Durchmesser	mm	5 mm	5,000000
AbstandMittlerer	mm	20 mm	20,000000
LängeZinken	mm	80 mm	80,000000
d3	grd	0 grd	0,000000
d4	mm	LängeZinken + Radius	90,000000
AC	mm		nanan



■ 11.2 Die Belastungsanalyse

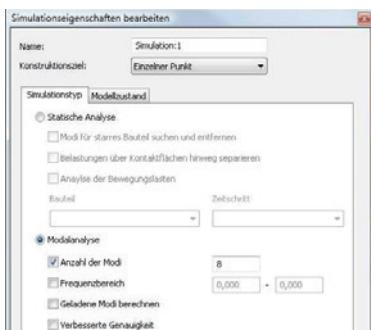


Simulation erstellen

Über die Registerkarte UMGBUNG wechseln Sie jetzt in die BELASTUNGSANALYSE.

Die wichtigste Einstellung nehmen Sie entweder durch die Auswahl SIMULATION ERSTELLEN oder über die Kontextmenüfunktion SIMULATIONSEIGENSCHAFTEN BEARBEITEN vor.



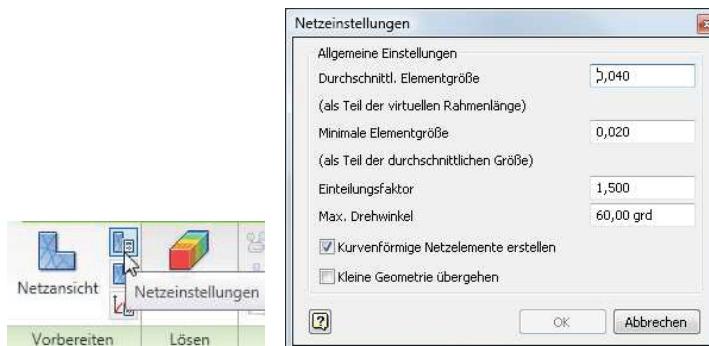


Im mittleren Bereich des Eigenschaftsfensters stellen Sie die MODALANALYSE ein, mit der Eigenfrequenzen eines Bauteils ermittelt werden. Das KONSTRUKTIONSZIEL bleibt noch auf der Auswahl EINZELNER PUNKT stehen, später werden wir jedoch auch die parametrische Analyse untersuchen.



11.2.1 Netzverfeinerung

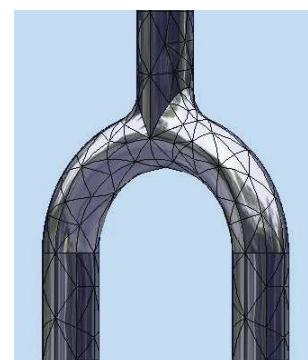
Da die Untersuchung relativ genau sein soll, wird über die Schaltfläche NETZEINSTELLUNGEN und das entsprechende Dialogfenster das FE-Netz verfeinert.



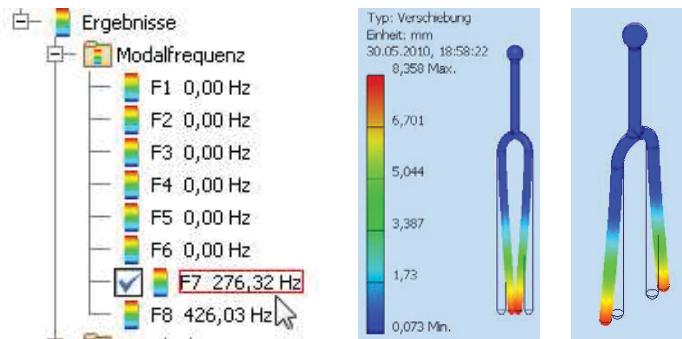
Die DURCHSCHNITTL. ELEMENTGRÖSSE soll 0,04 und die MINIMALE ELEMENTGRÖSSE nur noch 0,02 betragen.

Über den Button NETZANSICHT wird das FE-Netz generiert und angezeigt.

Auf dem Bildschirm oben links werden die Netzdaten mit 5220 KNOTEN und 2803 ELEMENTEN angezeigt. Sollte sich beim Simulieren herausstellen, dass dies noch zu ungenauen Ergebnissen führt, dann können an dieser Stelle weitere Verfeinerungen vorgenommen werden.



11.2.2 Die erste Simulation

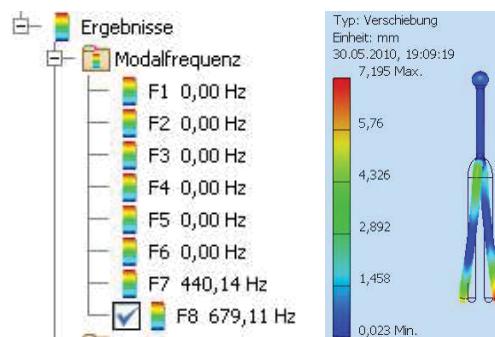


Die erste Simulation, die jetzt bereits stattfinden kann, zeigt bei der Frequenzart F7 sehr schön die Art der Schwingung. Ob die Schwingung nach außen oder innen angezeigt wird, ist allerdings zufällig und nicht beeinflussbar.

Die Grundfrequenzen F1 bis F6, die ohnehin mit 0 Hz angezeigt werden, sind uninteressant. Da die Stimmgabel mit keiner Abhängigkeit festgelegt ist, werden mit diesen Angaben theoretische Verschiebungen bzw. Rotationen im Sinne der sechs Freiheitsgrade angegeben.



Animation auf DVD



Beachtenswerter ist dagegen die Frequenz F8, die nicht die Schwingung nach innen und außen, sondern die ebenfalls gegensinnige Schwingung der Zinken nach vorne und hinten anzeigt.

Auch diese Bewegung ist jedoch bei einer Stimmgabel nicht von Bedeutung, da sie keine bzw. nur sehr geringe Luftverdichtungen und damit praktisch keine Schallschwingungen hervorruft.

Für die jetzt folgende Ermittlung der richtigen Zinkenlänge gibt es zwei Möglichkeiten, die weitgehend gleichwertig sind, jedoch unterschiedliche Arbeitsweisen erfordern:

- Die iterative Frequenzermittlung
- Die Verwendung der parametrischen Tabelle

■ 11.3 Frequenzermittlung iterativ

Das Vorgehen erfolgt über das Zusammenspiel der Parameter, wobei im entsprechenden Fenster die Länge der Zinken iterativ eingegrenzt und nach jeder Veränderung eine Simulation mit dem jeweils neuen Längenwert durchgeführt wird.

Länge der Zinken	Modalfrequenz F7
100 mm	276,32 Hz
50 mm	887,47 Hz
75 mm	454,02 Hz
77 mm	434,75 Hz
Usw.	usw.
76,37 mm	440,14 Hz

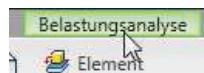
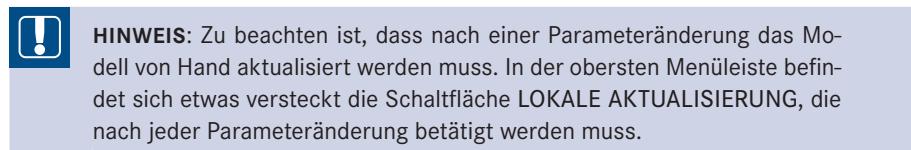
Die Frequenz F7 wird höher, wenn die Zinken kürzer werden, und umgekehrt.

Man nimmt nach zwei Extremversuchen (im Beispiel 100 und 50 mm) jeweils die Mitte und variiert die nächste Länge nach oben oder unten, je nachdem, ob die Frequenz zu hoch oder zu tief ist.

Für dieses alternierende Vorgehen muss die Arbeitsumgebung der Belastungsanalyse nicht verlassen werden. Das Parameterfenster wird über die Registerkarte VERWALTEN auch in dieser Umgebung erreicht.



Die Abbildung zeigt das Vorgehen für die Zinkenlänge 50 MM, die im Parameterfenster eingetragen wird.

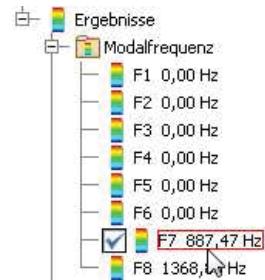


Dass die Arbeitsumgebung der Belastungsanalyse weiter aktiv ist, erkennt man am grün eingefärbten Reiter der Registerkarte. Man kann nach der Aktualisierung also sofort wieder in die Simulation gehen und erneut die Funktion SIMULIEREN aufrufen.

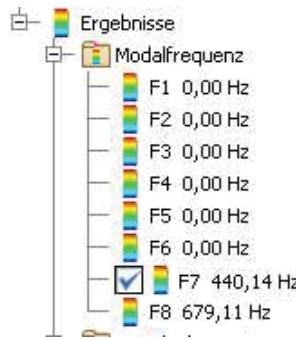


Bei der Zinkenlänge von 50 MM erhält man die F7-Frequenz von 887,47 HZ, die natürlich ob der kurzen Zinken viel zu hoch ist.

Die vorangegangene Tabelle zeigt jedoch, wie man relativ schnell mit der iterativen Längenauswahl zu brauchbaren Ergebnissen kommt. Mit wenigen Schritten pendeln sich die Längen zwischen 76 und 77 mm ein, und es ist eine Frage der gewünschten Genauigkeit, wie weit man diese Iteration treiben möchte.



Parameter			
Parametername	Einheit	Gleichung	Nennwert
Modellparameter			
Durchmesser	mm	5 mm	5,000000
Abstandmittler	mm	20 mm	20,000000
LängeZinken	mm	76,37 mm	76,370000
d3	grd	0 grd	0,000000
d4	mm	LängeZinken + Radius	86,370000
d5	mm	5 mm	5,000000
d6	mm	50 mm	50,000000
d7	grd	0 grd	0,000000
d8	mm	3 mm	3,000000
d9	mm	2,5 mm	2,500000
d10	mm	10 mm	10,000000
d12	mm	2,5 mm	2,500000
Benutzerparameter			
Radius	mm	Abstandmittler / 2 oE	10,000000



Es zeigt sich hier auch relativ schnell, dass die Genauigkeit der FE-Analyse bei der gewählten Netzdichte ihre Grenzen hat. Im Bereich von hundertstel Millimeter verändert sich an den Ergebnissen mitunter nichts mehr.

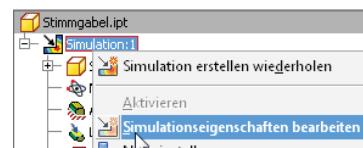
Auch an anderer Stelle im Buch wurde schon darauf hingewiesen, dass die FEM ein fehlerbehaftetes Näherungsverfahren ist, das mit manchen Dezimalstellen nach dem Komma eine nicht reale Genauigkeit nur vortäuscht.

Im Beispiel konnte das Ergebnis bei der Länge 76,37 MM und einer Frequenz von 440,14 HZ nicht mehr verfeinert werden. Darüber hinaus zeigten verschiedene Inventor-Versio- nen unterschiedliche Ergebnisse an.

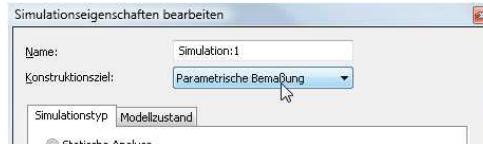
11.4 Frequenzermittlung mit parametrischer Tabelle



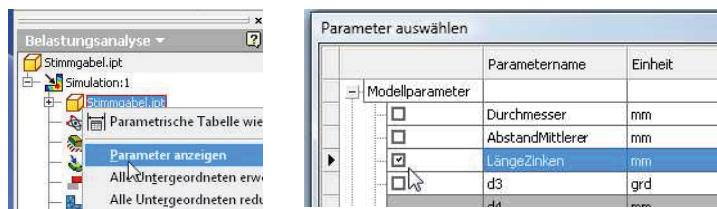
Etwas automatischer, aber nicht unbedingt schneller oder genauer, funktioniert das Optimierungsverfahren mit der Simulationsfunktion PARAMETRI- SCHE TABELLE.



Wie im vorherigen Verfahren wählen Sie dazu in der Arbeitsumgebung der Belastungsanalyse im ersten Schritt entweder die Funktion SIMULATION ERSTELLEN aus oder rufen für die aktuelle Umgebung die Kontextmenüfunktion SIMULATIONSEIGENSCHAFTEN BEARBEITEN auf.



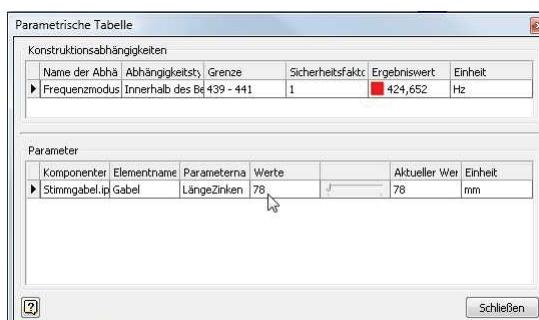
Als Konstruktionsziel wählen Sie jetzt im Eigenschaftsfenster die PARAMETRISCHE BE-MASSUNG aus, und natürlich bleibt weiter unten im Fenster die MODALANALYSE selektiert.



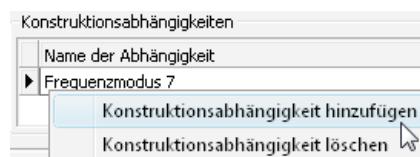
Im nächsten Schritt rufen Sie im Objektbrowser im Kontextmenü des Bauteils Stimmgabel die Funktion PARAMETER ANZEIGEN auf.

Im entsprechenden Dialogfenster versehen Sie den Modellparameter LÄNGEZINKEN mit einem Häkchen.

Jetzt kann über den Button PARAMETRISCHE TABELLE dieselbe geöffnet werden.



Im oberen Teil der Tabelle fügen Sie als NAME DER ABHÄNGIGKEIT den FREQUENZMODUS 7 ein. Dies geschieht, etwas ungewöhnlich, über das Kontextmenü des Textfeldes.



Grenze
439 - 441

Das Feld GRENZE wird mit einer Bereichsangabe gefüllt, die in etwa die Toleranz der gewünschten Frequenz angibt. Im Beispiel ist der Bereich 439–441 eingetragen, ebenso könnten z.B. engere Grenzen angegeben werden.



HINWEIS: Allerdings dürfen die Grenzen nicht so eng sein, dass der Inventor keine Lösung für diesen Bereich finden kann. Zumindest auf meinem System führte das zu einem endlosen Rechenprozess, der mit einem Inventor-Absturz quittiert wurde.

Ergebniswert
434,033

Ergebniswert
440,232

Ein Ergebniswert wird vom System erst dann eingetragen, wenn bereits eine Simulation stattgefunden hat. Das rote Quadrat zeigt an, dass der Wert außerhalb des angegebenen Bereichs liegt. Treffer werden mit einem grünen Quadrat ausgezeichnet.

Im unteren Bereich des Dialogfensters, in der Parametertabelle, werden in der Spalte Komponentenname das Bauteil STIMMGABEL.IPT, unter ELEMENTNAME die Extrusion der GABEL und als PARAMETERNAME der zur Anzeige markierte Parameter LÄNGEZIN-KEN angezeigt.

Werte	Aktueller Wert
74,9;75,76,1;77,77,1	77

In der Spalte WERTE können mehrere durch Strichpunkte getrennte Werte in aufsteigender Reihenfolge eingetragen werden. Da zu erwarten ist, dass das Ergebnis zwischen 74 und 77 mm liegt, werden dieser Werte: 74,9;75;76,1;77;77,1 eingetragen.

Mit dem Schieberegler rechts daneben können jetzt die einzelnen Größen durchlaufen werden.

Bei Werten, für die der Inventor noch kein Ergebnis berechnet hat, wird dies am Bildschirm durch die Anzeige NICHT VERFÜGBAR signalisiert.



Werte	Aktueller Wert	Einheit
74;74,5;74,9;75;76,1;77,77,1	74,5	mm

Context menu options (from bottom up):

- Konfiguration auf Modell anwenden
- Parameter entfernen
- Basiskonfiguration anzeigen
- Aktuelle Konfiguration erstellen
- Bereichskonfigurationen erstellen
- Alle Konfigurationen erstellen
- Diese Konfiguration simulieren**

Simulieren	
Modell:	Stimmgabel.upt
1	Simulation und 8 Konfigurationen werden ausgeführt.
Intelligenter Konfigurationssatz	<input type="button" value="Kompletter Konfigurationssatz"/>
Kompletter Konfigurationssatz	<input type="button" value="Intelligenter Konfigurationssatz"/>
Intelligenter Konfigurationssatz	<input type="button" value="Nur aktueller Konfigurationssatz"/>



Simulieren



Es muss dann, entweder über das Kontextmenü DIESE KONFIGURATION SIMULIEREN oder den SIMULIEREN-Button, eine Simulation durchgeführt werden.

Wählt man den SIMULIEREN-Button, so kann im Listenfeld KOMPLETTER KONFIGURATIONSSATZ ausgewählt werden, wobei das Programm dann auch alle anderen Werte berechnet.

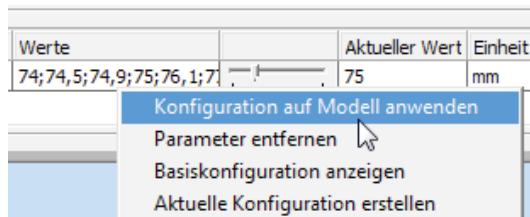
Wird anschließend die neue Zehntelreihe mit dem Schieberegler durchlaufen, so landet man bei den Werten 74,9 und 75 Treffer, die in dem angegebenen Toleranzbereich liegen.

Wertigkeitsotyp	Grenze	Sicherheitsfakt	Ergebniswert	Einheit
ob des Bereichs	439 - 441	1	440,13	Hz

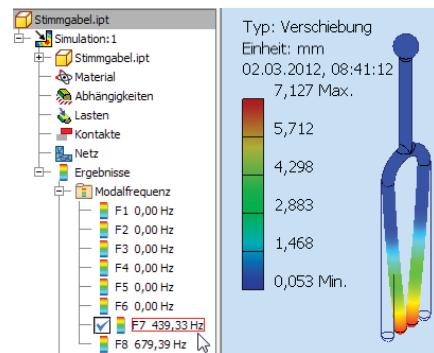
Wertigkeitsotyp	Grenze	Sicherheitsfakt	Ergebniswert	Einheit
ob des Bereichs	439 - 441	1	439,328	Hz

Parameternam	Werte	Aktueller Wert
LängeZinken	74;74,5;74,9;75;76,1;7	74,9

Parameternam	Werte	Aktueller Wert
LängeZinken	74;74,5;74,9;75;76,1;7	75



Die gefundene Länge wird jetzt mit KONFIGURATION AUF MODELL ANWENDEN an die Stimmgabel übergeben.



Parameter				
Parametername	Einheit/ Gleichung	Nennwert	Tol	
Modellparameter				
Durchmesser	mm	5 mm	5,000000	...
AbstandMittlerer	mm	20 mm	20,000000	...
LängeZinken	mm	75,0000000 mm	75,000000	...



Animation auf der DVD

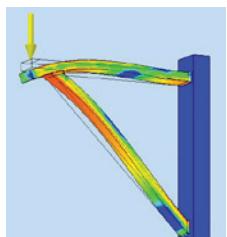
12

FEM an Schweißbaugruppen

Die Inventor FEM kann auch Schweißbaugruppen inklusive Schweißnähten berechnen. Auch wenn die Schweißnahtberechnung recht rudimentär ist, so kann sie doch als erste Näherung förderliche Auskünfte geben und beim Optimieren von Konstruktionen gute Dienste leisten.

Allerdings sind bei der Anwendung der FEM an Schweißbaugruppen einige Besonderheiten zu beachten, die es sinnvoll erscheinen lassen, in diesem Kapitel gesondert betrachtet zu werden.

Wie schon in den vorherigen Kapiteln soll auch hier mit einem ganz einfachen Beispiel die Vorgehensweise demonstriert werden. Die Eigenheiten bzw. die einzelnen Arbeitsschritte können dann problemlos auf komplexere Zusammenhänge übertragen werden.

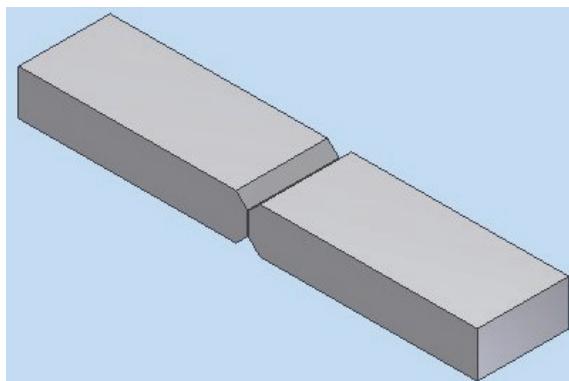


■ 12.1 Erstes Beispiel

12.1.1 Die Baugruppe

Als erstes Beispiel dient ein einfacher Zugstab, der aus zwei zum Schweißen vorbereiteten Flachstählen 20 X 40 MM zusammengesetzt werden soll. Die Datei [ZugstabKehlnaht.iam](#) befindet sich auf der DVD zum Buch.

Für die beiden vorgesehenen Kehlnähte sind 5X5-MM-Fasen an der Ober- und der Unterseite angebracht.



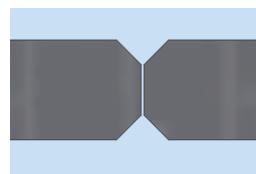
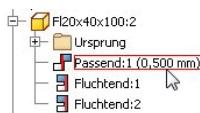
ZugstabKehlnaht.iam



Als Werkstoff wurde ein SR355-J2 gewählt, der sich standardmäßig nicht in der Inventor-Materialbibliothek befindet, aber in Kapitel 5, [Die Materialbibliothek](#), als Beispiel erzeugt wurde.

Eine erste Besonderheit ist im nachfolgend abgebildeten Querschnitt zu sehen. Die beiden Bauteile sind zwar an den Stoßflächen

mit der 3D-Abhängigkeit PASSEND (Fläche an Fläche) verbunden, es wurde aber ein VERSATZ VON 0,5 MM eingegeben, der dafür sorgt, dass die beiden Flächen nicht ganz zusammenstoßen.



Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass der FEM-Modul, wenn er die [Kontaktverbindungen](#) herstellt, die beiden Bauteilflächen getrennt lässt. Bei der Beschreibung der Kontakte wird darauf noch näher eingegangen.

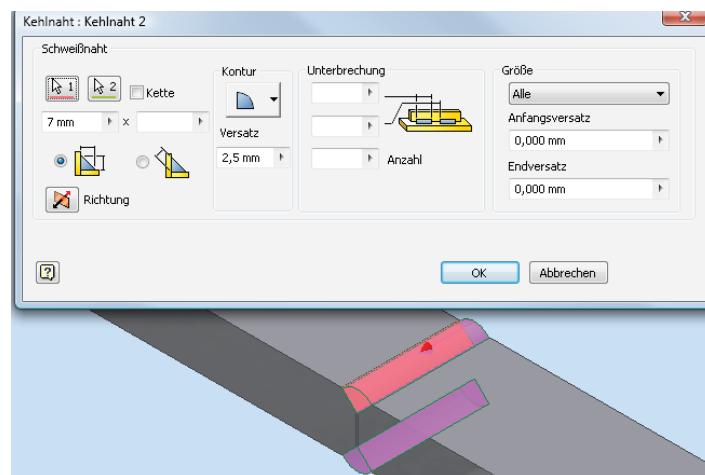
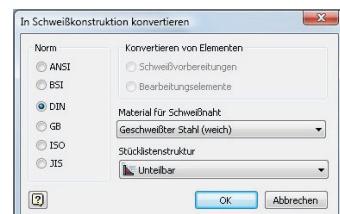
12.1.2 Die Schweißverbindung



Die Baugruppe muss, um Schweißnähte anbringen zu können, in eine Schweißbaugruppe konvertiert werden.

Die Materialauswahl für Schweißnähte ist relativ begrenzt, und so wird, neben der Schweißnorm DIN, ein einfacher geschweißter Stahl ausgewählt.

Für den Schweißvorgang ist entsprechend der Nahtvorbereitung eine KEHLSCHWELD NAHT anzubringen, die in der KONTUR-Ausführung gewölbt und mit 7 MM Nahthöhe eingepasst wird.



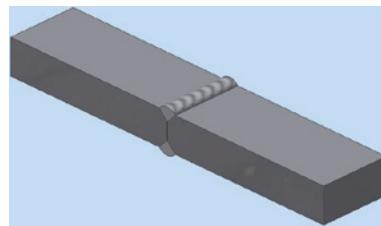
Am fertig geschweißten Bauteil ist jetzt auch deutlich der kleine Spalt zwischen den stirnseitigen Bauteilflächen zu erkennen.

Alternativ zur eher erfahrungsgemäßen oder gefühlsmäßigen Auslegung einer Schweißnaht kann natürlich auch der, in die Schweißumgebung des Inventors integrierte, [Modul zur Berechnung von Schweißnähten](#) herangezogen werden.

Leider stehen die hier verfügbaren Schweißwerkstoffe, z.B. die Elektrode E70XX, nicht in der Inventor-Materialbibliothek zur Verfügung. Möchte man das ändern, könnten aber die hier angegebenen Werte sehr gut zu einer entsprechenden neuen Materialdefinition in der Bibliothek herangezogen werden.

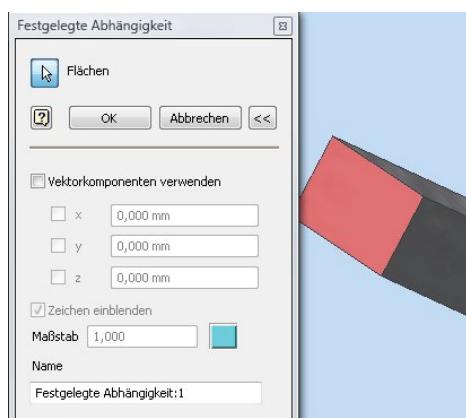
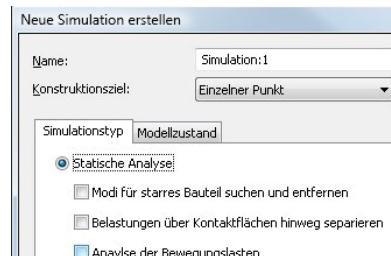
Die Berechnung liefert bei entsprechend eingegebenen Belastungsarten und Nahtquerschnitten und -längen gute Anhaltswerte für die Belastungen, die dieser Naht zugemutet werden können.

Außerdem können diese Daten leider nur manuell in die Belastungsanalyse übernommen werden.



12.1.3 Die Vorbereitung der Belastungssimulation

Wie schon häufiger beschrieben, wird jetzt über die Registerkarte UMGEBUNG die BELASTUNGSANALYSE aufgerufen, die immer mit der Erstellung einer neuen Simulation beginnt.



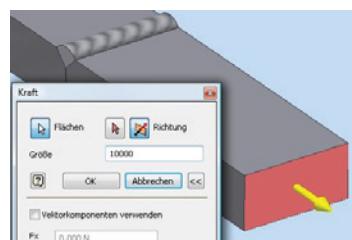
Auch hier handelt es sich wieder um eine STATISCHE ANALYSE, die im Einstellungsfenster keine weiteren Eingaben erforderlich macht.

Die Schweißverbindung soll auf Zug belastet werden, d.h., sie muss an irgendeiner Stelle festgehalten werden.





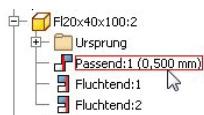
Um die Baugruppe zu stabilisieren, wird also an der hinteren Stirnseitenfläche die Abhängigkeit FEST vergeben.



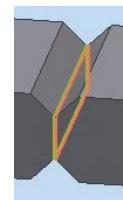
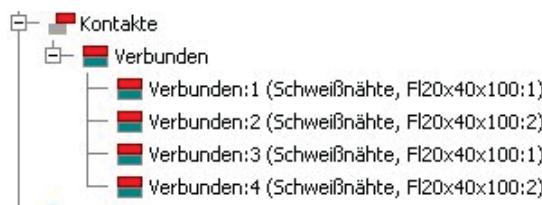
Dementsprechend wird an der gegenüberliegenden Stirnseite eine Zugkraft angebracht.

Die KRAFT könnte entsprechend der Berechnungsergebnisse in der Schweißberechnung bis zu 36.000 N betragen. Da es auf die Größe der Kraft in dieser Demonstration nicht ankommt, begnügen wir uns mit 10.000 N.

12.1.4 Kontakte überprüfen



Von hohem Interesse muss an dieser Stelle der Eintrag KONTAKTE im Objektbrowser sein.

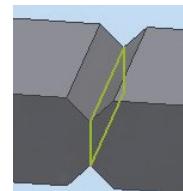
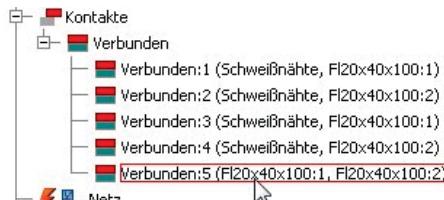


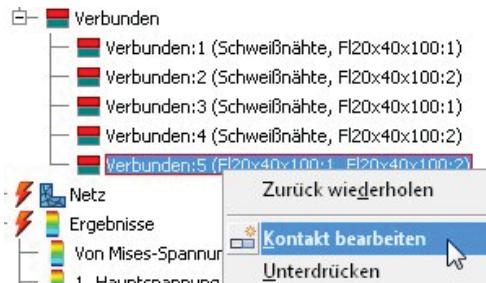
Wir erinnern uns, dass in der Baugruppe ein **0,5-mm-Spalt** zwischen den Stirnflächen gelassen wurde, damit die FEM-Umgebung die beiden Bauteile als getrennt erkennt und keinen automatischen Kontakt zwischen ihnen herstellt.

Dass dies der Fall ist, kann man an den Kontakteneinträgen im Objektbrowser erkennen, die ausschließlich die Schweißnähte umfassen.

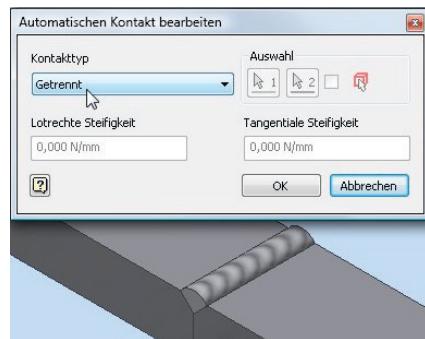
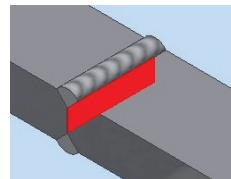


HINWEIS: Würden wir, wie in den Abbildungen gezeigt, den Abstand auf **0** stellen und damit die beiden Bauteile ohne Zwischenraum aneinanderfügen, dann würde die automatische Kontaktkonvertierung des FEM-Moduls die beiden Teile als verbunden interpretieren. Im Objektbrowser wäre dies daran zu erkennen, dass jetzt ein weiterer Kontakt zwischen den Bauteilen existiert. Eine Belastungsanalyse würde jetzt nicht nur die Schweißnähte in die Berechnung einbeziehen, sondern eben auch die Verbindung und damit falsche Ergebnisse liefern.

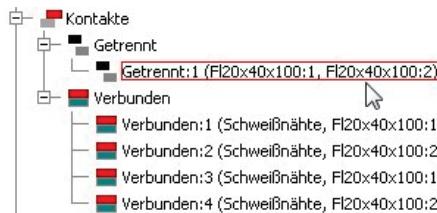




Wurde trotzdem so verfahren, so muss nach einer Kontrolle der Kontakte dieser Eintrag manuell bearbeitet werden.



Im Kontextmenü dieses Kontaktes wählen Sie dazu KONTAKT BEARBEITEN aus.



Im Dialogfenster AUTOMATISCHEN KONTAKT BEARBEITEN muss jetzt der KONTAKT-TYP GETRENNT eingestellt werden.

Im Objektbrowswer ist nun der neue Ordner **Getrennt** eingerichtet worden und die Bauteil-verbindung befindet sich als Eintrag in diesem Ordner.

Die Berechnung der Schweißverbindung wird jetzt richtig ausgeführt, obwohl die Bauteile aneinander anliegen.

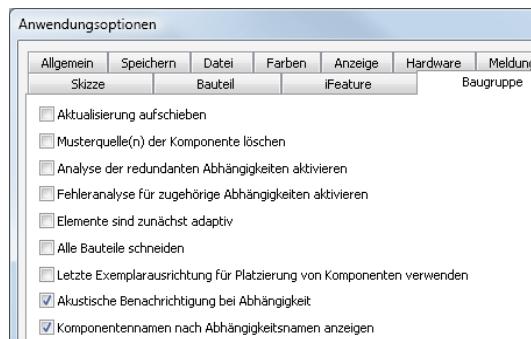


TIPP: Natürlich könnte man immer manuell verfahren. Bei umfangreichen Baugruppen wird die Anzahl der Kontakteneinträge jedoch leicht zwei- oder dreistellig, und es wäre ein mühsames Verfahren, all diese Einträge nachträglich zu ändern.

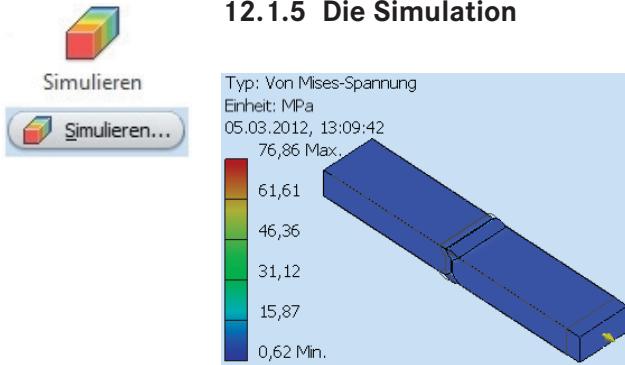
Einfacher ist es in der Regel, bereits beim Vergeben der 3D-Abhängigkeiten auf einen Abstand zu achten, der z.B. beim Schweißen in der Praxis meist sowieso auftreten würde.



HINWEIS: Damit im Objektbrowser hinter den 3D-Abhängigkeiten und hinter den Kontakten die betroffenen Bauteilnamen stehen, muss in den Anwendungsoptionen die Einstellung **KOMPONENTENNAMEN NACH ABHÄNGIGKEITSNAMEN ANZEIGEN** aktiviert sein.

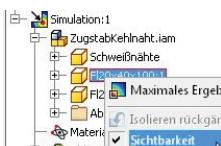


12.1.5 Die Simulation



Sind alle Vorbereitungen abgeschlossen, dann ist die eigentliche Simulation nur noch zwei Mausklicks entfernt und schnell durchgeführt.

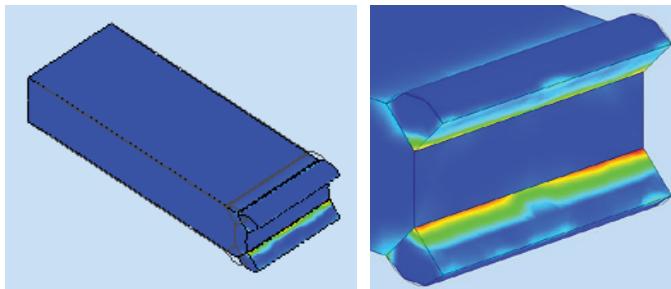
Das nebenstehende Ergebnis gibt zu denken. Laut der Farbschattierung liegen die Von-Mises-Spannungen alle im Bereich zwischen **0,62 MPa** und **ca. 33 MPa**. Trotzdem wird jedoch in der Farbskala als maximaler Wert eine Spannung von **76,86 MPa** angezeigt. Diese Spannung scheint sich an einer unsichtbaren Stelle aufzubauen, weswegen das Bauteil weiter untersucht werden muss.



Maximalspannung suchen

Greifen wir im Simulations-Objektbrowser auf das vordere Bauteil (Fl 20 x 40 x 100) zu, so besteht im Kontextmenü die Möglichkeit, die SICHTBARKEIT dieses Bauteils auszuschalten. Diese aus Baugruppen bekannte Eigenschaft funktioniert auch im FEM-Modul.

Wird dieser Vorgang durchgeführt, dann wird sehr schnell ersichtlich, wo bei dieser Baugruppe die hohen Spannungen auftreten.



Einerseits ist es beruhigend, diesen Umstand aufgedeckt zu haben, andererseits jedoch besteht hier auch ein generelles FEM-Problem, weswegen die Ergebnisse relativiert werden müssen.



HINWEIS: Bereits im Einführungskapitel zur FEM wurde darauf hingewiesen, dass Lasten auf Punkte oder Linien zu falschen Ergebnissen führen, da bei Flächen, deren Ausdehnung gegen null geht, die Spannungen gegen unendlich tendieren. Die Schweißnähte verlaufen nach innen sehr spitz zu und kommen damit in den Bereich, in dem die Höhe der ermittelten FE-Spannung nicht mehr zweifelsfrei übernommen werden kann.

Unbeschadet dessen treten aber an diesen Stellen sehr wohl Spannungsspitzen auf.

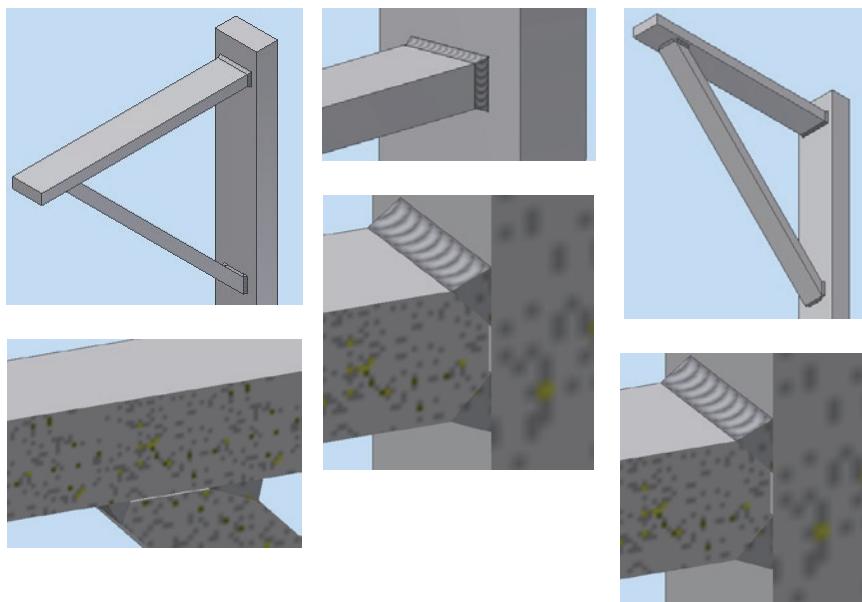
■ 12.2 Zweites Beispiel

12.2.1 Die Schweißkonstruktion

Das zweite Beispiel in diesem Zusammenhang soll nicht mehr ganz so ausführlich in der Schweißvorbereitung dargestellt werden. Es handelt sich um einen Kranausleger oder Galgen, dessen oberer Tragarm vertikal nach unten belastet werden soll. Die Streben stützen den Tragarm, der durch die Last vor allem auf Biegung beansprucht wird. Alle Verbindungen werden mit Kehlnähten an vorbereiteten Fasen versehen.



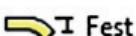
Die folgenden Abbildungen zeigen den Aufbau und die Schweißverbindungen.



Alle Stoßverbindungen wurden schon bei der Vergabe der 3D-Abhängigkeiten in der Baugruppenumgebung mit einem Abstand von 0,1 MM versehen, wie in den Schnittansichten an den entsprechende Spalten zu erkennen ist.

Der Grund hierfür wurde im ersten Beispiel dieses Kapitels ausführlich erläutert und liegt an den automatischen Kontaktkonvertierungen des FEM-Moduls.

12.2.2 Simulation vorbereiten



Festgelegte Abhängigkeit

Zur Vorbereitung der Simulation gehören natürlich der Wechsel in die Simulationsumgebung der Belastungsanalyse und anschließend, nach dem Erstellen einer neuen Simulation, die Vergabe der Abhängigkeiten und der Lasten.

Als einzige feste Abhängigkeit wurde bei diesem Beispiel der Einfachheit halber die ganze Rückseite des vertikal stehenden Flachstahls definiert. Sinnvoller wäre vielleicht gewesen, diesen Ständer mit Befestigungselementen an einer starren Wand zu fixieren, dann wäre er besser in die Belastungsanalyse integriert worden. So wird er von der FE-Berechnung weitgehend ignoriert, was für das Beispiel aber nicht weiter tragisch ist.

Das Problem des Kraftangriffes ist ein anderes. Die Kraft nur von oben auf den ganzen waagerechten Träger wirken zu lassen, würde die Ergebnisse der Simulation an den wichtigen Stellen der Schweißnähte verfälschen, weil eine so angeordnete Kraft über die Trägeroberfläche verteilt wirken würde.

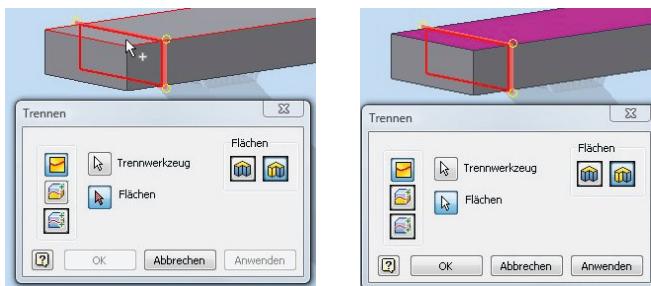
Infofern ist es an dieser Stelle wichtig, den Kraftangriff genauer zu spezifizieren. Es soll eine KRAFT von 10 KN nur am vordersten Bereich des Trägers wirken.



Kraftbelastung

Wenn der Kraftangriff auf die Vorderkante gelegt wird, das hatten wir schon besprochen, ergibt sich eine Linien- oder Streckenlast auf einer Kante, die zu unrealistisch hohen Berechnungsergebnissen bei der Spannung führt.

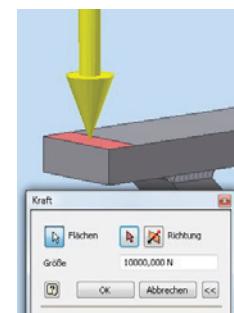
In den Abbildungen ist Folgendes zu sehen.



Zuerst wurde eine ARBEITSEBENE parallel zur vorderen Stirnfläche im Abstand von 10 MM erzeugt. Diese Arbeitsfläche dient als TRENNWERKZEUG.

Im nächsten Schritt wurde mit dem Werkzeug TRENNEN die Oberfläche des Trägers an dieser Arbeitsebene in zwei Flächenstücke zerlegt. Der Träger selbst bleibt dabei unverändert, nur seine obere Fläche ist in zwei Abschnitte geteilt.

Im dritten Schritt wurde auf den vorderen Teil der Trägerfläche eine Kraft von 10 kN installiert, die jetzt nur auf diese kleine Fläche wirkt.



12.2.3 Kontakte kontrollieren

Auch das Problem der Kontakte wurde im ersten Beispiel schon angesprochen.

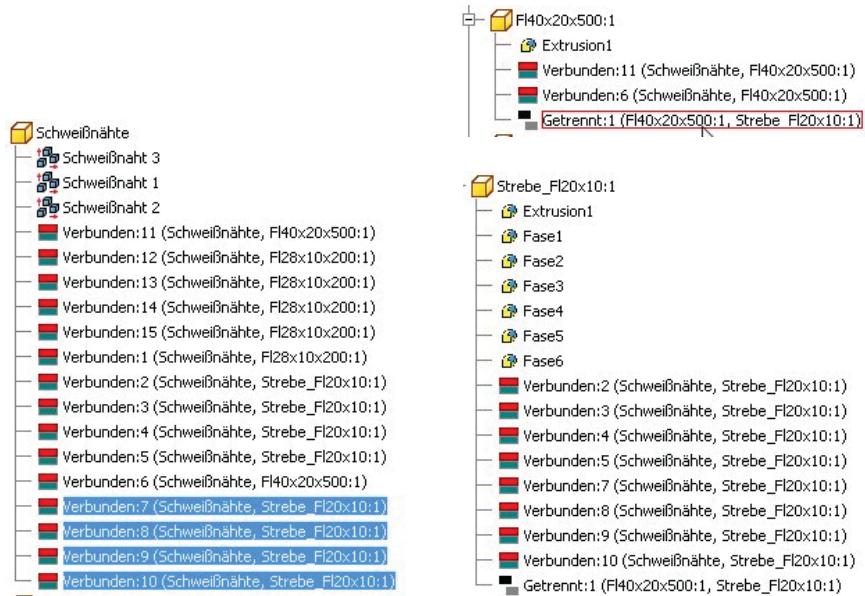
Nachdem wir bei der Vergabe der 3D-Abhängigkeiten bereits jeweils einen Flächenversatz von 0,1 mm eingegeben haben, kann der Inventor erkennen, dass diese Bauteile nicht direkt miteinander verbunden sind. Dies hat zur Folge, dass die für die Belastungsanalyse automatisch konvertierten Kontakte bereits richtig hergestellt werden.

Die Schweißnähte haben Kontaktflächen und sind jeweils beidseitig mit den Bauteilen verbunden, die Bauteile selbst sind, soweit eine Verbindung überhaupt erkannt wurde, als getrennte Kontakte definiert, über die kein Kraftfluss fließen kann.

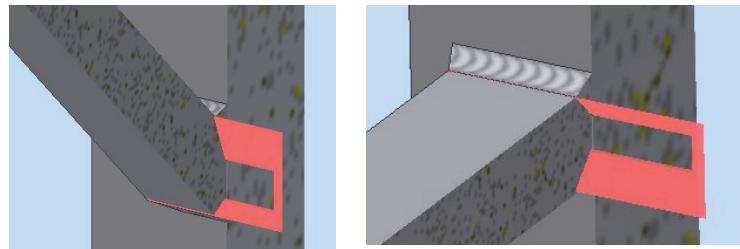
In den folgenden Abbildungen sind die Objektbrowser-Darstellungen der Kontakte in den Bauteildefinitionen gezeigt.



TIPP: Diese Ansicht ist etwas übersichtlicher als die lange Kontaktliste im Ordner *Kontakte*, da die Verbindungen bereits den Bauteilen zugeordnet sind.



VERBUNDEN sind nach dieser Auflistung nur Schweißnähte mit Bauteilen. Die Kontakte zwischen den Bauteilen werden als GETRENNNT geführt. Noch besser zu sehen ist dies, wenn man die Verbindungseinträge im Objektbrowser markiert und die Baugruppe im Halbschnitt darstellt. Dann werden die jeweiligen Kontaktflächen farbig über den Schnitt hinaus hervorgehoben, und es lässt sich gut erkennen, dass nur die Nähte in Verbindung mit den Bauteilen stehen.

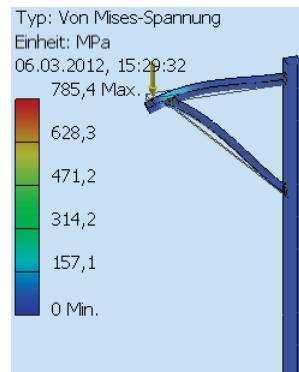


12.2.4 Die Simulation

Nachdem alle Vorbereitungen abgeschlossen sind, kann die Simulation durchgeführt werden.

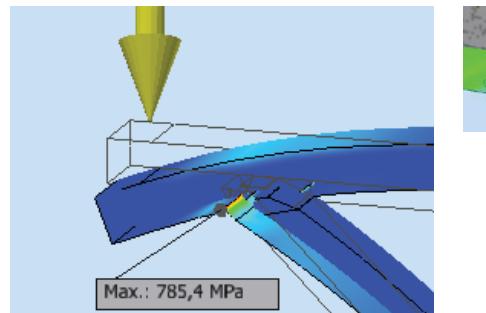
Die Darstellung wurde deshalb im Halbschnitt belassen, um einerseits die Schweißnähte besser zu sehen, andererseits aber auch, um die Kontaktflächen aller Verbindungen noch einmal von den getrennten Elementen unterscheiden zu können.

Als Maximalwert der Von-Mises-Spannung werden weit über **700 MPa** angezeigt, obwohl die Farbschattierung anzeigt, dass der überwiegende Bauteilbereich in der Größenordnung von nur **50 bis 150 MPa** beansprucht wird.

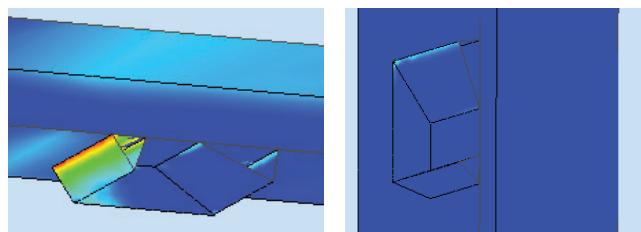


Eine schnelle Anzeige des Ortes des Maximalwertes bekommt man mit der Schaltfläche **MAXIMALWERT ANZEIGEN** in der Befehlsgruppe **ANZEIGE**.

Die Anzeige erfolgt mit einer Führungslinie direkt zu der Stelle, an der diese Spannung auftritt. Zoomt man sich in diesen Bereich hinnein, so erkennt man die Schweißnaht, an der diese Maximalbeanspruchung angezeigt wird, und die eindeutig zu hoch ist. Interessant ist, dass die Überlastung nur an der vorderen Schweißnaht auftritt, die hintere und alle anderen Nähte sind im ‚grünen‘ (hier im blauen) Bereich.



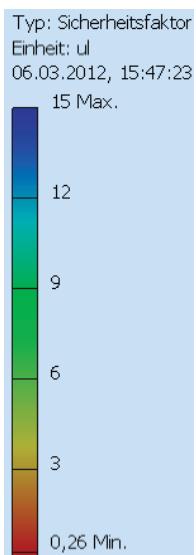
Mit einer größeren Fase an der Vorderkante der Strebe und einer entsprechend größeren Schweißnaht würde man dieses Problem relativ leicht in den Griff bekommen. Um alle Schweißnähte auf Spannungsspitzen zu kontrollieren, bietet sich aber als effektiveres Verfahren an, bestimmte (oder alle) Bauteile mit dem Kontext-Menüeintrag **SICHTBARKEIT** unsichtbar zu machen.



In der obigen Abbildung wurde beispielsweise die Strebe ausgeblendet, um alle Schweißnähte mit ihren Kontaktflächen zur Strebe sehen und kontrollieren zu können. Außerdem befinden wir uns immer noch im Halbschnitt, der jedoch für die nächsten Darstellungen abgeschaltet wird.



12.2.5 Sicherheitsfaktor



Bei der Darstellung des Sicherheitsfaktors wird erwartungsgemäß dasselbe Problem deutlich. Der minimale Sicherheitsfaktor tritt natürlich dort auf, wo die Spannung im Verhältnis zur Streckgrenze des Materials am höchsten ist.

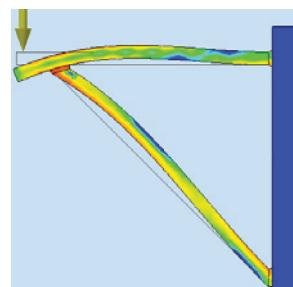
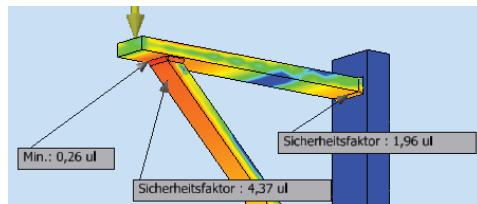
Mit der Schaltfläche PRÜFEN in der Befehlsgруппen *Ergebnis* können Ergebnis-Werte an beliebigen Stellen angezeigt werden. In der Abbildung ist zu sehen, dass die Sicherheitsfaktoren an der Strebe, trotz roter Darstellung, einen überdimensionierten Wert (4,37) aufweisen, die hintere Schweißnaht jedoch eine recht gute Größe (1,96) aufweist.

Ein minimaler Sicherheitsfaktor von 0,26, also ein Wert kleiner eins, sagt aber aus, dass eine erhebliche Überlastung an dieser Stelle besteht, die keinesfalls akzeptiert werden kann.

$S = R_e / \sigma_{\max}$ bedeutet, dass bei obigem Wert die Streckgrenze deutlich überschritten wird, was mindestens zu einer plastischen Verformung führen würde.

Interessant zu erfahren wäre natürlich auch, wie eine Verformung aussähe, die nicht plastisch durch eine Überbelastung, sondern im elastischen Bereich stattfinden würde.

Der obere Träger wird allem Anschein nach sehr stark auf Biegung und auch auf Zug beansprucht, die Schubspannungen werden eher klein ausfallen. Die Strebe dagegen wird durch die Verformung des oberen Trägers zwar auch durch Biegung, jedoch wahrscheinlich vielmehr durch eine Druckspannung belastet. Gegebenenfalls müsste an diesem Bauteil eine Untersuchung auf Knickung durchgeführt werden, die im Inventor FEM-Modul leider nicht enthalten ist.



■ 12.3 Punktschweißen

Punktschweißen im Inventor – geht das? Eigentlich geht's nicht – jedenfalls sieht die Schweißumgebung das Punktschweißen aus unerfindlichen Gründen nicht vor, obgleich die Symbolik dazu in Zeichnungsableitungen eingefügt werden kann.



TIPP: Möchte man eine Punktschweißverbindung in der Belastungsanalyse trotzdem simulieren, dann muss man etwas umständlich vorgehen – und dann geht es eben doch.

In den Elementen des Maschinenbaus lernte man einst, dass die Verbindung durch Punktschweißungen in erster Näherung mit Nietverbindungen verglichen werden kann. Zumindest die Scherspannungen im Schweißpunkt und auch die Spannungsverteilung, die am Niet als Flächenpressung und am Schweißpunkt im Bauteil wirkt, sind in etwa vergleichbar. Das Ausreißen eines Schweißpunktes findet bei Nietverbindungen natürlich kein Ge genstück, da würde der Niet selbst durch Zugkräfte abreißen, aber diese Art der Beanspruchung soll bei Punktschweißverbindungen ohnehin vermieden werden.

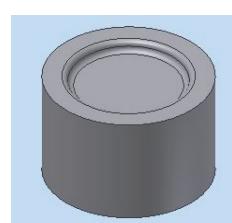
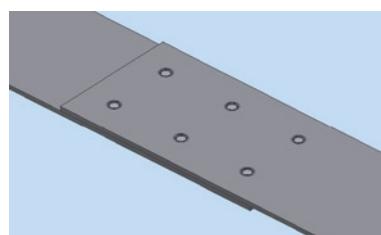
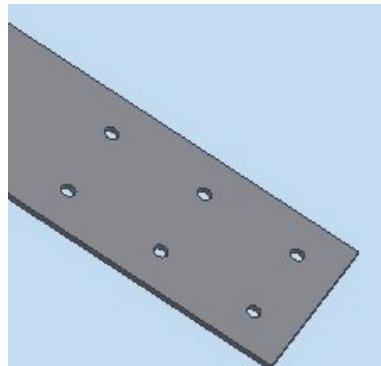
12.3.1 Die Punktschweißung im Beispiel

Wie immer soll ein einfaches Beispiel das Vorgehen erläutern.

Zwei Bauteile sind nötig: Ein Flachstahl mit sechs Löchern und als Ersatz für den Schweißpunkt ein zylindrisches Gebilde, das in etwa die Geometrie eines Schweißpunktes aufweist, einschließlich eines 0,2 mm tiefen Eindruckes der Schweißelektrode.

Die Baugruppe besteht aus den beiden identischen Flachstählen, die ausschließlich mit den sechs Schweißpunkten miteinander verbunden werden.

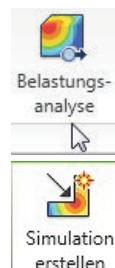
Bei der Vergabe der 3D-Abhängigkeiten ist darauf zu achten, dass die Mittelachsen der Schweißpunkte mit den Mittelachsen der Löcher und die Stirnflächen der Schweißpunkte mit den Oberflächen der Flachstähle korrespondieren und ansonsten die Flachstähle nur seitlich und flächig abhängig gemacht werden.



HINWEIS: Dieser Umstand ist deswegen wichtig, weil der FE-Modul automatisch alle 3D-Abhängigkeiten in Kontakte umwandelt und nicht funktionsgemäße 3D-Abhängigkeiten viel manuelle Nacharbeit bei den Kontakten erfordern.

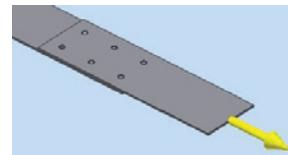
12.3.2 Die Simulation vorbereiten

Wie schon so oft wird die Belastungsanalyse aufgerufen, eine neue Simulation erstellt und die Baugruppe mit Abhängigkeiten und Lasten versehen.



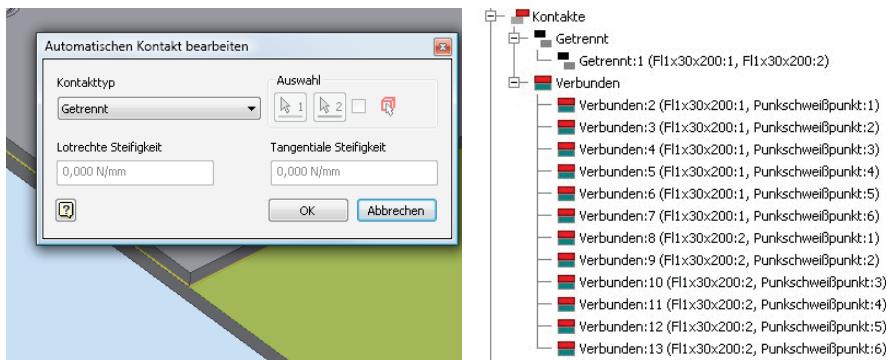


Der hintere Flachstahl wird an seiner hinteren Stirnfläche mit der Abhängigkeit FEST versehen. Am vorderen Flachstahl greift an der vorderen Stirnfläche eine KRAFT an, welche die Baugruppe auf Zug belastet.



12.3.3 Kontakte bearbeiten

Wichtige Arbeitsschritte sind die Überprüfung und gegebenenfalls die Überarbeitung der Kontakte zwischen den Bauteilen. Die beiden Flachstähle dürfen keine direkte Verbindung zueinander haben, der Kraftfluss muss über die Schweißpunkte geleitet werden.



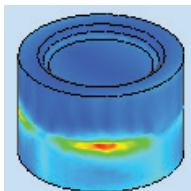
Den Kontakttyp GETRENNT müssen Sie hier von Hand einstellen. Die restlichen Kontakte laufen alle über die Schweißpunkte, es sind sechs Verbindungen zum Flachstahl_1 und sechs Verbindungen zum Flachstahl_2.

Wurden die Schweißpunkte und die Löcher bereits in der Baugruppe über ihre Mittelachsen abhängig gemacht, so sind jetzt automatisch die Berührungsflächen, also die Mantelflächen der Bauteile, miteinander verbunden.

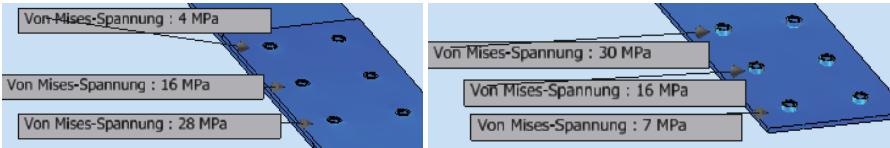


12.3.4 Die Simulation

Die Vorbereitung der Simulation ist damit abgeschlossen, und die Belastung der Punktschweißverbindung kann simuliert werden. Das Ergebnis überrascht durch seine Eindeutigkeit im Ergebnis.



Aus der Festigkeitslehre wissen wir, dass die Anzahl der sinnvoll hintereinander anzubringenden Verbindungspunkte, egal ob beim Punktschweißen, beim Nieten oder eingeschränkt auch beim Schrauben, auf relativ wenige begrenzt ist. Die jeweils vorderste Querreihe bekommt die volle Belastung ab, die dahinter liegende aufgrund der abnehmenden Dehnung schon weniger, und die letzte Querreihe wird kaum noch etwas von der Beanspruchung merken.



In den beiden Abbildungen ist die Abnahme der Spannungen in den Bauteilen sehr gut zu sehen. Im jeweils hinteren Bereich (Kraftangriff) sind die Spannungen relativ hoch, zur Mitte hin nehmen sie ab, und in der jeweils vorderen Reihe sind die Spannungen minimal.

Auch die Schweißpunkte, die wir dank unserer umständlichen Konstruktion dafür jetzt einzeln untersuchen können, werden an den Mantelflächen durch die Flächenpressung und im Schubquerschnitt durch die Schubspannung am stärksten belastet. Der mittlere Stirnflächenbereich wird dagegen weitgehend verschont.

Die verschiedenen Darstellungen wurden durch die Ausblendung der jeweils nicht sichtbaren Bauteile erzeugt. Im Objektbrowser ist dies auch im FE-Modul über das Kontextmenü und die Auswahl SICHTBARKEIT zu erreichen.

13

Einfache Bewegungssimulationen

Funktionelle Bewegungen von Bauteilen in Baugruppen können im Inventor in verschiedenen Arbeitsbereichen erzeugt werden. Die Voraussetzungen dafür sind unterschiedlich. Meist werden die 3D-Abhängigkeiten bzw. die Freiheitsgrade einer Verbindung für die Bewegung vom Inventor interpretiert, in der Präsentationsumgebung sind es Pfade und Bewegungen, die für einzelne Bauteile angegeben werden müssen.

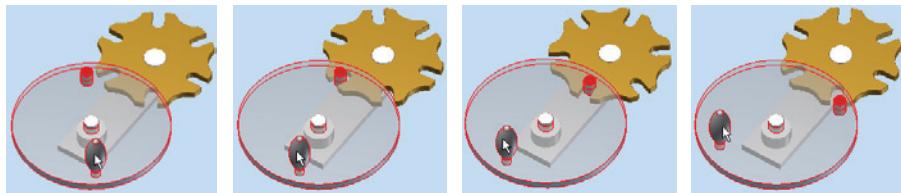
- Baugruppen lassen sich von Hand bewegen.
- Bewegungen in Baugruppen können automatisch stattfinden.
- In der Präsentationsumgebung können Bewegungen definiert werden.
- Im Inventor Studio können Bewegungen dargestellt werden.
- Die Simulationsumgebung ermöglicht weitgehend reale technische Animationen.

Im Folgenden werden die ersten vier Möglichkeiten der Animation relativ kurz vorgestellt, denn erstens stellen sie keine sehr hohen Anforderungen an die Ausführung, und zweitens liegt der Schwerpunkt des Buches auf der fünften Variante, der Bewegungssimulation in der Simulationsumgebung.

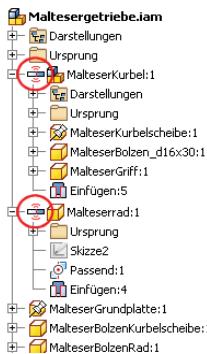
■ 13.1 Baugruppen von Hand bewegen

Ein Bauteil einer Baugruppe mit dem Zeigegerät anzufassen und es zu bewegen, ist die einfachste Variante der Bewegungserzeugung. Funktionelle Bewegungen lassen sich damit aber nur erzeugen, wenn

- a) entsprechende 3D-Abhängigkeiten vergeben wurden und
- b) wenigstens ein Freiheitsgrad die Bewegung von Hand noch zulässt.



Im Beispiel des Maltesergetriebes wurden alle 3D-Abhängigkeiten vergeben, d.h., alle Freiheitsgrade bis auf die Rotationen der Malteserscheibe und der Kurbelscheibe wurden eliminiert. Das Getriebe wird mit dem Mauszeiger (Pfeil) bewegt.



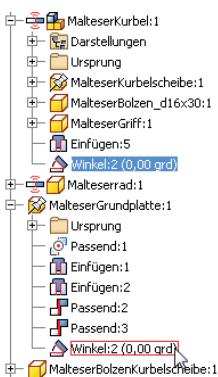
Die Unterbaugruppe **MALTESERKURBEL** besteht nur aus der Kurbelscheibe, dem Mitnehmerbolzen und dem Griff zum Kurbeln.

Die Malteserfunktion des Getriebes, die bewirkt, dass der Mitnehmerbolzen jeweils in eine Nut des Malteserrades eingreift, dieses etwas weiterdreht und der Bolzen sich dann wieder aus der Nut herausdreht, wurde mit den Inventor-Funktionen **KONTAKTSATZ** und **KONTAKTLÖSER** (siehe rote Kreise in der Abbildung) erreicht.

Der Freiheitsgrad der Rotation wurde an beiden Scheiben zugelassen, also nicht durch 3D-Abhängigkeiten gesperrt. Insofern kann auch die Malteserscheibe per Hand gedreht werden.

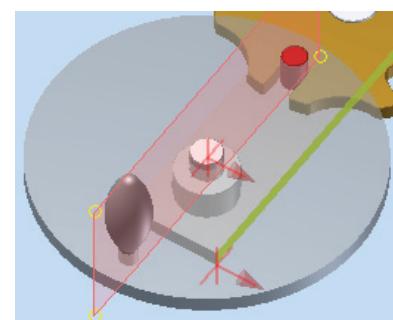
Das Bauteil **MALTESERGRUNDPLATTE** ist fixiert, damit das Getriebe insgesamt stabilisiert ist und nicht beim Bewegen über den Bildschirm wandern kann.

■ 13.2 Automatische Bewegung in der Baugruppe



Mit der vorher beschriebenen Bewegungsart verwandt ist diese Version. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass solch ein System in der Regel keinen Freiheitsgrad mehr hat und eine 3D-Abhängigkeit, je nach ihrer Festlegung, durch den Inventor entsprechend bewegt wird.

Im bisherigen Maltesergetriebe waren ohnehin nur noch die Freiheitsgrade der Rotation der beiden Scheiben vorhanden. Soll das Getriebe automatisch durch die Kurbelscheibe angetrieben werden, so ist diese mit einer Winkelabhängigkeit zu versehen. Im Beispiel wurde diese Abhängigkeit zwischen der Ursprungsebene der Unterbaugruppe **MALTESERKURBEL** (XZ-EBENE) und einer Seitenfläche der Grundplatte mit dem Winkel 0 Grad eingefügt.



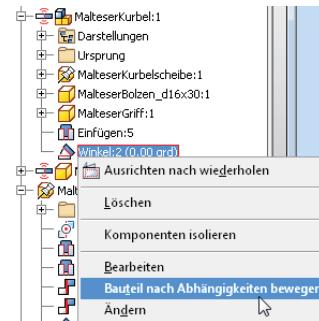
Durch diese Festlegung wird die Kurbelscheibe im ersten Schritt nach der Grundplatte ausgerichtet, was ja auch der Sinn der Abhängigkeit Winkel ist.

Allerdings kann diese Abhängigkeit über das Kontextmenü variiert werden. Der Menüeintrag BAUTEIL NACH ABHÄNGIGKEIT BEWEGEN ruft das entsprechende Dialogfenster auf den Bildschirm, in dem beispielsweise der Start- und der Endwinkel eingestellt werden können.

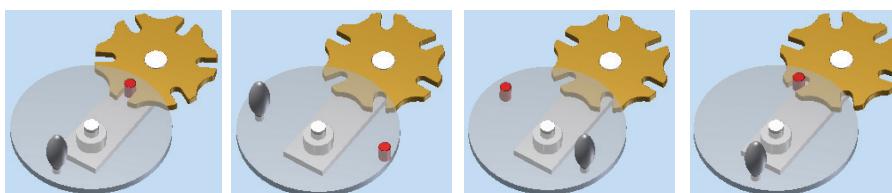
Im Beispiel wurde eine ganze Umdrehung eingestellt (0 bis 360 Grad).

Die Bedeutungen in den erweiterten Einstellungen im unteren Bereich des Dialogfensters sind folgende:

- **BEWEGUNGSADAPTIVITÄT** passt gegebenenfalls adaptive Bauteile an die Bewegung an. Dies ermöglicht u. a. die realistische Darstellung von federnden Elementen wie beispielsweise Spiralfedern.
- **KOLLISIONSERKENNUNG** hält die Bewegung an, wenn Kollisionen erkannt werden, und zeigt diese an.
- Das **INKREMENT** steuert die Anzeige bzw. die Schrittweite der Einzelbilder einer Bewegungssequenz.
- Mit **WIEDERHOLUNGEN** wird die Anzahl der vollständigen Durchläufe angegeben.
- Die **AVI-RATE** entspricht dem Inkrement bei der Filmaufzeichnung.

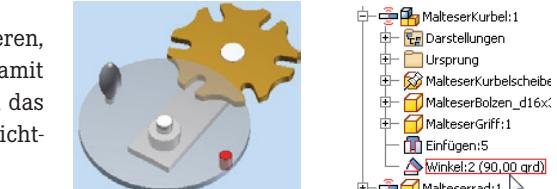


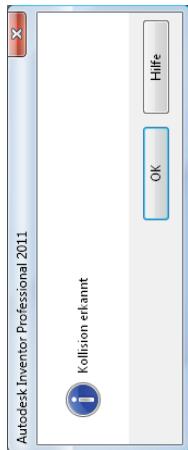
Animation auf der DVD



Kollisionserkennung

Um die Kollisionskontrolle und -erkennung zu demonstrieren, wurde die Winkelabhängigkeit auf 90 Grad eingestellt, damit sich der Mitnehmerbolzen außerhalb der Nut befindet, und das Malteserrad von Hand so verstellt, dass eine Kollision absichtlich herbeigeführt wird.





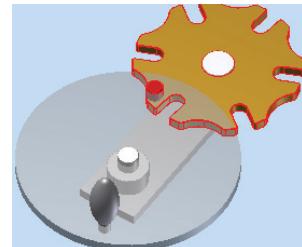
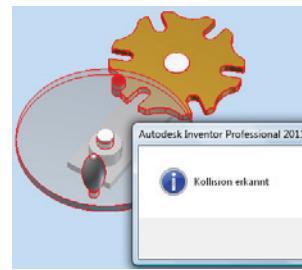
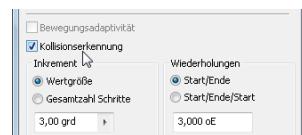
Wird jetzt die Funktion BAUTEIL NACH ABHÄNGIGKEIT BEWEGEN aufgerufen, dann dreht sich die Kurbelscheibe so weit, bis der Mitnehmerbolzen an die Malteserscheibe stößt.

In dieser Stellung wird die Bewegung angehalten und die Kollision angezeigt.

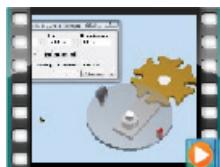
Die Checkbox KOLLISIONSERKENNUNG muss bei diesem Vorgang natürlich aktiviert sein.

In der Abbildung ist die Bewegungssimulation bereits durchgelaufen. Zum Zeitpunkt der Kollision wurde die Bewegung angehalten, die kollidierten Bauteile sind rot markiert. und die Kollisionsmeldung erfolgt mit einem Nachrichtenfenster.

Wird die Meldung ignoriert, d.h. mit OK weggeklickt, und anschließend die Bewegung mit der PLAY-Taste fortgesetzt, dann wandert der Mitnehmerbolzen peu à peu in die Malteserscheibe, wobei aber bei jedem Schritt wieder die Kollisionsmeldung erscheint.



Animation auf DVD



■ 13.3 Bewegung in der Präsentation

Präsentationsansichten werden in einer separaten Datei, einer Präsentationsdatei (*.IPN), gespeichert. Wenn an der Baugruppe bzw. an den einzelnen Modellen Änderungen vorgenommen werden, so werden die Präsentationsansichten automatisch aktualisiert.

Die Präsentationsumgebung ist eine der Baugruppenumgebung ähnliche Arbeitsumgebung. Es können aber in dieser Umgebung keine Änderungen an Teilen oder der Baugruppe vorgenommen werden.

3D-Abhängigkeiten, die in der Baugruppe vergeben wurden, werden für automatische Explosionen und Animationen verwendet, haben darüber hinaus aber keinen Einfluss auf die Bauteile in einer Präsentation.

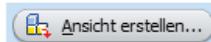


Norm (DIN).ipn

13.3.1 Eine Präsentation erstellen



Ansicht erstellen



Ansicht erstellen...

Eine neue Präsentation wird als neue Datei mit einem Klick auf das Symbol NORM(DIN).IPN oder NORM(MM).IPN erstellt.

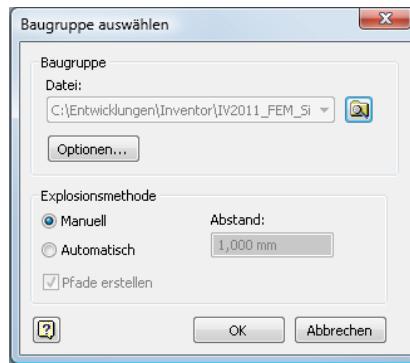
Mit dem Menübefehl EINFÜGEN → ANSICHT ERSTELLEN ... oder einem Klick auf das entsprechende Icon im Befehlsbereich muss im nächsten Schritt eine bestehende Zusam-

menbaudefinition (Baugruppe, *.IAM) einge-fügt werden.

Das sich öffnende Dialogfenster BAUGRUPPE AUSWÄHLEN bietet im oberen Bereich die Möglichkeit, eine geöffnete Baugruppe direkt oder eine beliebige Baugruppe über den Dialog DATEI ÖFFNEN auszuwählen.

Im unteren Bereich befinden sich die beiden Optionsschaltflächen, mit denen die Art der Erzeugung der Explosionsansicht vorbestimmt werden muss:

- manuell und
- automatisch.

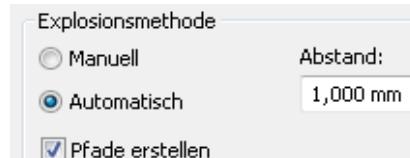


Die beiden Möglichkeiten werden im Anschluss erklärt.

13.3.2 Die automatische Explosionsmethode

Alle Komponenten werden automatisch um den angegebenen ABSTAND versetzt angeordnet. Die definierten Baugruppenabhängigkeiten (3D-Abhängigkeiten) bestimmen die Richtung, in welche die Komponenten verschoben werden.

Die Option PFADE ERSTELLEN, die im Dialogfenster bei der Auswahl „Automatisch“ ebenfalls gewählt werden kann, zeichnet Explosionspfade in Form von dünnen Linien bzw. macht diese sichtbar.



Nach dem Platzieren der Ansicht können Positionsveränderungen einzelner Komponenten manuell geändert werden, um die Ansicht zu optimieren.



HINWEIS: Nicht immer kommen bei diesem Verfahren sinnvolle Gebilde zustande. Die Gestaltung ist zum einen von den vergebenen Abhängigkeiten, zum anderen aber auch von deren Richtung (gegeneinander/zueinander) abhängig. In vielen Fällen wird es rationeller sein, die manuelle Methode, die per Default ohnehin eingestellt ist, zu benutzen.

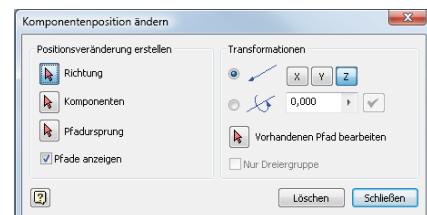
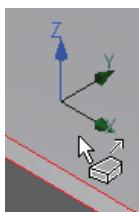
13.3.3 Die manuelle Explosion

Beim Anwenden der manuellen Methode wird die Zusammenbaudefinition unverändert in die Präsentationsumgebung geladen. Alle Veränderungen müssen manuell vorgenommen werden.



Für die manuelle Positionsveränderung gibt es den entsprechenden Befehl KOMPONENTENPOSITION ÄNDERN.

Der Aufruf öffnet ein Dialogfenster mit vielfältigen Einstell- und Auswahlmöglichkeiten. Im linken Bereich, POSITIONSVERÄNDERUNGEN ERSTELLEN, muss jeweils ausgewählt werden, was getan werden soll. In der Reihenfolge werden bestimmt:



- Die RICHTUNG als Translation oder Rotation im kartesischen Koordinatensystem, das an jedem Element angezeigt wird. Nebenstehend wurde eine Bauteilfläche selektiert, bei der die Z-Achse nach oben gerichtet ist.
- Die KOMPONENTEN, die verschoben werden sollen, werden ausgewählt, wobei mehrere Bauteile zugleich ausgewählt sein können.

Den PFADURSPRUNG muss man in der Regel nicht festlegen, da er vom Inventor generell im Massenschwerpunkt angeordnet ist. Der rechte Bereich, die TRANSFORMATION, enthält die Einstellmöglichkeiten für die Schaltfläche RICHTUNG bzw. die Art der Bewegung, welche die Bauteile machen sollen.

Es werden die Optionen TRANSLATION (geradlinige Verschiebung) und ROTATION (Drehung) angeboten. Sie bestimmen zum einen die Achse des Koordinatensystems, in deren Richtung verschoben oder um die rotiert werden soll. Zum anderen wird im Eingabefeld entweder ein Abstand oder ein Winkel angegeben.

Hat man die Transformationen eingestellt, kann mit dem Haken, der dann grün wird, die Verschiebung oder Drehung sofort ausgeführt werden.

13.3.3.1 Die Transformationsrichtung



Die Richtung der Transformation wird über das Koordinatensystem-Symbol in der Arbeitsfläche angezeigt und verändert sich ständig, wenn das Zeigegerät bewegt wird. Die Symbolausrichtung wird an Komponenten und Elementen vorgenommen, die mit der Maus überfahren werden. Ein beherzter Klick legt das Symbol und damit auch die Transformationsrichtungen fest.

Wurde dieser Klick getätigt, so ändert das Symbol sein Aussehen. Die aktiv eingestellte Richtung bzw. Transformation wird blau, die anderen Richtungen werden grün dargestellt.

13.3.3.2 Die Auswahl der Komponenten

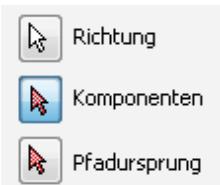
Wurde die Richtung per Klick eingestellt, so schaltet Inventor die Buttons im linken Bereich des Dialogfensters, der Positionsveränderung, automatisch auf die Auswahl der KOMPONENTEN um.

Der Maus-Cursor verändert sein Aussehen (siehe nebenstehende Abbildung), und die Komponenten werden durch einfaches Anklicken selektiert.

Wurde ein Element zu viel oder versehentlich angeklickt, so lässt sich dies durch gleichzeitiges Drücken der SHIFT-Taste und einen nochmaligen Klick auf das Element wieder rückgängig machen.

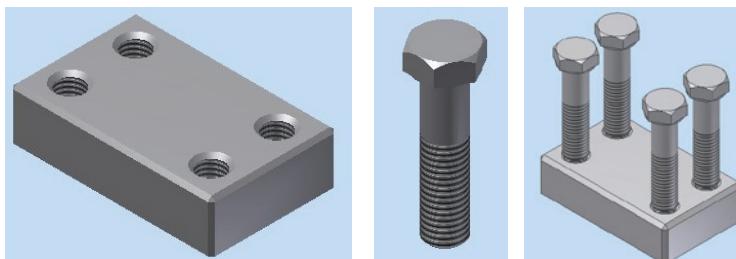
Die Auswahl der Komponenten im Objektbrowser kann oft viel einfacher und eindeutiger erfolgen als in der Baugruppe, die für die Auswahl einzelner Komponenten mitunter immer wieder gedreht werden muss oder wobei im Inneren verbauten Komponenten die Sichtbarkeit anderer ausgeschaltet werden muss.

Bei der Komponentenauswahl im Objektbrowser gelten die üblichen Selektionskriterien des Windows-Dateiexplorers. Ein einfacher Klick selektiert den Eintrag, kombiniert mit der SHIFT-Taste wird ein ganzer Bereich ausgewählt, und kombiniert mit der STRG-Taste können einzelne Einträge angeklickt werden.

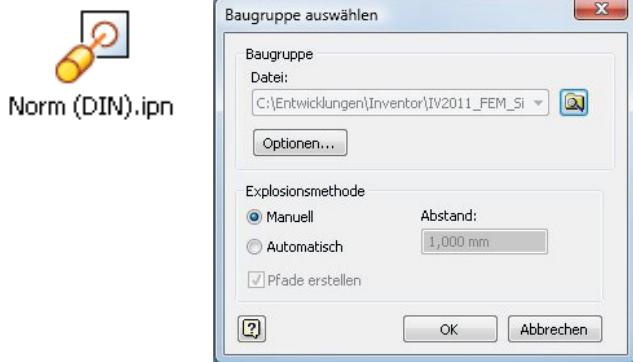


■ 13.4 Die Präsentationsanimation von Schrauben

Nach dieser relativ ausführlichen Vorrede soll nun eine Bewegungssimulation von Schrauben, die in Gewinde eingeschraubt werden, erzeugt werden. Zu diesem Zweck wurden die folgenden Bauteile und die Baugruppe erstellt.



Eine Gewindeplatte mit vier M12-Gewinden, eine Sechskantschraube M12 x 50 mit 30 mm Gewindelänge und dem Gewinde M12 x 1,75 und eine Baugruppe, in die die Gewindeplatte und vier Schrauben eingefügt wurden.



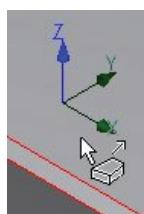
13.4.1 Eine neue Präsentation erstellen

Für die beabsichtigte Animation muss zuerst ein neues Dokument aus der Präsentationsvorlage NORM (MM).IPN oder NORM(MM).IPN erstellt werden.

Mit der Funktion ANSICHT ERSTELLEN wird die Baugruppe der Gewindeplatte mit den Schrauben eingefügt. Die Explosionsmethode MANUELL ist voreingestellt und soll beibehalten werden.



13.4.2 Komponentenpositionen



Die Auswahl der KOMPONENTEN erfolgt durch Anklicken der vier Schrauben.

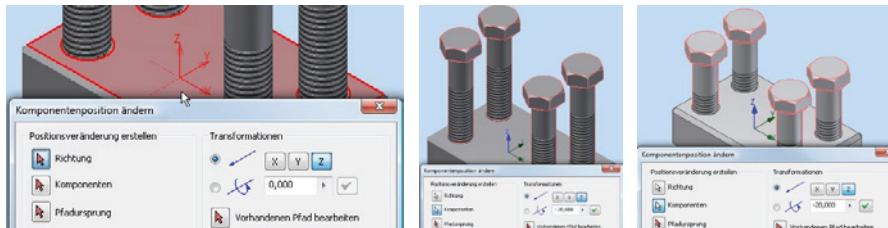
Die markierten Bauteile werden als Gruppe behandelt und verschoben, was insofern eine Bedeutung haben kann, als diese Gruppierung auch bei einer nachfolgenden Animation erhalten bleibt.

Als Größe der Verschiebung werden 20 MM eingestellt.

Ein Klick auf den grünen Haken führt die Translation sofort durch, das Dialogfenster bleibt aber geöffnet, sodass weitere Aktionen durchgeführt werden können.

Über die Funktion KOMPONENTENPOSITION ÄNDERN werden jetzt die Bewegungspfade bestimmt.

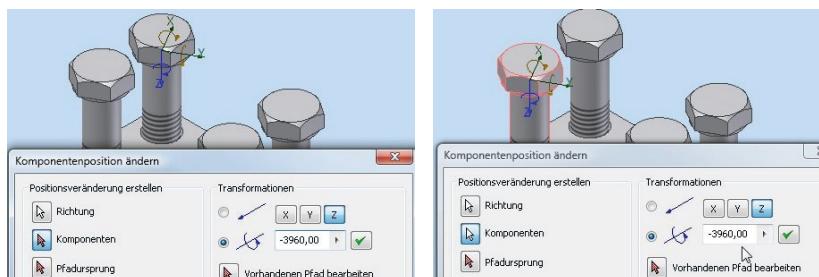
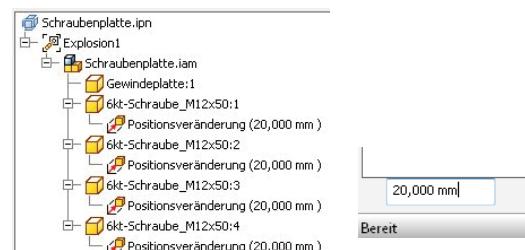
Die RICHTUNG der ersten Translationen wird auf der Oberfläche der Gewindeplatte eingestellt. Im Beispiel ist es die positive Z-Richtung, die eine entsprechende Verschiebung verursacht.



Im Objektbrowser sind nun die zu den einzelnen Bau teilen gehörenden Positionsveränderungen eingetragen. Bei Bedarf kann dort auch die Position jedes Bau teils modifiziert werden.

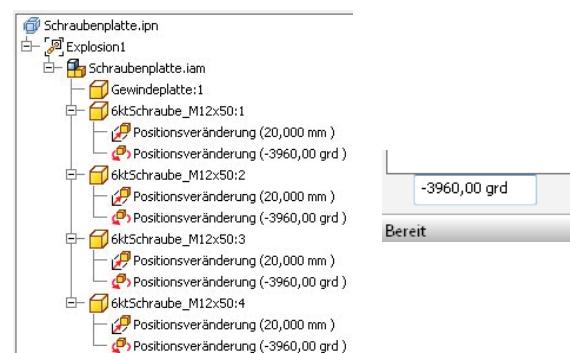
Wird eine Positionsveränderung im Browser ange klickt, so erscheint in der linken unteren Ecke des Inventor-Programmfensters das aktuelle Maß, das dort auch überschrieben werden kann.

In ähnlicher Art und Weise wird mit der Rotation der Schrauben verfahren. Allerdings müssen jetzt für jede Schraube einzeln die RICHTUNG und die KOMPONENTE bestimmt werden, da jede Schraube ihre eigene Rotationsachse haben muss, um die sie sich drehen soll.



Die einzugebende Gradzahl der Umdrehung ergibt sich aus dem Translationsweg dividiert durch die Ge windesteigung: $20 \text{ mm} / 1,75$ ergibt ungefähr elf Um drehungen, also ca. 3960 GRAD.

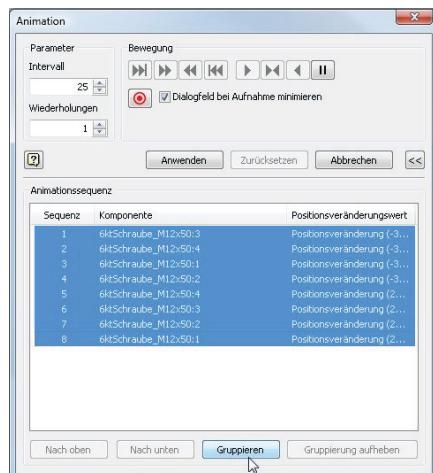
Wurde auch dieser Schritt für alle vier Schrauben vollzogen, dann ist im Objektbrower jeder Schraube zusätz lich zur Translation die jeweilige Rotation zuge ordnet. Hier gilt natürlich ebenfalls, dass die Grad zahl jeder einzelnen Rotation, nachdem sie selektiert wurde, im linken unteren Eck des Programmfensters ge ändert werden kann.



13.4.3 Die Schraubenbewegung animieren – der Film geht ab



Mit dem Befehl ANIMIEREN können Bewegungen angezeigt werden. Er ruft das nachfolgend abgebildete Dialogfenster auf.



dem sich das Dialogfenster um die Möglichkeit der Ablaufsteuerung erweitert. In der Spalte SEQUENZ ist die Reihenfolge der Bewegungen angegeben und fortlaufend nummeriert.

Für dieses Beispiel bedeutend ist der untere Bereich des Dialogfensters, in dem alle Positionsveränderungen gelistet sind. In der obigen Abbildung wurde die Funktion GRUPPIERUNG AUFHEBEN bereits ausgeführt, da durch die gemeinsame Behandlung der Schraubentranslation diese vier Einträge alle in einer Gruppe waren.

Sequenz	Komponente	Positionsveränderungswert
1	éktSchraube_M12x50:3	Positionsveränderung (-3960,00 grd)
1	éktSchraube_M12x50:4	Positionsveränderung (-3960,00 grd)
1	éktSchraube_M12x50:1	Positionsveränderung (-3960,00 grd)
1	éktSchraube_M12x50:2	Positionsveränderung (-3960,00 grd)
1	éktSchraube_M12x50:4	Positionsveränderung (20,000 mm)
1	éktSchraube_M12x50:3	Positionsveränderung (20,000 mm)
1	éktSchraube_M12x50:2	Positionsveränderung (20,000 mm)
1	éktSchraube_M12x50:1	Positionsveränderung (20,000 mm)

Mit der Funktion GRUPPIEREN hingegen werden alle acht Einträge einer einzigen Gruppe zugeordnet. Hintergrund dieser Aktion ist, dass die Bewegungen aller vier Schrauben gleichzeitig ablaufen sollen.



Das Listenfeld INTERVALL gibt an, in wie vielen Schritten eine Bewegung aufgelöst werden soll. Wobei eine Bewegung grundsätzlich immer einen einzelnen Pfad betrifft, entweder eine Verschiebung oder eine Rotation.

Mit WIEDERHOLUNGEN kann angegeben werden, wie oft ein Bewegungsablauf nacheinander abgespielt werden soll.

Die Abspieltasten sind selbsterklärend und von Playern hinreichend bekannt.

Die Schaltfläche mit den roten Kreisen ist die Rekorder-Taste, mit der ein Film (*.avi) des Bewegungsablaufes aufgenommen werden kann.

Interessant und wichtig ist der Button, mit

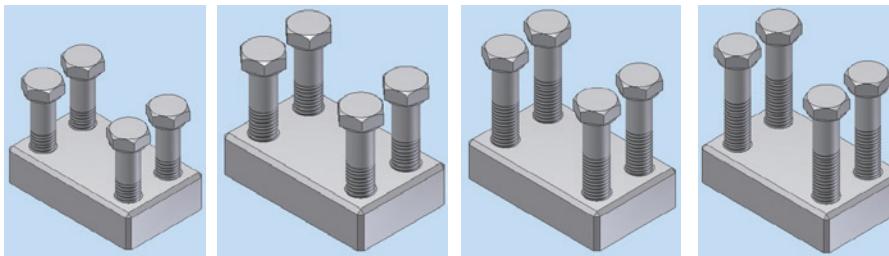
dem sich das Dialogfenster um die Möglichkeit der Ablaufsteuerung erweitert. In

der Spalte SEQUENZ ist die Reihenfolge der Bewegungen angegeben und fortlaufend

nummeriert.

Um die Änderungen im unteren Bereich des Dialogfensters wirksam werden zu lassen, muss die Schaltfläche ANWENDEN geklickt werden.

Damit steht einer Animation, die mit der Play-Taste gestartet werden kann, nichts mehr im Wege.

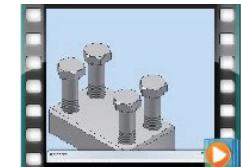


Die vier Schrauben drehen sich entsprechend ihrer Gewindesteigung gleichzeitig aus den Gewindebohrungen heraus oder hinein, je nachdem, in welche Richtung man die Animation laufen lässt.

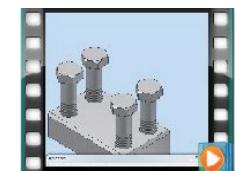
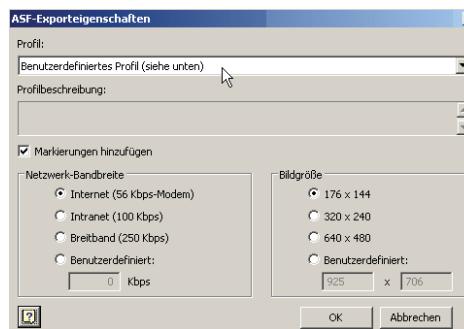
Mit dem roten Aufnahmeknopf kann die dargestellte Bewegung als Film in einem üblichen Windows-Filmformat gespeichert werden.

Nachdem man den Dateinamen, den Speicherort und die Art der Filmdatei (AVI, WMV) bestimmt hat, kann im folgenden Dialogfenster eins der unzähligen Aufnahmeprofile im Listenfeld PROFIL ausgewählt werden.

Eine Kontrolle darüber, welche Einstellungen tatsächlich vorliegen, erhält man allerdings nur, wenn man das benutzerdefinierte Profil auswählt und die Einstellungen selbst vornimmt. Die Netzwerkbandbreite bestimmt dabei die Qualität der Aufnahme und die Größe der erzeugten Filmdatei.



Animation auf DVD



Animation auf CD

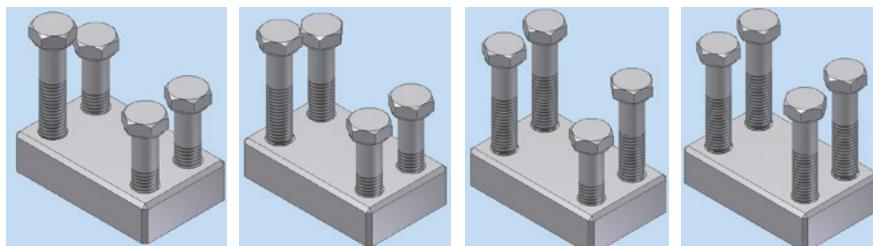
Schrauben nacheinander eindrehen

Selbstverständlich ist es auch möglich, alle oder einige Schrauben einzeln zu animieren.

Sequenz	Komponente	Positionsveränderungswert
1	6ktSchraube_M12x50:1	Positionsveränderung (-3960,00 grd)
1	6ktSchraube_M12x50:1	Positionsveränderung (20,000 mm)
2	6ktSchraube_M12x50:2	Positionsveränderung (-3960,00 grd)
2	6ktSchraube_M12x50:2	Positionsveränderung (20,000 mm)
3	6ktSchraube_M12x50:3	Positionsveränderung (-3960,00 grd)
3	6ktSchraube_M12x50:3	Positionsveränderung (20,000 mm)
4	6ktSchraube_M12x50:4	Positionsveränderung (-3960,00 grd)
4	6ktSchraube_M12x50:4	Positionsveränderung (20,000 mm)

Im Listenfeld wurde mit GRUPPIERUNG AUFHEBEN die zuvor definierte Zuordnung rückgängig gemacht, mit den Buttons NACH OBEN und NACH UNTEN wurden danach

die ausgewählten Einträge wie abgebildet verschoben, sodass die Schrauben nach ihren Positionsveränderungen sortiert angezeigt werden. Anschließend wurden die beiden Positionsveränderungen jeder Schraube mit GRUPPIEREN zusammengefasst. Man erhält dadurch vier Gruppen, die bei der Animation nacheinander durchlaufen werden.



Fazit

Ob diese Methode der Bewegungssimulation für komplexe Baugruppen geeignet ist, hängt von der jeweiligen Bewegungsart der Einzelteile und ihrer Anzahl ab. Für überschaubare Funktionspräsentationen ist es eine schnell und unkompliziert durchzuführende Methode. Es sollte jedoch nicht übersehen werden, dass die Präsentationsumgebung an sich dem Zweck dient, animierte Explosionsdarstellungen z.B. für Montageanleitungen zu erstellen, insofern sind die Möglichkeiten der Bewegungssimulation ziemlich beschränkt.

■ 13.5 Bewegung im Inventor Studio

Auch die Arbeitsumgebung Inventor Studio ermöglicht die Animation von Baugruppen-abhängigkeiten und Positionsdarstellungen zur Erstellung mechanischer Bewegungen.

Im Gegensatz zu der bisher beschriebenen und der in Kapitel 15 behandelten Simulationsumgebung ist der wichtigste Einsatzbereich für Inventor Studio die Bild- und Videoausgabe realistischer und veranschaulichender Inhalte.



HINWEIS: Trotzdem oder auch deswegen ist diese Funktionalität im Zusammenhang mit Simulationen nicht zu übergehen, da sie ihrerseits wiederum einzigartige Funktionen und Möglichkeiten bietet.

Die Funktionalität des Inventor Studios geht weit über die Möglichkeit der Animation hinaus. Im Rahmen dieses Kapitels werden aber nur die Abschnitte intensiver beleuchtet, die mit Bewegungen zu tun haben, und hier insbesondere die, welche die Bauteilanimationen innerhalb von Baugruppen umfassen.

13.5.1 Die Inventor Studio-Arbeitsumgebung

Die Datei, mit der in diesem Beispiel gearbeitet wird, ist die **Kurbeltrieb.iam**, die sich auf der DVD zum Buch befindet und in der sich eine fertige Animation befindet.

Über die Registerkarte **UMGEBUNGEN** erreicht man die Schaltfläche **INVENTOR STUDIO**, mit der dieser Programmteil gestartet wird.



Kurbeltrieb.iam



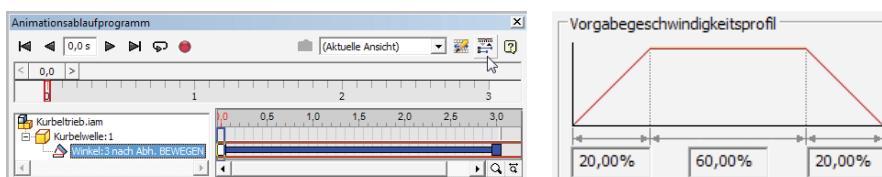
Inventor Studio

Da wir uns hier schwerpunktmäßig mit Bewegungssimulationen beschäftigen, ist vor allem die Funktionsgruppe **ANIMIEREN** von Interesse.



Hier werden Komponenten-, Abhängigkeits-, Parameter- oder Positions-, Kamera- und Lichtspuren angelegt und mit jeweils eigenen, variablen Zeitachsen versehen. Mit der Rekorder-Taste werden Animationen als Filme gespeichert. Die Gesamtdauer und das Geschwindigkeitsprofil werden eingestellt.

Animationsablaufprogramm



Animationsablaufprogramm

Das **ANIMATIONSABLAUFPGRAMM** steuert eine bereits erstellte Studio-Animation. Die abgebildete Einstellung erreicht man mit dem Button **VORGANGSEITOR ERWEITERN**, der sich oben rechts im Dialogfenster befindet.

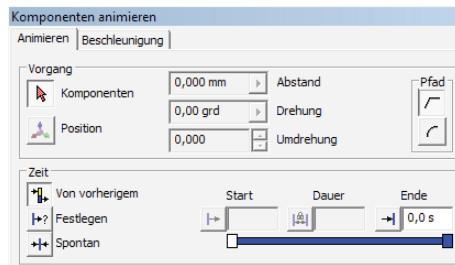
Mit der Schaltfläche **ANIMATIONSOPTIONEN** kann hier beispielsweise die Vorgabe für das Geschwindigkeitsprofil der Animation eingestellt werden.

Komponenten

Die Schaltfläche **KOMPONENTEN** ist für das Hinzufügen von Bauteilen oder Baugruppen zuständig.



Mit dieser Funktion werden u. a. die Art der Bewegung, Positionseinstellungen, Zeiten der Bewegung und das konkrete Geschwindigkeitsprofil (Beschleunigung) für die ausgewählten Komponenten eingestellt. Von anderen Bauteilen abhängige Komponenten reagieren nur dann auf die Positionierung, wenn der entsprechende Freiheitsgrad verfügbar ist.

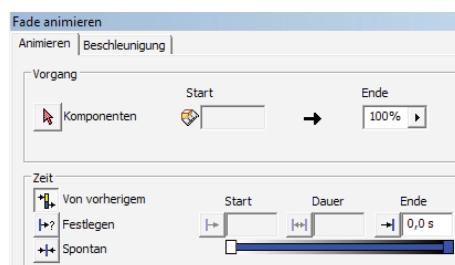


Unvermittelt eintretende Vorgänge können über die Schaltfläche SPONTAN bei allen Hinzufügungen, auch bei Fade, Abhängigkeiten etc., anstelle einer Zeitachse bestimmt werden. Sie laufen plötzlich ab und haben keine Dauer.

Fade



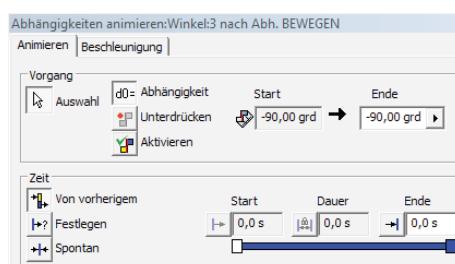
Die Schaltfläche FADE steuert die Sichtbarkeit einer Komponente in einem bestimmten Zeitrahmen. Im START- und ENDE-Feld wird die Sichtbarkeit in Prozent zwischen 0 und 100 angegeben. Eine Komponente wird über die zu definierende Zeitachse ein- bzw. ausgeblendet. Auch für die Funktion kann ein Geschwindigkeitsprofil (Beschleunigung) ausgewählt werden. Für eine Ein- und Ausblendung, oder umgekehrt, sind jeweils zwei Vorgänge erforderlich.



Abhängigkeiten



Hier können lineare und Winkelabhängigkeiten animiert werden. Entsprechende 3D-Abhängigkeiten werden in die Ablaufsteuerung übernommen und bekommen eine eigene Zeitachse. Die Möglichkeiten der Zeit- und Geschwindigkeitssteuerung (Beschleunigung) entsprechen denen der Komponenteneinfügung.

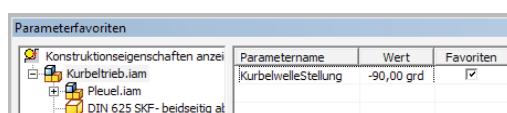


Parameter
Favoriten

Parameter

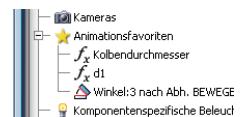
Um Parameter animieren zu können, sind vorher zwei Schritte erforderlich.

Erstens müssen im Bauteil- oder Baugruppendokument im Parameterfens-



ter die zu animierenden Parameter als EXPORTPARAMETER gekennzeichnet werden und zweitens müssen mit der Inventor-Studio-Funktion PARAMETER FAVORITEN die gewünschten Parameter als Favoriten angehakt werden.

Nach diesem Vorgang befindet sich im Objektbrowser ein neuer Ordner ANIMATIONSFAVORITEN, in dem sich die ausgewählten Parameter befinden, die über das Dialogfenster PARAMETER ANIMIEREN zur Ablaufsteuerung hinzugefügt werden können.

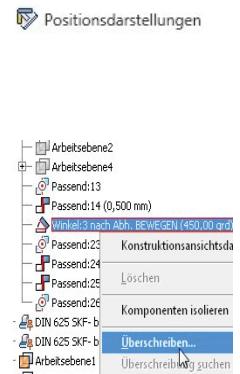
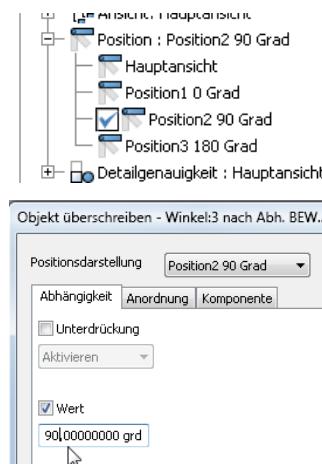
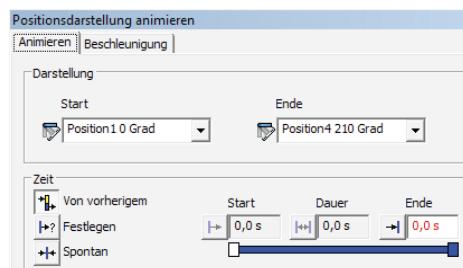


Positionsdarstellungen

Auch für die Anwendung der Positionsdarstellungen sind Vorarbeiten außerhalb des Inventor Studios nötig. Im Baugruppendokument müssen benutzerdefinierte Positionen der Baugruppe erstellt werden.

Nachdem im Objektbrowser der Baugruppe neue Positionen erzeugt und aktiviert wurden, kann z.B. im Kontextmenü einer 3D-Abhängigkeit die Funktion **ÜBERSCHREIBEN** ausgewählt werden.

Im Dialogfenster kann dann zu der jeweils aktiven Position u. a. ein eigener Wert eingetragen werden.



Ebenfalls im Objektbrowser der Baugruppe werden die definierten Positionen wie gewünscht aktiviert.

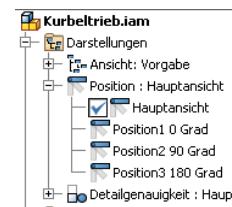
Ist das geschehen, dann können im Inventor Studio POSITIONSDARSTELLUNGEN animiert werden, indem in den Abrollfeldern die gewünschten Positionen für den START und das ENDE der Animationsphase ausgewählt werden. Die Möglichkeiten der Zeit- und Geschwindigkeitssteuerung entsprechen denen der Komponenteneinfügung.

Positionen in Excel bearbeiten

Es ist möglich und bei mehreren Positionsdefinitionen mitunter sinnvoll, diese nicht relativ umständlich direkt im Inventor vorzunehmen, sondern stattdessen in der Tabellenkalkulation Excel.

Ein kleines Beispiel soll das Vorgehen demonstrieren.

In einer Baugruppendatei sind bereits einige Positionsdarstellungen erzeugt worden, und es sollen weitere hinzugefügt werden.



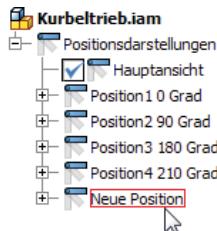


In der obersten Leiste des Objektbrowsers, in der üblicherweise Modell steht, kann mit einem Klick auf den Pfeil die Ansicht im Browser auf DARSTELLUNGEN umgestellt werden. Wurde dies gemacht, dann befinden sich unter der Titelliste des Objektbrowsers drei Buttons, von denen der rechte das Excel-Symbol enthält.

	A	B
1		Winkel:3 nach Abh. BEWEGEN (Abhängigkeitsversatz)
2	Hauptansicht	-90 grd
3	Position1 0 Grad	0,00 grd
4	Position2 90 Grad	90,00 grd
5	Position3 180 Grad	180,00 grd
6	Position4 210 Grad	210,00 grd

Die Betätigung dieser Schaltfläche öffnet eine Excel-Tabelle, in der bereits die relevanten Eintragungen vorliegen.

Der Positionsbezug ist in diesem Beispiel eine Winkelabhängigkeit mit der Bezeichnung **Winkel 3 nach Abh. BEWEGEN**, die in der obersten Zeile als Spaltenüberschrift über den Werten angezeigt wird.



Links neben den Werten stehen die bereits definierten Positionsnamen. Fügt man nun in derselben Art und Weise eine neue Position an die Tabelle an (z.B. **Neue Position**) und gibt ihr einen entsprechenden Wert (z.B. **315 grd**), dann wird nach dem Speichern und Schließen der Tabelle diese Positionsdefinition automatisch in den Objektbrowser übernommen und kann sofort angewendet werden.

Im Gegensatz zu iParts ist die Tabellenkalkulation in dieser Umgebung kein eingebettetes Excel-Dokument, sondern lediglich eine Bearbeitungsumgebung für die Positionswerte.

Kamera und Licht

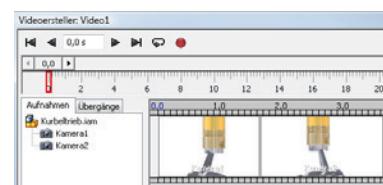


Für die beiden Funktionen **KAMERA** und **LICHT ANIMIEREN** gilt dasselbe wie für die Positionen- oder Parameteranimation. Es müssen eine oder mehrere Kameras und/oder Lichter definiert werden, damit diese in eine Animation aufgenommen werden können. Kamerafahrten mittels definierter Wiedergabepfade und Beleuchtungseffekte werden mit diesen Funktionen sehr wirkungsvoll in Szene gesetzt.

Videoersteller

Der **VIDEOERSTELLER** fügt verschiedene Kamerafahrten oder -aufnahmen aneinander, fügt ggf. Übergänge ein und rendert die Aufnahme sehr hochwertig als Film.

Um mit dem Videoersteller eine Aufnahme rendern zu können, muss wenigstens eine Kamera definiert sein. Es muss außerdem im Objektbrowser ein Video definiert und aktiviert werden. Im Dialogfenster **VIDEOERSTELLER** werden dann die gewünschten Einstellungen für das aktive Video vorgenommen.



Der Rendervorgang, der mit dem Rekorder-Button eingeleitet wird, benötigt je nach Einstellung und Videodauer sehr viel Zeit, weil jedes einzelne Filmbild aufwendig berechnet werden muss.

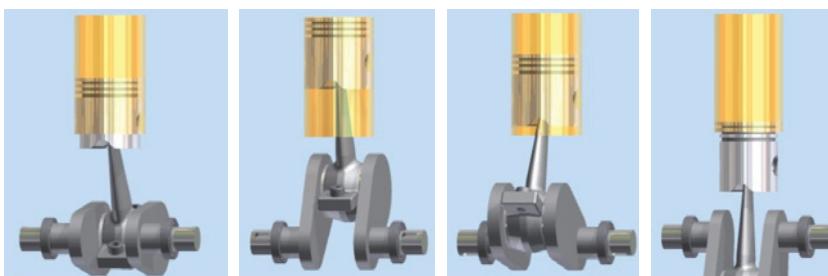
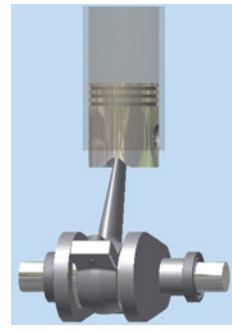
■ 13.6 Beispiel einer Studio-Animation

Im Folgenden soll anhand eines einfachen Beispiels aufgezeigt werden, wie einfach, schön und effektvoll eine Animation im Inventor Studio erzeugt werden kann.

Der dafür verwendete Kurbeltrieb (Datei: [Kurbeltrieb.iam](#)) besteht aus den Bauteilen und einer Unterbaugruppe (Pleuel). Alle Bauteile wurden in der Baugruppe so mit 3D-Abhängigkeiten versehen, dass sie ihre Funktion erfüllen. Die beiden Lager und der provisorische Zylinder wurden fixiert. In seiner Funktion stellt der Kurbeltrieb eine offene Gelenkkette dar (siehe Kapitel 4, [Technische Mechanik, Festigkeitslehre und Inventor](#)).

Für die reale Simulation eines Verbrennungsmotors müsste diese über den Kolben angetrieben werden, was aber in dieser Simulation (reine Bewegung im Inventor Studio) nicht funktioniert, da weder der Kolben noch die Kurbelwelle eine Schwungmasse besitzen und deswegen die Anordnung im UT stehen bleiben würde.

Hier muss die Kurbelwelle per 3D-Abhängigkeit angetrieben werden, was in der Realität eher einem Kolbenverdichter oder einer Kolbenpumpe entspricht.



Animation auf DVD

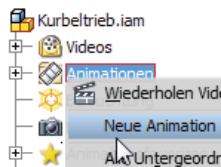
13.6.1 Vorbereitung der Animation

Nachdem die Baugruppe [Kurbeltrieb.iam](#) erzeugt bzw. von der DVD geladen wurde, wechselt man über die Registerkarte UM-GEBUNG und mit dem Button INVENTOR STUDIO in diese Arbeitsumgebung.

Mithilfe des Kontextmenüs des Ordners ANIMATIONEN im Objektbrowser wird eine NEUE ANIMATION erzeugt.



Inventor Studio

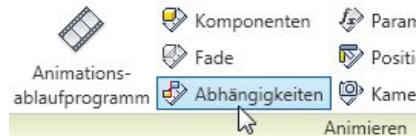


Der Eintrag **Animation1** erscheint sofort innerhalb des Ordners. Der Haken zeigt an, dass diese Animation aktiv ist und alle folgenden Animationsmanipulationen diesem Eintrag zugeordnet werden. Würden mehrere Animationen existieren, dann könnte man im Kontextmenü jedes Eintrages die entsprechende Animation aktivieren.

13.6.2 Abhängigkeit animieren

Die Baugruppe verfügt über eine Winkelabhängigkeit an der Kurbelwelle, über welche die Baugruppe auch ohne das Inventor Studio schon bewegt werden könnte. Dieses Verfahren wurde bereits in Abschnitt 13.2 beschrieben und funktioniert über den Kontextmenüeintrag **BAUTEIL NACH ABHÄNGIGKEIT BEWEGEN**.

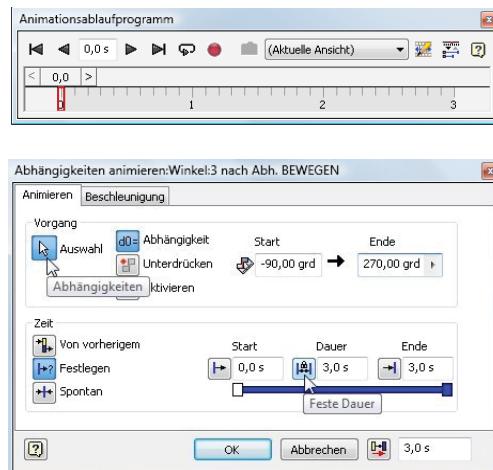
Die Möglichkeiten im Inventor Studio sind jedoch viel umfangreicher, weswegen dieser Ansatz hier nicht zur Anwendung kommen soll.



Abhängigkeiten

Stattdessen rufen wir die Funktion **ABHÄNGIGKEITEN** auf, mit der 3D-Abhängigkeiten animiert werden können.

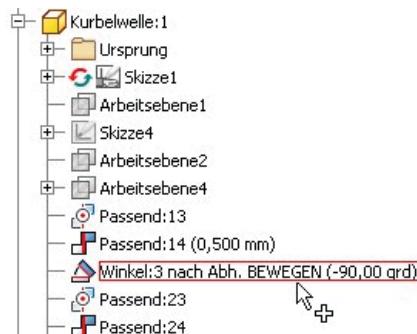
Zwei Sachen passieren nach dem Funktionsaufruf.



Zum einen öffnet sich das Dialogfenster **ANIMATIONSABLAUFPGRAMM**, über das die gesamte Animation gesteuert wird, in dem an dieser Stelle aber noch kein Eintrag vorhanden ist.

Zum anderen öffnet sich das Dialogfenster **ABHÄNGIGKEITEN ANIMIEREN**, mit dem zuerst gearbeitet werden muss.

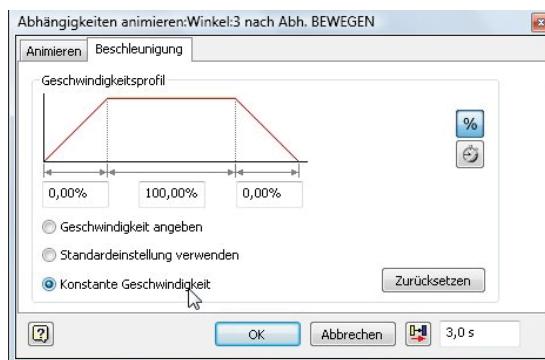
Die Schaltfläche AUSWAHL ist nach dem Öffnen aktiv und signalisiert, dass im ersten Schritt eine Abhängigkeit ausgewählt werden muss, für die dann die entsprechende Animation definiert wird.



Im Objektbrowser beim Bauteil Kurbelwelle finden wir die Abhängigkeit, mit der das Bauteil auch ohne Animation, nur über das Kontextmenü, bewegt werden könnte. Diese Abhängigkeit WINKEL:3 NACH ABH. BEWEGEN (-90,00 GRD) wird ausgewählt. Die Benennung ist willkürlich.

Im Dialogfenster ABHÄNGIGKEIT ANIMIEREN werden nun die weiteren Animationsdaten eingegeben. Der Startwinkel im Feld START ist von der Abhängigkeit übernommen worden und mit -90,00 GRD bereits eingetragen. Eine volle Umdrehung von 360 Grad führt demnach zum Endwinkel, der mit 270,00 GRD in das Feld ENDE einzutragen ist.

Für die zeitliche Steuerung im Bereich ZEIT wird in das Zeitfeld ENDE eine Zeitspanne von drei Sekunden eingetragen, die Startzeit im Feld START ist mit 0 Sekunden ohnehin vorbestimmt, da es die erste Animation ist. Die Animationsdauer im Feld DAUER wird automatisch errechnet.



Auf der zweiten Registerkarte BESCHLEUNIGUNG kann das Geschwindigkeitsprofil für diese Animation bestimmt werden.

Die absolute Geschwindigkeit der Animation ergibt sich aus der bereits definierten Zeitspanne und der Wegdefinition (360 Grad), insofern können jetzt nur Prozentwerte angegeben werden, die in der Summe immer 100% ergeben müssen. Für dieses Beispiel, in dem

kein langsames Anfahren und Anhalten vorgesehen ist, wird die Einstellung KONSTANTE GESCHWINDIGKEIT selektiert. Mit OK wird das Dialogfenster geschlossen.

13.6.3 Die Ablaufsteuerung



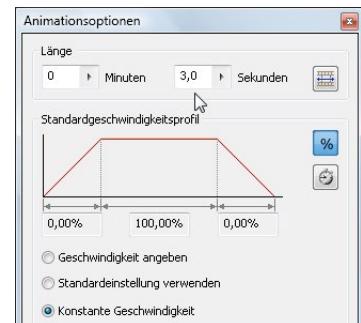
Ist zwischenzeitlich das Dialogfenster ANIMATIONSABLAUFPGRAMM verschwunden, so kann es jederzeit mit der dazugehörigen Schaltfläche wieder aufgerufen werden.



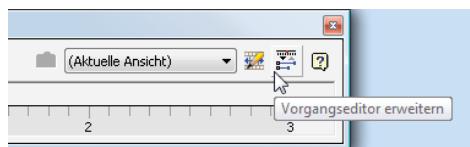
Im oberen Bereich dieses Fensters ist nicht viel zu sehen.

Im rechten Bereich des Fensters befindet sich der Button ANIMATIONSOPTIONEN, der zuerst betätigt werden sollte. Die Werte in diesem Fenster betreffen die gesamte Animation, die aus mehreren Teilen bestehen kann.

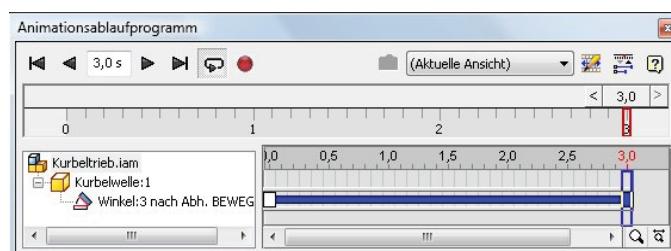
Die Voreinstellung der LÄNGE von 30 Sekunden sollte für dieses Beispiel mit 3 SEKUNDEN überschrieben werden, da nur eine einzige Animation eingetragen ist und diese nur drei Sekunden dauert. Würde man die 30 Sekunden stehen lassen, dann würde in den restlichen 27 Sekunden die Animation weiterlaufen, aber es würde nichts passieren.



Auch hier wird die KONSTANTE GESCHWINDIGKEIT ausgewählt.



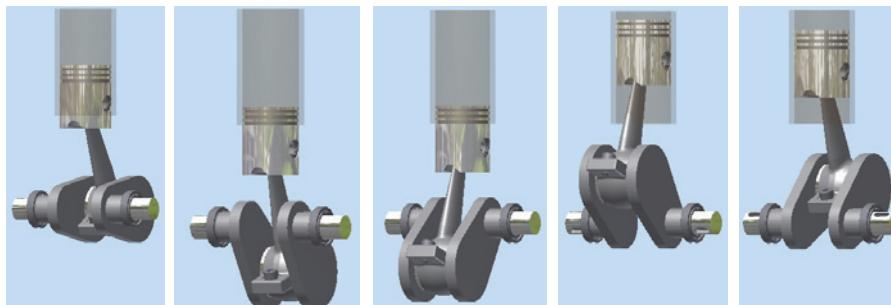
Noch immer ist im Programmfenster der Ablaufsteuerung nicht viel zu sehen. Die Schaltfläche ganz rechts, VORGANGSEITOR ERWEITERN, kann dies ändern.



Ein Klick darauf fördert den Eintrag unserer Abhängigkeit und die Zeitachse für die Animation zutage. Der blaue Balken zeigt die Animationsstrecke an, die, wie eingegeben, mit drei Sekunden über die Gesamtlauftzeit von ebenfalls drei Sekunden eingetragen ist.

Ist wie in der Abbildung der Button WIEDERHOLUNG EIN/AUS gedrückt, dann läuft die Animation so lange, bis die STOPP-Schaltfläche gedrückt wird, die allerdings erst dann erscheint, wenn die Animation läuft.

Die PLAY-Taste startet die fertige Animation.



13.6.4 Animation aufzeichnen

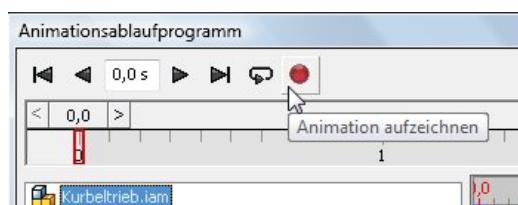
Sinn und Zweck des Inventor Studios ist es vor allem, Animationen für Präsentationen zu erstellen. Insofern soll der letzte Abschnitt dieses Kapitels diese Funktion kurz vorstellen.

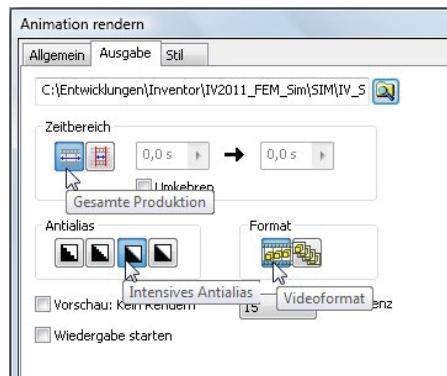
Der Rekorder-Button ANIMATION AUFZEICHNEN ist für diese Leistung zuständig.

Wird er geklickt, dann erscheint das Dialogfenster ANIMATION RENDERN, in dem alle Einstellungen für die Videoproduktion vorgenommen werden können.

In diesem Fenster können allgemeine Daten, das Ausgabeformat und der optische Stil eingestellt werden.

Im Prinzip können alle Einstellungen auf der Registerkarte ALLGEMEIN für die erste Animation beibehalten werden. Ist der Spieltrieb erst einmal erwacht, können fast unendlich viele Variationen ausprobiert werden – sofern man die Zeit dafür hat.





Animation auf DVD



Auf der zweiten Registerkarte AUSGABE selektieren Sie den Button GESAMTE PRODUKTION, damit die vollständige Animation aufgezeichnet wird. Andernfalls könnte auch nur ein Teilbereich im Film wiedergegeben werden.

Für die Produktion eines Filmes ist die Schaltfläche VIDEOFORMAT anstelle der EINZELBILDER auszuwählen. Die ANTIALIAS-Option regelt die Glättung der Kanten.

Auf der dritten Karte STIL kann die KORREKTE SPIEGELUNG beibehalten werden.

Mit dem Button RENDERN unten rechts im Fenster wird der Vorgang gestartet. Damit wurde die erste Animation erstellt.

Alle Funktionen, die das Inventor Studio bietet, zu erklären, würde ein eigenes kleines Buch füllen. Der Einstieg ist gemacht, und damit sollte es nicht schwerfallen, all die anderen Funktionen auszuprobieren.

Sowohl für die Durchführung einer FA-Analyse als auch für dynamische Simulationen ist es mitunter sehr vorteilhaft, mit möglichst wenigen Bauteilen in Baugruppen zu arbeiten. Vielfach spielen Schrauben, Buchsen, Scheiben, Sicherungsringe etc. für die beabsichtigte Simulation ohnehin keine Rolle und können vernachlässigt werden. Der Inventor verfügt zu diesem Zweck über eine Reihe von Funktionen zur Bauteil- bzw. Baugruppenvereinfachung.



HINWEIS: Einige Vorteile der Bauteil- bzw. Baugruppenvereinfachung:

- weniger Einzelteile
- übersichtlichere Konstruktionen
- schnellere Durchführung einer Belastungsanalyse
- einfachere Struktur in der dynamischen Simulation
- bessere Bauteil- bzw. Gelenkerkennung in der dynamischen Simulation
- schnelle Rechenzeiten in der dynamischen Simulation



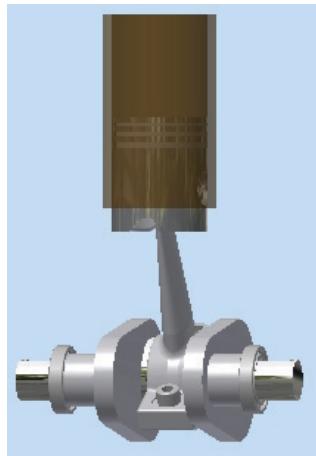
TIPP: Möchten Sie die Vereinfachungsfunktionen nutzen, dann empfiehlt es sich, schon bei der Struktur der Baugruppe darauf zu achten, dass Unterguppen so zusammengefasst werden, dass sie in der FE-Analyse und in der dynamischen Simulation als jeweils ein starres Teil betrachtet werden können.

■ 14.1 Beispiel: Kurbeltrieb

Ein vereinfachter Kurbeltrieb, der in späteren Kapiteln noch mehrmals als Beispiel dient, soll im Folgenden vereinfacht werden. Die Datei [Kurbeltrieb_einfach.iam](#) finden Sie auf der DVD zum Buch.



Kurbeltrieb_einfach.iam

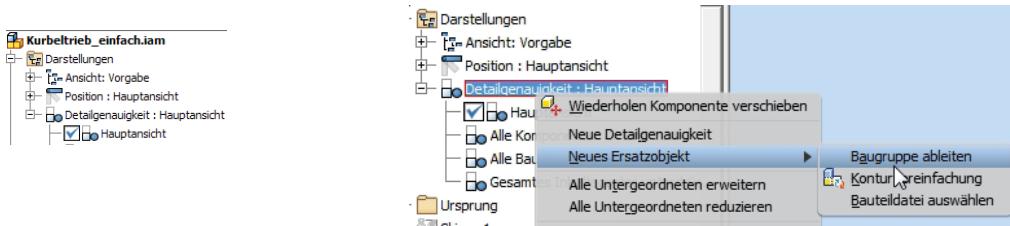


Der Kurbeltrieb besteht aus 15 Bauteilen, die funktionsgerecht montiert und mit entsprechenden 3D-Abhängigkeiten versehen sind.

Die Unterbaugruppe *Pleuel* ist aus zehn Bauteilen zusammengesetzt. Dies sind die beiden Pleuelteile, der Kolbenbolzen und zwei Sicherungsringe, zwei Schrauben, das Kurbelwellenlager und zwei Lagerscheiben. Diese Teile sind alle unbeweglich miteinander verbunden, wobei der Kolbenbolzen der Einfachheit halber ebenfalls dieser Baugruppe zugeordnet wurde.

Vereinfacht man diese Pleuel-Baugruppe zu einem Teil, dann besteht die Gesamtkonstruktion nur noch aus sechs Teilen: Zylinder, Kolben, Kurbelwelle, zwei Rillenkugellager und Pleuel-Baugruppe.

■ 14.2 Detailgenauigkeit erstellen

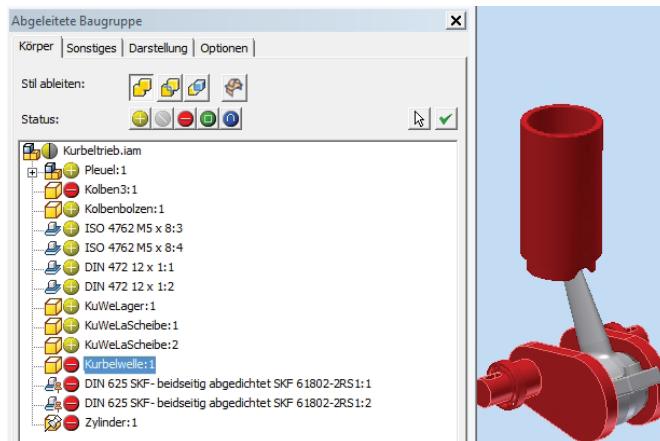


Der erste Schritt besteht in der Erzeugung einer neuen Detailgenauigkeit. Da die neue Pleuel-Baugruppe als Ersatz für die betroffenen Bauteile eingefügt und aus der bestehenden Konstruktion abgeleitet werden soll, ist im Kontextmenü der Detailgenauigkeit NEUES ERSATZOBJEKT und BAUGRUPPE ABLEITEN auszuwählen.

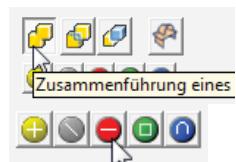


Das Ersatzobjekt wird im Projektordner als neues Bauteil gespeichert und benötigt somit einen Komponentennamen, der im nächsten Schritt einzugeben ist. Ein sprechender Name für unsere Baugruppe wäre beispielsweise **Pleuel_Bg_einfach**. Nachdem dies mit OK bestätigt wurde, öffnet sich das Fenster **Abgeleitete Baugruppe**, in dem die Bauteile ausgewählt werden, welche das neue vereinfachte Bauteil bilden sollen.

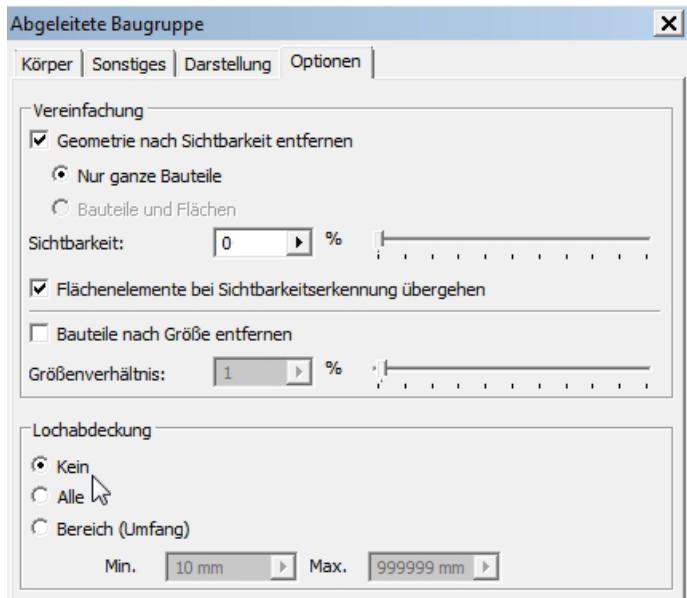
Komponenten auswählen



Unter *Stil ableiten* aktivieren wir den Button **ZUSAMMENFÜHRUNG EINES VOLUMEN-KÖRPERS DURCH VERBINDUNG PLANARER FLÄCHEN** und subtrahieren anschließend mithilfe der runden Schaltflächen vor den Komponentennamen diejenigen Komponenten, welche **nicht** in die abgeleitete Baugruppe übernommen werden sollen. Das **MINUSZEICHEN IM ROTEN KREIS** signalisiert diese Auswahl. Der Kolben, die Kurbelwelle, der Zylinder und die Rillenkugellager werden nun entfernt.



Im selben Fenster sollten Sie auf der Registerkarte **OPTIONEN** darauf achten, dass bei den Lochabdeckungen die Auswahl **KEIN** getroffen wurde, damit die Bohrungen im Kurbelwellenlager und im Kolbenbolzen erhalten bleiben.





Wird das Fenster mit OK geschlossen, dann passieren drei Dinge.

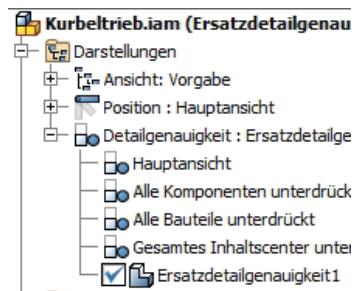
Im Objektbrowser existiert unter **Darstellungen** → **Detailgenauigkeit** der neue Eintrag **Ersatzgenauigkeit1**, der auch aktiv ist.

Im Arbeitsbereich sehen Sie die abgeleitete vereinfachte Darstellung der Pleuel-Baugruppe.

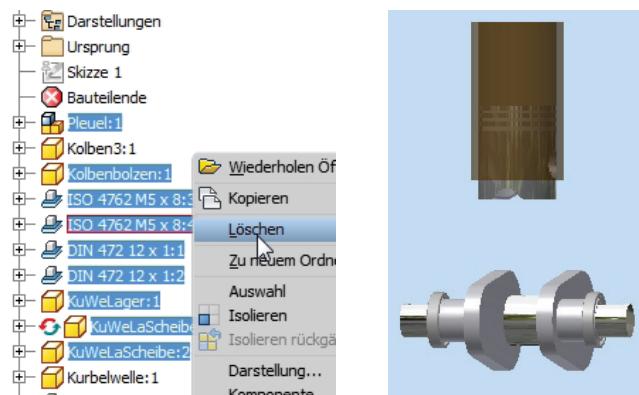
Im Projektordner wird eine neue Bauteildatei **Pleuel_Bg_einfach.ipp** erzeugt bzw. gespeichert.

Die Ansicht der gesamten ursprünglichen Baugruppe erreichen Sie, indem Sie unter **Darstellungen** → **Detailgenauigkeit** den neuen Eintrag **HAUPTANSICHT** wieder auf aktiv setzen.

Jetzt sollte die Baugruppe unter einem neuen Namen als vereinfachte Baugruppe, z.B. **Kurbeltrieb_ver einfacht.ipp**, gespeichert werden.



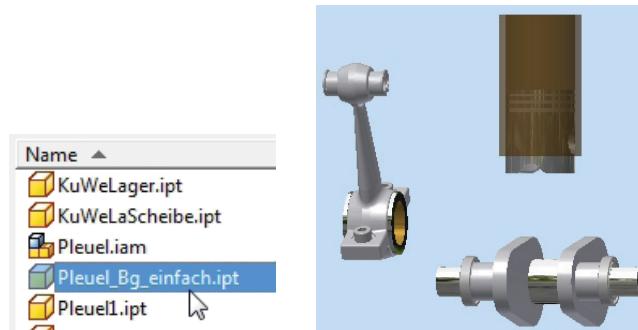
■ 14.3 Bauteile mit vereinfachtem Bauteil ersetzen



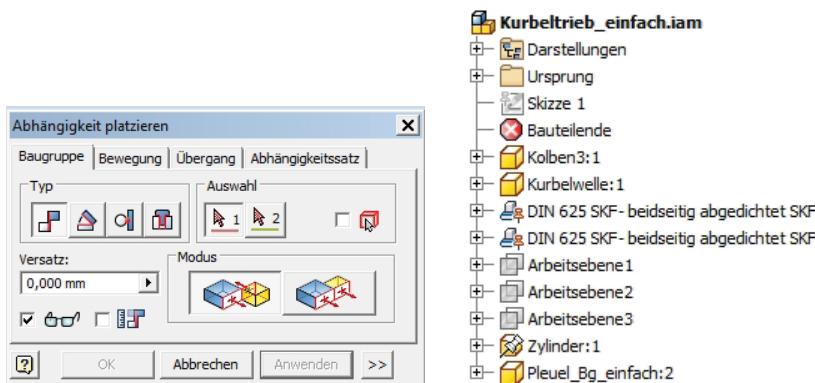
In der neu gespeicherten Baugruppe, die ggf. geöffnet werden muss, sollten Sie jetzt alle Bauteile, die sich in der vereinfachten Darstellung befinden, löschen.



Ist dies geschehen, dann können Sie mit **KOMPONENTE PLATZIEREN** das vereinfachte Bauteil **Pleuel_Bg_einfach.ipp** in die Baugruppe einfügen.



Im letzten Schritt vergeben Sie die ABHÄNGIGKEITEN zwischen Kurbelwelle und Kurbelwellenlager sowie zwischen Kolben und Kolbenbolzen neu.



Die vereinfachte Baugruppe besteht jetzt aus nur noch sechs Bauteilen, wobei die vereinfachte Baugruppe [Pleuel_Bg_einfach.ipp](#) ebenfalls als ein Bauteil angezeigt wird.

Die dynamische Simulation verwendet, im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Verfahren, die physikalische Eigenschaften wie Masse und Reibung, Trägheitsmatrix und Belastungsdefinitionen, um Informationen darüber zu bieten, wie sich die Komponenten in der realen Welt verhalten.

Mit den Funktionen dieser Arbeitsumgebung ist es möglich, den Einfluss zu analysieren, den Kräfte und Momente tatsächlich auf die Konstruktion ausüben. Eine Verknüpfung mit Inventor Studio ermöglicht eine realistische Animationsaufzeichnung der Bewegung.

■ 15.1 Die Arbeitsumgebung

Ist eine Baugruppe, also eine *.iam-Datei, im Inventor geöffnet, dann kommt man über die Registerkarte UMGEBUNG zur Schaltfläche DYNAMISCHE SIMULATION.



Die folgenden Funktionsgruppen und Buttons stehen in dieser Arbeitsumgebung zur Verfügung:



In den nächsten Abschnitten folgt ein Überblick über die einzelnen Funktionen.

15.1.1 Funktionsgruppe Verbindung

Gelenk einfügen



Mit der Funktion GELENK EINFÜGEN werden Bauelemente so miteinander verbunden, dass sie einer Mechanismusfunktion entsprechen. Die meisten Gelenke in dieser Befehlsgruppe sind so benannt bzw. mit Icons versehen, dass sie aufgrund ihres Namens erkannt und verwendet werden können. Letztendlich erfüllt diese Funktion zwei Aufgaben: Erstens verbindet sie zwei Teile (ähnlich den 3D-Abhängigkeiten), und zweitens entfernt sie alle Freiheitsgrade, die das ausgewählte Gelenk nicht haben darf.

In Kapitel 15.5, [Gelenkeinfügungsarten](#), wird diese umfangreiche Funktion detailliert beschrieben und erläutert.

Abhängigkeit ableiten



Wurde in den Simulationseinstellungen angegeben, dass die Abhängigkeiten nicht automatisch in Gelenke umgewandelt werden sollen oder befinden sich noch nicht berücksichtigte Abhängigkeiten in der Baugruppe, dann können mit der Funktion ABHÄNGIGKEITEN ABLEITEN bzw. ABHÄNGIGKEITEN UMWANDELN Gelenke aufgrund der gewählten Bauteile bzw. der vorhandenen 3D-Abhängigkeiten erzeugt werden. Inventor lässt dabei wenige Spielräume bei der Interpretation der Bewegungsmöglichkeiten, und so führt dieses Vorgehen nicht immer zum gewünschten Ergebnis.

Status des Mechanismus



Der STATUS DES MECHANISMUS zeigt nur Informationen an: den Grad der Redundanzen und der Beweglichkeit sowie die Anzahl der Körper und die Anzahl der beweglichen Körper.

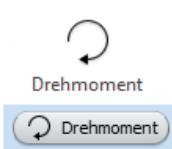
15.1.2 Funktionsgruppe Laden

Kraft



Eine KRAFT beliebiger Größe und Richtung kann mit der Auswahl einer Achse, Kante oder Fläche positioniert werden. Die Richtung wird grundsätzlich über das Koordinatensystem der ausgewählten Geometrie vorgegeben, kann jedoch umgekehrt oder per Vektoren in beliebige X-, Y- und Z-Komponenten aufgeteilt werden.

Drehmoment



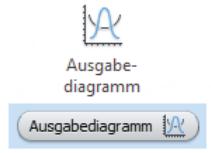
Ein DREHMOMENT beliebiger Größe und Richtung kann mit der Auswahl einer Achse, Kante oder Fläche positioniert werden. Die Richtung wird grundsätzlich über das Koordinatensystem der ausgewählten Geometrie vorgegeben, kann jedoch umgekehrt oder per Vektoren in beliebige X-, Y- und Z-Komponenten aufgeteilt werden.

15.1.3 Funktionsgruppe Ergebnisse

Ausgabediagramm

Mit dem AUSGABEDIAGRAMM wird der zeitlich Verlauf beliebiger Größen und Variablen im Diagramm als Kurvenverlauf dargestellt.

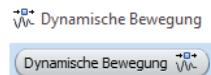
Belastungsverläufe können in den FEM-Modul oder in Excel exportiert werden, und die Diagramme kann man natürlich auch auf einem Drucker ausgeben.



Dynamische Bewegung

Die DYNAMISCHE BEWEGUNG erlaubt, einen Mechanismus ‚von Hand‘ zu bewegen. Der Mauszeiger übt dabei eine externe Kraft auf das zu bewegende Bauteil aus. Alle Gelenke, Einschränkungen, sonstigen Kräfte etc. funktionieren uneingeschränkt wie definiert. Die Funktion ist bestens dafür geeignet, die Bewegungseinstellungen einer Konstruktion zu testen.

Im Dialogfenster DYNAMISCHE BEWEGUNG werden die Einstellungen für dieses Verfahren vorgenommen, es können Kraftwerte und Dämpfungen bestimmt werden.



Unbekannte Kraft

Mit der Funktion UNBEKANNTE KRAFT können innerhalb von Mechanismen die durch die Bewegung auf einzelne Bauteile wirkenden Kräfte oder Momente ermittelt werden. Es werden dabei alle externen Einflüsse berücksichtigt, z.B. auch die Schwerkraft oder Federkräfte.



Die Größe der ermittelten Kraft oder des Momentes ist der Wert, der dafür nötig ist, das System im jeweiligen momentanen Zustand im statischen Gleichgewicht zu halten. Im Ausgabediagramm kann der zeitliche Verlauf der unbekannten Größe aufgezeichnet werden.

Spur

Die Schaltfläche SPUR fordert dazu auf, einen Punkt des Mechanismus zu bestimmen und seine Bewegungsgrößen Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf aufzuzeichnen.



Während der Bewegungssimulation wird der Wegverlauf des Punktes als Spur auf dem Bildschirm angezeigt, der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf kann im Ausgabediagramm dargestellt werden.

15.1.4 Funktionsgruppe Animieren

Film publizieren

Mit FILM PUBLIZIEREN wird die Bewegung einer Simulation in einer AVI-Filmdatei aufgezeichnet. Verschiedene Codecs und Komprimierungsverfahren können ausgewählt bzw. konfiguriert werden.

In Studio publizieren

Der Button IN STUDIO PUBLIZIEREN ermöglicht den direkten Wechsel in das Animationsablaufprogramm der Inventor Studio-Arbeitsumgebung. Die Möglichkeiten dieser Option wurden in den Kapiteln 13.5 und 13.6 bereits beschrieben. Sie erlaubt vielfältige Gestaltungsvarianten insbesondere zu Präsentationszwecken.

Nach dem Verlassen der Studio-Arbeitsumgebung muss die Simulationsumgebung erneut aufgerufen werden.

15.1.5 Funktionsgruppe Verwalten



Simulationseinstellungen

 Einstellungen für dynamische Simulation

Hier werden wichtige und grundsätzliche Optionen ausgewählt. Die SIMULATIONSEINSTELLUNGEN bestimmen, ob die 3D-Abhängigkeiten automatisch in Gelenke umgewandelt werden oder die Gelenke von Hand definiert werden müssen. Die Vorgabe ist der Automatismus. Wird auf Handbetrieb umgestellt, dann werden ggf. alle bereits definierten Gelenke gelöscht.

Des Weiteren können Warnungen bei Überbestimmungen und eine farbige Darstellung der beweglichen Bauteile eingestellt werden. Darüber hinaus wird die FEM-Exportart eingestellt, entweder für die interne FE-Analyse oder für das externe ANSYS-Programm.

Mit den erweiterten Einstellungen können u. a. weitere Details des Simulationsablaufes, wie Genauigkeitsdarstellungen, Erfassungs- und Regulierungsgeschwindigkeiten, beeinflusst werden.



Simulationswiedergabe

 Simulationswiedergabe

Die SIMULATIONSWIEDERGABE startet die Bewegungssimulation. Hier werden außerdem die Simulationsdauer, die Anzahl der zu speichernden Bilder und die Anzahl der angezeigten Bilder bestimmt.

Sehr wichtig ist in diesem Dialogfenster auch die Schaltfläche KONSTRUKTIONSMODUS, mit der von der Simulationsdarstellung in die Umgebung gewechselt wird, in der die konstruktiven Details (Gelenke, Fixierungen, Freiheitsgrade usw.) verändert werden können.

Parameter

Mit dem Aufruf der Funktion PARAMETER wird das aus der Bauteil- und Baugruppenumgebung bekannte Parameterfenster auf den Bildschirm gerufen.



Wurde bereits eine Simulation definiert, dann sind zusätzliche Parametergruppen in der Darstellung enthalten, welche die für die Simulation festgelegten Werte, wie Schwerkraftdefinition, Zeit- und Geschwindigkeitsparameter, enthalten.

15.1.6 Funktionsgruppe Belastungsanalyse

Exportieren nach FEM

Nach einer ausgeführten Simulation und dem Wechsel in den Konstruktionsmodus (siehe Simulationswiedergabe) steht die Funktion EXPORTIEREN NACH FEM zur Verfügung. Mit ihr werden die Bauteile selektiert, für die eine FE-Untersuchung stattfinden soll. Die Funktion speichert FEM-Daten für die ausgewählten Bauteile für jeden im AUSGABEDIA-GRAMM ausgewählten Zeitschritt.



Exportieren nach FEM

Je nach Einstellung in den Simulationseinstellungen werden die Daten für die programmierte FE-Analyse oder für das ANSYS-Programm aufbereitet und zwischengespeichert.

Um in der Inventor-Belastungsanalyse auf die Bewegungsdaten der Simulation zugreifen zu können, muss in der FEM-Umgebung in den Simulationseigenschaften die ANALYSE DER BEWEGUNGSLASTEN aktiviert sein und das jeweils zu untersuchende Bauteil ausgewählt werden.

Beim Export für ANSYS werden alle notwendigen Daten in einer Textdatei gespeichert, die in ANSYS importiert werden kann.

15.1.7 Funktionsgruppe Beenden

Fertigstellen Dynamische Simulation

Mit dieser selbsterklärenden Schaltfläche wird die Arbeitsumgebung beendet und in den Baugruppenmodus gewechselt.



Fertigstellen
Dynamische Simulation

■ 15.2 Der Objektbrowser in der dynamischen Simulation

Der Objektbrowser in der dynamischen Simulation hat zum Teil eine eigene Symbolik, deren Bedeutung beim Arbeiten in dieser Umgebung bekannt sein sollte. Wie im Inventor generell, wird die Hierarchie des Browsers über Gruppen mit Gruppensymbolen und Untergliederungen hergestellt.

Die folgende Tabelle stellt eine weitgehende Zusammenfassung der Gruppeneinteilung und der verwendeten Symbole sowie der jeweiligen Untergliederung mit den entsprechenden Bedeutungen dar.

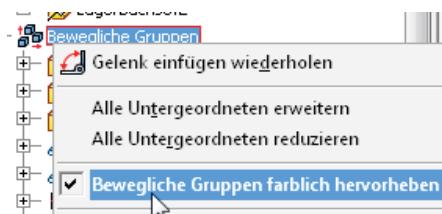
Symbol	Ordner	Beschreibung	Gruppenelemente	
	Fixiert	Bauteile und Baugruppen ohne Freiheitsgrade. In der Regel werden die Fixierungen aus der Baugruppe übernommen.		Fixierte Bauteile
				Fixierte Baugruppen
				Fixierte Schweißbaugruppen
				Unterdrücktes fixiertes Bauteil
				Unterdrückte fixierte Baugruppe
	Bewegliche Gruppen	Die Elemente der beweglichen Gruppe haben Freiheitsgrade und nehmen an der Simulation teil, sofern sie in den Kraftfluss eingebunden sind. Beweglichen Gruppen können über das Kontextmenü Farben zugewiesen werden, was zu einer übersichtlicheren Darstellung beiträgt.		Bauteil
				Baugruppe
				Geschweißte Gruppen
				Bibliotheksbauteil
				Unterdrücktes Bauteil

Symbol	Ordner	Beschreibung	Gruppenelemente
	Norm-verbin-dungen	Diese Verbindungen werden in der Regel automatisch beim Aufruf der dynamischen Simulationsumgebung erzeugt. Die umgewandelten 3D-Abhängigkeiten werden als untergeordnete Knoten angezeigt.	   
	Rollver-bin-dungen	Mit der Funktion GELENK einfügen erzeugte Rollgelenke	 
	Schiebe-verbin-dungen	Mit der Funktion GELENK einfügen erzeugte Schiebegelenke	 
	Kontakt-gelenke	Mit der Funktion GELENK EINFÜGEN erzeugte Kontaktgelenke	 
	Kraftver-bin-dungen	Mit der Funktion GELENK EINFÜGEN erzeugte Kraftverbindungen	   

Symbol	Ordner	Beschreibung	Gruppenelemente		
	Externe Belastungen	Durch die Schwerkraftdefinition oder die Funktionen Kraft oder Drehmoment definierte externe Einwirkungen auf das System		Definierte Schwerkraft	
				Nicht definierte oder unterdrückte Schwerkraft	
				Extern einwirkende Kraft	
				Extern einwirkendes Moment	
Sonderzeichen:					
	Eine Komponente, die an einem Gelenk beteiligt ist, wurde überbestimmt, d.h., mindestens ein Freiheitsgrad wurde durch mindestens zwei Abhängigkeiten blockiert, von denen eine die Überstimmung auslöst.				
	Unterdrückte oder deaktivierte Bauteile oder Baugruppen sind nicht verfügbar.				
	Werden die 3D-Abhängigkeiten in der Baugruppe so unterdrückt, dass keine Gelenkfunktion wirkt, dann wird dieses Symbol eingeblendet.				
FETT	Fett gedruckte Gelenkeinträge im Objektbrowser kennzeichnen die Gelenke, die bei der Selektion eines Bauteils der Baugruppe mit diesem Objekt korrespondieren.				

■ 15.3 Bewegliche Gruppen einfärben

Eine Funktion, die sehr zur Übersichtlichkeit in umfangreichen Simulationsbaugruppen beiträgt, besteht mit der Möglichkeit, die einzelnen Bewegungsgruppen farblich unterschiedlich darzustellen.

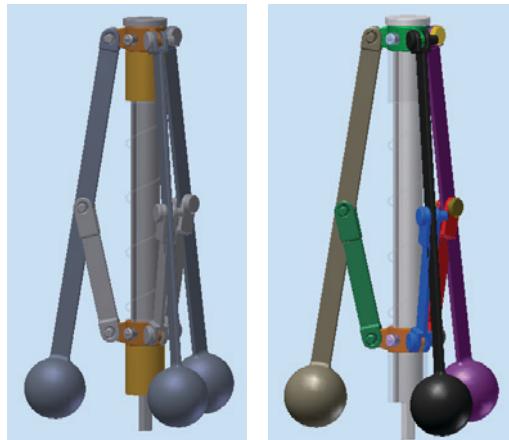


Die übernommenen Gruppenfarben werden übernommen, weil sie miteinander fest verbunden sind, d.h., dass sie untereinander keine Freiheitsgrade mehr besitzen.

Ein erneuter Klick auf den Kontextmenüeintrag stellt die vorherige Ansicht wieder her.

Die Funktion stellt nicht unbedingt die einzelnen beweglichen Bauteile dar, sondern die zusammengefassten Gruppen, die z.B. als [Geschweißte Gruppe](#) aus der Baugruppe übernommen wurden, weil sie miteinander fest verbunden sind, d.h., dass sie untereinander keine Freiheitsgrade mehr besitzen.

In der nachfolgenden Abbildung sind deswegen die Gelenkhebel (grün, blau, rot) zusammen mit den Bolzen zu jeweils einer sog. geschweißten Gruppe zusammengefasst. Die Funktion ist über das Kontextmenü des Gruppentitels BEWEGLICHE GRUPPEN erreichbar und bringt z.B. die folgende Darstellung auf den Bildschirm:



Links: vorher, rechts: bewegliche Gruppen farblich hervorgehoben

Leider unterstützt der Inventor nicht die farbige Darstellung von Gelenkketten (Kinematikketten, Gelenkvierecken etc.), was für die Interpretation der Beweglichkeit ebenfalls sehr hilfreich wäre.

■ 15.4 Beschreibung der Gelenkkarten

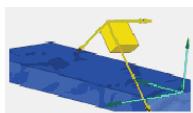
Gelenke sind Verbindungen zwischen Bauteilen, welche die Freiheitsgrade der Verbindung auf bestimmte Bewegungsmöglichkeiten einschränken. So hat beispielsweise ein Scharniergegen (Klavierband) nur noch einen Freiheitsgrad, nämlich den der Rotation um seine Schwenkachse.

In wenigen Fällen führt die automatische Umwandlung nicht zum gewünschten Ergebnis, weswegen zu Beginn einer dynamischen Simulation die Untersuchung der Gelenke und ggf. die Veränderung der entsprechenden Bewegungsbedingungen durchgeführt werden muss.



HINWEIS: Dieser Vorgang ist der wichtigste der ganzen Simulation, weil er die grundlegenden Anfangsbedingungen setzt, auf die sich alle folgenden Berechnungen beziehen. Bei umfangreichen Baugruppen kann die Gelenkanalyse auch sehr zeitaufwendig sein.

15.4.1 Normgelenk



Als Normgelenk wird grundsätzlich zuerst eine Pseudoverbindung, die alle sechs Freiheitsgrade besitzt, eingerichtet. Im zweiten Schritt werden alle Freiheitsgrade dann vom Inventor entfernt, die durch vergebene 3D-Abhängigkeiten eingeschränkt wurden.

Eine *Fläche auf Fläche*-Abhängigkeit lässt beispielsweise nur noch drei Freiheitsgrade zu: die beiden Translationen (z.B. in X- und Y-Richtung), die in der Flächenebene möglich sind, und die Rotation, die um die Flächennormale möglich ist.

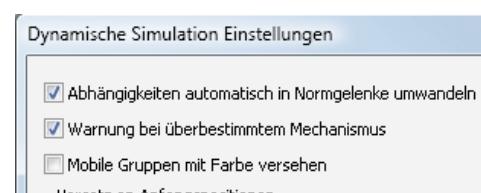
15.4.2 Abhängigkeiten und Gelenke



Wurde in den Simulationseinstellungen nichts verändert, dann ist die Vorgabe **ABHÄNGIGKEITEN AUTOMATISCH IN NORMGELENKE UMWANDELN** aktiv, d.h., bereits beim Aufruf der dynamischen Simulation aus einer Baugruppe heraus werden alle 3D-Abhängigkeiten in Gelenke konvertiert.



Abhängig machen Zusammenfügen



Die folgenden 3D-Abhängigkeiten werden in Baugruppen eingesetzt: *Passend, Fluchtend, Winkel, Tangential, Einfügen*



HINWEIS: Auch wenn Abhängigkeiten automatisch in Normverbindungen umgewandelt werden, ist es möglich, zusätzliche räumliche Verbindungen (Normgelenke, Spatialverbindungen) einzufügen. Es ist ebenfalls möglich, einzelne 3D-Abhängigkeiten mit der Funktion **ABHÄNGIGKEITEN ABLEITEN** in Gelenke umzuwandeln.

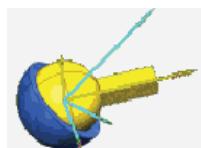
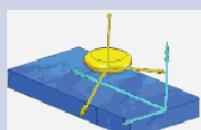
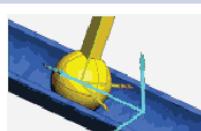
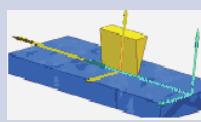


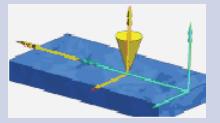
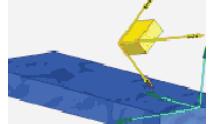
Da man auf die automatische Umwandlung von 3D-Abhängigkeiten in Normgelenke keinen direkten Einfluss hat, die Konvertierung aber von den vergebenen Abhängigkeiten in der Baugruppe abhängig ist, kann man mit einer Einflussnahme auf die Abhängigkeiten in der Baugruppe die Gelenkumwandlung beeinflussen. Dazu muss jedoch bekannt sein, nach welchen Regeln der Inventor dabei vorgeht.



HINWEIS: Eindeutig kann diese Zuordnung jedoch nicht sein, da es eine sehr große Anzahl von Möglichkeiten gibt, alle möglichen 3D-Abhängigkeiten miteinander zu kombinieren (zweimal *Passend*, dreimal *Winkel*, zweimal *Tangential*, zweimal *Einfügen*). Jede mögliche und sinnvolle Kombination der Abhängigkeiten im Zusammenhang mit den geometrischen Elementen Punkt, Linie, Fläche, Zylinder kann andere Gelenkkarten zur Folge haben.

Insofern stellt die folgende Tabelle lediglich Anhaltspunkte für dieses Verhalten und eine kleine Hilfe zur Verfügung. In der Spalte Normgelenke sind die Freiheitsgrade (T = Translation, R = Rotation) für das jeweilige Gelenk unter der Voraussetzung angegeben, dass keines der beteiligten Bauteile fixiert ist. Eine Fixierung eines Gelenkpartners würde in den meisten Fällen eine Reduzierung der Freiheitsgrade zur Folge haben (Ausnahme: Kugelgelenk).

Baugruppen-Abhängigkeiten	Normgelenk
Einfügen (Kreiskante, Kreiskante) Passend (Linie, Linie) und Passend (Ebene, Ebene) Passend (zylindrische Fläche, zylindrische Fläche) und Passend (Ebene, Ebene)	Drehung 1R 
Passend (Ebene, Ebene) und Passend (Ebene, Ebene)	Prismatisch 1T 
Passend (Linie, Linie) Tangential (zylindrische Fläche, zylindrische Fläche)	Zylindrisch 1T 1R 
Passend (Punkt, Punkt) Passend (kugelförmige Fläche, kugelförmige Fläche)	Kugelförmig 3R 
Passend (Ebene, Ebene)	Ebene 2T 1R 
Passend (Linie, Punkt) Tangential (Linie, kugelförmige Fläche)	Punkt-Linie 1T 2R 
Fläche (Ebene, Linie)	Linie-Ebene 2T 2R 

Baugruppen-Abhängigkeiten	Normgelenk
Fläche (Ebene, Punkt) Fläche (Ebene, kugelförmige Fläche) Anmerkung: Der Mittelpunkt der Kugel verbleibt in der Ebene.	Punkt-Ebene 2T 3R 
Keine Abhängigkeiten	Räumlich (Spatial) 3T 3R 
Kombination von drei Abhängigkeiten oder zwei Einsatzstücken	Verschweißt keine Freiheitsgrade 



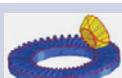
Inventor-Symbol zum Einfügen eines Gelenks in eine Baugruppe



Inventor-Symbol zur Auswahl eines Gelenks

15.4.3 Vordefinierte Gelenke

Über die Normgelenke hinaus können die folgenden Gelenke frei vergeben werden. Um Missverständnissen vorzubeugen: Die Bilder (Inventor-Icons) sind nur als Symbole für die Gelenkfunktionen zu betrachten, es können mit diesen Funktionen keine Bau- oder Normteile erzeugt werden.

Gelenkart, Inventor-Bezeichnung	Inventor-Symbol	Funktion
Rollgelenk Zylinder auf Ebene		Abrollende, verknüpfte Dreh- und Längsbewegung, wie bei Stirnrad und Zahnstange
Rollgelenk Zylinder auf Zylinder		Abrollende, verknüpfte Drehbewegung, wie bei Stirnrädern, wahlweise mit tangentialer Ausrichtung
Rollgelenk Zylinder in Zylinder		Abrollende, verknüpfte Drehbewegung, wie bei stirnverzahnten Hohl- und Planetenrädern
Rollgelenk Kegel auf Ebene		Abrollende, verknüpfte Drehbewegung, wie bei einem Kegelrad auf einer ebener Stirnverzahnung (Hirt)
Rollgelenk Kegel auf Kegel		Abrollende, verknüpfte Drehbewegung, wie bei einem Kegelrad auf einem Tellerrad
Rollgelenk Kegel in Kegel		Abrollende, verknüpfte Drehbewegung, wie bei einem Kegelrad in einem Tellerrad

Gelenkkart, Inventor-Bezeichnung	Inventor-Symbol	Funktion
Rollgelenk Zylinder und Kurve		Abrollende, verknüpfte Bewegung an Kontaktflächen (Kurvenscheibe).
Riemen		Riementrieb, gleichlaufend oder gekreuzt
Schraube		Schraubenverbindung, Bewegungsschrauben
Schneckenrad		Schneckengetriebe, Schneckeneingriff im Schneckenrad
2D-Kontakt		Kontaktflächen in einer Ebene
3D-Kontakt		Kontaktflächen im Raum
Schiebegelenk Zylinder auf Ebene		Schiebender Zylinder auf einer Führungs- schiene
Schiebegelenk Zylinder auf Zylinder		Drehende Rolle gegen festen Zylinder laufend
Schiebegelenk Zylinder in Zylinder		Fester Zylinder im Ring laufend
Schiebegelenk Zylinder und Kurve		Fester Zylinder auf Kurvenscheibe laufend
Schiebegelenk Punkt und Kurve		Punktförmiger Abnehmer in Kurvenkontur laufend
Feder/Dämpfung/ Buchse		Federverbindung mit Dämpfung und Führung

■ 15.5 Gelenkeinfügungsarten



Gelenk einfügen



Abhängigkeiten ableiten

Wie schon erwähnt, können Gelenke mithilfe drei unterschiedlicher Arbeitsweisen in Baugruppen eingefügt werden:

- Gelenkeinfügung von Hand mit der Funktion GELENK EINFÜGEN
- Gelenkdefinition mit der Funktion ABHÄNGIGKEITEN ABLEITEN
- Automatische Gelenkdefinition

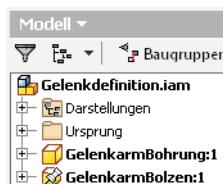
Die Arbeitsweisen sollen anhand einfacher Beispiele demonstriert werden.



Gelenkdefinition.iam



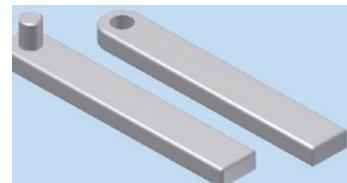
Gelenk einfügen
Drehgelenk.avi



15.5.1 Gelenkeinfügung von Hand: die Funktion Gelenk einfügen

Für die kurze Darstellung des Vorgehens wurden zwei Bauteile erstellt, ein Gelenkarm mit einer Bohrung und ein Gelenkarm mit einem Bolzen, der genau in die Bohrung passt.

Die Bauteile dieses Beispiels befinden sich in der Datei [Gelenkdefinition.iam](#) auf der DVD zum Buch. Der komplette Vorgang des Gelenkeinfügens ist als Video [Gelenk einfügen Drehgelenk.avi](#) ebenfalls auf der DVD.



In die Baugruppe GELENKARMDEFINITION.IAM wurden die beiden Teile eingefügt. Das Bauteil GELENKARMBOLZEN:1 ist fixiert und stellt somit die Basis für die mögliche Bewegung anderer Bauteile dar.



HINWEIS: In dynamischen Simulationen muss immer ein Bauteil festgelegt (fixiert) sein, da sich ansonsten bei einem Kraftangriff die gesamte Konstruktion frei im Raum bewegen würde.

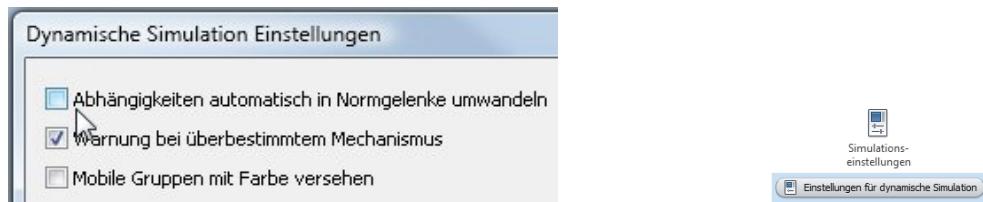
Da das Gelenk in der Simulationsumgebung von Hand definiert werden soll, wurden in der Baugruppe keinerlei 3D-Abhängigkeiten vergeben. Dies ist deswegen von Bedeutung, weil gemäß der Inventor-Voreinstellungen in der Simulationsumgebung bereits beim Erstellen einer neuen Simulation automatisch alle 3D-Abhängigkeiten in Gelenke umgewandelt werden. Ein Einfügen eines Gelenks wäre in diesem Beispiel somit nicht mehr möglich.



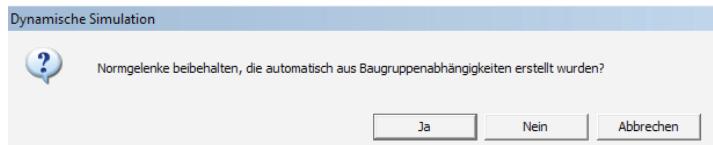
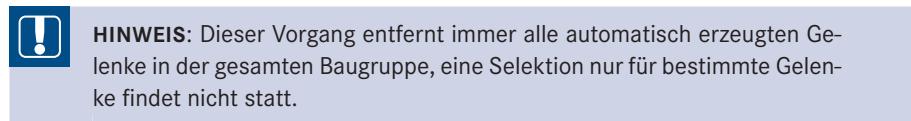
Dynamische
Simulation

Dynamische Simulation

Jetzt erfolgt über die Registerkarte UMGEBUNG der Wechsel in die DYNAMISCHE SIMULATION.



Für Baugruppen, in denen bereits 3D-Abhängigkeiten vergeben wurden und in denen trotzdem die Gelenke von Hand erzeugt werden sollen, müssen ggf. an erster Stelle die SIMULATIONSEINSTELLUNGEN aufgerufen und der Haken bei ABHÄNGIGKEITEN AUTOMATISCH IN NORMGELENKE UMWANDELN entfernt werden.



Entfernt man den Haken in den Simulationseinstellungen einer bestehenden Simulation, dann kann man sich entscheiden, ob auch automatisch erzeugte Norm-Gelenke entfernt werden sollen.

Das Gelenk einfügen

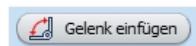
Mit der Funktion GELENK EINFÜGEN wird der entsprechende Dialog aufgerufen, indem in maximal sechs Schritten das Gelenk definiert werden kann.

Ein Gelenk verbindet immer genau zwei Bauteile, und pro Bauteil sind drei Angaben zu machen. Für ein **Drehgelenk** sind dies

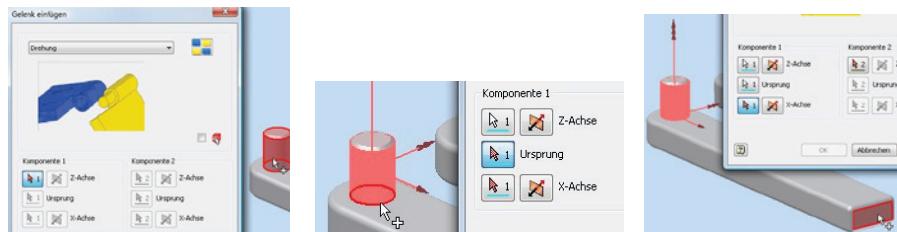
- die Drehachse,
- der Gelenkursprung und
- die Gelenkausrichtung.



Gelenk einfügen



Die sechs folgenden Abbildungen zeigen das Vorgehen in jeweils drei Schritten für jedes Bauteil. Mit welchem Bauteil mit der Gelenkdefinition begonnen wird, ist unerheblich.

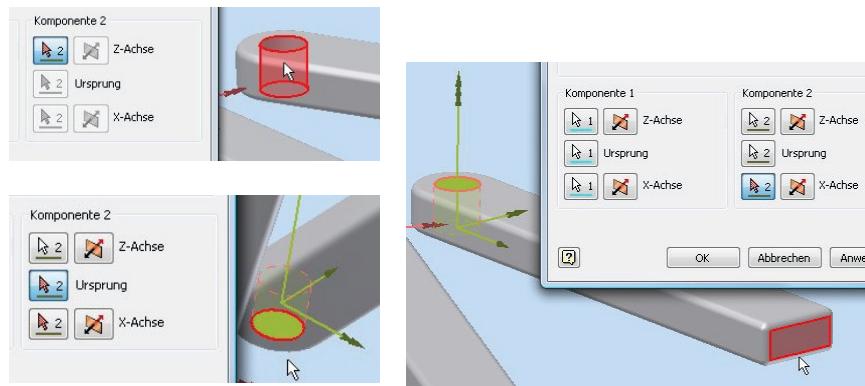


Am ersten Bauteil, der KOMPONENTE 1, wird im ersten Schritt die Z-ACHSE des Gelenkes bestimmt, was durch die Selektion der Zylinderfläche geschieht. Die Richtung der Z-Achse wird von der ausgewählten Geometrie automatisch bestimmt und zeigt im Beispiel nach oben, was aber am ersten Bauteil noch keine Bedeutung hat.

Im zweiten Schritt wird der URSPRUNG des Gelenkes an den Grundkreis des Zylinders gelegt, da das zweite Bauteil an dieser Stelle anschließen soll.

Auf den dritten Schritt, mit dem die Richtung der X-ACHSE festgelegt wird, könnte bei diesem Gelenk eigentlich verzichtet werden, da die Drehung um 360 Grad völlig frei erfolgen kann. Soll bei anderen Gelenkdefinitionen in späteren Schritten ein Drehwinkel mit Start- und Endposition angegeben werden, so ist allerdings auch diese Angabe wichtig. Im Beispiel wird die vordere Stirnfläche zur Definition der Richtung der X-Achse benutzt.

Die Angaben am zweiten Bauteil, der KOMPONENTE 2, erfolgen in derselben Art und Weise, wie die folgenden drei Abbildungen zeigen.



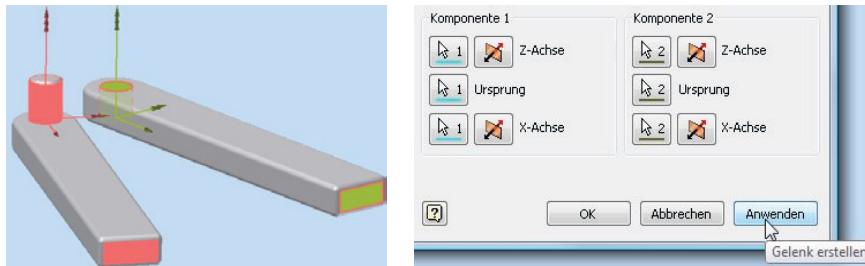
Die Z-ACHSE wird über den Bohrungszylinder definiert, wobei die Richtung der Achse dieselbe wie bei der Komponente 1 sein soll.

Der URSPRUNG wird hier an der Unterseite der Bohrung, am dortigen Bohrungskreis bestimmt, weil diese Bauteilstelle am Gelenkursprung der KOMPONENTE 1 platziert werden soll.

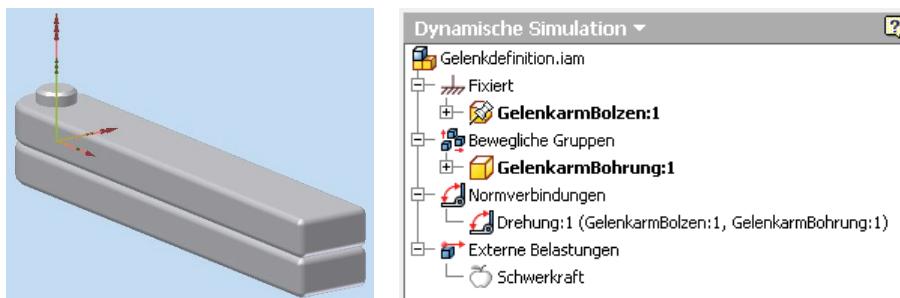
Die Definitionsrichtung der X-Achse wird ebenfalls über die vordere Stirnfläche des Bauteils bestimmt, wodurch die X-Achsen beider Komponenten in dieselbe Richtung zeigen.

Wurden alle sechs Angaben an den beiden Komponenten abgeschlossen, sollte man sich noch einmal vergewissern, dass die vorgenommenen Definitionen korrekt sind.

An beiden Bauteilen wird das Gelenk-Koordinatensystem in unterschiedlichen Farben dargestellt, die X-Achse mit einem Pfeil, die Y-Achse mit zwei und die Z-Achse mit drei Pfeilen. Die Ursprünge der beiden Koordinatensymbole befinden sich einmal oben und einmal unten an den Stellen, an denen die Gelenkteile zusammengefügt werden sollen.



Wenn alles stimmt, dann klicken Sie auf die Schaltfläche ANWENDEN, wodurch, ähnlich wie bei der Vergabe von 3D-Abhängigkeiten in Baugruppen, die beiden Teile gefügt werden. Die beiden Bauteile werden gemäß ihrer Gelenk-Koordinatensysteme ausgerichtet und liegen nun völlig deckungsgleich übereinander. Im Objektbrowser sind alle Definitionen nachvollziehbar eingetragen.



Der GELENKARBMBOLZEN:1 ist das fixierte Bauteil.

Im Ordner BEWEGLICHE GRUPPEN ist das Bauteil GELENKARMBOHRUNG:1 eingeordnet.

Bei den NORMVERBINDUNGEN befindet sich das Gelenk DREHUNG:1, das die beiden Bauteile miteinander verbindet.

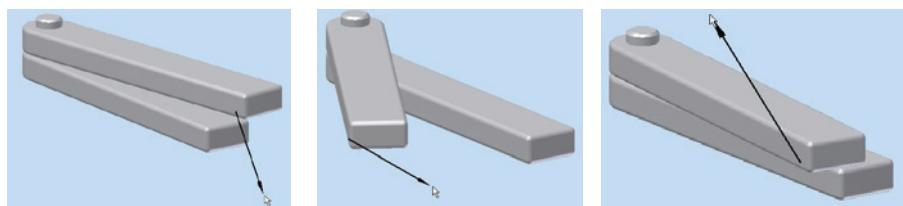
Unter EXTERNE BELASTUNGEN ist die Schwerkraft ausgegraut dargestellt, da sie nicht definiert wurde. Andere externe Belastungen existieren nicht.



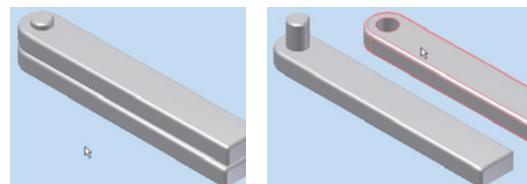
HINWEIS: Die beiden +Zeichen an den Bauteilen im Objektbrowser sind irreführend und haben auch keine Funktion, d.h., die entsprechenden Browserknoten können nicht erweitert werden, da keine zugeordneten Definitionen existieren. An diesen Stellen würden, wie im nächsten Beispiel zu sehen ist, Baugruppenabhängigkeiten angezeigt werden.

Gelenk testen

Die Beweglichkeit des Gelenkes kann jetzt ganz einfach dadurch getestet werden, dass mit der Maus das bewegliche Bauteil „angefasst“ und gezogen wird. Der schwarze Vektor, der durch das Ziehen des Mauscursors entsteht, entspricht einem Gummifaden, mit dem das bewegliche Bauteil geschwenkt wird. Die Länge des Vektors ist ein Maß für die Kraft, mit der das Bauteil angetrieben wird.



Rückkehr in die Baugruppenumgebung



Verlässt man nach diesem kurzen Beispiel die Simulationsumgebung und kehrt in die Baugruppenumgebung zurück, dann stellt man fest, dass trotz des definierten Gelenkes keinerlei 3D-Abhängigkeit vergeben wurde. Die beiden Bauteile liegen zwar noch wie verbunden aufeinander, können aber problemlos gegeneinander verschoben werden.



HINWEIS: Aus 3D-Abhängigkeiten können automatisch Gelenke erzeugt werden. Aus Gelenken können jedoch keine 3D-Abhängigkeiten abgeleitet werden.

15.5.2 Gelenk aus Abhängigkeit erzeugen: die Funktion Abhängigkeiten ableiten

Wie man ein Gelenk aus einer Abhängigkeit ableitet, wird in dem Video [Gelenk einfügen Abhängigkeit ableiten.avi](#) auf der DVD gezeigt.

Sind in einer Baugruppe Abhängigkeiten vorhanden und wurde in den Simulationseinstellungen der Haken bei **ABHÄNGIGKEITEN AUTOMATISCH IN NORMGELENKE UMWANDELN** entfernt, dann werden alle Normgelenke in der Simulationsumgebung gelöscht. Das entsprechende Meldungsfenster gibt diese Information aus, bevor es zu spät ist.

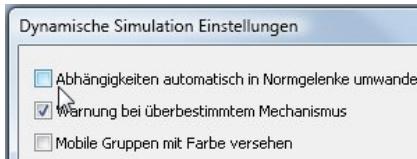
Nach diesem Vorgang ist die Schaltfläche **ABHÄNGIGKEITEN ABLEITEN** aktiv und kann zur Gelenkdefinition eingesetzt werden.

Das entsprechende Dialogfenster zu dieser Funktion fordert lediglich dazu auf, **ZWEI BAUTEILE AUSZUWÄHLEN**. Das Normgelenk wird nach der Auswahl aufgrund der Abhängigkeiten, die zwischen diesen beiden Bauteilen bestehen, automatisch vorgeschlagen bzw. erzeugt.

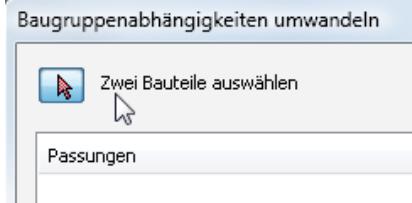
Im Beispiel existieren ein bolzenförmiges Lager (rot) und eine Scheibe mit Bohrung (blau), die mit der Abhängigkeit **EINFÜGEN** auf dem Bolzen platziert wurde.

Nachdem für das Dialogfenster **ABHÄNGIGKEITEN ABLEITEN** diese beiden Bauteile selektiert wurden, wird in das Textfeld **PASSUNGEN** die erkannte Abhängigkeit eingetragen und ein entsprechendes Gelenk vorgeschlagen. Die Abhängigkeit **EINFÜGEN** wurde erkannt und zusammen mit den betroffenen Bauteilbezeichnungen eingefügt.

Als Normgelenk wird dementsprechend das Drehgelenk **DREHUNG** vorgeschlagen. Das Textfeld **GELENK** täuscht dabei eine Eingabemöglichkeit vor, die nicht existiert. Der Gelenkname wird automatisch erzeugt und kann an dieser Stelle nicht geändert werden. Im Objektbrowser wird das Normgelenk erwartungsgemäß eingetragen. Dort kann auch der Gelenkname zumindest ergänzt werden.

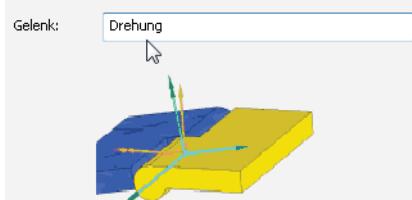
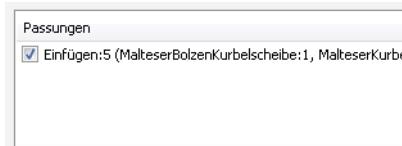
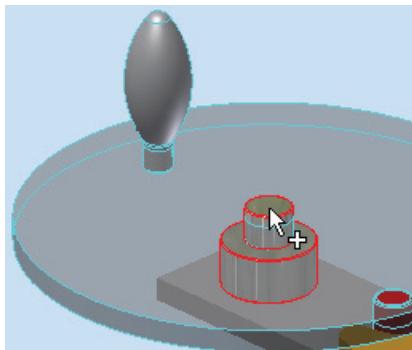


Gelenk einfügen
Abhängigkeit
ableiten.avi



Abhängigkeiten ableiten

- Bewegliche Gruppen
- Normverbindungen
- Drehung Kurbelscheibe
- Externe Belastungen



15.5.3 Automatische Gelenkdefinition

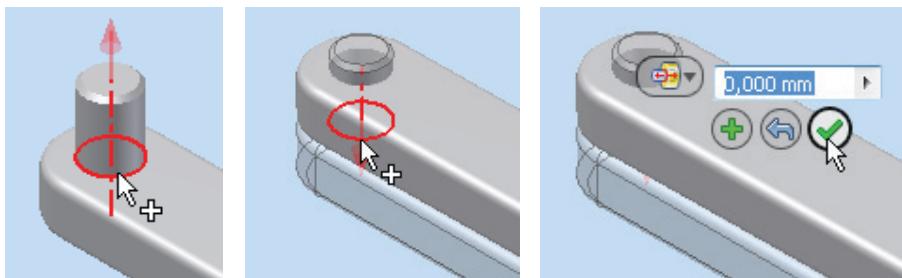
Abhängigkeit in der Baugruppe einfügen

Damit die automatische Gelenkdefinition funktionieren kann, müssen in der Baugruppe 3D-Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen eingefügt werden. Wie dies funktioniert, ist in Grundlagenbüchern zum Inventor detailliert erklärt. In diesem Beispiel soll das Vorgehen nur kurz und funktionsbezogen erläutert werden.



Der Inventor kennt zwei Funktionen, mit denen Bauteile voneinander abhängig gemacht werden können, der Befehl **ABHÄNGIG MACHEN** ruft das bereits in den älteren Programmversionen installierte Dialogfenster auf, in dem sehr umfangreiche Einstellungen vorgenommen werden können. Der Befehl **ZUSAMMENFÜGEN** ist die praktische Kurzversion davon und lässt sich intuitiver und möglicherweise schneller bedienen.

Die Abhängigkeit **EINFÜGEN ENTGEGENGESETZT** ist in beiden Funktionsvarianten vorhanden und soll für das Bolzen-Drehgelenk angewendet werden.



Mit dem Platzieren der Abhängigkeit wurden der Verbindung mathematisch gesehen fünf von sechs Freiheitsgraden entzogen. Nur noch die Rotation um die vertikale Achse ist zulässig.

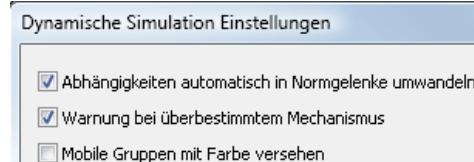
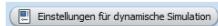
Dynamische Simulation



Dynamische Simulation



Simulations-
einstellungen



Wie zuvor erfolgt nun über die Registerkarte **UMGEBUNG** der Wechsel in die **DYNAMISCHE SIMULATION**.

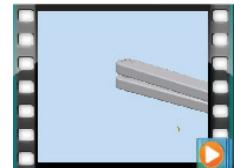
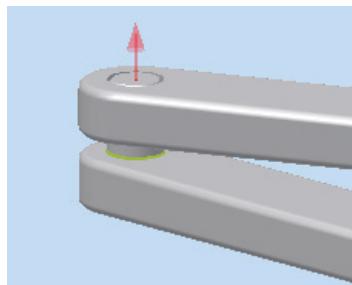
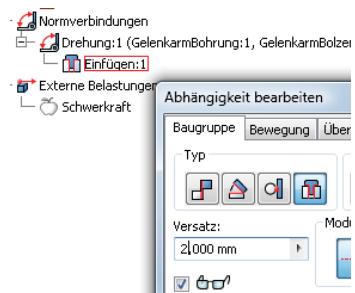
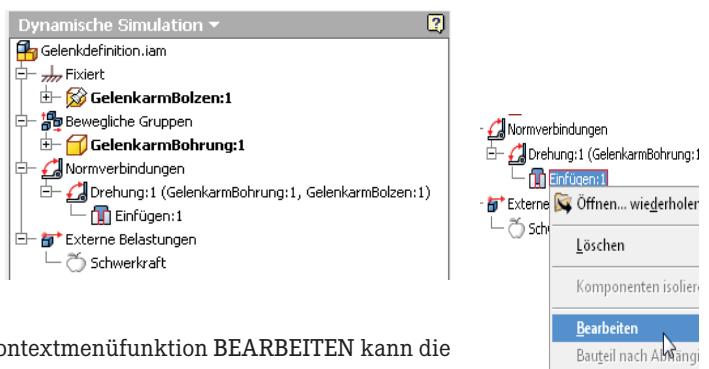
Falls in der vorherigen Übung der Haken bei den automatischen Abhängigkeiten entfernt wurde, muss jetzt in den

Simulationseinstellungen der Eintrag **ABHÄNGIGKEITEN AUTOMATISCH IN NORMGelenke UMWANDELN** aktiviert werden. Die Aktivierung sorgt dafür, dass die Umwandlung der Abhängigkeiten in Gelenke sofort vollzogen wird. War der Haken schon gesetzt, dann wurde das Gelenk ohnehin bereits beim Wechsel in die Simulationsumgebung erzeugt.

Gelenk testen

Ein Blick in den Objektbrowser offenbart, dass weiter nichts zu tun ist, außer das Gelenk wie im Beispiel vorher zu testen.

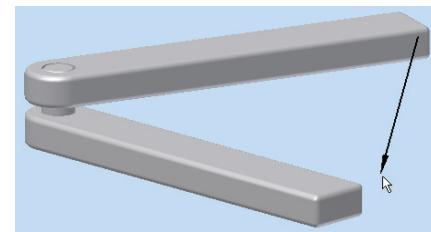
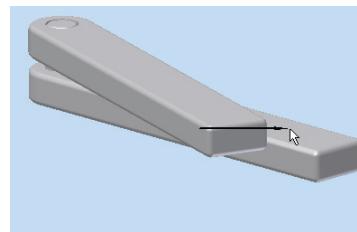
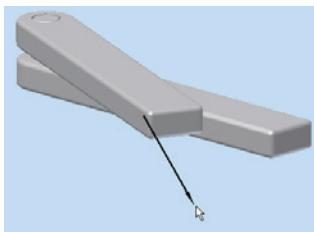
Im Ordner Normverbindungen wurde ein völlig identisches Gelenk eingefügt, wie das im ersten Beispiel von Hand erzeugt. Die schon vorher sinnlos angezeigten +-Zeichen neben den Bauteilen bleiben weiter ohne Funktion. Unterhalb des Gelenks DREHUNG:1 wird jetzt allerdings die Abhängigkeit EINFÜGEN:1 angezeigt. Mit der Kontextmenüfunktion BEARBEITEN kann die Eigenschaft dieser Abhängigkeit im Rahmen der Gelenkfunktion modifiziert werden.



Animation auf DVD

Im Beispiel wurde ein Versatz von 2 mm nachträglich definiert, der dafür sorgt, dass die beiden Gelenkteile jetzt an der Bolzenstirnfläche bündig ausgerichtet sind.

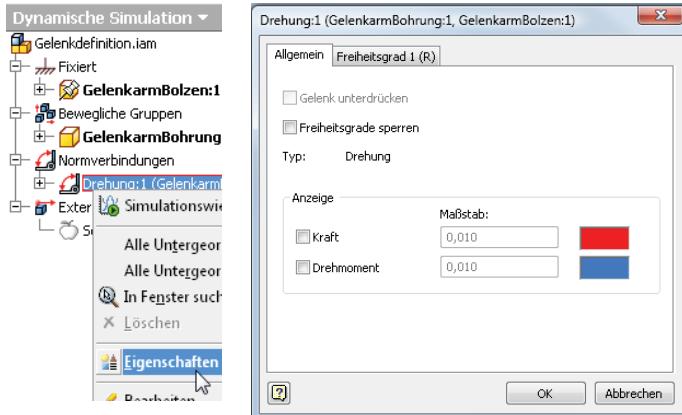
Das Testen der Gelenkverbindung mit der Maus anstelle einer externen Kraft funktioniert genauso wie vorher.



■ 15.6 Eigenschaften der Normverbindung bearbeiten

Wir bleiben bei dem einfachen Beispiel der Gelenkdefinition und befassen uns in diesem Abschnitt mit den Eigenschaften dieses Gelenks. Mit wenigen Abweichungen sind die im Folgenden erworbenen Erkenntnisse ebenso auf die anderen Gelenkkarten anwendbar.

Im Kontextmenü des Gelenks DREHUNG:1 befindet sich der Eintrag EIGENSCHAFTEN, der das folgende Dialogfenster aufruft.



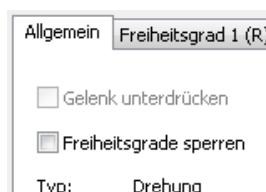
In diesem Fall hat das Eigenschaftsfenster nur zwei Registerkarten, ALLGEMEIN für grundsätzliche Einstellungen und FREIHEITSGRAD 1 (R) für die Einstellungen der Beweglichkeit, der Dynamik und der Kraftwirkungen des Gelenks.

Die Bezeichnung FREIHEITSGRAD 1 (R) zeigt die laufende Nummer des definierten Freiheitsgrads, und das (R) lässt erkennen, dass es sich um einen Freiheitsgrad der Rotation handelt.

Hier liegt auch der wesentliche Unterschied zu anderen Gelenkkarten, die u. U. mehrere Freiheitsgrade und damit für jeden Frei-

heitsgrad eine eigene Registerkarte oder anstelle eines Rotationsfreiheitsgrades eine der Translationen, die dann mit (T) bezeichnet ist, haben.

15.6.1 Registerkarte Allgemein



Im oberen Bereich der Registerkarte ALLGEMEIN befinden sich zwei Auswahlfelder, GELENK UNTERDRÜCKEN und FREIHEITSGRADE SPERREN. Zusätzlich wird der Typ des Gelenks angezeigt.

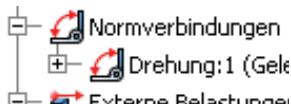
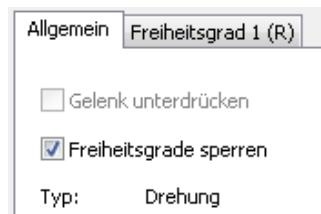
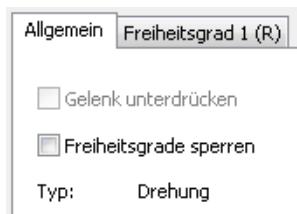
In unserem Beispiel wäre es sinnlos, das Gelenk zu unterdrücken, da es das einzige Gelenk in der Baugruppe ist und damit keine Simulation mehr durchgeführt werden könnte. Das Auswahlfeld ist deswegen von vorneherein ausgegraut.

Die Möglichkeit, Freiheitsgrade zu sperren, kann ausgewählt werden und hat zur Folge, dass sämtliche Bewegungsmöglichkeiten des Gelenks gesperrt wären. Da diese Option alle Freiheitsgrade eines Gelenks betrifft, ist die Auswirkung dieselbe wie eine Unterdrückung des Gelenks. Der Unterschied zwischen den beiden Auswahlfeldern bleibt somit unklar.

Die Funktion zum Sperren aller Freiheitsgrade eines Gelenks kann auch direkt im Kontextmenü des Gelenks aufgerufen werden.

Sind mehrere Gelenke in einer Konstruktion vorhanden, dann kann die Sperrung eines Gelenks durchaus Sinn machen, z.B. um besondere Bewegungs- oder auch Kraftflüsse der Konstruktion zu untersuchen.

Wurden Freiheitsgrade eines Gelenks gesperrt, so ist dies im Objektbrowser sofort zu erkennen. Während ein nicht gesperrtes Gelenk im Objektbrowser das Symbol der Normverbindung mit dem roten Doppelpfeilbogen besitzt, hat ein gesperrtes bzw. ein überarbeitetes Gelenk ein Symbol mit einer grünen Raute und einem kleinen roten Pfeil, der die Blockade symbolisieren soll.



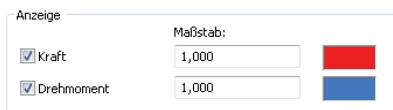
Nicht gesperrtes Gelenk und Gelenksymbol im Browser



Gesperrtes Gelenk und Gelenksymbol im Browser



Im unteren Bereich der Registerkarte werden die Anzeige von KRAFT und DREHMOMENT des Gelenks geregelt. Mit der Angabe Maßstab wird die Länge der Vektoren, über die Farbfelder die Vektorenfarben dargestellt.



In der nebenstehenden Abbildung ist der **rote Kraftvektor**, der am Ursprung des Gelenk-Koordinatensystems angreift, zu erkennen. Seine Größe und Richtung werden in jedem Bewegungsmoment in Abhängigkeit der Eingangskraft (schwarzer Pfeil) errechnet und angezeigt.

Für eine erste, allgemeine und grobe Betrachtung mag diese Darstellung einen Eindruck vermitteln, für genauere Bewer- tungen von Gelenkkräften ist sie natürlich nicht ausreichend. Dafür bieten die Möglichkeiten auf der zweiten Registerkar- te, auf der die Parameter für die Freiheitsgrade eingestellt werden können, wesentlich mehr Möglichkeiten.



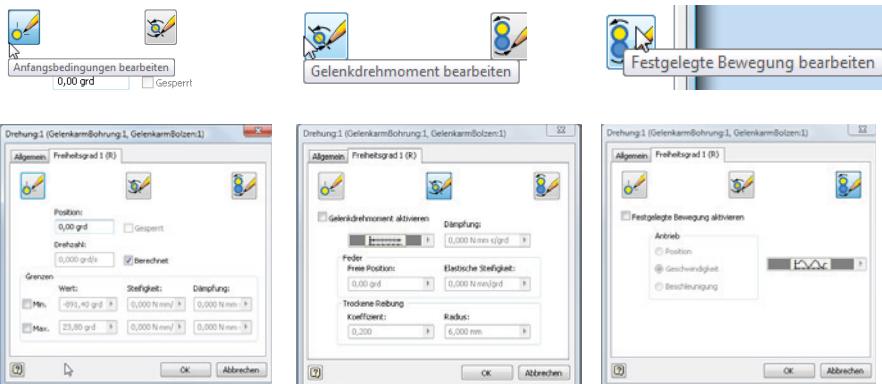
Animation auf DVD:
Gelenk einfügen
(Kraftanzeige.avi)

15.6.2 Registerkarte Freiheitsgrad x (R/T)

Die Registerkarte(n) zu dem/den Freiheitsgrad(en) ist nicht sehr ergonomisch designt, ein Unterregister wäre sicher übersichtlicher. Bedient wird sie über die drei Schaltflächen im oberen Bereich:

- Anfangsbedingungen bearbeiten,
- Gelenkdrehmoment (R) bzw. Gelenkkraft (T) bearbeiten und
- Festgelegte Bewegung bearbeiten.

Je nachdem, welcher Bearbeitungsbereich gewählt wurde und ob eine Rotation oder eine Translation vorliegt, ändern sich die Eingabefelder erheblich.



Anfangsbedingungen

Position:	<input type="text" value="0,00 grd"/>	Position:	<input type="text" value="-1,212 mm"/>
<input type="checkbox"/> Gesperrt	<input type="checkbox"/> Gesperrt		
Drehzahl:	<input type="text" value="0,000 grd/s"/>	Drehzahl:	<input type="text" value="0,000 mm/s"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Berechnet		<input checked="" type="checkbox"/> Berechnet

Die Anfangsbedingungen sind relativ gut verständlich und leicht zu setzen. Bei Rotationen beziehen sich alle Gradangaben immer auf den Ursprung des Gelenk-Koordinatensystems, die Z-Achse als Drehachse und die Drehung der positiven X-Achsen zueinander. Die POSITION ist bei einer Rotation in Grad und bei einer Translation in mm anzugeben. Die Angabe richtet die beiden Teile zueinander aus.



HINWEIS: Der Dialogboxtext DREHZAHL, der auch bei einer Translation zur Bewegungsangabe angezeigt wird, ist natürlich falsch und muss GE-SCHWINDIGKEIT lauten (das ist schon seit Inventor 2010 so und reklamieren hilft nichts).

Bevor aber an dieser Stelle weiter nur beispielhaft die eine oder andere Eingabe in die entsprechenden Felder vollzogen wird, soll ein Abschnitt mit grundsätzlichen Erläuterungen zu den Definitionen, Einheiten, Eingabemöglichkeiten und Wirkungen der entsprechenden Daten folgen.

■ 15.7 Gelenkkräfte, Steifigkeit und Dämpfung

Bei der dynamischen Simulation haben Gelenke die Eigenschaften der Steifigkeit und der Dämpfung. Aus der klassischen Mechanik der starren Körper ist dies nicht ableitbar, bei Körpern, und damit auch bei Gelenken, existieren nur die Masse, die Kraft und die Reibung.

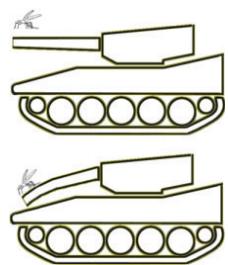
Da diese in der Simulation einzugebenden Daten jedoch einen maßgeblichen Einfluss auf den Ablauf der simulierten Bewegung haben und da sie bei allen Gelenken immer wieder vorkommen, sollen die Grundlagen zu diesen Begriffen kurz erläutert werden.

15.7.1 Nichts ist starr – alles ist Gummi!

Jeder Körper, und fühlt er sich auch noch so starr an, ist elastisch, weswegen auch für jedes Material ein E-Modul existiert. Würde man nur genau genug messen können, dann könnte man feststellen, dass eine Fliege, die sich vorne auf das Kanonenrohr eines Panzers setzt, dieses verbiegen würde.

Tatsächlich ist es so, dass jede Kraft, und sei sie noch so klein, auf jeden Körper, und sei er noch so stabil, eine verformende Wirkung ausübt. Die Moleküle des Materials werden verschoben, und der Körper wird deformiert.

Die Frage der Bauteilstifigkeit ist nicht, ob die Kraft das tut (sie tut's ja immer), sondern ob der Körper so elastisch ist, dass er nach der Wegnahme der Kraft wieder in seine Ausgangslage zurückkehrt. Bei der Fliege auf der Panzerkanone wird das sicher der Fall sein.



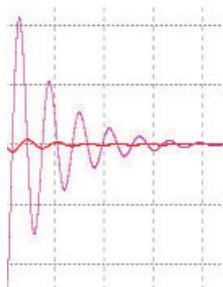
15.7.2 Steifigkeit und Dämpfung – der Sprungbretteffekt

Bleiben wir bei der Fliege. Wenn sie auf dem Rohr landet, dann wird die Kanone nicht plötzlich, das heißt annähernd in der Zeit null, abknicken, sondern es verhält sich wie eine Feder, schwingt also nach unten, federt wieder zurück, schwingt nach und kommt nach einiger Zeit zur Ruhe. Wir kennen eben diesen Effekt beispielsweise vom Sprungbrett – da ist es auch etwas deutlicher zu erkennen.

Das heißt, jedes Material verhält sich wie eine Feder und fängt unter einer Krafteinwirkung an zu schwingen. Wir wissen auch, dass es härtere und weicher Sprungbretter gibt,



also welche, die ziemlich steif sind und wenig federn, und andere, die weicher sind und sehr stark federn. Die Steifigkeit ist also ein Maß für die Federwirkung, für die Amplitude einer Schwingung.



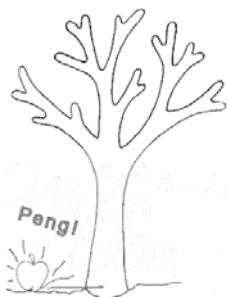
Außerdem zeigt uns unsere Lebenserfahrung, dass jedes Sprungbrett, auf dem wir stehen, irgendwann aufhört zu schwingen, d.h., mit der Zeit wird die Schwingung kleiner, und es kommt nach einer bestimmten Zeit ganz zur Ruhe – erfreulicherweise.

Jede Schwingung, die nicht angeregt wird, zeigt dieses Verhalten, das man Dämpfung nennt. Die Dämpfung ist also ein Maß für die Schwingungsdauer nach einer plötzlichen, impulsartigen Krafteinwirkung.



HINWEIS: Zusammenfassend ergibt sich also, dass jeder Körper bei gleicher Krafteinwirkung mit einer Schwingung reagiert, deren **Amplitude durch die Federsteifigkeit** und deren **Schwingungsdauer durch die Dämpfung** bestimmt wird.

Die physikalischen Größen Elastizität (Steifigkeit) und Dämpfung sind durch den molekularen Aufbau eines Werkstoffs bestimmt und spielen sich demnach **im Material selbst ab**.

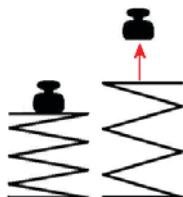


15.7.3 Inventor ist ein Starrkörpersystem

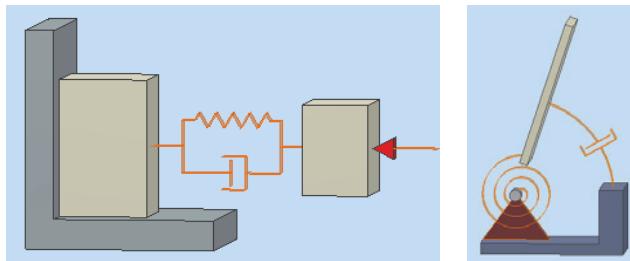
Der Inventor ist jedoch, wie alle 3D-CAD-Systeme, ein **Starrkörpersystem**, d.h., die konstruierten Bauteile sind nicht elastisch, sie verformen sich nicht und haben deswegen eine absolute Steifigkeit, die in der Realität nicht vorkommt. Die Belastungsanalyse im FE-Modul täuscht uns da aufgrund von näherungsweisen Berechnungen etwas vor, was das CAD-System eigentlich nicht leisten kann.

Auch in der dynamischen Simulation wird an manchen Stellen deutlich, dass es sich um ein Starrkörpersystem handelt. So kann man beispielsweise eine Schwerkraft definieren und einen per Materialdefinition weichen Körper aus großer Höhe auf eine Metallplatte fallen lassen. Die Fallgeschwindigkeit und -beschleunigung wird dabei richtig simuliert, aber der Körper schlägt am Boden völlig unbeschädigt auf, er erleidet keinerlei Deformationen.

15.7.4 Inventor ist elastisch?



In der dynamischen Simulation, der Bewegungssimulation des Inventors, wird versucht, der Realität ziemlich nahe zu kommen. Mit den starren Bauteilen funktioniert diese Dynamik nicht, aber da die Bewegungssimulation nur mit Baugruppen arbeitet und damit immer in Systemen, in denen mehrere Bauteile durch Gelenke miteinander verbunden sind, können die Elastizitäten bzw. die Steifigkeiten und Dämpfungen in die Gelenke verlagert werden.



Ersatzweise könnte man sich das wie im Bild links dargestellt vorstellen. Ein solch lineares Ersatzgelenk besteht aus einer Feder und einem Dämpfer.

Selbst einen Aufprall könnte man so simulieren. Prallt ein Körper gegen einen anderen, dann wird es durch die Elastizität der Körper zu einem Abprallen kommen. Die Federenergie wirft einen Körper zurück, der Dämpfer sorgt dafür, dass dies mit viel weniger Energie erfolgt als der Aufprall.

Ein Ersatzbild für ein Drehgelenk würde beispielsweise mit einer Spiralfeder und einem bogenförmigen Dämpfer gezeichnet werden können.

So ist es möglich, Massen-, Kraft-, Moment-, Reibungs- und Schwerkraftwirkungen zusammen mit Geschwindigkeiten und Beschleunigungen über mehrere Bauteile hinweg elastisch und gedämpft wirken zu lassen. Die Voraussetzung dafür ist, dass den Gelenken diese Größen mitgegeben werden.



HINWEIS: Bei der dynamischen Simulation in einem Starrkörpersystem werden die Elastizität (Steifigkeit) und die Dämpfung in die Gelenke verlagert.

15.7.5 Steifigkeit

Der Begriff der Steifigkeit beschreibt den Widerstand, den ein Körper (oder ein Gelenk) Verformungen entgegensezt. Bei Federn ist dieser Begriff besser bekannt als die Federrate oder die Federkonstante. Bei Körpern ist die Steifigkeit durch den E-Modul bzw. den G-Modul definiert.

Bewegungsart	Abhängigkeit	Einheit
Steifigkeit bei Translation	Kraft/Weg	N/mm
Steifigkeit bei Rotation	Moment/Drehwinkel	Nmm/grd

Die Einheiten, mit denen im Inventor an den entsprechenden Stellen die Werte angegeben werden, erklären sich wie folgt:

Die Einheit der Steifigkeit eines Rotationsgelenks kann anhand einer Schenkelfeder gut nachvollzogen werden. Hat die Feder, deren einer Federschenkel fixiert ist, eine Steifig-



keit von 50 Nmm/grd und greift am anderen Schenkel im Abstand von 10 mm von der Drehachse eine Kraft von 10 N an, dann wird sich der Federwinkel um $10 \text{ N} \cdot 10 \text{ mm} / 50 \text{ Nmm/grd} = 2 \text{ grd}$ verändern.

Ein 500 mm langer Stahlstab mit dem Querschnitt $10 \times 10 = 100 \text{ mm}^2$ und einem E-Modul von 200.000 N/mm^2 , der sich bei einer Zugkraft von 40 kN um genau einen mm verlängert, hat eine Steifigkeit von $(A \times E) / l_o = (100 \text{ mm}^2 \times 200.000 \text{ N/mm}^2) / 500 \text{ mm} = 40 \text{ kN/mm}$.

15.7.6 Dämpfung

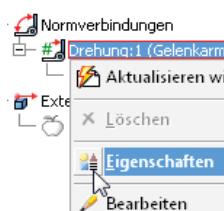
Der Begriff der Dämpfung beschreibt den geschwindigkeitsabhängigen Widerstand eines bewegten Körpers (oder eines Gelenkes) gegen die Bewegung. Ein gedämpftes System verringert somit seine Bewegungsenergie und damit z.B. seine Schwingungssamplitude bzw. seine Auslenkung.

Die Einheiten, mit denen im Inventor an den entsprechenden Stellen die Werte angegeben werden, erklären sich wie folgt:

Bewegungsart	Abhängigkeit	Einheit
Dämpfungskonstante bei Translation	Kraft/Geschwindigkeit	$N/v = N/(mm/s) = \text{Ns/mm}$
Dämpfungskonstante bei Rotation	Moment/Winkelgeschwindigkeit	$Nmm/\omega = Nmm/(grd/s) = \text{Nmms/grd}$

Die Dämpfungskraft ist proportional zur Geschwindigkeit und ergibt sich bei einer geradlinigen Bewegung aus dem Produkt von Dämpfungskonstante und Geschwindigkeit. Hat ein Körper beispielsweise eine Geschwindigkeit von $v = 100 \text{ mm/s}$ und wird er mit der Dämpfungskonstanten $c = 10 \text{ Ns/mm}$ gebremst, dann ergibt sich die Dämpfungskraft $F_D = c \times v = 10 \times 100 = 1000 \text{ N}$.

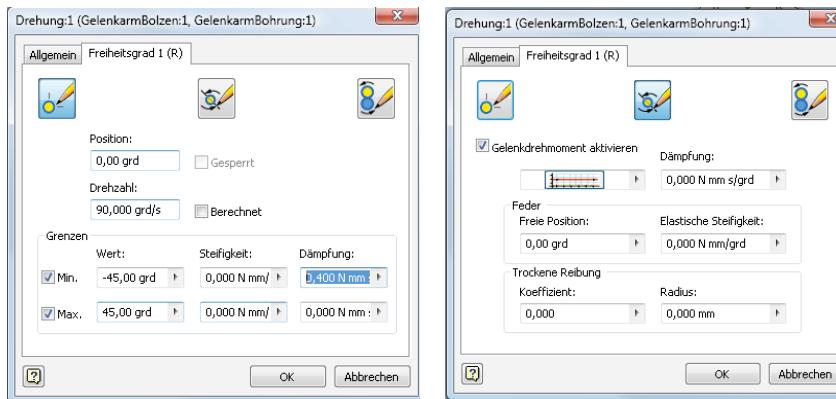
■ 15.8 Gelenkeigenschaften



Die Eigenschaften der verschiedenen Gelenke werden später detaillierter behandelt. An dieser Stelle soll nur eine kurze Einsicht in die Möglichkeiten der Federungseigenschaften der Gelenke gegeben werden.

Die Gelenkeigenschaften sind über das Kontextmenü eines Gelenks zu erreichen und stellen sich im jeweils auf das Gelenk angepassten Dialogfenster dar.

Wie man in den Dialogfenstern sehen kann, gibt es mehrere Registerkarten. Die erste, **ALLGEMEIN**, ist für diese Betrachtung uninteressant. Die zweite, **FREIHEITSGRAD 1 (R)**, und gegebenenfalls die folgenden, die ebenfalls Freiheitsgrade beschreiben, enthalten die Gelenkdaten.



Im gezeigten Beispiel hat das Gelenk nur einen Freiheitsgrad der Rotation (R), das entspricht z.B. einem Scharnier.

Im linken Bild ist der linke der drei Buttons gedrückt, und die Registerkarte zeigt die Anfangs- und Grenzwerte für die Gelenkbewegung. Im rechten Bild ist der mittlere Button gedrückt, und diese Registerkarte zeigt die Werte für das Gelenkdrehmoment. Der rechte Button, mit dem festgelegte Bewegungen definiert werden können, ist für diesen Abschnitt ebenfalls nicht von Bedeutung.

15.8.1 Anfangsbedingungen bearbeiten

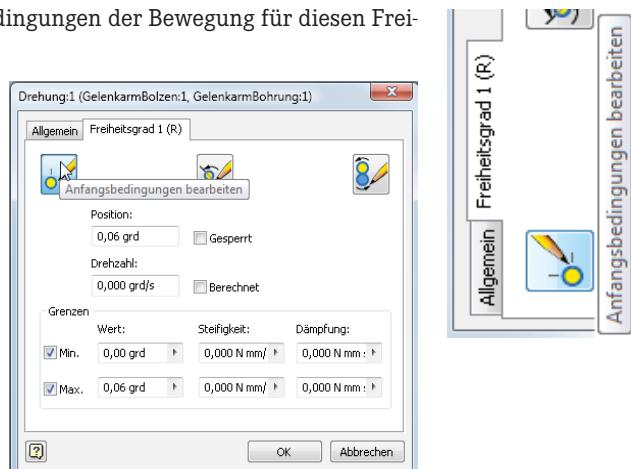
Auf dieser Registerkarte werden die Anfangsbedingungen der Bewegung für diesen Freiheitsgrad eingestellt.

Die Angabe der POSITION legt die Startposition, gemessen vom Ursprung der Gelenkdefinition aus, fest. Bei Translationen erfolgt die Angabe in mm, bei Rotationen in Grad, jeweils mit der positiven X-Achse als Bezug.

Mit GESPERRT besteht die Möglichkeit, den Freiheitsgrad bzw. die Beweglichkeit an dieser Position zu sperren.

Die DREHZAHL (Rotation) bzw. die GE SCHWIN DIGKEIT (Translation) kann fest vorgegeben oder mit dem Auswahlfeld BERECHNET kann das Programm dazu veranlasst werden, diese Bewegungsdaten aufgrund der physikalischen Voraussetzungen eigenständig zu berechnen.

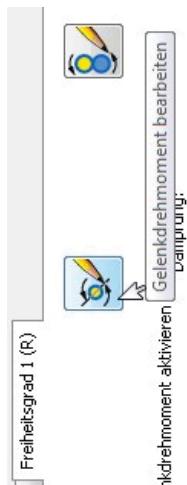
Die Eintragungen im Bereich GRENZEN sind die für diesen Abschnitt relevanten Daten.





HINWEIS: Die minimalen und maximalen Angaben für die Position (WERT) sind keine absoluten und starren Größen, sondern stellen die Grenzen dar, ab denen das System der Bewegung über die Grenzen hinaus einen Widerstand entgegengesetzt, der über die Steifigkeit und die Dämpfung definiert wird.

15.8.2 Gelenkdrehmoment bzw. Gelenkkraft bearbeiten



In den Feldern dieser Registerkarte werden die Werte definiert, die der Inventor den Bewegungskräften als Gelenkkkräfte während einer Bewegung entgegengesetzt.

Mit der Auswahl GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN (Rotation) bzw. GELENKKRAFT AKTIVIEREN (Translation) werden die Daten für dieses sogenannte Rückstoßmoment bzw. die Rückstoßkraft eingegeben.

Ein Drehmoment bzw. eine Kraft kann direkt bestimmt werden, die Dämpfung wird, wie im Abschnitt vorher beschrieben, eingegeben.

Die Federwirkung eines Gelenks wird per Amplitude und Steifigkeit festgelegt.

Die Angaben für die trockene Reibung betreffen den Reibungskoeffizienten und, nur bei Drehgelenken, den Radius des Angriffs der Reibkraft. Der Wert des Koeffizienten darf, warum auch immer, maximal 2 betragen, was in den allermeisten Fällen jedoch auch ausreichend sein dürfte. Ob die Reibung tatsächlich trocken oder geschmiert stattfindet, kann über die Größe des Reibwertes bestimmt werden, insofern ist der Titel des Eingabefeldes eher als relativ zu betrachten.



HINWEIS: Eine größere Einschränkung besteht allerdings darin, dass der Inventor an dieser Stelle nicht zwischen Haft- und Gleitreibung unterscheidet. Gerade Bedingungen, bei denen ein erhöhter Anlaufwiderstand zu überwinden ist, die dann aber relativ leicht beweglich sind, lassen sich so also nicht simulieren.

15.8.3 Festgelegte Bewegung bearbeiten



Der dritte und letzte Button im Eigenschaftsfenster der Freiheitsgrade, FESTGELEGTE BEWEGUNG BEARBEITEN, lässt es zu, eine festgelegte Antriebsbewegung für ein Gelenk zu definieren.

Die drei Eingabemöglichkeiten Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung

können als konstante Werte oder als Funktionen jeweils über der Zeit bestimmt werden, wobei die Positionsangabe natürlich nur als Funktion über der Zeit Sinn macht, da ein konstanter Wert einer Antriebsblockade gleichkommen würde.

Da hier, wie auch schon bei den vorherigen Eingabemöglichkeiten, immer wieder zwischen konstanten Werten und dem Eingabediagramm unterschieden werden kann und das Eingabediagramm sehr viele Möglichkeiten von Funktionsdefinitionen zulässt, soll im nächsten Abschnitt diese Eingabevariante näher beschrieben werden.

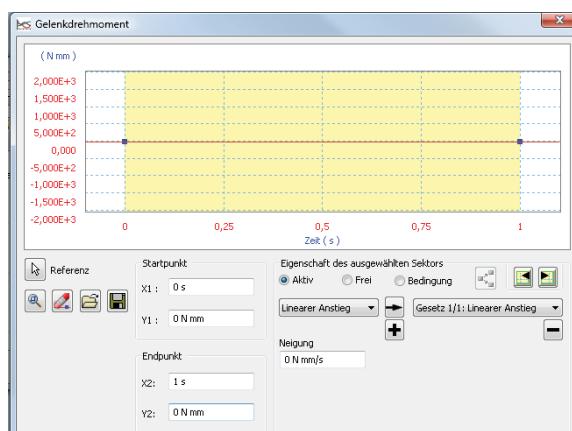
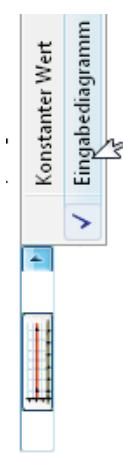


■ 15.9 Das Eingabediagramm

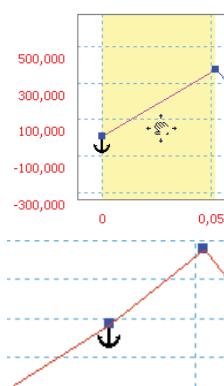
An vielen Stellen der Gelenkdatendefinition kann wahlweise entweder ein KONSTANTER WERT eingegeben werden oder die Wertedefinition über ein EINGABEDIAGRAMM erfolgen.



HINWEIS: Die Definition über ein Eingabediagramm ist immer dann anzuwenden, wenn sich Werte während der Bewegung ändern.



15.9.1 Die Diagrammfläche



Die einfachste Variante, einen linearen Kraft- oder Momentenverlauf zu modellieren, besteht mit den Manipulationsmöglichkeiten in der Diagrammfläche selbst.

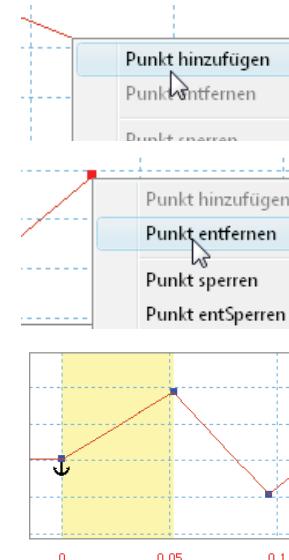
Mit dem Drehen des Mausrades wird zuerst die Größenordnung der Diagrammfläche eingestellt, mit dem Drücken des Mausrades kann sie seitlich verschoben werden.

An beliebigen Stellen der roten Verlaufslinie können entweder über das Kontextmenü oder direkt mit einem Doppelklick Definitionspunkte hinzugefügt werden.

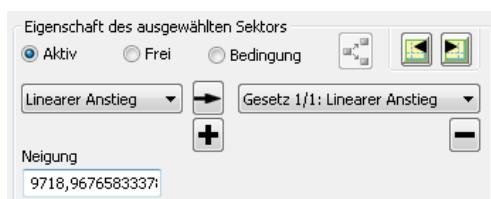
Wird ein vorhandener Punkt markiert, dann kann dieser ebenfalls per Kontextmenü wieder entfernt, gesperrt oder entsperrt werden. Gesperrte Punkte behalten ihre Position, wenn benachbarte Punkte bewegt werden, können jedoch selbst weiterhin verschoben werden. Sie sind durch das Ankersymbol gekennzeichnet.

Die einzelnen Diagrammpunkte können mit dem Mauszeiger sowohl seitlich als auch in der Höhe beliebig verschoben werden.

Der Bereich zwischen zwei Punkten wird als SEKTOR bezeichnet. Beim Klick auf ein Liniensegment wird der entsprechende Sektor gelb markiert. Jeder einzelne Sektor kann entsprechend der jeweiligen Eingabedaten oder Kurvengesetze seine eigene Dynamik zugewiesen bekommen.



15.9.2 Sektor-Optionen



Die Vorgabe AKTIV bedeutet, dass der gezeigte Kurvenverlauf, die gerade Verbindung zwischen zwei Punkten, die gültige Bedingung ist.

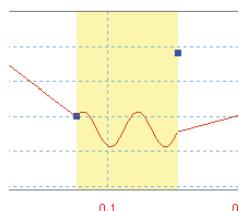
Die Option FREI löscht die Verbindungsline und damit auch den Kraft- oder Momentenverlauf in diesem Bereich, d.h., dass für diese Zeitspanne das Gelenk keiner Bedingung unterworfen und der Freiheitsgrad, um dessen Eigenschaften es geht, freigegeben ist.

Mit BEDINGUNG wird dagegen eine definierbare Wenn-dann-Abhängigkeit für diesen Sektor eingefügt. Der gezeichnete Kraft- oder Momentenverlauf in diesem Sektor wird nur dann zur Anwendung kommen, wenn die Bedingung erfüllt ist, ansonsten wird der Sektor freigegeben.

Wenn PF11 (Drehung:1) zwischen größer oder gleich und 10.000000 grad ist

Für jeden Sektor kann außerdem ein wählbares Kurvengesetz bestimmt werden.

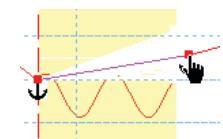
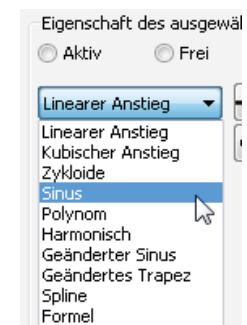
Wurde beispielsweise ein sinusförmiger Verlauf selektiert, dann wird einerseits mit dem Pfeil-Button das GESETZ 1/1: SINUS definiert, und in den Eingabefeldern werden die Amplitude, die Frequenz und der Phasenwinkel für diesen Sektor angegeben.



Der entsprechende sinusförmige Kurvenverlauf wird anschließend automatisch in das Diagramm eingetragen, wobei allerdings der anschließende Linienerlauf dem Ende, d.h. dem Auslauf der Kurve, angepasst wird.



Durch Ziehen der Definitionspunkte kann jedoch die Kontinuität des gesamten Kurvenverlaufs wieder hergestellt werden.



15.9.3 Start- und Endpunkt



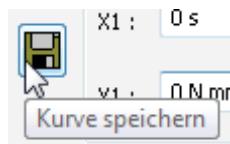
Für jeden Sektor kann ein **Start- und Endpunkt** nicht nur optisch durch Ziehen, sondern auch über die Eingabefelder bestimmt werden.

In der Abbildung beginnt der Kurvenverlauf dieses Sektors bei 0 Sekunden und einem Moment von 10 Nmm, und er endet nach 0,023 Sekunden mit einem Moment von 200 Nmm.

Die **NEIGUNG** des linearen Kurvenstücks wird errechnet und in Nmm/s angezeigt oder ins Feld eingegeben, wodurch der nicht verankerte Kurvenpunkt angepasst wird.

Neigung	8260,0 N mm/s
---------	---------------

15.9.4 Funktionsdefinitionen speichern und laden



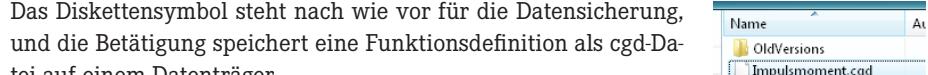
Komplexe Bewegungs- bzw. Momenten- oder Kraftverläufe sind aufwendig zu erstellen und erfordern evtl. zusätzliche Rechenarbeit, um auf praxisrelevante Größen zu kommen. Wird solch ein entwickelter Hergang häufiger benötigt, dann ist es sinnvoll, diesen zu speichern, bei Bedarf zu laden und an die aktuelle Situation anzupassen.

Das Diskettensymbol steht nach wie vor für die Datensicherung, und die Betätigung speichert eine Funktionsdefinition als cgd-Datei auf einem Datenträger.

Entsprechend wird mit dem Ordnersymbol eine ebensolche Datei wieder ins System geladen und kann sofort angewendet werden.

15.9.5 Referenzachsen bestimmen

Alle Größen im Eingabediagramm beziehen sich standardmäßig auf die Zeit, die an der horizontalen Diagrammachse eingetragen ist. Für besondere Fälle kann dieser Bezug durch einen anderen ersetzt werden. Die Schaltfläche REFERENZ ruft dazu ein Auswahlfenster auf, in dem fast beliebige Abhängigkeiten ausgewählt werden können. Für die Sinnhaftigkeit der Wahl ist allerdings der Wählende selbst verantwortlich.



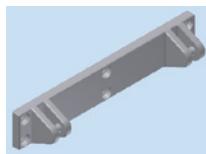
16

Pendelklappe mit Schwerkraft

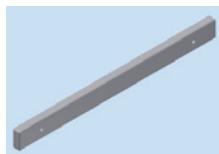
Als erste vollständige Bewegungssimulation soll eine einfache Klappe, die sich alleine aufgrund ihrer Masse und der Schwerkraft bewegt, simuliert werden.

■ 16.1 Die Bauteile und die Baugruppe

Die Klappe ist sehr einfach gehalten und besteht aus lediglich vier unterschiedlichen Bauteilen, denen entsprechende Materialien zugewiesen wurden. Die Baugruppendatei [Pendelklappe.iam](#) befindet sich auf der DVD zum Buch.



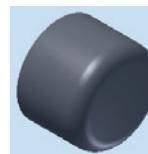
Wandhalter mit Scharnieren
Werkstoff: Stahl
E_Modul: 210 GPa



Anschlageiste mit Pufferaufnahme
Werkstoff: Stahl
E_Modul: 210 GPa



Klappe mit Haken
Werkstoff: Aluminium 6061
E_Modul: 68,9 GPa

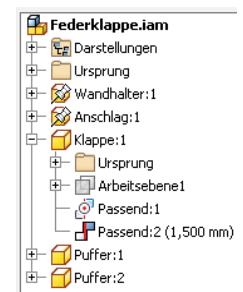
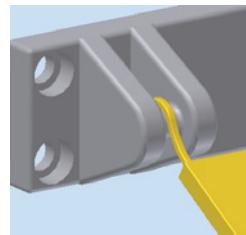
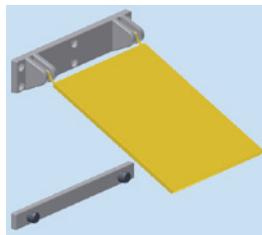


Gummipuffer
Werkstoff:
Gummi
E_Modul:
2 GPa



Pendelklappe.iam

In der Baugruppe wurden der Wandhalter und die Anschlageiste fixiert. Die Klappe ist per 3D-Abhängigkeiten in die Scharniere eingehängt.



Damit die Klappe beweglich bleibt, ist sie PASSEND:1 über ihre Haken-Mittelachse mit den Mittelachsen der Scharnierbolzen verbunden.

Die seitliche Führung zwischen einer Scharnierwange und einer Haken-Seitenfläche wurde ebenfalls mit PASSEND:2 (1,5000 MM) und 1,5 MM VERSATZ ausgeführt.

Die beiden Puffer wurden über ihre Mittelachsen mit den Bohrungen im Anschlag und der Abhängigkeit PASSEND ausgerichtet und ebenfalls PASSEND Fläche an Fläche an die Anschlagleiste gesetzt.

■ 16.2 Die dynamische Simulation starten

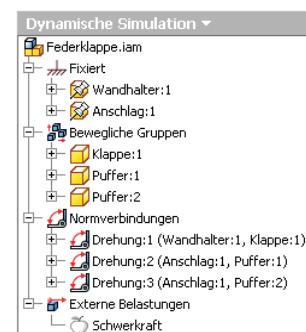


Über die Registerkarte UMGEBUNG wird mit der Schaltfläche DYNAMISCHE SIMULATION die Simulationsumgebung gestartet.

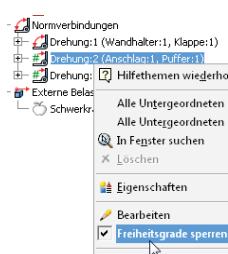
Es ist wichtig, nach dem Start dieser Arbeitsumgebung die Einträge im Objektbrowser zu überprüfen.

Im Ordner FIXIERT befinden sich der **Wandhalter** und der **Anschlag**. Das ist richtig, denn diese Bauteile waren auch in der Baugruppe bereits fixiert.

Dem Ordner BEWEGLICHE GRUPPEN ist die **Klappe** korrekt zugeordnet. Die beiden **Puffer** scheinen allerdings fehl am Platz zu sein, denn sie sind ja funktionsgemäß mit dem Anschlag fest verbunden.



HINWEIS: Eine Überprüfung der Abhängigkeiten zwischen **Puffer** und **Anschlag** ergibt jedoch, dass nur die Mittelachsen (Bohrung/Puffer) und die Flächen (Anschlag/Puffer) abhängig gemacht wurden, d.h., ein Freiheitsgrad der Rotation bleibt tatsächlich erhalten, die Puffer können sich um ihre Längsachse drehen. Entsprechend dieser Freiheitsgrade wandelte der Inventor die Abhängigkeiten in Gelenke um und definierte die Puffer als beweglich. Die Zuordnung zum Ordner **Bewegliche Gruppe** ist also richtig.



Im Ordner NORMVERBINDUNGEN befinden sich somit drei Gelenke, die als Drehgelenke erkannt wurden, einmal die Klappe am Wandhalter und zweimal die Puffer, die jeweils nur noch einen Freiheitsgrad der Rotation zur Verfügung haben.

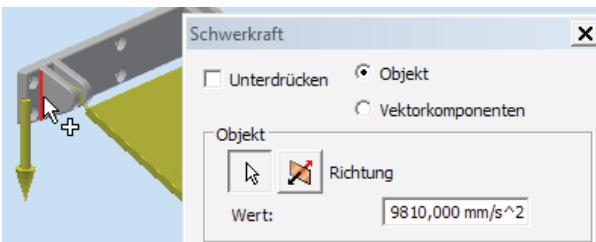
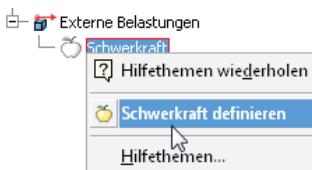


HINWEIS: Die Puffergelenke würden zwar die Simulation nicht stören, erhöhen aber den Rechenaufwand. Es ist sinnvoll, die Freiheitsgrade zu sperren, was im jeweiligen Kontextmenü mit der Funktion FREIHEITSGRADE SPERREN einfach zu bewerkstelligen ist.



Eine Simulationswiedergabe könnte jetzt zwar schon gestartet werden, würde aber rein gar nichts bewirken, da noch keine Kraft oder kein Moment wirksam ist.

■ 16.3 Schwerkraft definieren



Im Ordner EXTERNE BELASTUNGEN befindet sich bereits das noch ausgegraute Symbol für die **Schwerkraft**, die über das Kontextmenü definiert werden kann.

Die Richtung der Schwerkraft kann entweder über ein **OBJEKT** oder über **VEKTORKOMPONENTEN** bestimmt werden.

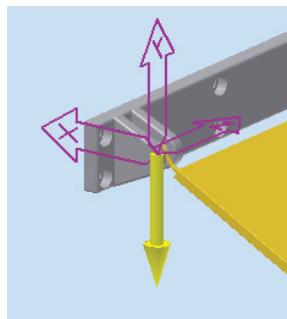


HINWEIS: Wird die Schwerkraft über ein Objekt bestimmt, dann muss dieses Objekt (Bauteil) ein **fixiertes** Objekt sein.

Im Beispiel wurde dafür der Wandhalter ausgewählt.



HINWEIS: Es ist unerheblich, wo der Schwerkraftangriff angesetzt wird, da die Wirkung der Schwerkraft, wie im realen Leben, auf alle Teile in derselben Art und Weise wirkt.



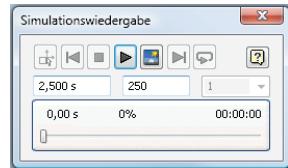
Wird die Richtung der Schwerkraft über VEKTORKOMPO-
NENTEN definiert, dann wird das Symbol des Koordina-
tensystems eingeblendet. Die Größe der Schwerkraft wird
mit $9,81 \text{ m/s}^2$ oder in den Inventor-Einheiten mit -9810
 mm/s^2 angegeben. Das negative Vorzeichen resultiert aus
dem angezeigten Symbol für das Koordinatensystem.

Sobald die Schwerkraft mit OK definiert ist, bekommt der
Newton-Apfel im Objektbrowser seine goldgelbe Farbe.

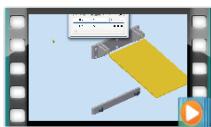
■ 16.4 Die erste Simulation

Eigentlich ist es noch nicht so weit, aber zu Demonstrati-
onszwecken kann jetzt trotzdem schon eine Bewegungssi-
mulation laufen.

Im Wiedergabefenster wurde eine Zeit von 2,5 Sekunden
eingestellt, und dass dabei 250 Bilder erzeugt werden, stellt
der Inventor automatisch ein und kann auch so bleiben.



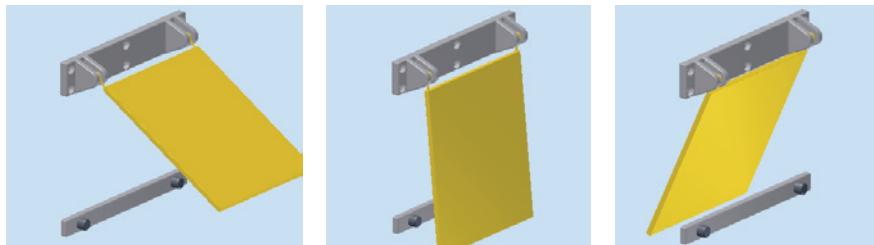
Was passiert?



Animation auf CD

Wir haben eine Klappe mit einem Gewicht und eine Schwerkraft, welche die Klappe nach unten zieht. Über das Drehgelenk stellt sich eine Drehbeschleunigung ein, welche die Klappe nach hinten durchschwingen lässt. Da das Gelenk noch reibungsfrei definiert ist, wird die Klappe nach hinten genauso hoch schwingen, wie sie von vorne nach unten schwingt. Und da weder Reibungen noch Dämpfungen definiert sind, haben wir ein Per-
petuum mobile konstruiert, das so lange pendelt, bis der Rechner ausgeschaltet wird.

Auch die Tatsache, dass die Klappe den Anschlag mit den Gummipuffern völlig ignoriert, ist nicht verwunderlich, da bis jetzt noch keinerlei Zusammenhang zwischen diesen Bau-
teilen und der Klappe definiert ist.

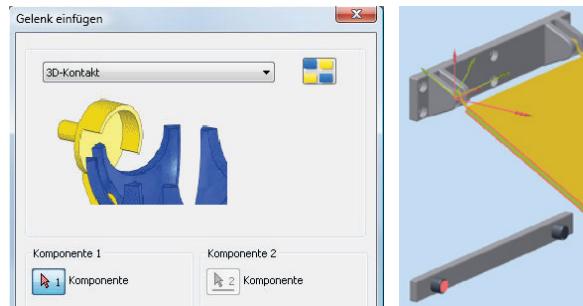
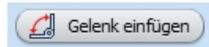


■ 16.5 Einen 3D-Kontakt einfügen

Um die Gummipuffer ihrer Funktion zuzuführen, fügen wir einen 3D-KONTAKT zwischen Puffer und Klappe ein.



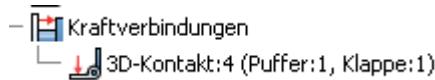
Gelenk einfügen



Die beiden Komponenten sind ein Gummipuffer (rot) und die Klappe (grün). Die ausgewählten Bauteilflächen und die entsprechenden Kontakt-Koordinatensysteme werden jeweils in derselben Farbe dargestellt. Dass sich der 3D-Kontakt über das Drehgelenk definiert, erkennt Inventor automatisch.

Zwei Effekte stellen sich nach dieser Aktion ein. Zum einen erscheint ein Hinweis, dass Kontakt-elemente bzw. Kontaktkräfte nicht nach FEM exportiert werden können. Das ist sehr schade, da es schon interessant gewesen wäre, die Druckbelastung der Puffer in FE-Analyse festigkeitsmäßig zu untersuchen.

Zum Zweiten existiert im Objektbrowser ein neuer Ordner KRAFTVERBINDUNGEN, in dem der 3D-Kontakt zu finden ist.



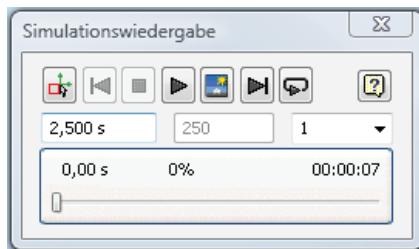
Die Eigenschaften dieses Kontaktes sind bereits vorgegeben und können über das Kontextmenü abgerufen werden.

Die Steifigkeit ist mit 1000 N/MM sehr hoch vorgegeben, trifft aber die Eigenschaften eines harten Gummipuffers recht gut. Demnach ist die Kraft von 1 kN erforderlich um den Gummipuffer um einen Millimeter zu verformen.

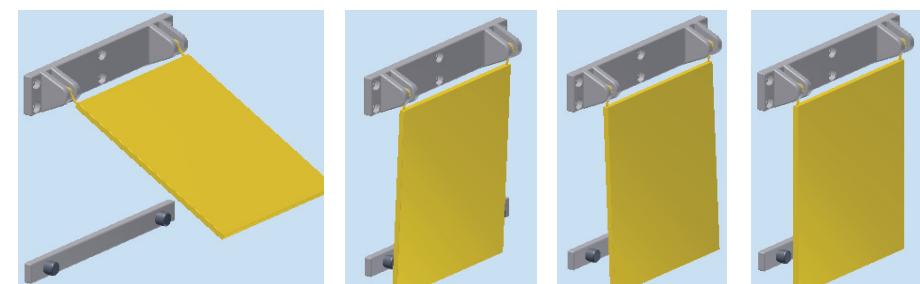
Auch die Dämpfungs- und Reibungswerte sollen erst einmal so übernommen werden.



■ 16.6 Die zweite Simulation



Animation auf DVD



■ 16.7 Ändern der Pufferdämpfung

Möglicherweise könnte die Dämpfung des Puffers mit 1 Ns/mm doch etwas hoch sein, zumal später noch die Gelenkkreibung Einfluss nimmt.

Mit der Kontextmenüauswahl EIGENSCHAFTEN des 3D-Kontakts holen wir das Fenster zum Einstellen dieser Werte wieder auf den Bildschirm und verändern den Dämpfungswert auf 0,05 NS/MM.

Wie zu erwarten ist, wird jetzt die Rückfederung der Klappe stärker ausfallen, sie wird mehrfach am Puffer anschlagen, bis sie wieder in ihrer vertikalen Lage zur Ruhe kommt.



Ungewöhnlich ist der sehr lange Ausschwingvorgang, der immer noch darauf zurückzuführen ist, dass das Drehgelenk reibungsfrei ist, was sich in der nächsten Simulation ändern soll.



Animation auf DVD

■ 16.8 Drehgelenkeigenschaften einstellen

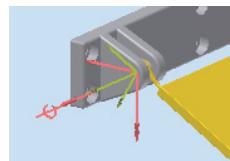
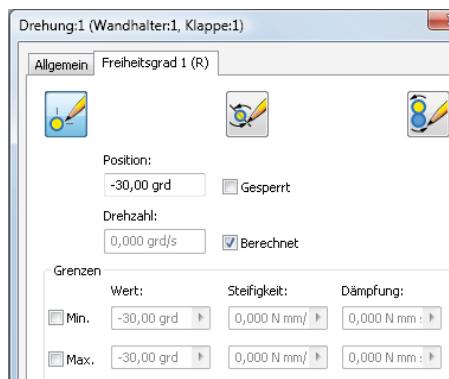
Die EIGENSCHAFTEN des Drehgelenks DREHUNG:1 werden ebenfalls über das Kontextmenü aufgerufen, und es erscheint das im Kapitel 15.6 ausführlicher beschriebene Dialogfenster zum Einstellen der Eigenschaften von Normgelenken.

Die Registerkarte ALLGEMEIN bleibt weiterhin unberücksichtigt, und mit der ersten der drei Einstellungsvarianten eines Gelenks, ANFANGSBEDINGUNGEN BEARBEITEN, beginnen wir die Gelenkbetrachtung für dieses Beispiel.

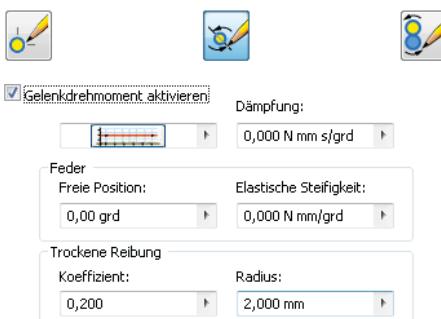
Die Position steht auf -30 GRD, bezogen auf die positive X-Achse und den Winkel-drehsinn ist das die Auslenkung aus der Horizontalen um 30 grd nach unten.

Die Drehzahl am Anfang der Bewegung wird vom System berechnet, da ja praktisch ein freier Fall mit Erdbeschleunigung vorliegt und über die Drehbeschleunigung ein berechneter Geschwindigkeitsverlauf die genaueste Möglichkeit darstellt.

Im Bereich der mittleren Einstellungsvariante, GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN, wird das Auswahlfeld GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN selektiert, was zur Folge hat, dass die nachfolgend eingegebenen Werte in die Bewegungsberechnung einbezogen werden.



Animation auf DVD



Eine Dämpfung und Federwirkung des Drehgelenks soll außer Acht bleiben, die Reibung wird jedoch mit einem KOEFFIZIENTEN von 0,2 auf einem RADIUS von 2 MM angegeben, da die Gelenkbolzen einen Durchmesser von 4 mm haben.

Die Bewegung erfolgt jetzt harmonischer und kommt realitätsnäher zur Ruhe.

17

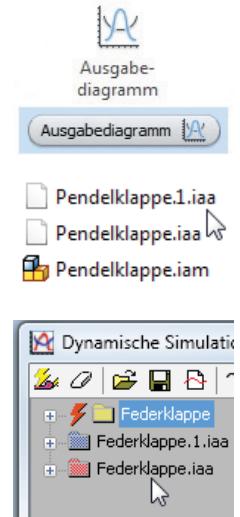
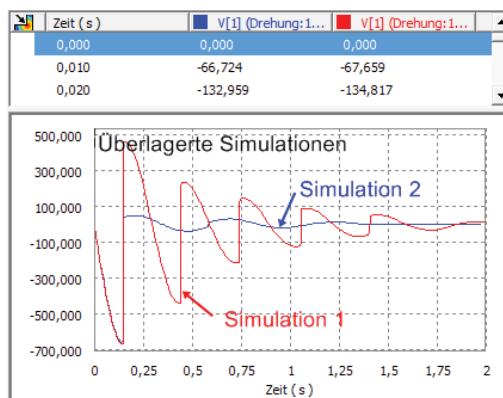
Das Ausgabediagramm

Nachdem eine Simulation durchgelaufen ist, können verschiedene Ergebnisse dieser Simulation im AUSGABEDIAGRAMM dargestellt werden.

Ein im Ausgabediagramm eingestelltes und angezeigtes Simulationsergebnis, z.B. der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf eines Bauteils und Punktes, kann als Simulationsdatei (*.iaa) gespeichert werden.

Die gespeicherten bzw. geladenen Simulationsergebnisse werden im Browser des Ausgabediagramms als farbige Ordner dargestellt.

Wurden verschiedene Simulationen mit z.B. unterschiedlichen Reibungswerten durchlaufen, so können die Diagrammkurven überlagert dargestellt und ausgewertet werden.

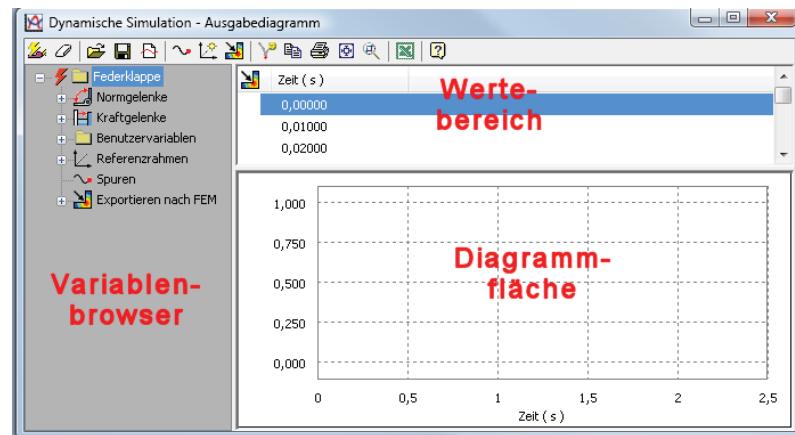


In der Abbildung wurden zuerst die beiden Simulationen Federklappe1.iaa und Federklappe.iaa aus zwei Simulationen des vorherigen Kapitels, die mit unterschiedlichen Reibungswerten gefahren wurden, gespeichert.

Die beiden Simulationen wurden anschließend ins Ausgabediagramm geladen und es wurde in jeder Simulation die Gelenkgeschwindigkeit des Drehgelenks Drehung1 zur Anzeige gebracht.

Deutlich zu sehen ist, dass in der ersten Halbschwingung, während die Klappe frei nach unten fällt, beide Geschwindigkeitsverläufe deckungsgleich sind. Erst nach dem ersten Anschlag am Puffer verhalten sich die Geschwindigkeiten unterschiedlich.

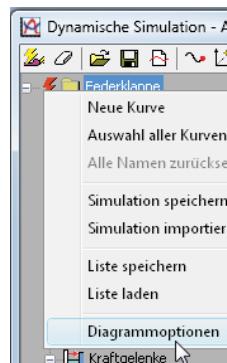
■ 17.1 Die Oberfläche des Ausgabediagramms



Das Dialogfenster AUSGABEDIAGRAMM ist in drei Bereiche gegliedert:

- **VARIABLENBROWSER:** Hier sind die berechneten Größen, wie Positionen, Kräfte, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen etc., als Variablen selektierbar, die untersucht und dargestellt werden sollen.
- **WERTEBEREICH:** Neben den Zeitschritten werden, in Spalten farbig geordnet, die jeweiligen Werte der selektierten Variablen listenförmig angezeigt.
- **DIAGRAMMFLÄCHE:** Die grafische Darstellung zeigt den Größenverlauf der selektierten Variablen über der Zeitachse, wobei mehrere Darstellungen überlagert werden können. Die Funktionen ZOOM und PAN werden wie im Inventor bedient und ermöglichen sehr genaue Darstellungen und Untersuchungen.

■ 17.2 Diagrammoptionen



An fast jeder Stelle und in jedem Bereich zeigt das Kontextmenü die Auswahlmöglichkeit **DIAGRAMMOPTIONEN** an, in dessen Dialogfenster auf drei Registerkarten grundsätzlich Einstellungen vorgenommen werden können.

In der Regel werden die Einstellungen automatisch vom System vorgenommen und richten sich nach den Größenordnungen der Variablen und der Simulationsdauer. In einzelnen Fällen, für Präsentationen und zu genaueren Untersuchungen, kann es jedoch vorteilhaft sein, entsprechende Einstellungen von Hand vorzunehmen.

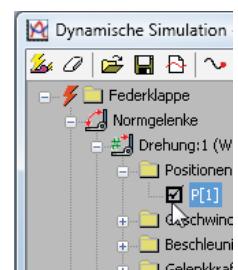
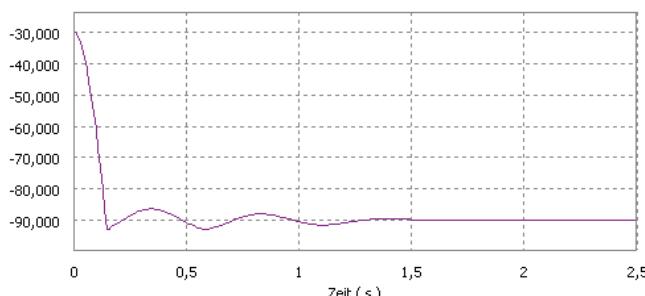
Die Bereiche gliedern sich in:

- **DIAGRAMMACHSEN:** Die Vorgabe für die X-Achse ist die Zeit, die als gesamte Simulationszeit auf dieser Achse untergebracht ist. Die Y-Achse wird je nach Größenbereich der dargestellten Variablen den gesamten Wertebereich zur Anzeige bringen
- **ACHSENINTERVALLE:** Neben der Anzeige des Rasters kann hier die Anzahl der Abstufungen der Abszissen- und der Ordinatenachse eingestellt werden. Bei der ANZAHL DER WICHTIGEN ZIFFERN hat der Übersetzer wieder zugeschlagen, damit ist die Anzahl der Dezimalstellen in der Achsenbeschriftung gemeint, allerdings wird immer eine Dezimalstelle weniger angezeigt, als eingetragen ist (z.B. der Eintrag 3 ergibt 2 Dezimalstellen).
- **WERTETABELLE:** Auf der dritten Registerkarte wird das Zahlenformat der Werte in der Wertetabelle eingestellt. Die Anzahl der Dezimalstellen, die Schreibweise in Exponentendarstellung, ist eindeutig formuliert, mit der Auswahl ZEICHEN werden auch die positiven Werte mit einem Vorzeichen (+) versehen.



■ 17.3 Variable anzeigen

Als erstes Beispiel einer Diagrammanzeige soll die Winkelposition des Drehgelenks über der Zeit zur Ansicht gebracht werden. Im Variablenbrowser wird dazu im Ordner NORM-GELENKE das Drehgelenk DREHUNG:1 geöffnet und im Unterordner POSITIONEN die einzige Variable P[1] selektiert.



Im Diagrammbereich erscheint daraufhin sofort der entsprechende Kurvenverlauf über die gesamte Simulationszeit von 2,5 Sekunden. Die Ausgangsstellung der Klappe ist -30 Grad, und sie pendelt sich bei -90 Grad vertikal aus.



Wird beispielsweise der erste Anschlagpunkt am Puffer bei etwas unter -90 Grad und ca. $0,2$ Sekunden gezoomt, dann ist sehr genau zu ermitteln, dass dieser ziemlich genau nach der Zeit $0,15$ Sekunden bei ca. $-92,9$ Grad stattfindet.

Im weiteren Verlauf ist ebenfalls gut zu sehen, dass bei ca. $0,6$ Sekunden noch eine zweite Pufferberührung stattfindet, bevor die Klappe dann berührungslos auspendelt.

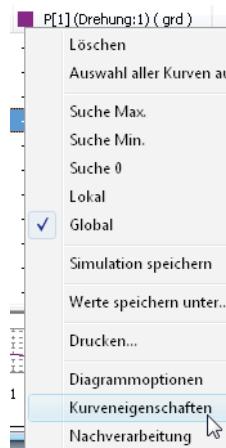
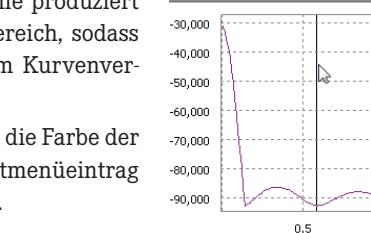
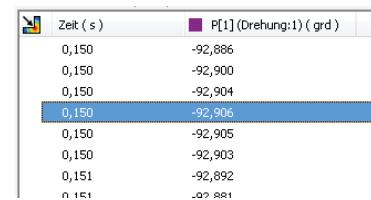
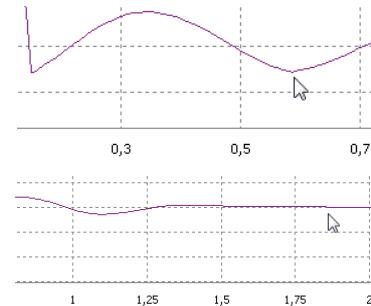
Der gesamte Ausschwingvorgang ist nach ca. $1,85$ Sekunden abgeschlossen, d.h., die Klappe befindet sich nach dieser Zeit in der Ruhestellung.

Im Wertebereich sind die Daten der Simulation noch genauer zu sehen als in der Diagrammfläche.

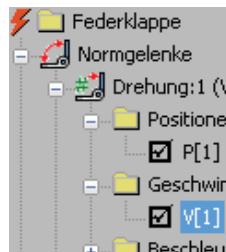
In der Spalte $P[1](DREHUNG:1)$ (GRD) ist beispielsweise abzulesen, dass bei der Zeit $0,15$ Sekunden der maximale Ausschlag bei $-92,906$ Grad stattgefunden hat.

Ein Doppelklick auf einen Eintrag in der Wertetabelle produziert eine entsprechende vertikale Linie im Diagrammbereich, sodass der Bezug zwischen den Tabelleneinträgen und dem Kurvenverlauf immer deutlich hergestellt werden kann.

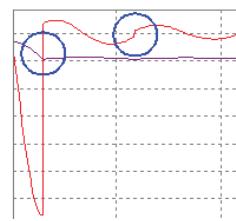
Das farbige Quadrat vor der Spaltenbezeichnung gibt die Farbe der Kurve im Diagramm wieder, die mit dem Kontextmenüeintrag KURVENEIGENSCHAFTEN verändert werden kann.

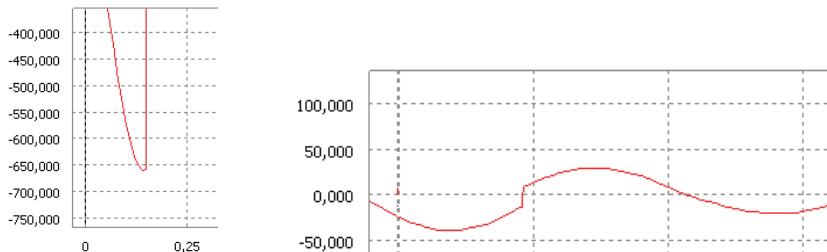


■ 17.4 Eine zweite Variable überlagern



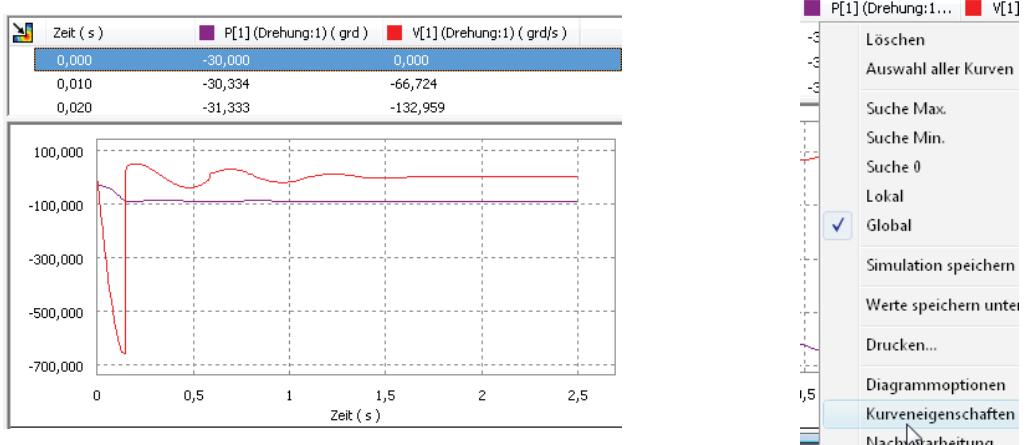
Wird als zweite Variable im Unterordner GESCHWINDIGKEITEN desselben Gelenks die dort einzige Variable $V[1]$ zur Anzeige gebracht, dann können über den Geschwindigkeitsverlauf weitere Rückschlüsse auf das Verhalten der Klappe gezogen werden. Jeweils bei den vertikal dargestellten Geschwindigkeitswechseln bzw. Unstetigkeiten erfolgt ein Anschlag an den Puffern.





Die Maximalgeschwindigkeit beim ersten Anschlag nach der Zeit 0,15 Sekunden beträgt ca. 660 Grad/Sekunde, der zweite Anschlag findet bei einer Geschwindigkeit von knapp um 0 Grad/Sekunde, d.h. fast schon in der Ruhestellung, statt.

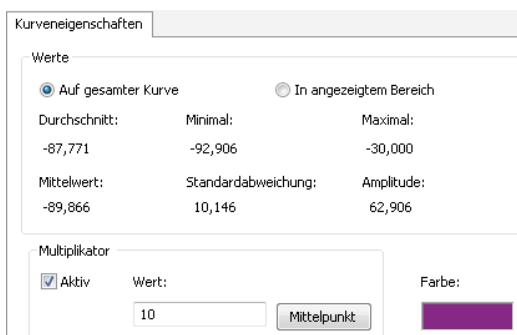
Beide Kurven zusammen ergeben allerdings einen nicht so aussagekräftigen Eindruck, da beide an derselben Ordinatenachse mit demselben Maßstab ausgerichtet werden, was bei unterschiedlich großen und durch die vorgegebenen Einheiten bestimmten Werten die Kurve mit den kleineren Werten fast zum Verschwinden bringt.



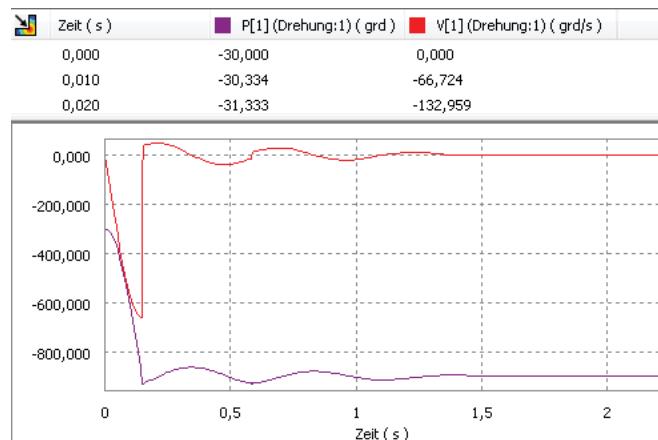
Kurvenmaßstab verändern

Ein Trick hilft aber auch bei diesem Problem weiter. Im Kontextmenü einer Kurvenspalte in der Wertetabelle kann das Dialogfenster KURVENEIGENSCHAFTEN aufgerufen werden, das im unteren Bereich das Setzen eines Multiplikators für diese Kurve erlaubt.

Wird dieser MULTIPLIKATOR aktiv geschaltet und für dieses Beispiel mit dem WERT 10 ausgestattet, dann wird die entsprechende Kurve entsprechend gedehnt.

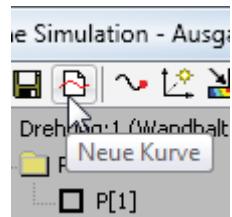


Mit dem Button ANWENDEN oder OK erreicht man damit eine Darstellung beider Kurven in annähernd gleicher Größendarstellung, die eine recht gute Beurteilung des Verlaufes zulässt.



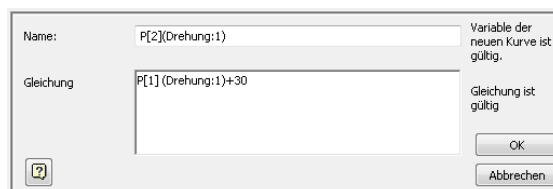
Eine Nullpunktverschiebung für eine einzelne Kurve ist leider nicht möglich, wodurch auch die Multiplikator-Funktion bei sehr gespreizten Werten an ihre Grenzen stößt.

■ 17.5 Nullpunktverschiebung



Der Inventor wäre jedoch nicht der Inventor, wenn es nicht auch für das Problem der Nullpunktverschiebung eine Lösung gäbe.

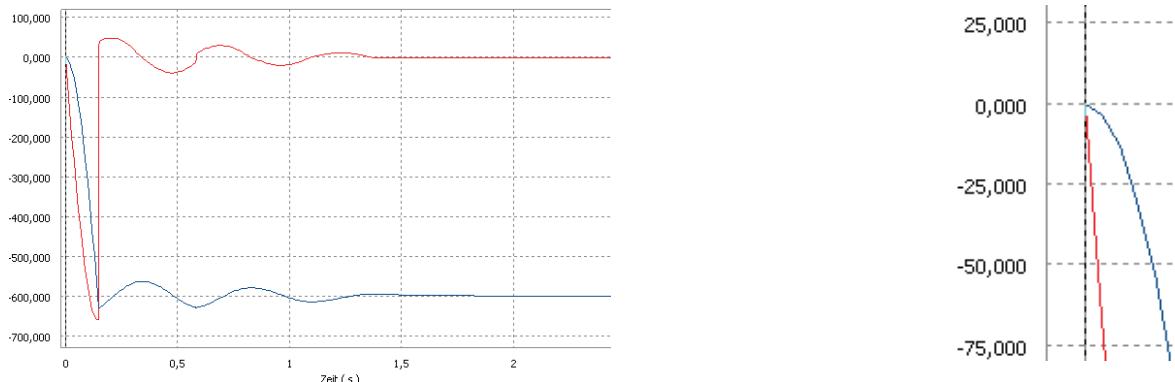
Über das abgebildete Icon NEUE KURVE oder über das Kontextmenü lassen sich neue Diagrammkurven aufgrund existierender Variablen berechnen und erzeugen.



Sie müssen dazu im Dialogfenster lediglich einen neuen Variablennamen eintragen und eine gültige Gleichung für die neue Kurve aufstellen.

Im Beispiel heißt die neue Kurve P[2](DREHUNG:1). Die Gleichung nimmt Bezug auf die Variable P[1](DREHUNG:1) und addiert den Wert 30 zu deren Variablenwerten.

Die Zahl 30 kommt zustande, weil die P[1]-Kurve ihren Beginn beim Wert -30,0 hat. In der neuen Kurve soll dieser aber auf den Wert 0 gesetzt werden.



Im neuen Diagramm mit der verschobenen Kurve, deren Multiplikator wieder auf den Wert 10 gesetzt wurde, beginnen beide Kurven beim Wert null, Rot bedeutet die Geschwindigkeit und Blau die Position der Klappe.

■ 17.6 Darstellungs- und Wertegenauigkeit

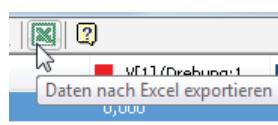
Die Genauigkeit aller Angaben und Anzeigen ist natürlich relativ. Es werden zwar beliebig viele Dezimalstellen angezeigt, die Werte sind jedoch z.B. von der Genauigkeit der Angabe von Reibungskoeffizienten, Elastizitätskonstanten und Dämpfungsbeiwerten abhängig, die mehr oder weniger genau geschätzt in die entsprechenden Gelenkeigenschaften eingetragen wurden. Insofern wird in vielen Fällen eine nicht reale Genauigkeit nur vorgetäuscht.



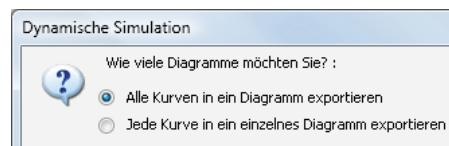
Wichtig ist deswegen, mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Gelenkeigenschaften (Maxima/Minima) zu durchlaufen, um einen Überblick über das tatsächlich mögliche Verhalten und über die Auswirkung von Veränderungen zu bekommen.

■ 17.7 Diagramm und Werte nach Excel exportieren

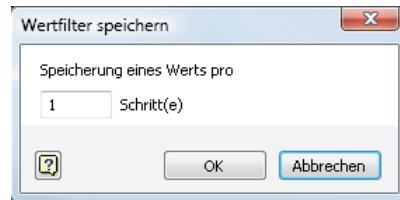
Die meisten der Icons in der Symbolleiste sind selbsterklärend und einfach zu bedienen. Interessant für externe Anwendungen ist allerdings auch die Funktion DATEN NACH EXCEL EXPORTIEREN, die kurz beleuchtet werden soll.



Direkt nach einem Klick auf das Icon beginnt der Exportvorgang.

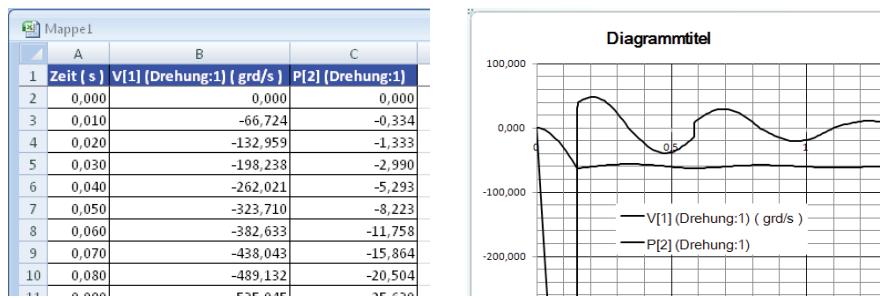


Sind mehrere Kurven in einem Diagramm vorhanden, dann ist die Auswahl möglich, alle Kurven in ein einziges Diagramm oder jede Kurve in ein eigenes Diagramm exportieren zu lassen.



Als Speicherung der Schrittanzahl empfiehlt sich die Vorgabe 1 zu belassen, da sonst die Excel-Diagrammkurven recht eckig und unansehnlich werden.

Nach der Bestätigung der Eingaben öffnet sich Excel und zeigt auf unterschiedlichen Arbeitsblättern das Diagramm und die Werteliste an.



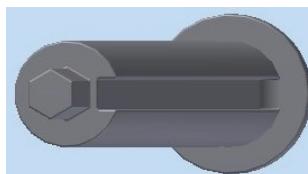
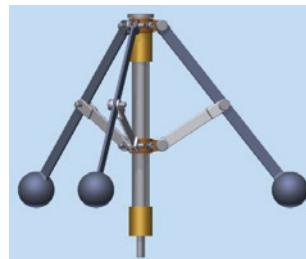
Ein Manko bei diesem Vorgehen ist, dass die Kurvenfarben nicht mit an Excel übergeben werden.

18

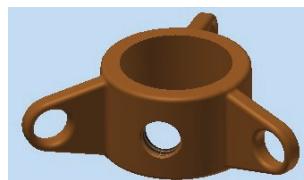
Fliehkraftregler

Im folgenden Kapitel soll ein Fliehkraftregler aufgebaut und simuliert werden. Die Funktion und nicht die Form ist beispielhaft für viele derzeitige Fliehkraftregler, die meist kleiner und komplexer konstruiert sind. Das Funktionsprinzip ist jedoch in den vielen Fällen dasselbe, weswegen sich der gute alte Dampfmaschinenregler für die Demonstration besser eignet.

Die Baugruppe besteht aus den folgenden Bauteilen:



Welle
Stückzahl: 1
Stahl



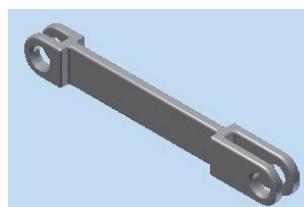
Gleitbuchse mit Gew.stift
Stückzahl: 2
Bronze



Lagerbuchse
Stückzahl: 2
Messing



Gewichtsstange
Stückzahl: 3
Blei



Gelenkstange
Stückzahl: 3
Stahl



Bolzen
Stückzahl: 9
Stahl

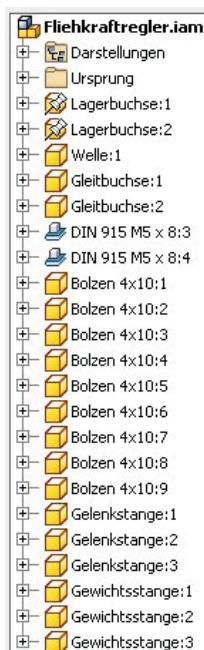
■ 18.1 Die Baugruppenabhängigkeiten

Der Zusammenbau ist schnell beschrieben und eigentlich problemlos zu bewerkstelligen.



HINWEIS: Da die Simulation und gegebenenfalls eine anschließende FE-Analyse mit den Bewegungslasten erfolgen soll, ist jedoch peinlich darauf zu achten, dass die 3D-Abhängigkeiten genauso vergeben werden, wie die einzelnen Funktionen, der Kraftfluss, dies verlangen.

Dieser Umstand ist vor allem deswegen so wichtig, weil die Simulationsumgebung gemäß der Inventor-Vorgabe alle 3D-Abhängigkeiten automatisch in Gelenke umwandelt und falsch vergebene Abhängigkeiten Fehlfunktionen zur Folge haben können.



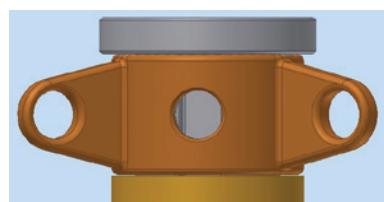
Lager- und Gleitbuchsen axial fluchtend

Im ersten Schritt werden die beiden Lagerbuchsen und die Welle platziert. Die beiden Lagerbuchsen und die Welle **fluchten** über ihre Mittelachsen. Die untere runde Stirnfläche der Welle bildet mit der unteren Stirnfläche der unteren Lagerbuchse **eine Ebene**.

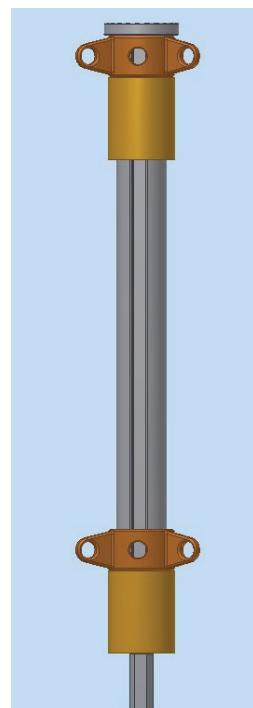
Zwischen der oberen Lagerbuchse und dem Wellenkopf wird eine Gleitbuchse mit ihrer Mittelachse **fluchtend** zur Welle eingebaut. Die obere Stirnfläche dieser Gleitbuchse ist mit einem **Abstand** von **0,1 MM** **passend** an der unteren Kopffläche des Wellenkopfes ausgerichtet.



TIPP: Der kleine Abstand verhindert, dass die Simulationsumgebung eine Verbindung zwischen den beiden Flächen herstellt.



Die obere Lagerbuchse soll zur unteren einen **lichen Abstand** haben, der so groß ist, dass sich ebenfalls ein Spalt zwischen ihrer oberen Stirnfläche und der unteren Stirnfläche der oberen Gleitbuchse befindet. Beträgt der lichte Abstand zwischen den beiden Lagerbuchsen **99,8 MM**, dann entsteht oben ebenfalls ein Spalt von **0,1 MM**.

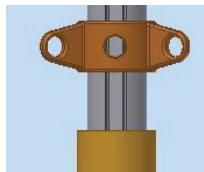


Gewindestifte passend – tangential – passend

Im nächsten Schritt können die beiden Gewindestifte M5x8 eingefügt werden.

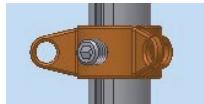
Diese Schrauben haben die Aufgabe, das Drehmoment von der Welle auf die beiden Gleitbuchsen zu übertragen. Dafür müssen die Zapfen in der Wellennut **vertikal beweglich** laufen. Insgesamt sind somit jeweils drei Abhängigkeiten zu vergeben:

- Mittelachse Gewindestift – Mittelachse Gewindebohrung: PASSEND
- Zapfenmantelfläche – Nutseitenfläche: TANGENTIAL
- Zapfenstirnfläche – Nutgrundfläche: PASSEND mit 0,1 MM Abstand



Bolzen – Gelenkstangen und Bolzen – Gleitbuchsen

Für die Verbindungen der Gelenkstangen und der Gewichtsstangen mit den Gleitbuchsen durch die Bolzen ist besondere Sorgfalt aufzuwenden.

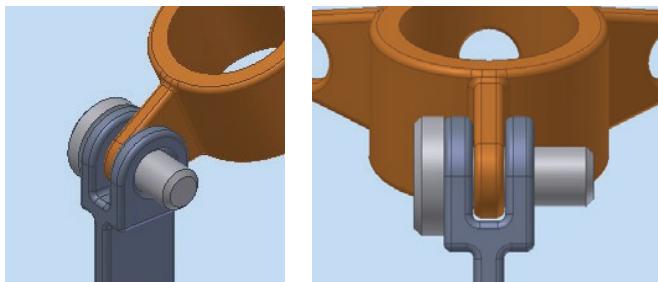


HINWEIS: Da der Kraftfluss jeweils über die Bolzen von einem auf das andere Bauteil übertragen wird, sind die Abhängigkeiten genauso zu vergeben: von der Gelenk- bzw. Gewichtsstange zum Bolzen und vom Bolzen zur Gleitbuchse.



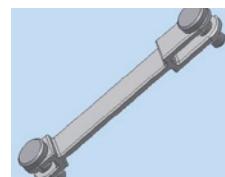
Gewichtsstange – Bolzen: EINFÜGEN

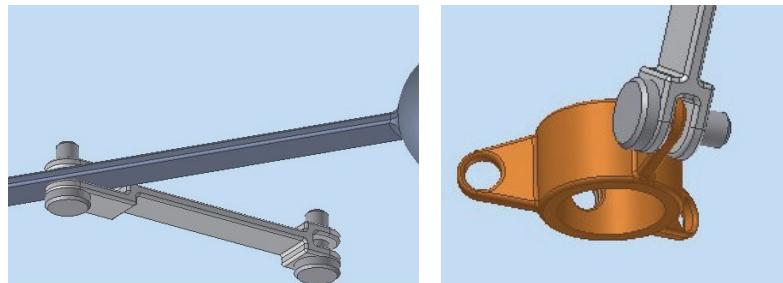
- Mittelachse Bolzen – Mittelachse Gleitbuchsenbohrung: PASSEND
- Seitenfläche Gleitbuchsenwange – innere Seitenfläche Gewichtsstange: PASSEND mit 0,1 MM Abstand



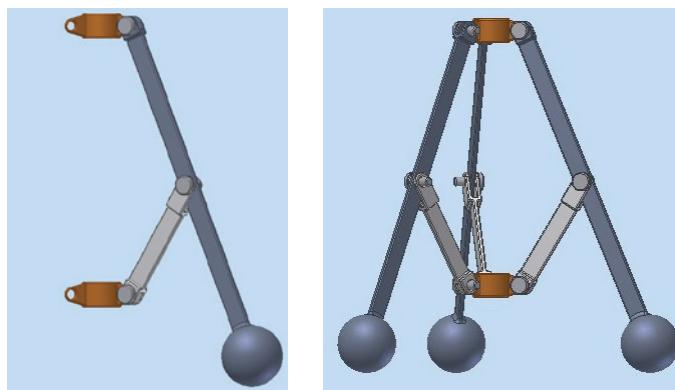
In der rechten Abbildung ist deutlich die Platzierung des Gelenks der Gewichtsstange in der Gleitbuchse zu sehen. Es befindet sich allseits ein kleiner Spalt zwischen den Flächen (seitlich je 0,1 mm), der verhindert, dass die Simulationsumgebung eine feste Verbindung zwischen den Bauteilen herstellt, die von Hand nachgearbeitet werden müsste.

In derselben Art und Weise bringen Sie die Bolzen zuerst mit der Abhängigkeit EINFÜGEN in der Gelenkstange unter. Das längere Gelenk der Gelenkstange verbinden Sie dann über den Bolzen, wie oben beschrieben, mit der mittleren Bohrung der Gewichtsstange. Das untere Gelenk der Gelenkstange montieren Sie genauso mit der unteren Gleitbuchse.

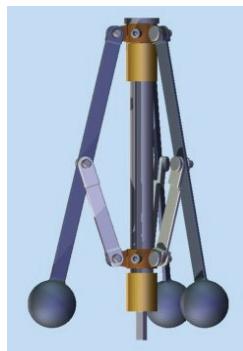




Sind alle Verbindungen an einem Gelenkarm hergestellt, dann ist mit den anderen beiden Armen ebenso zu verfahren.



TIPP: Es empfiehlt sich, zur Montage dieser Teile die Welle und die Lagerbuchsen, die an diesen Vorgängen nicht teilhaben, auf **unsichtbar** zu schalten; möglicherweise auch die jeweils nicht benötigten anderen Teile. Die Übersichtlichkeit und die Handhabung beim Vergeben der Abhängigkeiten erleichtern sich dadurch nicht unwesentlich.



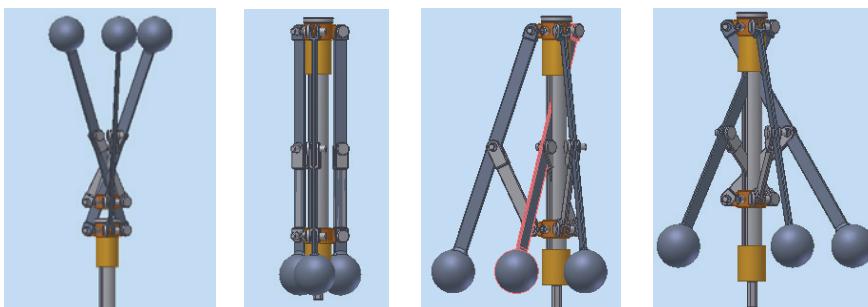
Sind alle Teile montiert, dann werden die beiden Lagerbuchsen **FIXIERT**. Diese beiden Buchsen stellen das Gehäuse bzw. den Rahmen dar, mit dem die gesamte Konstruktion nach außen hin stabilisiert sein muss.

■ 18.2 Baugruppe bewegen

In der Baugruppe kann jetzt die Konstruktion im Rahmen ihrer Abhängigkeiten mit dem Mauszeiger bewegt werden.



HINWEIS: Aber Vorsicht! Da der Inventor keine praktikable Möglichkeit kennt, das Durchdringen von Bauteilen durch andere zu verhindern, kann sehr schnell ein nur schwierig zu behebendes Durcheinander der Bauteile entstehen (siehe nachfolgende Abbildungen).

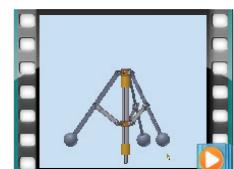


Alle möglichen bzw. unmöglichen Gebilde können durch unvorsichtiges Bewegen entstehen, vor allem dann, wenn die Gelenkstangen in eine gestreckte Lage kommen, kann nicht vorhergesagt werden, in welche Richtung sie sich weiter bewegen.

Da alle drei Hebelgetriebe, die übrigens drei Gelenkvierecke darstellen, miteinander verbunden sind und immer nur eine Stelle bewegt werden kann, fällt es schwer, wieder Ordnung in das System zu bringen. Ein beherzter Zug der unteren Gleitbuchse nach unten und das anschließende Schieben nach oben helfen manchmal weiter.

Alle Varianten, mit denen dieses Problem im Inventor umgangen werden könnte, sind im Rahmen der dynamischen Simulation nicht anzuwenden und ungeeignet.

- Bauteile zusätzlich als Referenzbauteile einzufügen und die Extremstellungen damit anzudeuten, eignet sich nur für Zeichnungsableitungen und macht in der Prototypherstellung keinen Sinn.
- Nach Abhängigkeiten bewegen zu lassen (siehe Kapitel 10, [Modal- oder Eigenfrequenzanalyse](#)), erfordert zusätzliche Abhängigkeiten und Grenzangaben, die bei der dynamischen Simulation stören würden.
- Kontaktsatz und Kontaktlöser anzuwenden, hilft nur weiter, wenn man die Bauteile nach Abhängigkeit bewegen lässt.



Animation auf DVD

■ 18.3 Die dynamische Simulation

18.3.1 Überbestimmungen



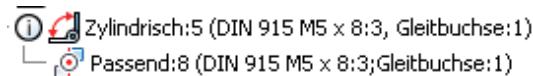
Wie schon mehrmals geschehen, wird die dynamische Simulationsumgebung über die Registerkarte UMGEBUNG und die Schaltfläche DYNAMISCHE SIMULATION gestartet.

Das Erste, was wir zu sehen bekommen, ist eine Warnung, die besagt, dass unsere Konstruktion mit acht oder mehr Graden überbestimmt ist. Zu erkennen ist dieser Umstand auch im Objektbrowser neben dem Baugruppennamen durch das eingeblendete i im Kreis.



Die Warnung kann momentan ignoriert werden, da sie für die Bewegungssimulation ohne Bedeutung ist. Wird später eine FE-Analyse durchgeführt, dann müssen entsprechende Vorkehrungen getroffen werden. Das Fenster ist also zur Kenntnis zu nehmen und mit OK wegzuklicken.

Im Objektbrowser befinden sich an den Gelenken, die von den besagten Redundanzen betroffen sind, ebenfalls die Informationssymbole.



Erkennen lässt sich nach dem Öffnen des Eintrages, dass es sich in diesem Fall um die Abhängigkeit *Passend* zwischen einem Gewindestift und einer Gleitbuchse handelt.

Die Warnung wird offensichtlich deswegen ausgegeben, weil sowohl die Mittelachse des Gewindestifts mit der Mittelachse der Gewindebohrung als auch die Mantelfläche des Zapfens mit der Seitenfläche der Wellennut verbunden ist. Verständlich ist die Meldung trotzdem nicht, denn eine Überstimmung liegt definitiv nicht vor. Aufgrund welchen Umstandes der Inventor damit ein Problem hat, bleibt leider unklar.



18.3.2 Der Objektbrowser

Interessanter als in der letzten Übung, der Federklappe, sind in diesem Beispiel die Einträge im Objektbrowser.

Fixiert

Die in der Baugruppe bereits fixierten Elemente befinden sich in der Gruppe Fixiert.

Bewegliche Gruppen

Alle Objekte, die an der Bewegung teilnehmen und die in den Kraftfluss eingebunden sind, befinden sich in der Gruppe Bewegliche Gruppen.

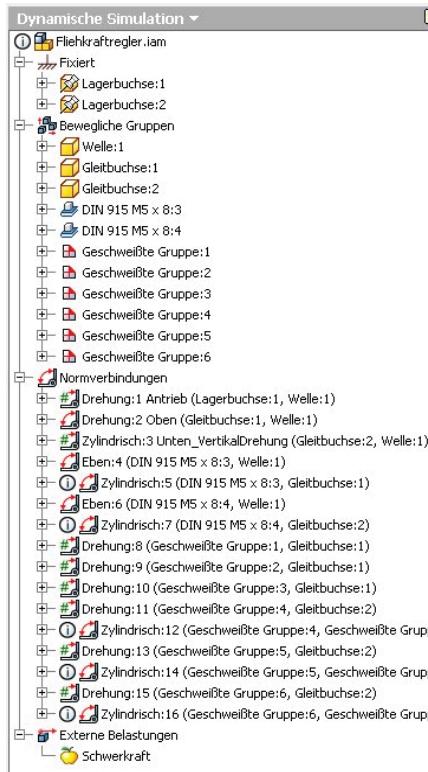
Die Elemente Geschweißte Gruppe sind nicht wirklich geschweißt, sie sind durch die Abhängigkeiten lediglich fest miteinander verbunden.

Normverbindungen

Hier befinden sich alle automatisch erzeugten Gelenke. Die grüne Raute drückt aus, dass in den Gelenkeigenschaften Einträge vorgenommen wurden. Das i im Kreis weist auf Überbestimmungen hin.

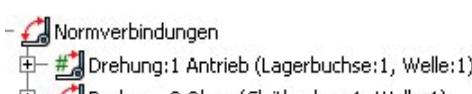
Externe Belastungen

Unter den externen Belastungen ist die Schwerkraft eingetragen. Andere Kräfte oder Momente sind nicht definiert.

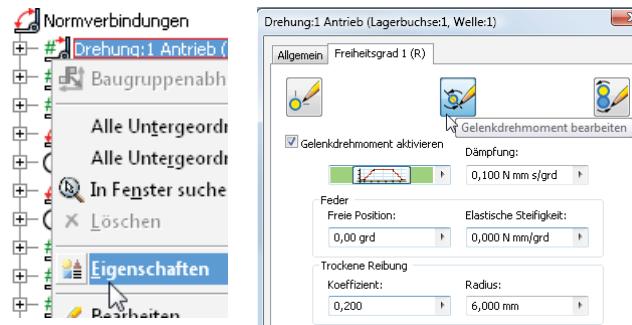


18.4 Der Antrieb

Eher zufällig steht an der obersten Stelle in den Normverbindungen das Gelenk DREHUNG:1, das der besseren Kenntlichmachung wegen um den Zusatz ANTRIEB (Umbenennung im Objektbrowser) ergänzt wurde. Dass es sich bei diesem Gelenk



um die Abhängigkeit zwischen der unteren Lagerbuchse und der Welle handelt, geht aus dem Klammerausdruck (LAGERBUCHSE:1, WELLE:1) hervor.



Über dieses Gelenk soll der Antrieb des Fliehkraftreglers erfolgen.

Der Eintrag EIGENSCHAFTEN im Kontextmenü des Gelenks ruft das Dialogfenster auf, in dem alle Gelenkeinstellungen vorgenommen werden können.

Auf der Registerkarte zum einzigen FREIHEITSGRAD 1 (R) des Gelenks wählen Sie die mittlere Schaltfläche GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN aus.

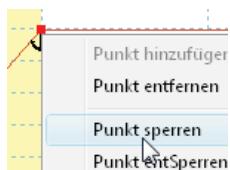
Aktivieren Sie das Auswahlfeld GELENKDREHMOMENT und definieren Sie ein Drehmoment über das Eingabediagramm.

18.4.1 Antriebsmoment

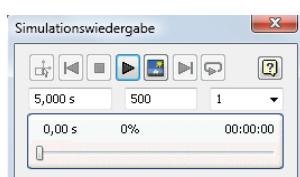


Die Definition im Eingabediagramm stellen Sie so ein, dass in den ersten 0,5 SEKUNDEN das Moment auf 150 NMM linear ansteigt, danach EINE SEKUNDE konstant bleibt, bis es in den letzten 0,5 SEKUNDEN wieder auf den Wert null abfällt.

Neue Diagrammpunkte fügen Sie mit einem Doppelklick ein.

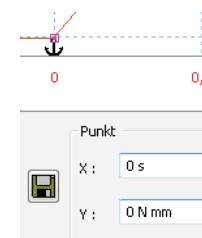


TIPP: Es empfiehlt sich, die einzelnen Diagrammpunkte zu sperren, da damit das Kurvengesinde während der Manipulationen stabil bleibt.



Wurde ein Punkt mit einem einfachen Klick selektiert, dann können seine Daten, in diesem Fall der X-Wert in Sekunden und der X-Wert in Nmm, direkt in die Eingabefelder eingetragen werden. Die Kurve im Diagramm passt sich jeder Eingabe automatisch an.

Die Gesamtzeit der Momenteneinwirkung beträgt zwei Sekunden. Die Simulationszeit wird später auf fünf Sekunden eingestellt, da zu erwarten ist, dass die Fliehkraftrotation aufgrund der Massenträgheit der Gewichte noch einige Zeit nachläuft.



18.4.2 Dämpfung

Eine DÄMPFUNG von 0,1 NMM S/GRD wurde dem Moment gefühlsmäßig zugeordnet, damit es nicht durch starre und harte Stöße bei Lastwechsel Spannungsspitzen hervorruft.



18.4.3 Reibung

Der KOEFFIZIENT der Reibung ist mit 0,2 eingetragen und entspricht in etwa einer trockenen Reibung zwischen Metallen. Der RADIUS des Reibmomentes von 6 MM ergibt sich aus dem Wellendurchmesser von 12 mm.



■ 18.5 Die Vertikalbewegung der unteren Gleitbuchse

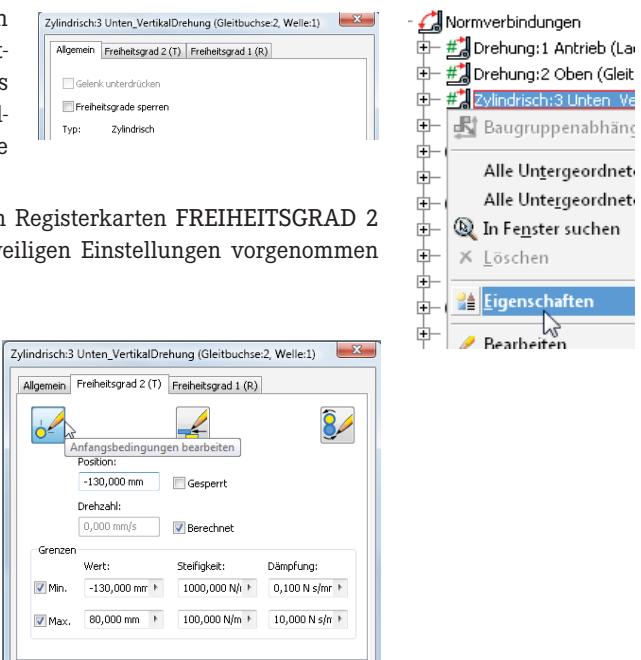
Das Gelenk für die Vertikalbewegung der unteren Gleitbuchse muss ebenfalls eingestellt werden. Entsprechend der Beweglichkeit dieses Gelenks hat es zwei Freiheitsgrade, einen der Translation (Vertikalbewegung) und einen der Rotation (Antrieb durch die Welle über den Gewindestift).

Das Eigenschaftsfenster zeigt demgemäß die beiden Registerkarten FREIHEITSGRAD 2 (T) und FREIHEITSGRAD 1 (R), auf denen die jeweiligen Einstellungen vorgenommen werden.

Die Translation

Die Angaben für die Translation sind etwas umfangreicher und mit der linken Schaltfläche ANFANGSBEDINGUNGEN BEARBEITEN vorzunehmen.

Die POSITION der Ruhelage, an der die Bewegung beginnen soll, befindet sich bei -130 MM und soll dort auch festgeschrieben werden. Ermittelt wird diese Stellung durch Verschieben der Buchse und Ablesen des Wertes in diesem Feld.



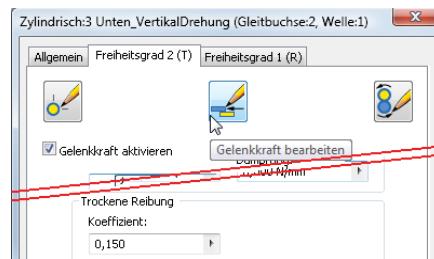
Die DREHZAHL bleibt auf BERECHNET stehen, da sie vom Antrieb abhängig ist.

Interessant sind die Eingaben der Grenzen. Beide Extreme, MIN. und MAX., sind von Bedeutung. Der minimale Wert der Position darf nicht unter -130MM liegen, da sich sonst eine Durchdringung mit der Lagerbuchse ergeben würde.



HINWEIS: Richtiger wäre, an dieser Stelle ein Kontaktgelenk (3D-Kontakt) zwischen der unteren Lagerbuchse und der Gleitbuchse zu platzieren und damit eine tatsächliche mechanische Grenze zu installieren. Dies würde allerdings den Rechenaufwand für die Simulation deutlich erhöhen, weswegen mit dieser Grenzangabe ein Kompromiss eingegangen wird.

Der Kompromiss besteht in der Angabe einer sehr hohen STEIFIGKEIT von 1000 N/MM für diese Position, die einem mechanischen Kontakt gleichkommt. Die DÄMPFUNG von 0,1 NS/MM wird hinzugefügt.



Der maximale Wert wird mit 80 MM einge tragen und entspricht in etwa der Streckstellung der Gelenkstangen. Die STEIFIGKEIT dieser Position ist mit 100 N/MM deutlich geringer, dafür sorgt an dieser Position eine relativ hohe DÄMPFUNG von 10 NS/MM für eine weiche Einnahme der Endstellung.

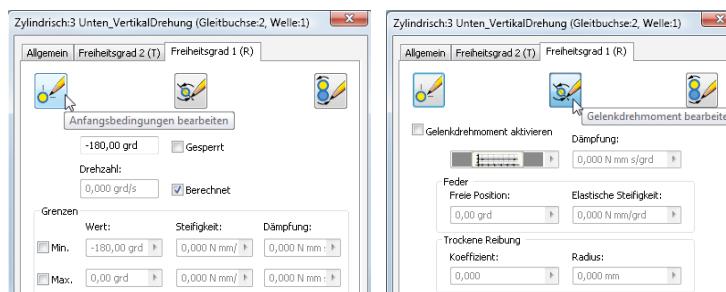
Mit der mittleren Schaltfläche GELENKKRAFT BEARBEITEN wird die Einstellung

GELENKKRAFT AKTIVIEREN vorgenommen, damit ein Reibwert für die Vertikalbewegung eingegeben werden kann. Der KOEFFIZIENT von 0,15 sollte einigermaßen realistisch dafür sein.

Damit ist die Definition der Translationsbewegung der unteren Gleitbuchse abgeschlossen.

18.5.1 Die Rotation

Die ANFANGSBEDINGUNGEN der Rotation sind ohne Belang. Die Anfangsposition in Grad ist unerheblich, und die Drehzahl wird natürlich berechnet.



Am GELENKDREHMOMENT gibt es nicht viel zu tun. Die Auswahl GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN kann deaktiviert bleiben, da sich die untere Gleitbuchse zusammen mit der Welle dreht und keine Rotationsreibung auftritt.

■ 18.6 Andere Gelenke mit Reibwerten versehen

Die folgenden Schritte entsprechen einer kleinen Fleißarbeit, sollten aber der realistischen Bedingungen wegen trotzdem durchlaufen werden.

In allen Gelenken, in denen eine Bewegung stattfindet, tritt auch Reibung auf. Dies betrifft

- die Rotationen in den beiden Lagerbuchsen und
- alle Rotationen in allen Bolzenverbindungen
- sowie die Vertikalbewegung des unteren Gewindestifts in der Wellennut.

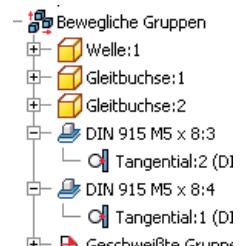
Der Vorgang ist fast überall derselbe: EIGENSCHAFTEN des betroffenen Gelenks aufrufen, den richtigen FREIHEITSGRAD wählen, die Schaltfläche GELENKDREHMOMENT (Rotation) oder GELENKKRAFT (Translation) betätigen, das GELENKDREHMOMENT oder die GELENKKRAFT aktivieren und die Daten für die TROCKENE REIBUNG eingeben. Bei Rotationsgelenken ist jeweils noch der richtige RADIUS einzutragen.

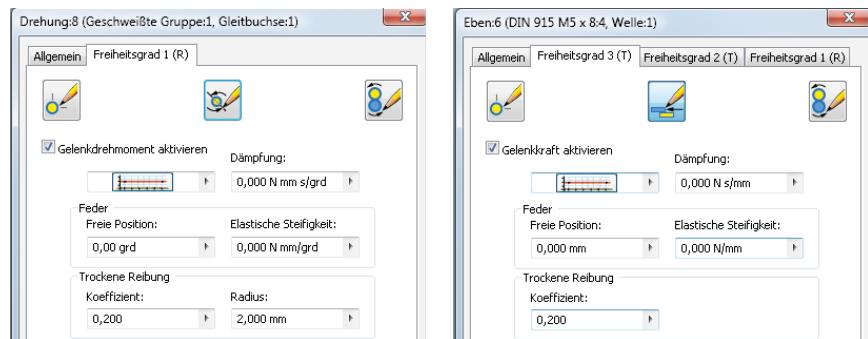
Beispielhaft zeigen die folgenden zwei Abbildungen den Vorgang für die Rotation einer Bolzenverbindung, die in einer GESCHWEISSTEN GRUPPE steckt, mit dem Reibwert 0,2 sowie einem Radius von 2 MM (Bolzendurchmesser 4 mm) und der Translation des unteren Gewindestiftes in der Wellennut.



HINWEIS: Bei der Translation des Gewindestiftes in der Wellennut ist Folgendes zu beachten: Der Inventor hat offensichtlich ein Problem bei der Umsetzung der Abhängigkeit *Tangential* (Gewindestiftzapfen an Wellennutseite) zusammen mit der Winkelabhängigkeit am Gewindestift, die eigentlich die Rotation verhindert. Zu sehen ist das Problem auch daran, dass sich die tangentiale Abhängigkeit in den BEWEGLICHEN GRUPPEN befindet und nicht in ein Gelenk umgewandelt wurde.

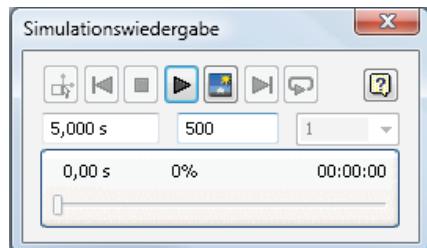
Anstelle des einen Freiheitsgrades der vertikalen Translation in der Wellennut vergibt der Inventor drei Freiheitsgrade (zweimal T, einmal R). Der richtige Freiheitsgrad ist durch die Anzeige des Pfeils in der Baugruppe bei der Registerkartenauswahl zu wählen. Im Beispiel ist es der Freiheitsgrad 3 (T).





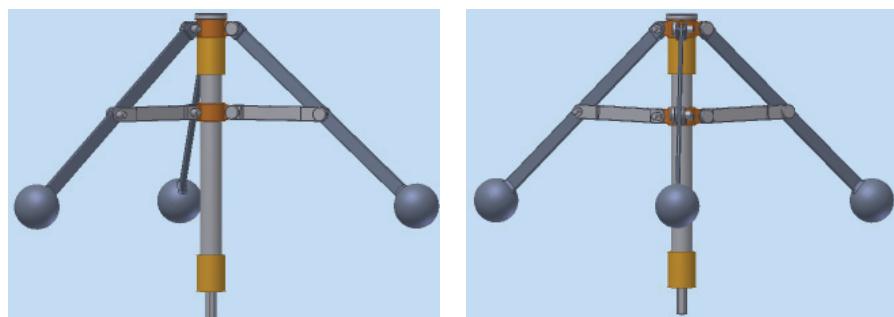
Sind alle Gelenke entsprechend bearbeitet, dann steht einer Bewegungssimulation nichts mehr im Weg.

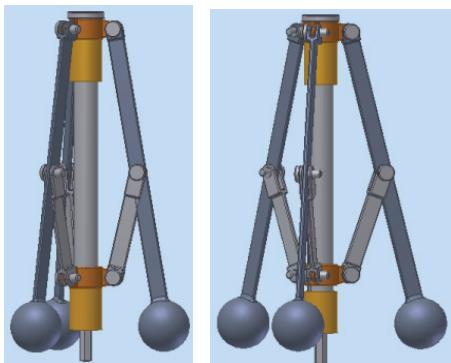
■ 18.7 Die Simulation



Wie vorher schon erwähnt wird die Dauer der Simulation auf 5 SEKUNDEN eingestellt, da die Antriebsdauer im Eingabediagramm zwei Sekunden beträgt und damit drei Sekunden für den Auslauf zur Verfügung stehen.

Mit einem beherzten Klick auf den Play-Button startet der Fliehkraftregler und führt seine Funktion (fast) tadellos aus.





Die AVI-Animation auf der DVD zeigt die Bewegung sehr realitätsnah.

Ein kleines Problem, das möglicherweise zu erwarten war, sind Schwingungen in den Extremlagen. Sowohl in der oberen Maximalstellung als auch nach dem Auslaufen in der untersten Stellung treten unschöne Schwingungen auf.

Durch eine erhöhte Dämpfung bzw. durch niedrigere Steifigkeiten wäre dieses Thema durchaus in den Griff zu bekommen.



Animation auf DVD

Inwieweit dies aber einer praktischen Umsetzung entsprechen würde, ist fraglich. Der bessere Weg ist der Einbau einer schwachen Spiralfeder, die das System etwas auf Vorspannung hält. Damit sollten die Schwingungen unter Kontrolle zu bekommen sein.

Bevor es so weit ist, soll aber zuerst das Ausgabediagramm vorgestellt und untersucht werden.

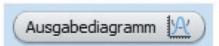
■ 18.8 Das Ausgabediagramm

Das Ausgabediagramm ähnelt dem schon besprochenen Eingabediagramm. Sein Fenster besteht aus drei Bereichen:

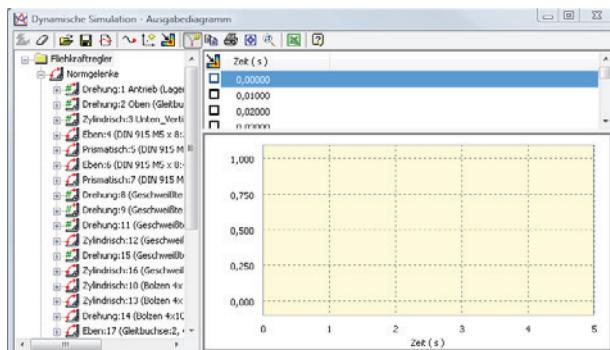
- dem Objektbrowser, in dem alle Gelenke, Benutzervariablen und Spuren mit ihren physikalischen und kinematischen Eigenschaften aufgelistet sind,
- dem Zeitschrittbereich, in dem die ausgewählten Daten millisekundengenau abgelesen und z.B. nach Excel exportiert werden können, und
- dem Diagrammbereich, in dem die ausgewählten Daten über der Zeitachse grafisch zur Anzeige gebracht werden können.

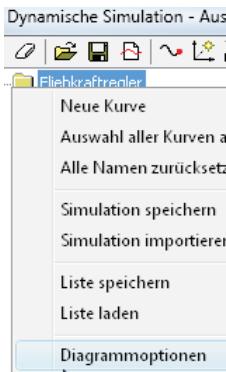


Ausgabe-
diagramm



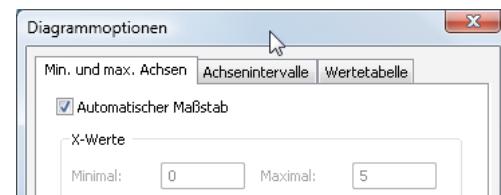
Ausgabediagramm



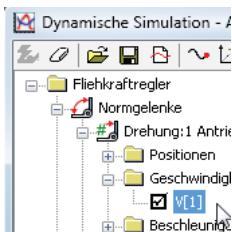


Die Daten im Ausgabediagramm stehen erst dann zur Verfügung, wenn eine Simulation durchlaufen wurde.

Jede stattgefundenen Simulation kann als *.iaa-Datei gespeichert werden. So können mehrere Simulationen miteinander verglichen und optimiert werden. Zum Vergleichen der unterschiedlichen Simulationen kann das Fenster auch mehrfach geöffnet werden.



Die Diagrammoptionen bieten Einstellungsmöglichkeiten für die Diagrammdarstellung der Diagrammachsen und der Wertetabelle. Sie sind über das Kontextmenü erreichbar.



18.8.1 Rotationsgeschwindigkeit interpretieren

Im Ausgabediagramm wird das Gelenk **Drehung:1**, über das der Antrieb definiert ist, selektiert und die **Geschwindigkeit** zur Anzeige gebracht.

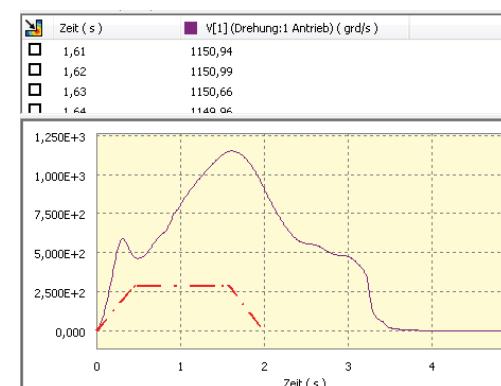
Zur Verdeutlichung des Geschwindigkeits- bzw. Drehzahlverlaufes wurde klein und rot der **Verlauf des Antriebsmomentes** von Hand eingezeichnet. Leider kann das Diagramm diese Größe nicht selbst darstellen, da es nur ein Ausgabediagramm ist.

In der Wertetabelle kann man ablesen, dass das Drehzahlmaximum nach 1,62 Sekunden mit 1150,99 grd/s erreicht wurde, also kurz nachdem das Antriebsmoment schon wieder kleiner wurde.

Das Diagramm zeigt folgenden Verlauf: Der erste steile Anstieg betrifft den Anstieg des Antriebsmoments und zeigt damit eine hohe Beschleunigung, die durch den Steigungswinkel der Anfangskurve dokumentiert wird.

Der anschließende kleine Überschwingen kommt durch die beschleunigte träge Masse der Gewichte zustande, die als Gegenreaktion auch die kleine Unterschwingung begründet.

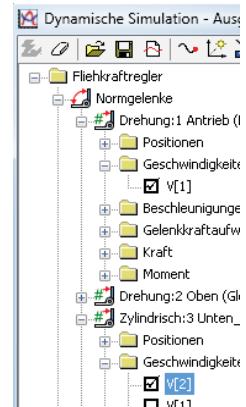
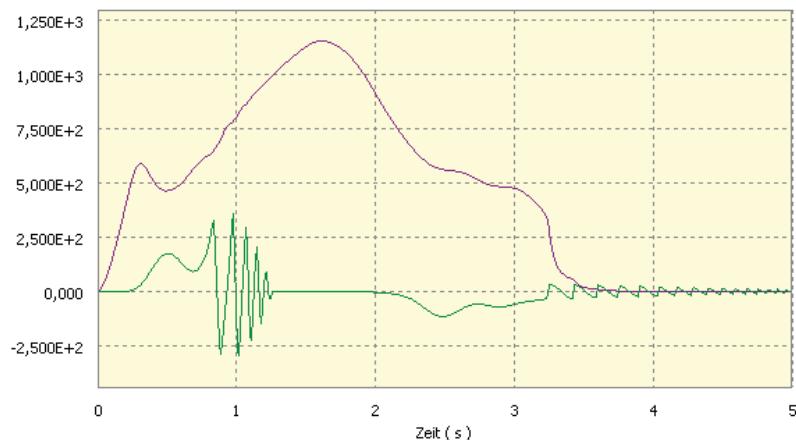
Während das Antriebsmoment konstant bleibt, steigt die Drehzahl immer weiter bis zu ihrem Maximum an und fällt nach dem Abklingen des Antriebs durch die Gelenkviereck-geometrie bis auf den Wert null ab.



18.8.2 Schwingungen untersuchen

Die festgestellten Schwingungen lassen sich in der Drehzahlbetrachtung nicht erkennen, diese müssen über die vertikale Bewegung der unteren Gleitbuchse zu sehen sein.

Wir lassen die Drehzahlkurve stehen und wählen zusätzlich im Browser das **zylindrische Gelenk mit der unteren Gleitbuchse** und dort die **Geschwindigkeit** aus.



Die grüne Kurve zeigt die Vertikalgeschwindigkeit der unteren Gleitbuchse, die im ersten Teil analog zur Drehzahl ansteigt. Dann, nach einer knappen Sekunde, beginnt eine erhebliche Schwingung, die sich nach etwa 1,25 Sekunden beruhigt.

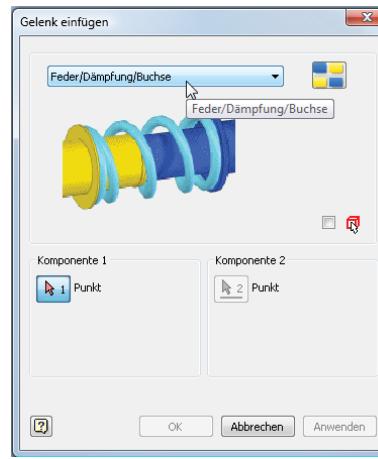
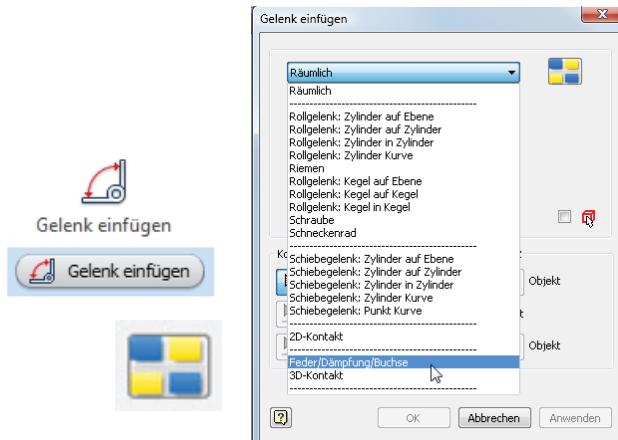
Nach zwei Sekunden, nachdem das Antriebsmoment weggefallen ist, wird die Geschwindigkeit negativ, die Richtung kehrt sich um, bis sie am Ende, wenn die untere Gleitbuchse auf der fixierten Lagerbuchse aufsetzt, wieder zu schwingen, diesmal mehr zu hoppersn (Sägezahn), beginnt.

■ 18.9 Feder einfügen

Leider ist es nicht möglich, im Inventor problemlos, d.h. ohne Tricks, eine wirklich funktionierende Feder als Baugruppenkomponente zu erstellen.



HINWEIS: In der dynamischen Simulation ist das zwar möglich, und die Feder wird auch naturgetreu dargestellt, aber leider ist sie nur ein Gelenk mit der entsprechenden Funktion und kein Bauteil der Baugruppe. In einer Stückliste wird sie beispielsweise fehlen, bei Gewichts- bzw. Masseberechnungen ebenfalls.



Als zweites Element, die KOMPONENTE 2, wählen Sie die obere Lagerbuchse aus, und selektieren dort ebenfalls den Innendurchmesser als Position für die Einfügung.

Das war's. Der Rest passiert erst mal von selbst, wie man sieht.

Die eingefügte Spiralfeder sieht zwar etwas unformig aus, und die Größenverhältnisse passen nicht ganz so gut zu den angegebenen Durchmessern, aber

Ein Punkt für die Wunschliste der nächsten Inventor-Version wäre: Die Feder aus der dynamischen Simulation in ein funktionierendes Bauteil umwandeln zu können.

Mit der Funktion GELENK EINFÜGEN wird das entsprechende Dialogfenster aufgerufen, in dem aus dem Abrollmenü der Eintrag FEDER/DÄMPFER/BUCHSE ausgewählt wird.

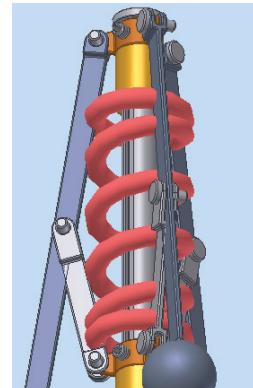
Alternativ ginge das auch über den blau-gelben Schachbrett-Button, Vorteile bringt das aber keine.

Die drei Begriffe **Feder**, **Dämpfer** und **Buchse** sind deswegen in einem Gelenkauftrag zusammengefasst, weil im weiteren Verlauf zwischen diesen Einbauten unterschieden werden kann.

In unserem Fall soll nur eine einfache Spiralfeder zur Anwendung kommen. Die Einfügung der Feder geht sehr unproblematisch vonstatten. Wählen Sie die beiden KOMPONENTEN, die mit der Feder verbunden werden sollen bzw. zwischen denen sich die Federkraft etablieren soll, aus.

Zu beachten ist dabei lediglich, dass die Funktion die Eingabe eines Punktelementes erwartet.

Als KOMPONENTE 1 wählen Sie in unserem Fall die untere Gleitbuchse und an dieser der Innendurchmesser aus. Bei der Selektion eines Kreises wird der Mittelpunkt als Positionsangabe für die Einfügung interpretiert.



immerhin, die Feder existiert, und sie auf die richtigen Dimensionen zu bringen, geht schnell und leicht.

Ein Blick in den Objektbrowser unter der ebenfalls neu entstandenen Kategorie KRAFTVERBINDUNGEN zeigt auch dort die eingefügte Feder als FEDER/DÄMPFUNG/BUCHSE:1 an.

Ein zweiter Blick auf das Kontextmenü der Feder in Objektbrowser zeigt den Eintrag EIGENSCHAFTEN, über den das folgende Einstellungsfenster für diese Gelenkverbindung aufgerufen werden kann.

Die STEIFIGKEIT und die DÄMPFUNG können aus der Vorgabe übernommen werden. Sollten sie nicht in den angegebenen Größen angezeigt werden, so sind sie wie abgebildet einzutragen.

Im mittleren Bereich des Fensters ist die SPIRALFEDER bereits eingetragen. Ein Blick auf die Wahlmöglichkeiten zeigt an dieser Stelle auch die Begründung für die eigenartige Benennung dieses Gelenks.

Die FREIE LÄNGE ist richtig eingetragen, kann aber mit der kleinen Schaltfläche rechts daneben aktualisiert werden.

Die weiteren geometrischen Eigenschaften müssen angepasst werden.

Die Anzahl der FACETTEN steuert die optische Darstellung der Feder, d.h. die Genauigkeit, mit der die Rundheit der Spiralen angezeigt wird. Sie kann auf 6 stehen bleiben.

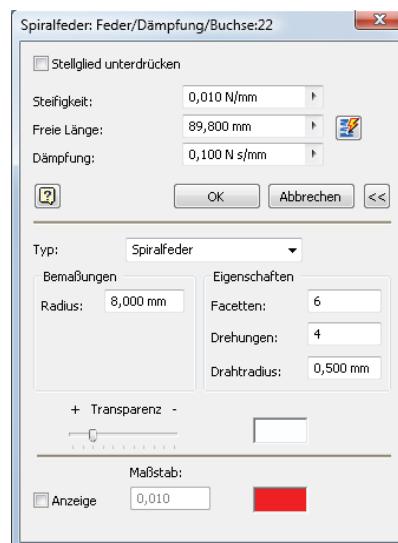
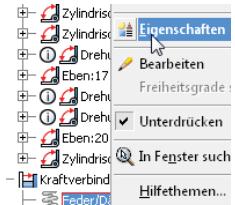
Der RADIUS ergibt sich aus dem Wellen- plus Drahtdurchmesser zuzüglich des Spiels zwischen Feder-Innendurchmesser und Welle und wird beispielsweise mit 8 MM einge tragen.

Die Anzahl der DREHUNGEN (mit denen der Übersetzer die Anzahl der federnden Windungen meinte) ist 4 und kann ebenfalls stehen bleiben oder verändert werden. Änderungen betreffen ohnehin nur die Optik der Darstellung.

Der DRAHTRADIUS wird mit 0,5 MM angegeben, womit sich eine akzeptable Einstellung ergibt.

Die geometrischen Einstellungen sind alle relativ unerheblich, da ja die Steifigkeit und die Dämpfung extra angegeben wurden.

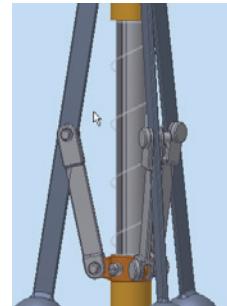
Die folgende Übersicht zeigt die Erklärungen des Inventor-Online-Handbuchs zu den Begriffen im Dialogfenster:



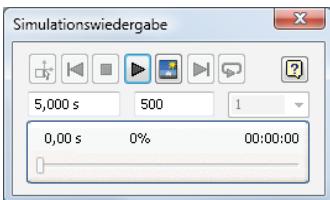
Bereich	Begriff	Erklärung
Hauptfenster		
	Steifigkeit	Legt die Steifigkeit von Federn fest. Auf die beiden Zuordnungspunkte wird eine Aktions-/Rückstoßkraft ausgeübt. Die Formel für die Kraft lautet: $F = K * X$, wobei F die ausgeübte Kraft darstellt und K die Steifigkeit angibt. X ist die Verlängerung der Feder (d. h. Länge abzüglich freier Länge ΔL).
	Freie Länge	Gibt die Länge an, bei der die Feder keine Kraft ausübt. In der Standardeinstellung entspricht die freie Länge der Strecke zwischen den beiden Zuordnungspunkten zum Zeitpunkt der Konstruktion.
		Aktualisiert die freie Länge auf die aktuelle Strecke zwischen den beiden Zuordnungspunkten
	Dämpfung	Legt die Federdämpfung fest. Auf die beiden Zuordnungspunkte wird eine Aktions-/Rückstoßkraft ausgeübt. Die Formel für die Kraft lautet: $F = C * V$, wobei F die ausgeübte Kraft darstellt, C die Dämpfung und V die relative Geschwindigkeit zwischen den beiden Zuordnungspunkten ist.
Weitere Optionen		
	Typ	Legt den Typ der Feder-Dämpfung-Buchse-Verbindung fest. Diese Auswahl legt fest, welche Parameter verfügbar sind. 
Bemaßungen		
	Radius	Legt den Radius der Spiralfeder, Feder oder Federdämpfung fest
		Für Federdämpfungen ist eine weitere Bemaßung verfügbar.
	Länge	Legt die Länge der Federdämpfung fest
Eigenschaften		
	Facetten	Legt die Facettenanzahl der Spiralfeder, Feder oder Federdämpfung fest
	Windungen	Legt die Anzahl von Windungen der Spiralfeder, Feder oder Federdämpfung fest
	Drahtradius	Legt den Radius für den Draht fest, aus dem die Spiralfeder bzw. die Federdämpfung hergestellt wird

Bereich	Begriff	Erklärung
	Transparenz	Legt die transparente Darstellung der Feder fest (+ = unsichtbar)
	Anzeige	Gelenkkraftvektor

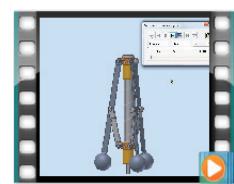
Die aufgrund der angegebenen Daten eingefügte bzw. dargestellte Feder, die zu ca. $\frac{3}{4}$ transparent eingestellt wurde, macht einen recht akzeptablen Eindruck.



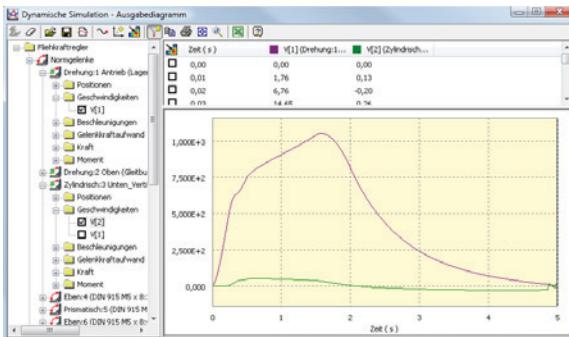
■ 18.10 Simulation mit eingebauter Feder



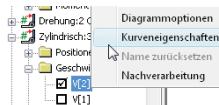
Die Simulation der Bewegung mit der eingebauten Feder verläuft sehr zufriedenstellend. Das Ausgabediagramm zeigt die beiden Kurven wie vorher, die Geschwindigkeit der Drehung (Drehzahl) des Antriebes und die vertikale Gleitgeschwindigkeit der unteren Gleitbuchse. Die Schwingungen sind fast vollständig verschwunden.



Animation auf der DVD



■ 18.11 Kurven im Ausgabediagramm bearbeiten

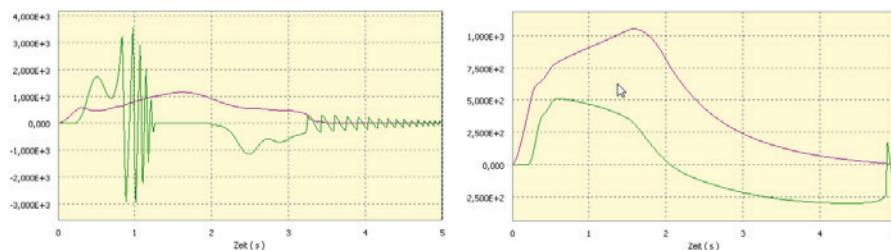
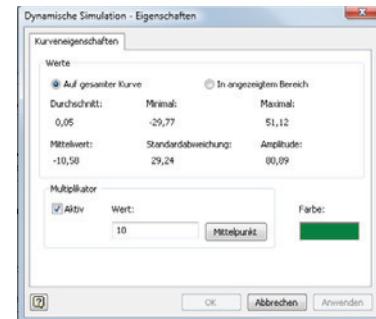


Die Darstellung der Verlaufskurven im Ausgabediagramm kann über den Eintrag im Kontextmenü **KURVENEIGENSCHAFTEN** beeinflusst werden.

Da im Diagramm nur eine Ordinatenachse mit einem Maßstab angezeigt wird, werden beide Geschwindigkeitskurven im selben Maßstab wiedergegeben. Die höhere der Geschwindigkeitskurven bestimmt die Darstellung. Die vertikale Gleitgeschwindigkeitskurve verläuft deswegen sehr flach.

Im Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** der grünen Kurve stellen wir deswegen den **MULTIPLIKATOR** auf aktiv und statten ihn mit dem **WERT** 10 aus.

Die beiden folgenden Vorher-Nachher-Bilder zeigen links den Geschwindigkeitsverlauf ohne und rechts mit eingebauter Feder. Im linken Bild ist die violette Kurve deswegen so flach, weil die grüne Kurve mit dem Multiplikator 10 so heftige Ausschläge zeigt.



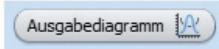
Der Effekt kann deutlicher kaum sein. Nur im letzten Teil der grünen Kurve finden noch einige Hopser statt, an der Stelle, an der die untere Gleitbuchse vor dem Stillstand auf der unteren Lagerbuchse aufsetzt.

■ 18.12 Export nach FEM und FE-Analyse von Bauteilen

Der Übergang von der dynamischen zur Belastungsanalyse erfolgt ebenfalls über das Ausgabediagramm.



Ausgabediagramm



18.12.1 Die Vorbereitung

Um für die Belastungsanalyse einen Moment hoher Belastung untersuchen zu können, ist es notwendig:

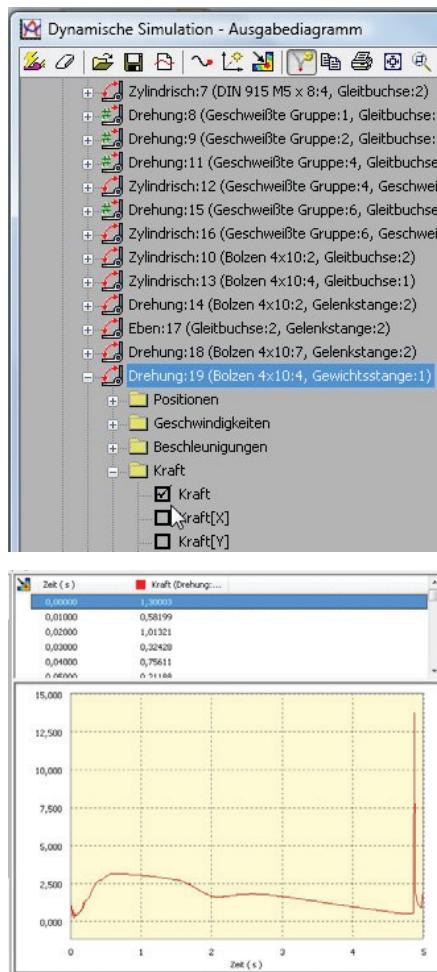
- erstens eine Bewegungssimulation durchlaufen zu lassen und
- zweitens eine Belastungskurve im Ausgabediagramm zur Anzeige zu bringen.

Der erste Schritt wurde bereits erledigt. Im zweiten Schritt wählen Sie beispielhaft das Gelenk DREHUNG:19 zwischen einem Bolzen und einer Gewichtsstange aus.

Für die Anzeige eines Kraftverlaufes versetzen Sie im Ordner KRAFT den Eintrag KRAFT, der die am Gelenk wirkende Gesamtkraft betrifft, mit einem Haken.

Das entsprechende Diagramm zeigt den Kraftverlauf über der Simulationszeit von fünf Sekunden. Auffallend ist die Spitze im Kurvenverlauf kurz vor dem Ende der Simulation, deren Größe bis knapp an die 15 N geht.

Von den Geschwindigkeitsdiagrammen her wissen wir, dass am Ende der Simulation ein Aufsetzen der unteren Gleitbuchse auf der unteren Lagerbuchse stattfand. Dieser erste Aufsetzer verursacht eine Kraft- bzw. Spannungsspitze, die in der FE-Analyse genauer untersucht werden soll.

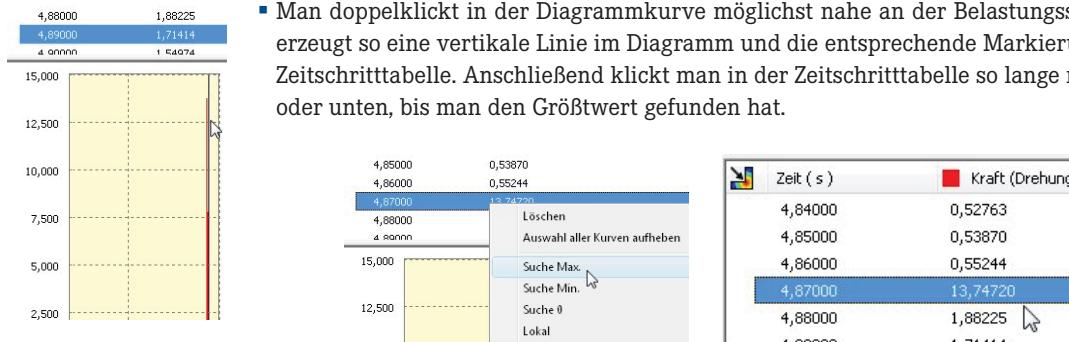


18.12.2 Zeitschritt auswählen

Wird kein Zeitschritt ausgewählt, dann wird der FEM-Export mit dem ersten Zeitschritt durchgeführt, der für unsere Untersuchung ungeeignet ist.

Um einen oder mehrere Zeitschritte auszuwählen, gibt es zwei Möglichkeiten:

- Man doppelklickt in der Diagrammkurve möglichst nahe an der Belastungsspitze und erzeugt so eine vertikale Linie im Diagramm und die entsprechende Markierung in der Zeitschritttabelle. Anschließend klickt man in der Zeitschritttabelle so lange nach oben oder unten, bis man den Größtwert gefunden hat.

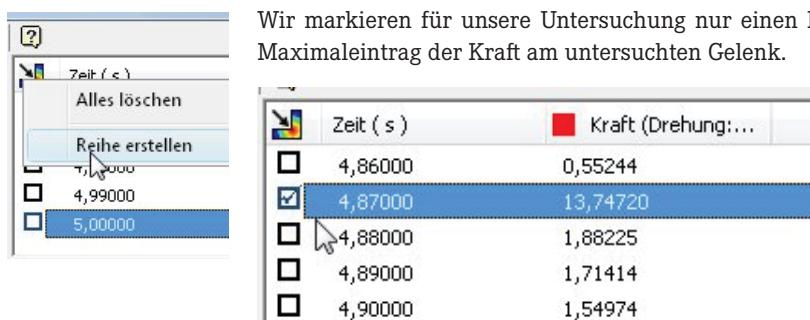


- Man wählt im Kontextmenü eines beliebigen Zeitschrittes in der Zeitschritttabelle den Eintrag **SUCHE MAX.** und freut sich darüber, dass der Inventor viel schneller ist als man selbst.

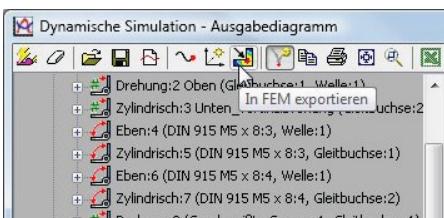
In beiden Fällen stößt man in unserem Beispiel beim Eintrag am Zeitschritt 4,87 Sekunden auf die Kraft 13,75 N.

Möchte man mehrere Zeitschritte exportieren, dann ist es möglich, über das Kontextmenü des FEM-Icons in der Zeitschritttabelle die Funktion **REIHE ERSTELLEN** auszuwählen. Über die Auswahlkästchen können alle Zeitschritte zur Untersuchung selektiert werden.

Wir markieren für unsere Untersuchung nur einen Eintrag, und zwar den gefundenen Maximaleintrag der Kraft am untersuchten Gelenk.

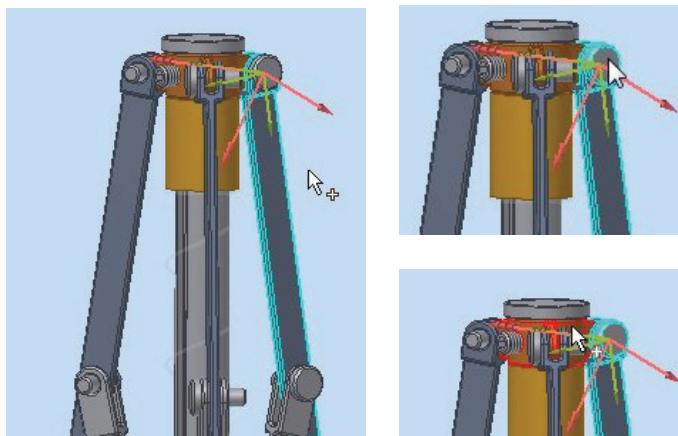


18.12.3 Bauteile zur FE-Analyse auswählen



Um den Export dieser Daten vorzubereiten, ist jetzt der Punkt gekommen, an dem man das entsprechende Symbol IN FEM EXPORTIEREN in der Symbolleiste des Ausgabediagramms betätigt.

Sobald dies geschehen ist, erscheint das Dialogfenster zur Auswahl der zu exportierenden Bauteile. Die zu untersuchenden Bauteile werden durch Anklicken selektiert.



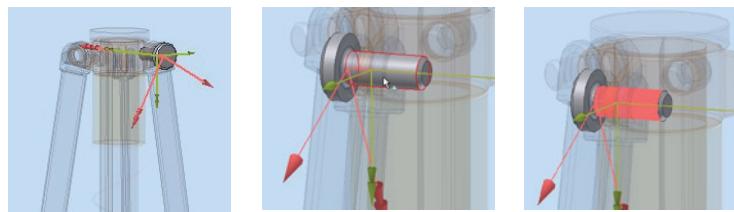
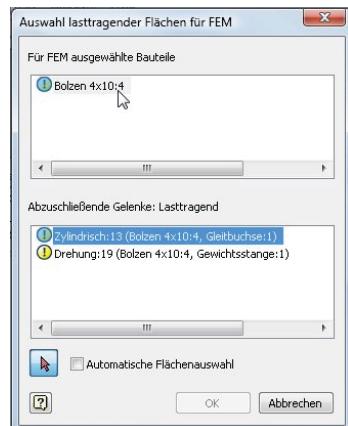
Untersucht werden sollen der Gewichtsarm, der Bolzen und die obere Gleitbuchse.

Bereits während der im Abschnitt 18.3.1 beschriebenen Überbestimmung von Gelenken wurde auf mögliche und teilweise nicht zu verhindern Warnmeldungen hingewiesen.

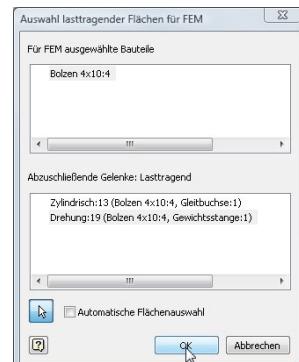
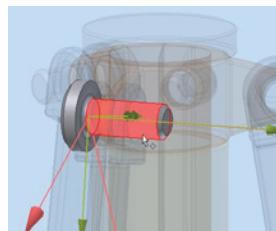
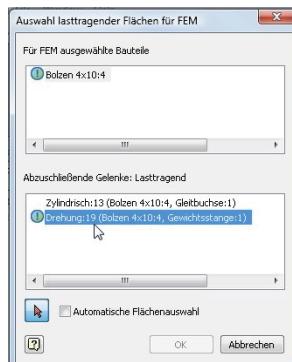
Auch jetzt erscheint, wenn ein vermeintlich überbestimmtes Bauteil selektiert wurde, die folgende Meldung.



18.12.4 Überbestimmte Bauteile heilen



Wurde die gewählte lasttragende Fläche akzeptiert, dann verschwindet das gelbe Ausrufezeichen neben dem Eintrag.



Dieser Vorgang muss so oft mit den jeweiligen Einträgen durchgeführt werden, bis alle gelben Ausrufezeichen eliminiert sind.

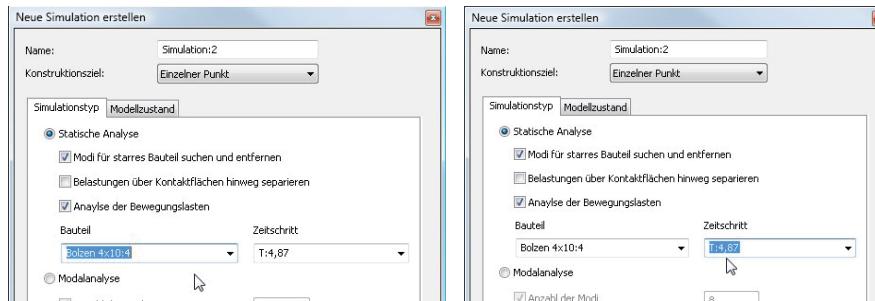
18.12.5 In die Belastungsanalyse wechseln

Die Vorbereitung des Exportes für die FE-Analyse ist jetzt abgeschlossen.

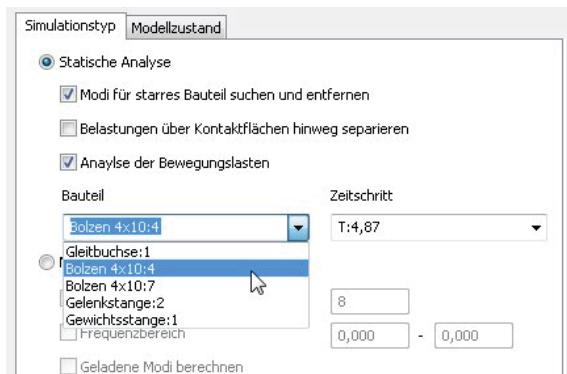
Verlassen Sie nun die dynamische Simulation und rufen Sie über die Registerkarte UMGEBUNG die BELASTUNGSANALYSE auf.

Erstellen Sie eine NEUE SIMULATION bzw. bearbeiten Sie die SIMULATIONSEIGENSCHAFTEN einer vorhandenen Simulation.

Im ersten Schritt treffen Sie im entsprechenden Dialogfenster die zu simulierende Auswahl.



Die wichtigste Einstellung ist die Aktivierung der ANALYSE DER BEWEGUNGSDATEN. Erst dann erscheinen die Abrollfelder für die Auswahl eines BAUTEILs und des entsprechenden ZEITSCHRITTES.

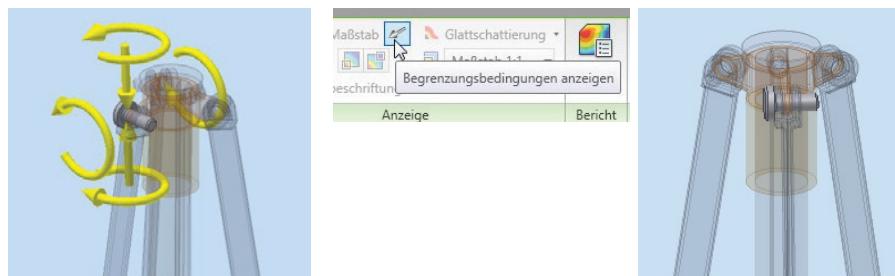


Für die erste Belastungsanalyse wird der BOLZEN 4X10:4 ausgewählt.

Hätten wir im Ausgabediagramm der dynamischen Simulation mehrere Zeitschritte markiert, dann würden diese hier zur Auswahl stehen. Da nur ein Zeitschritt exportiert wur-

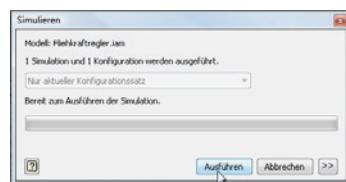
de, ist dieser schon in das entsprechende Abrollfeld eingetragen. Untersucht wird also die Belastung des Bolzens im Zeitschritt 4,87 SEKUNDEN, an dem der Aufsetzer und damit der Belastungsstoß erfolgen.

Wird das Eigenschaftsdialogfenster mit OK verlassen, dann wird der Bolzen optisch hervorgehoben dargestellt, bzw. alle anderen Bauteile werden abgeblendet.



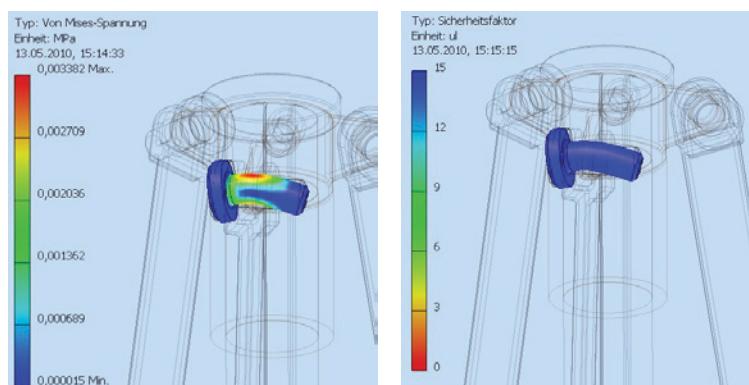
Entsprechend der Vorgabe werden alle auf das Bauteil einwirkenden Lasten mit gelben Pfeilen dargestellt. Mitunter kann das recht hilfreich sein, manchmal sieht man jedoch das Bauteil vor lauter Lasten nicht mehr. Der Button BEGRENZUNGSBEDINGUNGEN ANZEIGEN in der Funktionsgruppe ANZEIGE schaltet die Anzeige der Lasten ein und aus.

18.12.6 Die Belastungsanalysen



Jetzt kann sofort die Belastungsanalyse über die Schaltfläche SIMULIEREN gestartet werden. Im Dialogfenster wird AUSFÜHREN geklickt, und nach einer kurzen Zeit gibt's das Ergebnis.

Die Darstellung ist dramatischer anzusehen als die Spannungswerte dies vermitteln. Der Bolzen wird natürlich verformt, jedoch in einem Spannungsbereich bis 0,003 MPa, also vernachlässigbar gering.

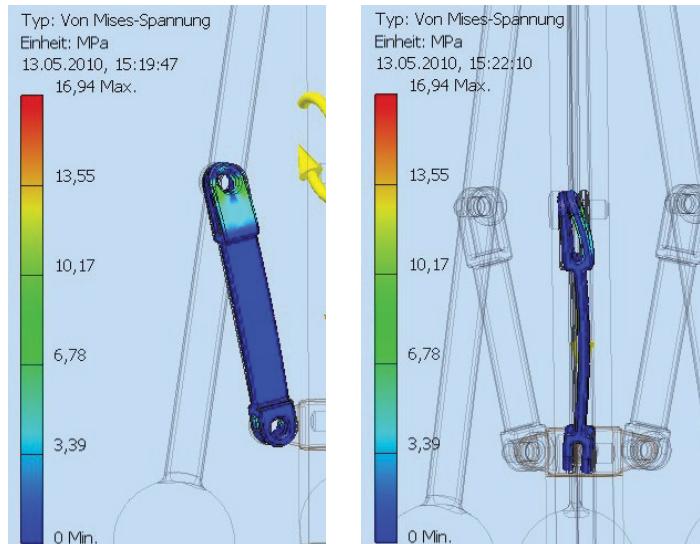
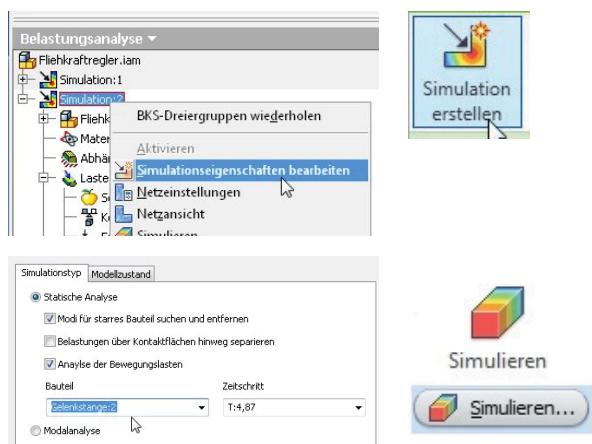


Dementsprechend hoch ist auch der Sicherheitsfaktor, d.h., der Bolzen ist nicht im Geringsten gefährdet.

Die nächste Simulation betrifft die Gelenkstange.

Mit dem Button **SIMULATION ERSTELLEN** kann eine neue Simulation erzeugt werden, wobei die vorhergehende erhalten bleibt. Per Kontextmenüauswahl kann die aktuelle Simulation auch mit **SIMULATIONSEIGENSCHAFTEN BEARBEITEN** überschrieben werden.

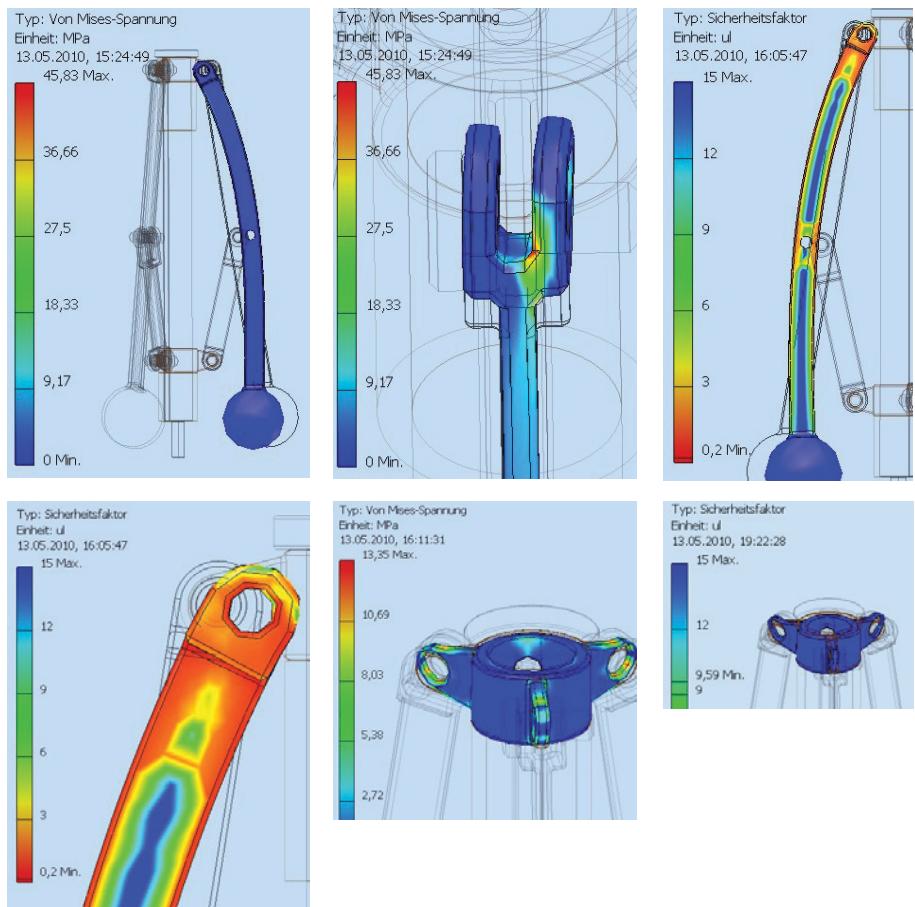
Im Dialogfenster wählen Sie nun als Bauteil die **GELENKSTANGE** aus, und damit beginnt das Procedere von vorne. Die Schaltfläche **SIMULIEREN** und der Klick auf **AUSFÜHREN** im Dialogfenster starten die Belastungsanalyse für die Gelenkstange.



Auch die Gelenkstange, in der zwar höhere Spannungen auftreten als im Bolzen, ist an keiner Stelle gefährdet.

Die dritte Simulation, die der Gewichtsstange, bringt etwas Interessanteres zutage.

Die Verformungsart beim Aufsetzen war zu erwarten, die Spannungen liegen an der oberen Gelenkstelle aber immerhin bei ca. 45 MPa.



Der Werkstoff der Gewichtsstange ist Blei. Dieses Material verformt sich auch bei niedrigen Spannungen schon recht bald plastisch. Der Sicherheitsfaktor zeigt deutlich, dass der minimale Wert bei 0,2 liegt, also nicht tolerierbar ist, und eine plastische Verformung stattfindet. Hier müsste dringend nachgearbeitet werden.

Die vierte Simulation in der oberen Gleitbuchse verläuft dagegen wieder völlig unkritisch. Der Sicherheitsfaktor zeigt hier einen minimalen Wert von 9,59 an.

18.12.7 Fazit

Um diesen kleinen Mechanismus zu optimieren, fängt die eigentliche Arbeit also genau an dieser Stelle erst an. Es müssten weitere dynamische Simulationen mit unterschiedlichen Drehzahlen und vor allem mit unterschiedlichen Drehzahlverläufen (siehe Eingabediagramm des Antriebs) durchgeführt werden.

Für all diese Simulationen müssen FE-Analysen erfolgen. Die Auswertung der Spannungen, Verformungen und Sicherheitsfaktoren sollte mit verschiedenen Werkstoffen erfolgen, sodass schlussendlich an die Optimierung der geometrischen Eigenschaften der Bauteile gegangen werden kann.

Auch diese Optimierung der Formgebung wird immer wieder ein Hin und Her zwischen den belastungs- und werkstoffmäßigen Optima und den fertigungstechnischen bzw. wirtschaftlichen Optima sein.

Dieser Prozess, der hier in diesem Buch nur recht grob angerissen wurde, stellt das eigentliche Prototyping, das in der Einleitung des Buches kurz angesprochen wurde, dar.

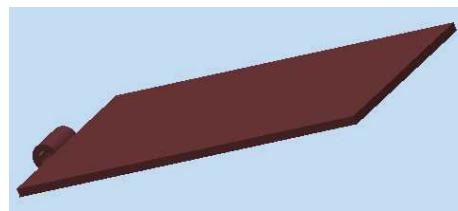
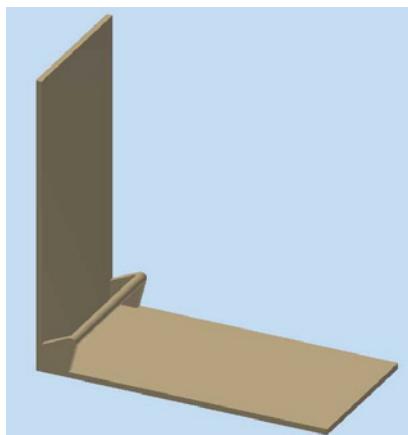
Die folgende kleine Übung könnte einerseits als Spielerei bezeichnet werden, bringt andererseits aber auch neue und interessante Elemente der dynamischen Simulation zur Sprache.

Ein Ball fällt auf eine schräg gestellte Unterlage, die im einen Fall gefedert und im anderen Fall starr ist. Durch die Schrägstellung fliegt der Ball zu einer senkrecht stehenden Wand und prallt von dort wieder ab.

■ 19.1 Die Bauteile und die Konstruktion

Auf der DVD zum Buch befindet sich die Baugruppendatei **Ballsprungbrett.iam**.

Die ganze stilisierte Vorrichtung besteht nur aus drei Teilen. Links ist der Winkel, der die Auflage und die senkrechte Wand zusammen mit der Scharnierstange darstellt, zu sehen. Rechts oben das Sprungbrett, auf dem der Ball auftrifft, und rechts unten der Ball.



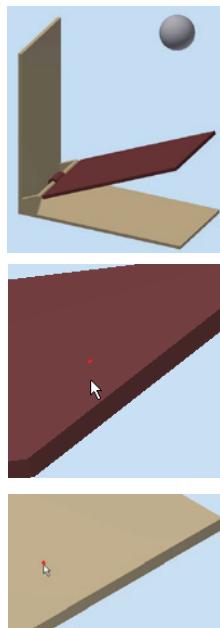
Ballsprungbrett.iam

Als Werkstoffe wurden für den Winkel **Stahl**, für das Sprungbrett **PVC** und für den Ball **Gummi/Silikon** ausgewählt. Bei der Werkstoffauswahl ging es in erster Linie um Gewichte, welche die entsprechenden Reaktionskräfte hervorrufen sollen.



HINWEIS: Wie schon in vorherigen Kapiteln erwähnt, ist der Inventor ein Starrkörpersystem, d.h., der Gummiball verformt sich auch beim Aufprall nicht.

Dieser Umstand kann nur durch eine entsprechend definierte Dämpfung bzw. Steifigkeit simuliert werden. Die Auswirkung der fehlenden Verformung verfälscht natürlich auch die Flugbahn des Balls, da lediglich eine unrealistische Punktberührung auf dem Sprungbrett und an der Wand simuliert wird.

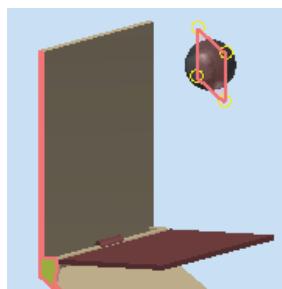


Die gesamte Konstruktion zeigt das Sprungbrett, das mit der Scharnierstange beweglich verbunden ist.

Eigentlich müsste sich zwischen der Bodenplatte und dem Sprungbrett eine Feder befinden, damit diese eine beschleunigende Wirkung beim Aufprall des Balls verursachen kann und das Sprungbrett in seiner Position hält. An dieser Stelle schlägt jedoch schon wieder das Starrkörpersystem zu. Eine Feder könnte zwar als Bauteil konstruiert werden, sie wäre jedoch in der dynamischen Simulation nicht verformbar, also unsinnig.

Alternativ wird in der Simulationsumgebung eine **Feder als Gelenk** zwischen der Bodenplatte und dem Sprungbrett eingefügt, die dann zwar leider kein Bauteil darstellt, dafür aber realistische federnde Eigenschaften aufweist.

Zum Zweck der Positionierung der Feder befinden sich sowohl in der Grundplatte als auch im Sprungbrett im vorderen Bereich je eine kleine Bohrung (siehe Pfeile), denn das Gelenk **FEDER/DÄMPFUNG/BUCHSE** benötigt zur Platzierung zwei Bauteile mit je einem Positionierungspunkt. Ein Bohrungskreis erfüllt diesen Zweck.



Im Objektbrowser der Baugruppe **BALLSPRUNGBRETT.IAM** ist zu sehen, dass der Winkel **BODEN&WAND:1** funktionsgemäß fixiert ist.

Die beiden anderen Bauteile **SPRUNGBRETT:1** und **BALL:1** wurden, mit entsprechenden Abhängigkeiten versehen, eingebaut.



Der Ball befindet sich schwebend über dem Sprungbrett und wurde lediglich mit einer seiner Ursprungsebenen **FLUCHTEND** zur Seitenebene des Winkels ausgerichtet. Diese Abhängigkeit wurde deswegen vergeben, damit der Ball nicht seitlich vom Sprungbrett hüpfen kann.



■ 19.2 Die Simulationsumgebung

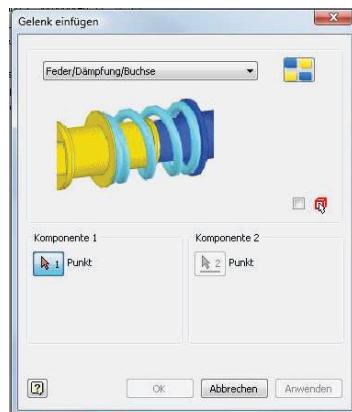
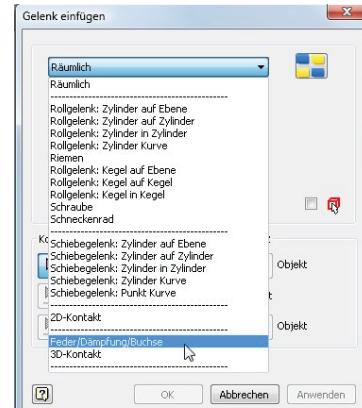
Ist die Baugruppe komplett, dann kann über die Registerkarte UMGEBUNG in die Arbeitsumgebung der DYNAMISCHEN SIMULATION gewechselt werden.



19.2.1 Feder einfügen

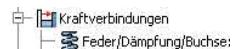
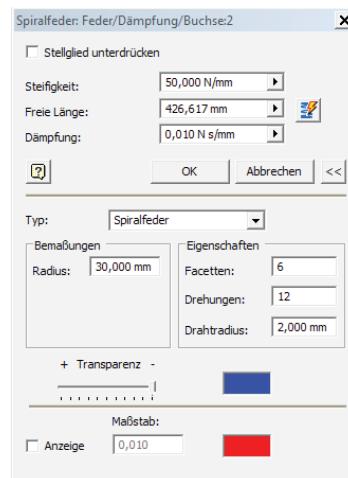
Die bereits erwähnte Feder soll im ersten Schritt eingefügt und definiert werden. Das grundsätzliche Vorgehen wurde bereits in der vorherigen Übung erklärt und läuft hier ganz ähnlich ab.

Über die Schaltfläche GELENK EINFÜGEN und das entsprechende Auswahlfenster wird das Gelenk FEDER/DÄMPFUNG/BUCHSE ausgewählt.



Die beiden Komponenten sind die Bodenplatte und das Sprungbrett, in die bereits in der Baugruppe zur Platzierung dieser Feder je eine Bohrung eingebracht wurde.

Diese Bohrungen werden für die KOMPONENTE 1 als PUNKT und für die KOMPONENTE 2 ebenfalls als PUNKT angegeben.



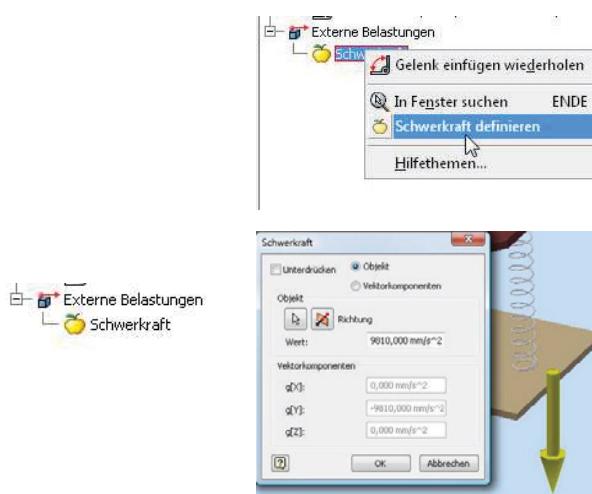
Die Feder wird mit einem Klick auf OK sofort erstellt, und im Objektbrowser erscheint im Ordner KRAFTVERBINDUNGEN der Eintrag FEDER/DÄMPFUNG/BUCHSE:1, über dessen Kontextmenü die EIGENSCHAFTEN dieses Gelenks aufgerufen werden können.



Die geometrischen Eigenschaften dienen nur der Optik und können beliebig verändert werden, sodass eine zur Baugruppe passende Feder angezeigt wird.

Während die **FREIE LÄNGE** automatisch berechnet wird, sind die Angaben zur **STEIFIGKEIT** und zur **DÄMPFUNG** diejenigen Parameter, welche die Federwirkung bestimmen. Mit diesen Werten kann experimentiert werden. Als Anhaltspunkt können die im abgebildeten Eigenschaftsfenster eingetragenen Werte übernommen werden.

19.2.2 Schwerkraft definieren



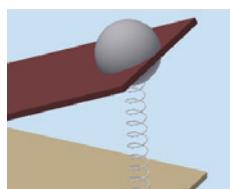
Damit der Ball nach unten fällt, muss natürlich eine Schwerkraft wirken. Auch das Verfahren zur Schwerkraftdefinition wurde in den vorherigen Übungen schon vorgestellt und wird hier nur kurz wiederholt.

Im Ordner **EXTERNE BELASTUNGEN** des Objektbrowsers wird im Kontextmenü der **SCHWERKRAFT** die Funktion **SCHWERKRAFT DEFINIEREN** aufgerufen.

Wird die Schwerkraft an einem **OBJEKT** ausgerichtet, dann muss dieses Bauteil ein fixiertes sein, ansonsten kann sie über die **VEKTORKOMPONENTEN** entsprechend dem Koordinatensystem ausgerichtet werden.

Wird die Definition mit **OK** bestätigt, dann wechselt der Schwerkraftapfel im Objektbrowser seine Farbe von Grau nach Gelb.

19.2.3 Der Ball benötigt Gelenke



Würde jetzt bereits die Simulation gestartet, dann fiele der Ball durch das Sprungbrett hindurch nach unten. Für den Ball existiert das Sprungbrett nicht, da er keinerlei Verbindung bzw. Bezug zu diesem Bauteil hat.

Dass die dynamische Simulation die Durchdringung von Materialien einfach so hinnimmt, ist ein anderes Kapitel.



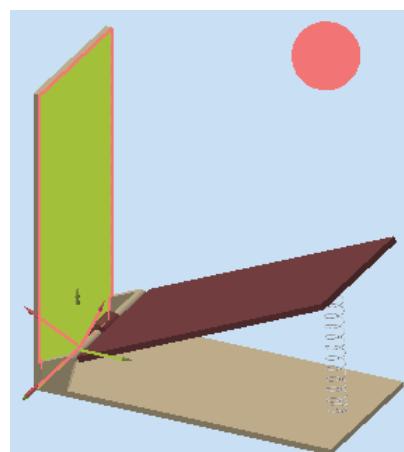
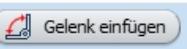
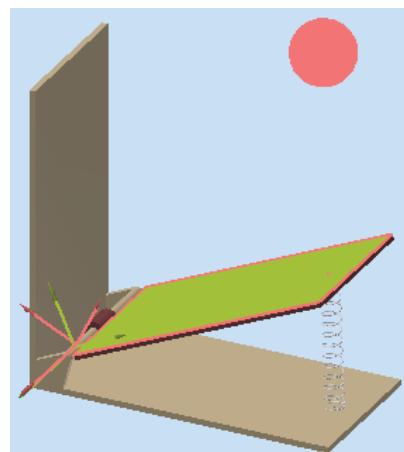
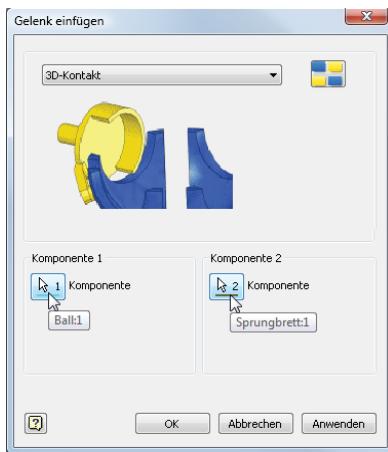
HINWEIS. In der Inventor-Simulation müssen alle Bauteile und Baugruppen, die in Interaktion miteinander treten sollen, durch Gelenke verbunden sein.

Da der Ball in seinen Bewegungsmöglichkeiten in keiner Art und Weise bzw. in keiner Richtung eingeschränkt ist, kommt als Gelenk nur ein **3D-KONTAKT** infrage.

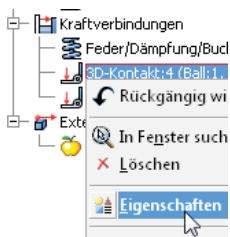
Über die Funktion GELENK EINFÜGEN und die Auswahl 3D-KONTAKT wird das Gelenk selektiert. Die Einfügung des 3D-Kontakt-Gelenks muss zweimal erfolgen, einmal zwischen dem Ball und dem Sprungbrett und noch einmal zwischen dem Ball und der Wand.



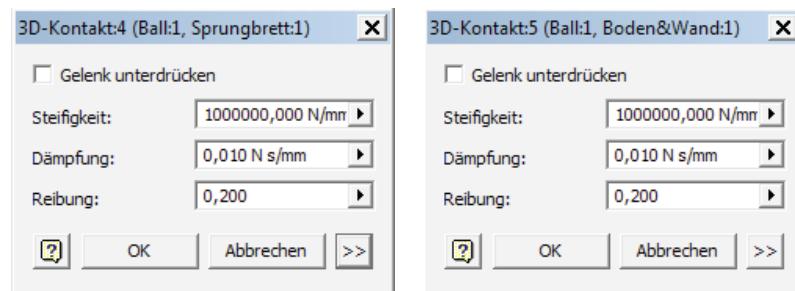
Gelenk einfügen



Die vertikale Wand muss deshalb mit einbezogen werden, weil zu erwarten ist, dass der Ball vom Sprungbrett aus gegen die Wand fliegt. Wäre hier kein 3D-Kontakt definiert, dann würde der Ball die Wand ignorieren und durch sie hindurch fliegen.

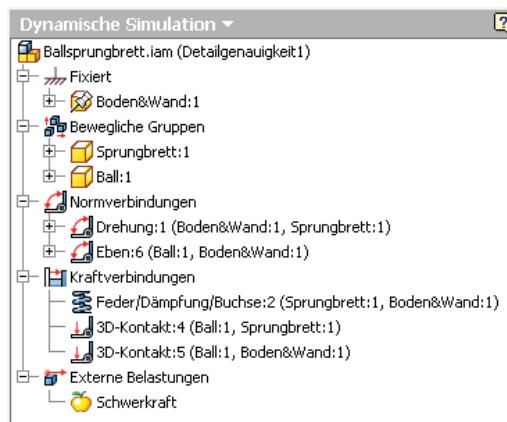


Sobald Sie die beiden Gelenke eingefügt haben, rufen Sie über das Kontextmenü im Objektbrowser ihre **EIGENSCHAFTEN** auf und stellen diese ein.



Damit der Ball schön abprallt, ist eine relativ hohe **STEIFIGKEIT** von 1000 KN/MM bei einer eher geringen **DÄMPFUNG** von 0,01 S/MM eingestellt. Die **REIBUNG** erhält den Koeffizienten 0,2.

19.2.4 Der Objektbrowser



Wurden alle Gelenke eingefügt, dann zeigt der Objektbrowser das in der obigen Abbildung dargestellte Aussehen.

Im Ordner **FIXIERT** existiert nur der Grundkörper Boden&Wand.

Zu den **BEWEGLICHEN GRUPPEN** gehören das Sprungbrett und der Ball.

Die **NORMVERBINDUNGEN** beinhalten die Gelenke, die beim Wechsel von der Baugruppen- in die Simulationsumgebung automatisch erstellt wurden: das Gelenk **DREHUNG** zwischen dem Sprungbrett und dem Grundkörper und die Verbindung **EBEN**, die durch die Abhängigkeit einer Ball-Ursprungsebene mit der Seitenfläche des Grundkörpers erzeugt wurde, damit der Ball nicht seitlich vom Brett fallen kann.

Im Ordner KRAFTVERBINDUNGEN sind die zusätzlich eingefügten Gelenke zu finden. Die eingefügte Feder und die beiden 3D-Kontakte sind mit den durch sie verbundenen Elementen aufgelistet.

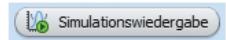
Der Ordner EXTERNE BELASTUNGEN zeigt die definierte Schwerkraft an.

■ 19.3 Die Simulation

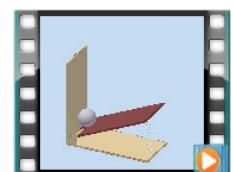
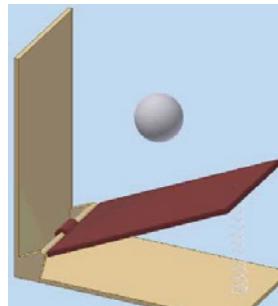
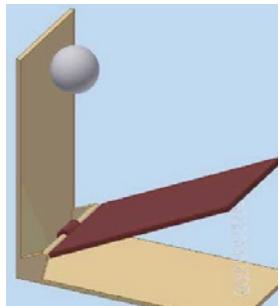
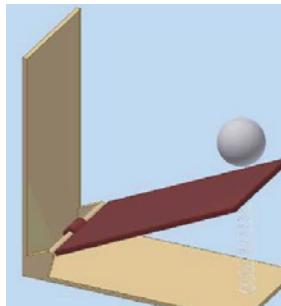
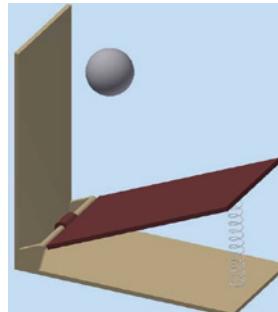
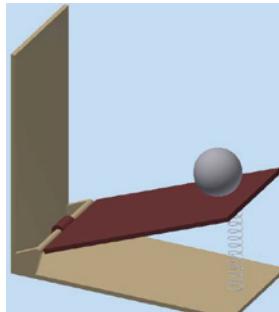
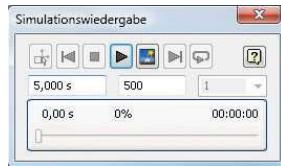
Die Simulationszeit wird auf fünf Sekunden eingestellt. Mit einem Klick auf die Play-Taste fällt der Ball auf das Sprungbrett, federt schräg gegen die Wand, fällt zurück auf das Sprungbrett usw.



Simulations-
wiedergabe



Simulationswiedergabe



Animation auf der DVD

Mit ähnlichen Mechanismen ließe sich beispielsweise ein Billardtisch oder ein Sportgerät simulieren. Auch Montage- oder Abfüllanlagen, bei denen Schüttgut transportiert wird, könnten simuliert und projektiert werden.

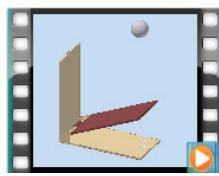
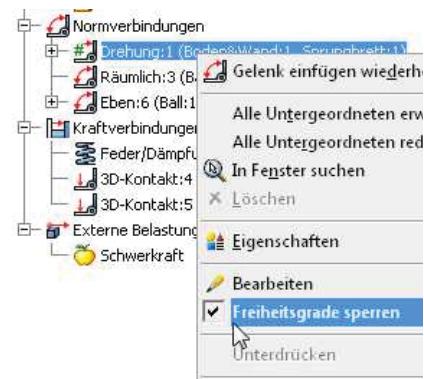
19.3.1 Starres Abprallen

Es ist relativ einfach möglich, die federnde Wirkung des Sprungbretts abzuschalten und damit ein starres System zu nachzuahmen. Jedes Gelenk kann mittels der Kontextmenüfunktion FREIHEITSGRADE SPERREN blockiert werden. Wird diese Funktion für die Normverbindung DREHUNG zwischen dem Grundkörper und dem Sprungbrett ausgeführt, dann ist die Feder ohne Funktion, und das Sprungbrett ist starr.

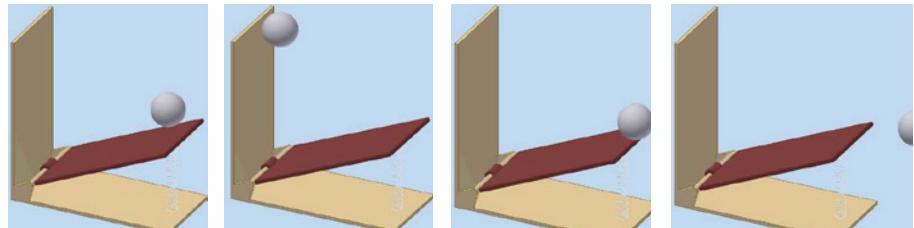


Im Objektbrowser wird diese Manipulation am Gelenk durch ein verändertes Icon, das jetzt mit einer grünen Raute versehen ist, angezeigt.

Es ist zu erwarten, dass der Ball durch den starren Aufprall auf dem Sprungbrett eine andere Flugbahn nimmt.



Animation auf der DVD



Tatsächlich fliegt der Ball etwas höher und wird somit von der Wand auch weiter zurück katapultiert, was zur Folge hat, dass er auf der Kante des Sprungbretts auftrifft und nach rechts ins Nirwana verschwindet.

20

Kurbelschwinge

Möglicherweise kennt der eine oder die andere diese kleine Maschine als beliebtes Übungs- oder Gesellenstück aus der Ausbildung oder dem Maschinenbau-Praktikum. Das Prinzip der Umsetzung einer Drehbewegung in eine Winkel- bzw. Längsbewegung wird beispielsweise bei Hobelmaschinen für die Hubbewegung des Hobelschlittens angewendet.

In der dynamischen Simulation kommen hier zwei Drehgelenke und eine bewegliche Verbindung zwischen einer Ebene und einem Zylinder zum Einsatz.

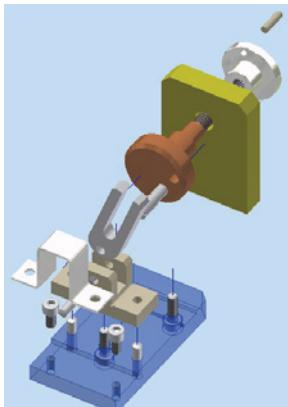
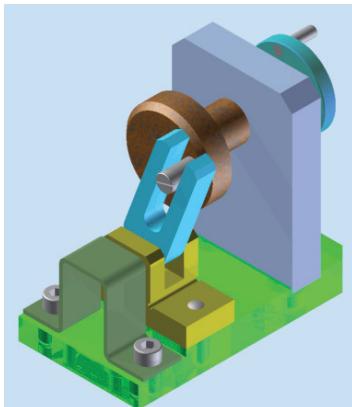
Auf der DVD zum Buch finden Sie die Baugruppendatei [Kurbelschwinge.iam](#) im Ordner [Kurbelschwinge01](#).



[Kurbelschwinge.iam](#)

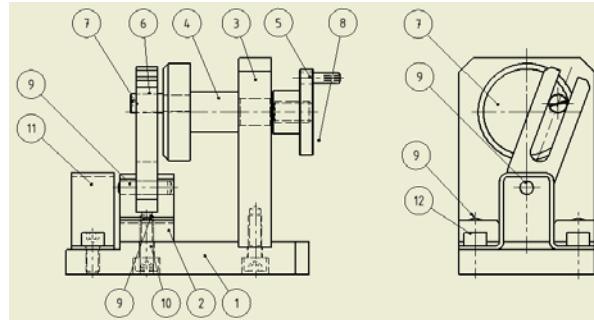
■ 20.1 Die Funktion

Zur Baugruppe und der Explosionsdarstellung ist nicht viel zu sagen. Mit der Kurbel wird die Scheibe mit dem exzentrisch angeordneten Bolzen gedreht. Der Bolzen gleitet in der Schwinge auf und ab und verursacht so die Schwenkbewegung der Schwinge.

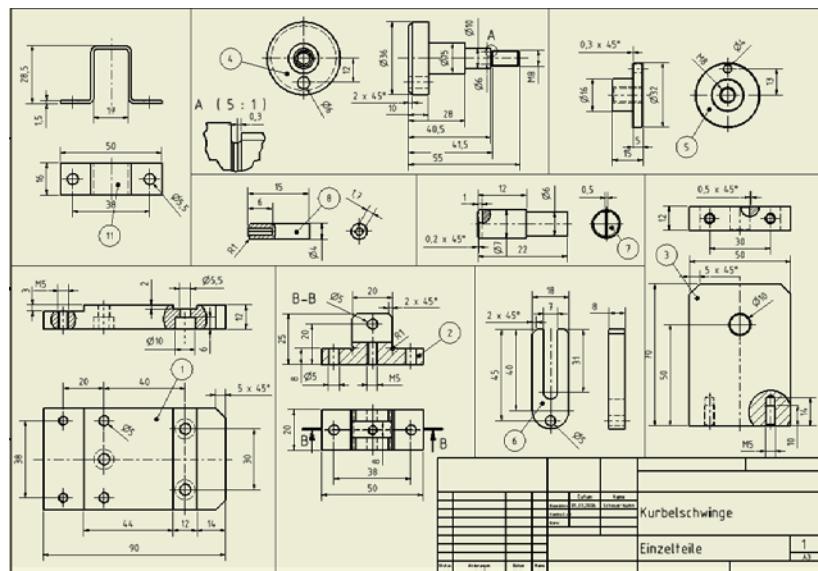


■ 20.2 Die Bauteile

Aus der Stückliste und den Baugruppenzeichnungen gehen alle Bauteile hervor. Der Werkstoff SR235 wurde in der Materialbibliothek neu angelegt.



In der folgenden Abbildung sind alle Einzelteile mit den entsprechenden Maßangaben dargestellt.

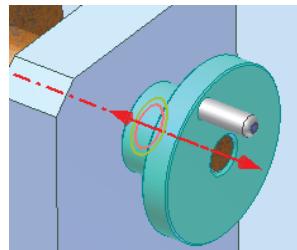
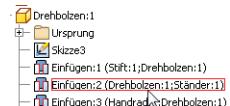
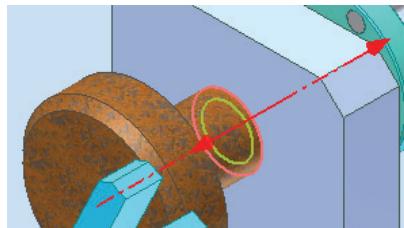


■ 20.3 Die Abhängigkeiten

Für die richtige Funktion der Kurbelschwinge sind die 3D-Abhängigkeiten ohnehin von zentraler Bedeutung, für die dynamische Simulation und damit für die Umwandlung in Gelenke sind sie, wie auch bei den bisherigen Übungen, besonders wichtig.

Auf die Erläuterung des Einfügens von Schrauben und Stiften sowie auf einfache Zusammenhänge soll zugunsten des Überblicks verzichtet werden. Insofern bleiben nur wenige zu beschreibende Verfahren übrig.

Der DREHBOLZEN wird mit der Abhängigkeit EINFÜGEN im Ständer platziert und bekommt dadurch sowohl seine axiale Position mit dem Freiheitsgrad der Rotation als auch seine Fixierung der Längsbewegung mitgeteilt.



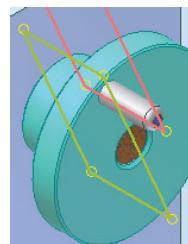
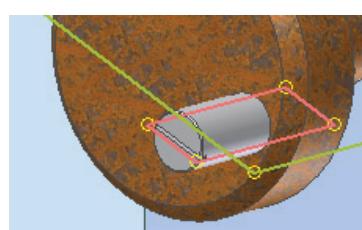
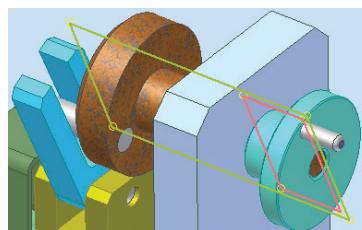
Mit dem HANDRAD wird im ersten Schritt ähnlich verfahren. Per EINFÜGEN wird es ebenfalls im Ständer platziert und befindet sich damit koaxial auf dem Drehbolzen.

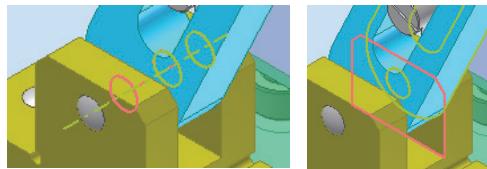
Die Tatsache, dass sich das Handrad mit dem Drehbolzen drehen muss, ohne dass eine formschlüssige Verbindung existiert, kann in der Praxis z.B. durch eine flüssige Schraubensicherung realisiert werden. Der Inventor kennt dieses Verfahren nicht, weswegen eine Ersatzverbindung hergestellt werden muss.

Eine recht einfache Möglichkeit ergibt sich durch die Verwendung der jeweiligen URSPRUNGSEBENEN der beiden Teile.

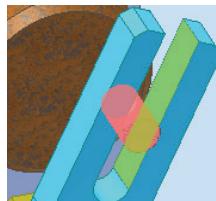
Wird beispielsweise die XY-Ebene des Handrades mit der XY- oder der XZ-Ebene des Drehbolzens über die Abhängigkeit PASSEND verbunden, dann entspricht dies genau der verlangten Funktion: die beiden Teile können sich nur noch gemeinsam drehen.

In ähnlicher Art und Weise werden über die jeweiligen URSPRUNGSEBENEN sowohl der GRIFF im HANDRAD als auch der STIFT im DREHBOLZEN gegen Verdrehen im entsprechenden Bauteil gesichert. Beide sollen sich ja in ihrer Verbindung nicht drehen.



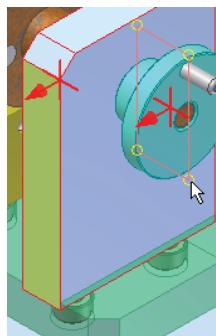


Die SCHWINGE wird mit der Abhängigkeit PASSEND MITTELACHSE, MITTELACHSE drehbar im Zylinderstift gelagert und axial ebenfalls mit PASSEND an eine innere Seite des Lagerbocks angelegt.



Dass der Exzenterstift in der Schwinge gleiten kann, dafür sorgt in der Baugruppe die Abhängigkeit TANGENTIAL zwischen dem STIFT und einer inneren Fläche der SCHWINGE. Wir werden allerdings später sehen, dass diese Abhängigkeit in der dynamischen Simulation nicht als Gelenk interpretiert wird, sie wird schlichtweg ignoriert, weswegen dort nachgebessert werden muss.

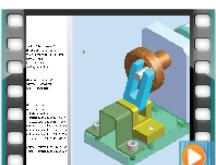
■ 20.4 Nach Abhängigkeit bewegen



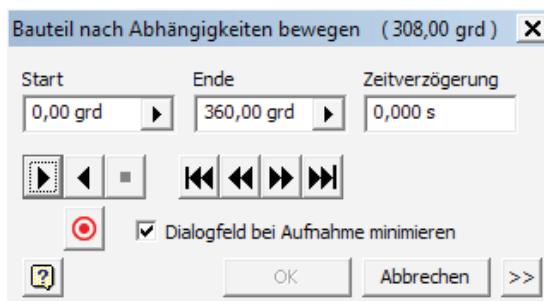
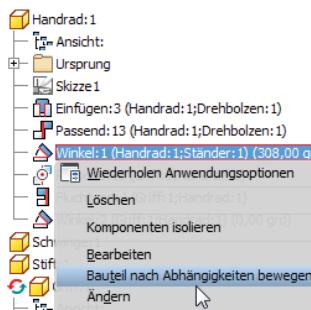
Von besonderem Interesse ist die Abhängigkeit WINKEL, die mit 0 Grad zwischen einer URSPRUNGS-EBENE des HANDRADES und einer SEITENFLÄCHE des STÄNDERS vergeben wurde.



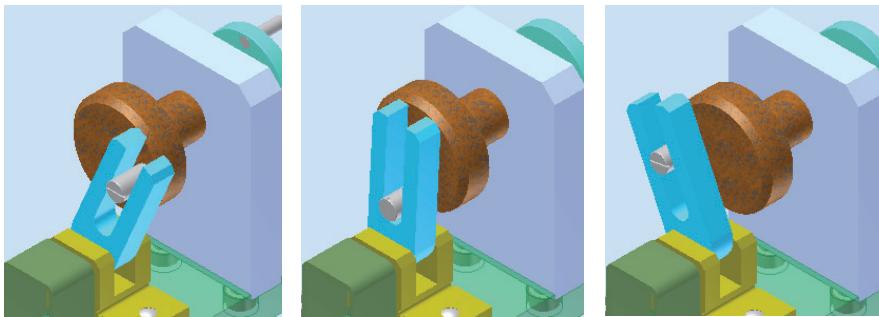
Mittels dieser Abhängigkeit und der Kontextmenüfunktion BAUTEIL NACH ABHÄNGIGKEIT BEWEGEN kann die Bewegung der Kurbelschwinge auch ganz ohne die dynamische Simulation in Bewegung versetzt werden.



Animation auf DVD



Das Verfahren wurde bereits in Kapitel 13, Einfache Bewegungssimulationen, genauer beschrieben und kann für eine einfache Bewegungspräsentation ohne Abstriche verwendet werden.



■ 20.5 Vorbereitung der Simulation

20.5.1 Nichts geht mehr

Wechseln wir mit den vorherigen Einstellungen, in denen die Winkelabhängigkeit am Handrad zum Ständer aktiviert ist, in die Arbeitsumgebung der dynamischen Simulation, dann bekommen wir das nebenstehende Bild im Objektbrower. Es werden keinerlei Gelenke erstellt, obwohl die **SIMULATIONSEINSTELLUNGEN** deutlich sagen, dass dies der Fall sein sollte.

Der Grund ist schnell gefunden. Mit der genannten **Winkelabhängigkeit** haben wir festgelegt, dass eine Ursprungsebene des Handrades parallel zur Seitenfläche des Ständers verlaufen soll, und damit haben wir den ganzen Mechanismus blockiert. Dass wir die Baugruppe in der Baugruppenumgebung zum Laufen bringen können, ändert auch nichts daran, denn dies ist eine völlig andere Funktion, die mit der Simulation nichts zu tun hat.

Die Reparatur ist jedoch einfach und kann in der Simulationsumgebung stattfinden.

Im ersten Schritt suchen wir das durch die Winkelabhängigkeit blockierte **HANDRAD**, das wir im Ordner **FIXIERT** und dort im Unterordner **GESCHWEISSTE GRUPPE:3** finden.

Werden die Untereinträge des Handrades geöffnet, dann erscheinen alle auf dieses Bauteil angewandten Abhängigkeiten und unter anderem auch die besagte Winkelabhängigkeit.

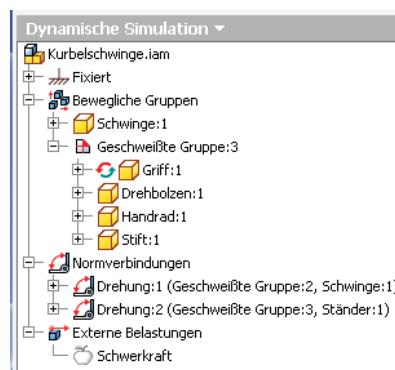
Das Kontextmenü dieses Eintrages bietet die Möglichkeit, diese Abhängigkeit zu **UNTERDRÜCKEN**, was auch geschehen sollte. Die Unterdrückung wird auch in der Baugruppe ausgeführt, bleibt also auch außerhalb der Simulation erhalten.



Dynamische Simulation



20.5.2 Geht doch!



Und wie von Zauberhand lösen sich alle Probleme sofort auf. Der Inventor berechnet die vollständige Baugruppe neu und kommt zum erfreulichen Ergebnis, dass es jetzt sowohl bewegliche Gruppen als auch Normverbindungen gibt.

Zu den **BEWEGLICHEN GRUPPEN** gehören die Schwinge und die **GESCHWEISSTE GRUPPE:3**, die wiederum das Handrad, den Drehbolzen und die Stifte beinhaltet.

Die automatisch erzeugten **NORMVERBINDUNGEN** bestehen aus zwei Drehgelenken, die einmal mit der **DREHUNG:1** die Beweglichkeit der

Schwinge zur geschweißten Gruppe 2 (Ständer, fixiert) und zum Zweiten mit der **DREHUNG:2** die Drehbewegung des Handrades (Geschweißte Gruppe 3) im Ständer ermöglichen.

20.5.3 Der Antrieb

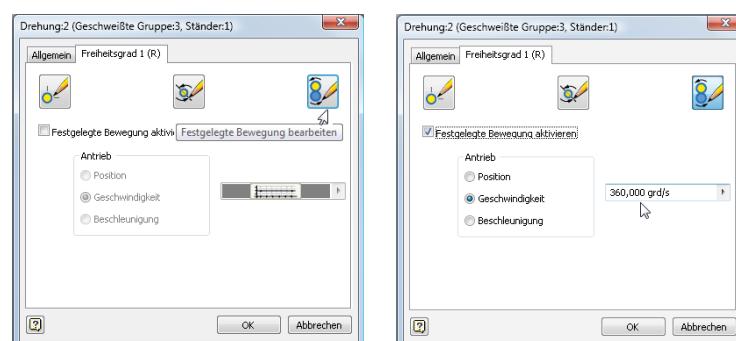


Starten wir jetzt die Simulationswiedergabe, dann passiert rein gar nichts.

Der Grund ist auch hier einfach zu finden: es fehlt ein antreibendes Element. Das Handrad soll im Beispiel den Antrieb darstellen, und der wird über das entsprechende Drehgelenk definiert.

Aus den **BEWEGLICHEN GRUPPEN** wissen wir, dass sich das Handrad in der **GESCHWEISSTEN GRUPPE:3** befindet. In den **NORMVERBINDUNGEN** ist beim Gelenk **DREHUNG:2** die geschweißte Gruppe:3 wiederzufinden.

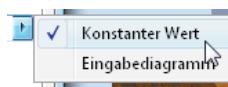
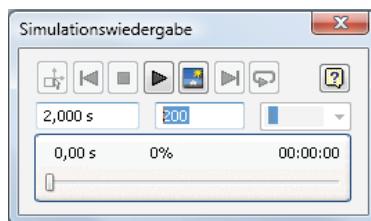
Der Eintrag **EIGENSCHAFTEN** im Kontextmenü bringt das abgebildete Dialogfenster auf den Bildschirm, in dem auf der Registerkarte **FREIHEITSGRAD 1 (R)** mit dem Button **FESTGELEGTE BEWEGUNG BEARBEITEN** die Antriebsbewegung für dieses Gelenk eingestellt werden kann.



Setzen Sie den Haken bei FESTGELEGTE BEWEGUNG AKTIVIEREN und stellen Sie für das Feld der Werteingabe KONSTANTER WERT ein.

Dass im Dialogfenster trotz der Angabe, dass es sich um einen Freiheitsgrad der Rotation handelt, eine Geschwindigkeit anstelle einer Drehzahl abgefragt wird, ist etwas verwirrend.

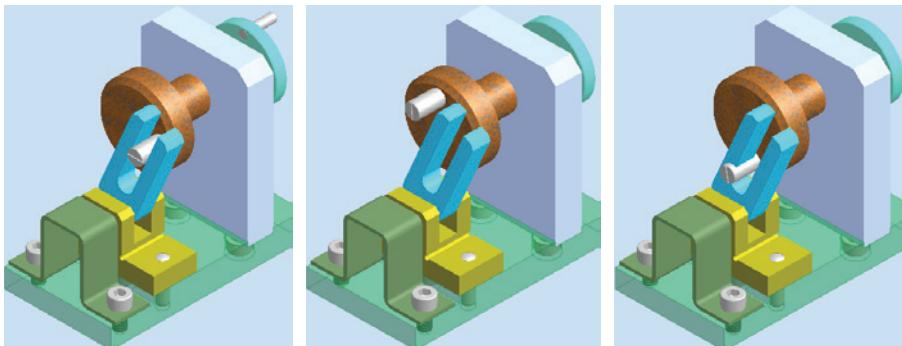
Der Wert an sich ist beliebig, im Beispiel wurden 360 GRD/S eingetragen. Die Einheit grd/s zeigt zumindest, dass es sich doch um eine Drehbewegung handelt.



Geändertes Symbol
für Drehgelenk mit
Antrieb

■ 20.6 Die erste Simulation

Jetzt sollte auch die Simulation ablaufen können. Eine Zeitangabe von zwei Sekunden reicht für zwei volle Umdrehungen aus. Die Play-Taste startet den Vorgang.



Das war wohl nichts. Die Drehbewegung wird zwar erwartungsgemäß ausgeführt, der Inventor erkennt jedoch, wie bereits angekündigt, die tangentiale Abhängigkeit zwischen der Schwinge und dem Exzenterstift nicht, und so bleibt die Schwinge einfach stehen.

Dass das Programm außerdem Kollisionen nicht erkennt und den Exzenterstift ohne Probleme durch den Stahl der Schwinge laufen lässt, ist ein Schwachpunkt, der an anderer Stelle im Buch schon beklagt wurde.

Als aufmerksamer Anwender hätte man aber schon bei der Betrachtung des Objektbrowsers stutzig werden können. Darin sind nämlich nur zwei Drehgelenke definiert, der Drehbolzen dreht sich, und die Schwinge könnte auch schwingen, wenn es denn eine Verbindung, ein Gelenk, zwischen dem Exzenterbolzen und der Schwinge gäbe – tut es aber (noch) nicht.



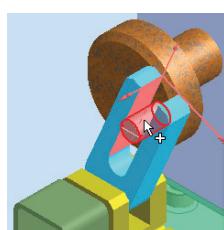
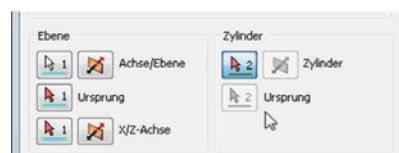
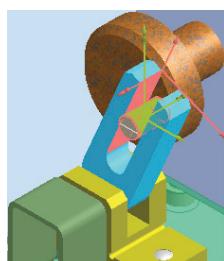
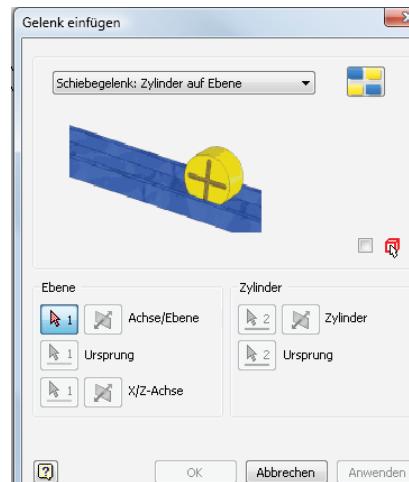
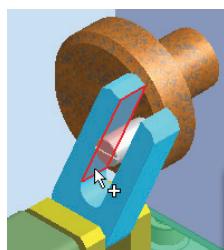
Animation auf DVD

■ 20.7 Schiebegelenk einfügen

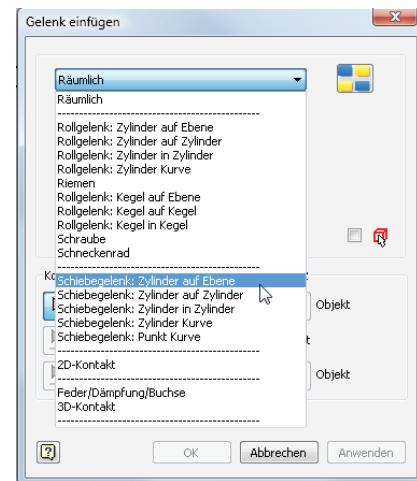
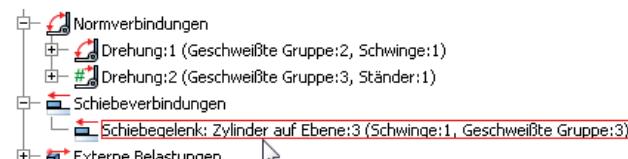


Über die Funktion GELENK EINFÜGEN ist im Dialogfenster das SCHIEBEGELENK: ZYLINDER AUF EBENE auszuwählen.

Gelenk einfügen



nach der Auswahl der Ebene auf den Button ZYLINDER und geben diesen an. Die Schaltfläche ANWENDEN oder OK fügt das Gelenk sofort und funktionsfähig ein, und im Objektbrowser wird das Gelenk unter SCHIEBEVERBINDUNGEN aufgeführt.



Bei der Auswahl der Gelenkobjekte muss entsprechend der Vorgabe zuerst die Ebene und anschließend der Zylinder gewählt werden. Als EBENE des Schiebegelenks selektieren Sie natürlich eine innere Seitenfläche, welche ist egal.

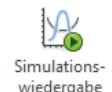
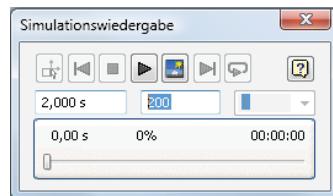
Der ZYLINDER ist ebenso natürlich der Exzenterstift.

Es reicht in diesem Fall die Angabe der Komponenten. Die Richtung der ACHSE/EBENE, der URSPRUNG und die X/Z-ACHSE müssen nicht definiert werden. Sie klicken einfach

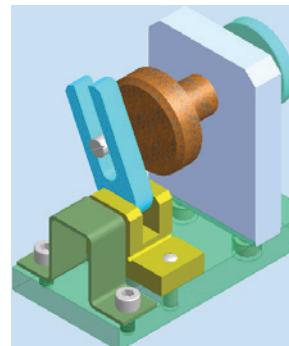
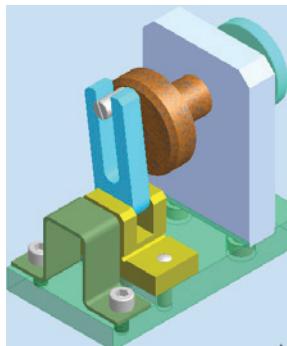
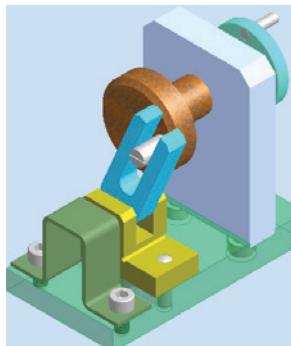
nach der Auswahl der Ebene auf den Button ZYLINDER und geben diesen an. Die Schaltfläche ANWENDEN oder OK fügt das Gelenk sofort und funktionsfähig ein, und im Objektbrowser wird das Gelenk unter SCHIEBEVERBINDUNGEN aufgeführt.

■ 20.8 Die zweite Simulation

Der zweite Versuch wird gestartet, und nun funktioniert es wie gewünscht. Das Handrad dreht den Drehbolzen, und dessen Exzenterstift bewegt die Schwinge hin und her.



Simulationswiedergabe



Animation auf DVD

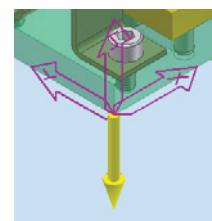
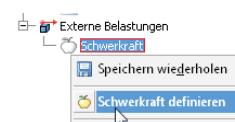
■ 20.9 Schwerkraft und Reibung

Um dem Mechanismus mehr Realitätsnähe einzuhauchen, sollen jetzt die Schwerkraft und Lagerreibungen hinzugefügt werden.

20.9.1 Schwerkraft

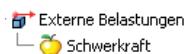
Bisher haben wir die Schwerkraft immer über ein fixiertes Objekt, d.h. über das Koordinatensystem eines Objekts, definiert. Das könnte möglicherweise dann zum Problem werden, wenn aus irgendwelchen Gründen die Fixierung aufgehoben und das Objekt verdreht werden würde.

Die zweite Variante, die Schwerkraft nach den VEKTORKOMPONENTEN, also nach dem Hauptkoordinatensystem auszurichten, soll jetzt angewandt werden.



Die entsprechende Option wird selektiert, und das Koordinatensymbol offenbart uns, dass die negative Z-Achse in Richtung der Schwerkraft zeigt.

Der Wert -9810 mm/s^2 wird in das entsprechende Feld eingegeben, und sofort bekommen wir die Ausrichtung mit den Koordinatenachsen zu sehen.



Mit OK wird diese Definition übernommen und ab sofort wirksam, wie uns der reif gewordene Apfel im Objektbrowser anzeigt.

20.9.2 Reibungswerte und Kraftübertragung

Reibung bzw. eine Kraftübertragung (Kraftfluss) findet in drei Lagerstellen statt: im Drehbolzenlager, im Schwingenlager und an der Gleitfläche zwischen dem Exzenterstift und der Schwinge.

20.9.3 Beidseitige Kraftübertragung an der Schwinge

Bei der Kraftübertragung an der Schwinge fällt auf, dass wir das Gelenk nur zwischen der einen Gleitfläche und dem Exzenterbolzen eingefügt haben. Bei der Drehbewegung, und dann, wenn im Mechanismus Kräfte wirksam werden, wird die Kraftübertragung jedoch abwechselnd an der einen und der anderen Gleitfläche der Schwinge stattfinden.



HINWEIS: Physikalisch richtig wäre es, zwischen dem Exzenterbolzen und der anderen Gleitfläche noch ein Schiebegelenk einzufügen und darauf zu hoffen, dass der Inventor je nach der Stellung des Exzenterbolzens den Kraftfluss richtig berechnet. Doch da irrt der hoffnungsvolle Anwender – die Inventor-Simulation stößt wieder einmal an ihre Grenzen.

- Erstens wird das System durch ein zweites Gelenk an den jeweils gleichen Bauteilen überbestimmt und gibt die entsprechende Meldung aus, dass die Rückstoßkräfte evtl. nicht mehr richtig berechnet werden können.
- Zweitens wird im Ausgabediagramm die Gelenkkraft des zweiten Gelenks immer mit 0 N ausgegeben, während sie im ersten Gelenk berechnet und im Ausgabediagramm angezeigt wird – wenn auch erklärungsbedürftig, je nach Darstellungsart einmal nur positiv (falsch) und ein anderes Mal positiv und negativ, je nach Exzenterstellung (richtig).
- Drittens können bei Schiebegelenken aus unerklärlichen Gründen weder ein Reibwert noch ein Wirkungsgrad (wie bei Rollgelenken) eingegeben werden, obwohl sich in unserem Fall theoretisch die beiden Gleitreibungszahlen sogar unterscheiden könnten. Dieser Umstand relativiert die Berechnungsergebnisse.

Wir verzichten also auf das zweite Schiebegelenk und gehen davon aus, dass die Gelenkkraft im ‚Rückwärtsgang‘ entsprechend negativ dargestellt und berechnet wird.

20.9.4 Gelenkreibungen der Drehgelenke

Der Vorgang der Reibwertdefinition ist für beide Drehgelenke derselbe, und wenn wir von gleichwertigen Werkstoffpaarungen und Schmierverhältnissen ausgehen, sind auch die Reibzahlen in beiden Gelenken gleich.

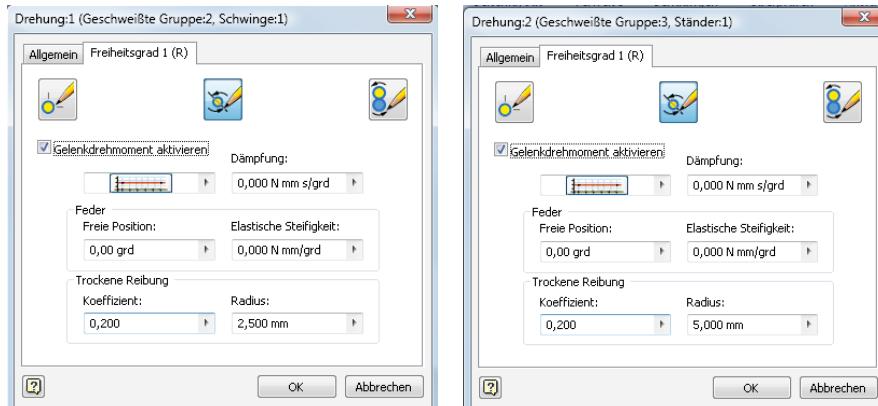
Ein Unterschied besteht jedoch in den Reibradien, während der Lagerstift für die Schwinde einen Durchmesser von 5 mm hat, beträgt der Durchmesser der Drehbolzenwelle 10 mm. Die entsprechenden Radien müssen also an beiden Lagerstellen unterschiedlich eingegeben werden.

Die Einstellungen für die Gelenkdaten erreicht man über die Auswahl **EIGENSCHAFTEN** im Kontextmenü einer Normverbindung.

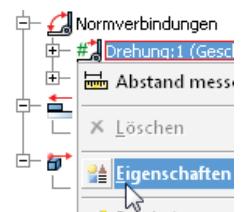
Gelenkdrehmoment bearbeiten

Die Gelenkdaten, die während der Bewegung relevant sind, befinden sich auf der Registerkarte für den jeweiligen **FREIHEITSGRAD**. Dort erreicht man sie durch einen Klick auf den mittleren Button **GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN**.

Nachfolgend ist für beide Drehgelenke die **TROCKENE REIBUNG** mit dem Koeffizienten 0,2 eingetragen, der **RADIUS** der Reibkraft ist entsprechend dem jeweiligen Lagerdurchmesser eingetragen.



Die Werte für Dämpfung, Feder und Steifigkeit müssen nicht eingegeben werden, da es sich um starre Gelenke handelt, die keinerlei Federwirkung aufweisen.



20.9.5 Startposition

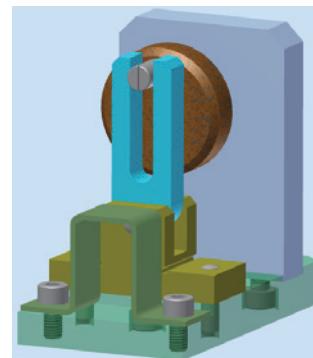
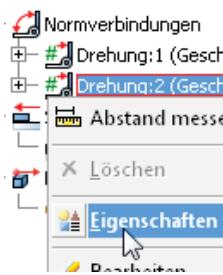
Die Startposition der Kurbelschwinge ist im Prinzip unerheblich, aus folgendem Grund empfiehlt es sich jedoch, eine Position zu definieren, die einen eindeutigen Startpunkt repräsentiert.

Die Kraft- und Bewegungsverhältnisse können im Ausgabediagramm dargestellt und ihre Größen dort abgelesen werden. Als Abszisse verwendet das Ausgabediagramm jedoch immer nur die Zeit, was bedeutet, dass ein Simulationsverlauf von zwei Sekunden bei einer Drehbewegung von 360 Grad/Sekunde einen Durchlauf von 720 Grad über zwei Sekunden darstellt.

Möchte man nun wissen, welche Kraft- und Bewegungsverhältnisse bei einer bestimmten Gradzahl existieren, dann ist das wesentlich leichter möglich, wenn die Startposition festgelegt ist.

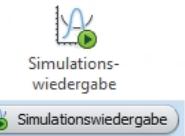
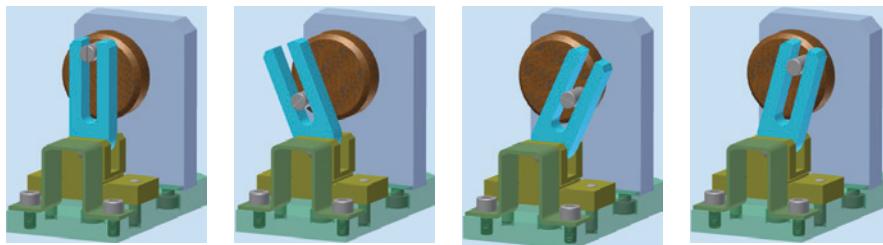
Über die EIGENSCHAFTEN der Verbindung DREHUNG:2 (GESCHWEISSTE GRUPPE:3, STÄNDER:1) kommt man wieder auf das Dialogfenster mit dem FREIHEITSGRAD 1 (R), in dem jetzt der erste Button ANFANGSBEDINGUNGEN BEARBEITEN zu klicken ist.

Im Feld POSITION wird der Startwinkel von 270 GRD eingetragen.



Der etwas eigenartige Startwinkel am oberen Totpunkt von 270 Grad ergibt sich aus der Definition der Baugruppenabhängigkeiten durch die Verknüpfung der Ursprungsebenen und soll nicht weiter stören.

■ 20.10 Die dritte Simulation und das Ausgabediagramm



Die dritte Simulation verläuft, bis auf die Startposition, optisch genauso wie der zweite Durchlauf, weswegen es dazu auch keine weiteren Erläuterungen gibt.

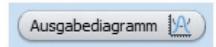
20.10.1 Das Ausgabediagramm

Das Ausgabediagramm soll nun der Gegenstand einer näheren Betrachtung sein.

Der Aufruf erfolgt über die abgebildete Schaltfläche, er macht aber nur Sinn, wenn bereits eine aktuelle Simulation durchlaufen wurde, denn nur dann stehen überhaupt bzw. aktuelle Daten für die Darstellungen zur Verfügung.



Ausgabediagramm



Die Zeitachse

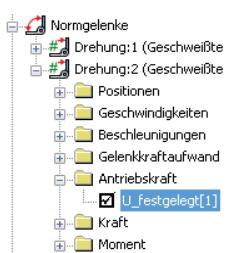
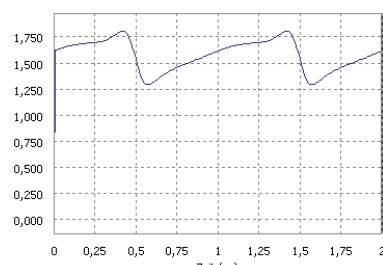
Die Laufzeit beträgt zwei Sekunden und der Drehwinkel in dieser Zeit beträgt 720 Grad. Daraus ergibt sich:

Zeit (Sek.)	Winkel (Grad)
0	0
0,25	90
0,5	180
0,75	270
1	360

Das Antriebsmoment

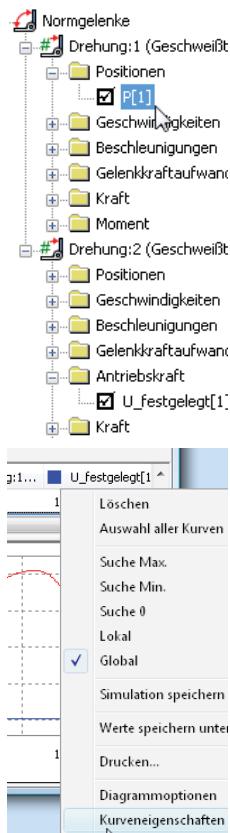
Betrachten wir zunächst das berechnete Antriebsmoment, das, da keinerlei externe Kraft wirksam ist, alleine auf der Überwindung der Reibungskräfte basiert.

Im Browser des Ausgabediagramms wird im Drehgelenk:2 das hier als ANTRIEBSKRAFT bezeichnete Moment für die von uns festgelegte Drehbewegung selektiert.



Zu Beginn der Bewegung steigt es wegen der Anfangsreibung steil an, erreicht nach ca. 0,4 Sekunden das Maximum und fällt dann bis zum unteren Totpunkt wieder ab.

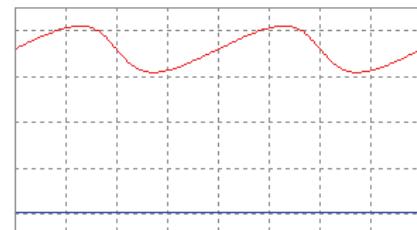
Interessanter ist der Vergleich des Moments mit der Schwingenbewegung (POSITION) in der nächsten Diagrammdarstellung.



Antriebsmoment und Schwingenbewegung

Im Diagramm wird jetzt zwar die Bewegung der Schwinge (rot) deutlich dargestellt, die Kurve des Antriebsmoments (blau) ist jedoch fast eine Gerade geworden.

Die Ordinate des Diagramms ist eine reine Zahlenwertachse, die lediglich die Zahlenwerte der Darstellungen wiedergibt. Die Einheiten sind im Kopfbereich des Diagramms neben den Kurvenbezeichnungen angegeben. Da das Moment im Vergleich zu den Bewegungsgrößen sehr kleine Zahlenwerte hat, werden diese auch entsprechend klein dargestellt. Die einzige Möglichkeit, hier gegenzusteuern, besteht in der Angabe eines Vergrößerungsfaktors für eine ausgewählte Kurve.



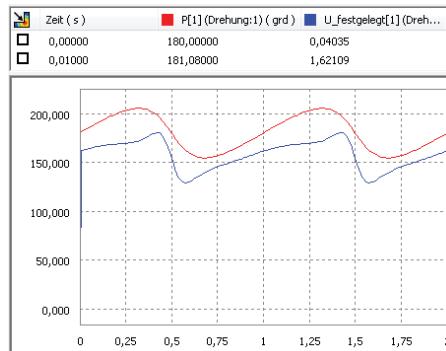
Das Kontextmenü der Kurve, das über die Kopfzeile im Ausgabediagramm und den Eintrag des Antriebsmoments (U_FESTGELEGT) erreicht werden kann, bietet die Auswahl KURVENEIGENSCHAFTEN.

Im unteren Bereich des Fensters müssen Sie den MULTIPLIKATOR auf AKTIV setzen, und als WERT den Faktor 100 eintragen.

Nach Bedarf kann in diesem Zusammenhang auch die Darstellungsfarbe der Kurve geändert werden. Ist dies geschehen und

mit OK bestätigt, dann werden beide Kurven fast gleichwertig angezeigt. Zu beachten ist jetzt allerdings, dass die angezeigten Ordinatenwerte für das Antriebsmoment um den Faktor 100 erhöht angezeigt werden.

Die Schwingung beginnt hier bei 180 Grad, was keinen Widerspruch zu der von uns festgelegten Startposition darstellt, denn diese 270 Grad bezogen sich auf den Dreh-



bolzen, und diese Angaben würden nur zufällig oder unter penibler Ausrichtung alle Koordinatensysteme übereinstimmen.

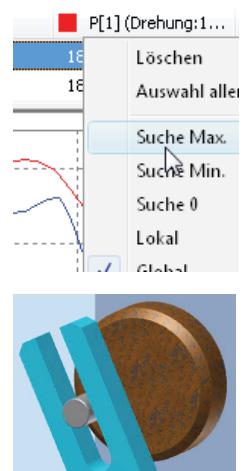
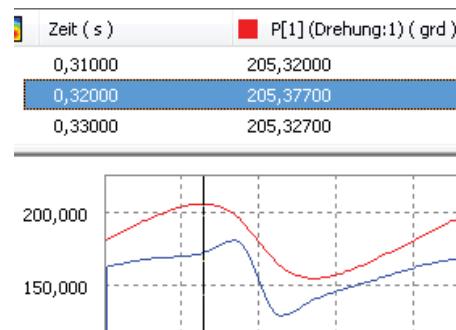
Interessant ist bei der Schwingungskurve beispielsweise der **Wendepunkt**, der einfach über die Kontextmenüfunktion dieser Kurve und unter dem Eintrag **SUCHE MAX.** gefunden wird.

Die senkrecht im Diagramm eingezeichnete Hilfslinie zeigt uns den Wendepunkt an. Gleichzeitig springt die Markierung in der Wertetabelle darüber auf den Maximalwert des Ausschlages von **205,377 Grad**, der den Wendepunkt darstellt.

Zum Zweiten springt auch die Baugruppe an diesen Punkt des maximalen Ausschlags der Schwinge, die jetzt eine Schräglage von $205,377 - 180 = 25,377$ Grad aufweist.

Das Verhalten des Antriebsmoments, das wie gesagt ja nur die Reibungskräfte zu überwinden hat, verwundert zunächst etwas, ist aber dadurch erklärbar, dass sich die Hebelarme der Reibkraft in den Lagern zu den jeweiligen Drehpunkten im Drehbolzenlager und im Schwingenlager während der Bewegung laufend ändern und dadurch der zunächst eigenartige Kurvenverlauf zustande kommt.

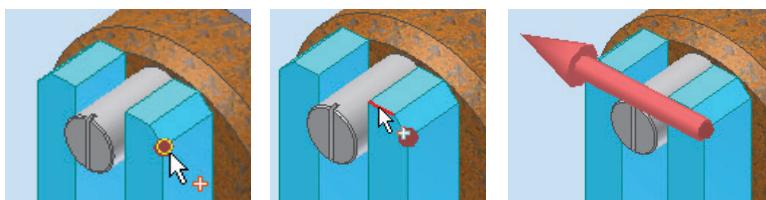
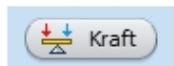
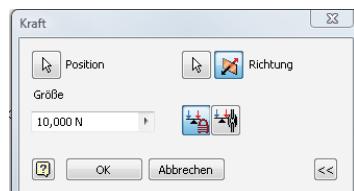
Im nächsten Schritt werden wir eine externe Kraft wirken lassen. Dann sieht auch der Verlauf des Antriebsmoments erklärbar aus.



■ 20.11 Externe Kraft einfügen

Eine externe KRAFT muss in mindestens drei Schritten definiert werden.

Die POSITION verlangt die Angabe eines Punktes, die RICHTUNG benötigt z.B. eine Bauteilkante, und als GRÖSSE muss natürlich der Wert einer Kraft in Newton eingetragen werden.



Im Beispiel wurden ein Eckpunkt der Schwinge für die Position und eine Kante für die Richtung ausgewählt. Der Richtungssinn kann wunschgemäß umgekehrt werden. Als Kraft sind 10 Newton angegeben.



Im Objektbrower wird die externe Kraft erwartungsgemäß im Ordner EXTERNE BELASTUNGEN aufgeführt und erhält die Bezeichnung KRAFT:1 (SCHWINGE:1).

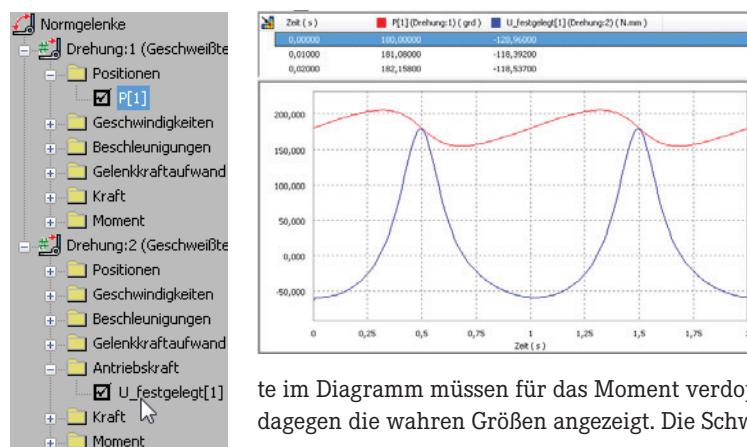
Auch für unser Beispiel sind die beiden Schaltflächen FESTE BELASTUNGSRICHTUNG und ASSOZIATIVE BELASTUNGSRICHTUNG von Bedeutung.



Da die Schwinge eine Dreh-(Schwenk-)bewegung macht, könnte man davon ausgehen, dass eine Kraft, die an einer Kante des Bauteils ausgerichtet ist, diesen Schwenk bei der Bewegung mitmacht und somit laufend ihre Richtung ändert.

In der Praxis ist dies jedoch meist nicht der Fall, und der Button FESTE BELASTUNGSRICHTUNG sorgt entsprechend dafür, dass die Kraftrichtung gemäß ihrer Anfangsdefinition erhalten bleibt. Nur die Angriffsposition der Kraft am Eckpunkt der Schwinge wandert mit dem Eckpunkt mit.

■ 20.12 Die vierte Simulation und das Ausgabediagramm



An der Simulationsdarstellung ändert sich jetzt nichts mehr, weswegen auf die Abbildung und Beschreibung der selben verzichtet wird.

Das Ausgabediagramm mit den beiden schon vorher eingetragenen Kurven hat jetzt ein etwas anderes Aussehen.

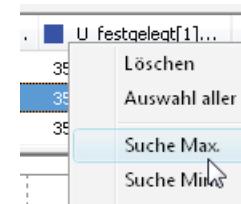
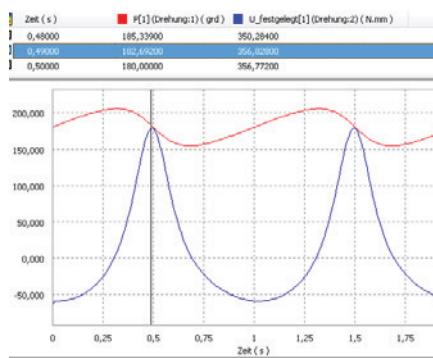
Als MULTIPLIKATOR für das Antriebsmoment (blau) ist der Faktor 0,5 eingetragen, d.h., die angezeigten Werte im Diagramm müssen für das Moment verdoppelt werden. In der Wertetabelle werden dagegen die wahren Größen angezeigt. Die Schwingenbewegung hat den Faktor 1.

Maximum suchen

Das Maximum des Moments befindet sich jetzt in der Nähe des unteren Totpunktes und beträgt 356,82 Nmm.



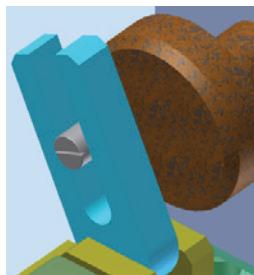
Am unteren Totpunkt ist das notwendige Antriebsmoment deswegen so hoch, weil das Moment der externen Kraft aufgrund des langen Hebelarmes dort sein Maximum hat.



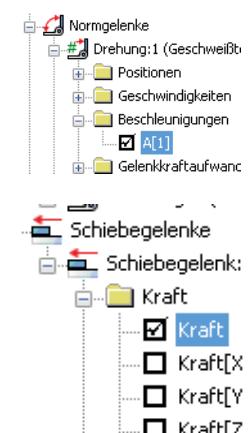
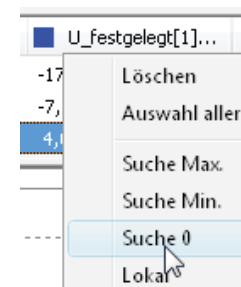
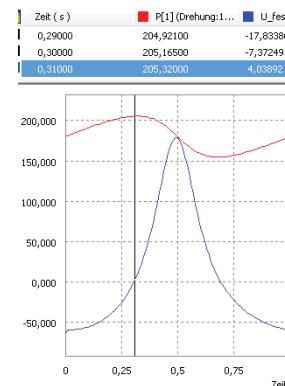
Zum Beginn liegt es im negativen Bereich und steigt ziemlich harmonisch bis zum Maximum an, um dann wieder in den negativen Bereich zu wechseln. Die negativen Werte kommen dadurch zustande, dass die externe Kraft in diesen Bereichen den Antrieb übernimmt und das eigentliche Antriebsmoment zum Bremsmoment wird, da wir ja eine mit 360 grd/s festgelegte Antriebsbewegung definiert haben.

Nulldurchgang suchen

Die Stelle, an der das Antriebsmoment seine Richtung wechselt, also in etwa den Wert null erreicht, finden wir mit der Kontextmenüfunktion SUCHE 0 dieser Kurve.

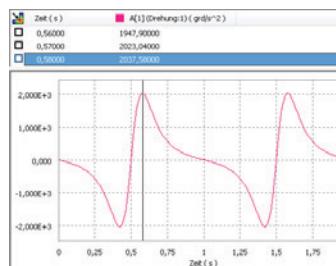


Der Nulldurchgang findet jetzt wie erwartet in der Nähe des maximalen Ausschlages der Schwinge, also in ihrem Wendepunkt bei ca. 205 grd, statt.



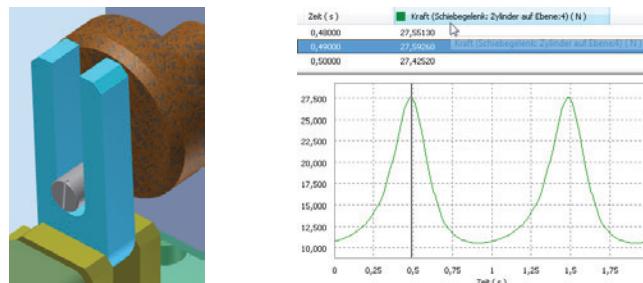
Die Beschleunigung der Schwinge

Interessant für manch praktische Berechnung bzw. Auslegung ist auch die Beschleunigung der Schwinge, die ja in einer vollständigen Maschine ebenfalls irgendeine Antriebsfunktion hätte. Das Maximum der Beschleunigung sowohl in die eine als auch in die andere Richtung beträgt immerhin stolze 2037,6 grd/s².



Kraft im Schiebegelenk

Die Untersuchung der Belastung des Schiebegelenks ergibt zwar keine sensationellen Ergebnisse, jedoch ist die Höhe der Belastung im ersten Moment doch verwunderlich hoch.



Trotz der externen Kraft von nur 10 N beträgt sie in ihrem Maximum über 27 N, obwohl, wie schon vorher beklagt, ein Reibwert zwischen dem Exzenterstift und der Gleitfläche nicht definiert werden konnte.

Die hohe Belastung tritt in der Nähe des unteren Totpunktes an der Stelle auf, an der die Beschleunigung ihren Nulldurchgang hat. An dieser Stelle ist auch das Antriebsmoment am höchsten und die dort gegebene Begründung zu den ungünstigen Hebelarmen in dieser Stellung gilt natürlich auch hier.

■ 20.13 Spur aufzeichnen



Die Funktion SPUR berechnet und zeigt die absoluten oder relativen kinematischen Werte von Bauteilstellen (Punkten) wahlweise als Bewegungsbahn, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf an.

Die Anzeige der Bewegungskurven erfolgt im Ausgabediagramm und im Grafikfenster der Baugruppe. Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte werden nur im Ausgabediagramm angezeigt.



HINWEIS: Eine wesentliche Aufgabe dieser Funktion besteht auch darin, die aufgezeichnete Bewegungsbahn als Skizze (2D oder 3D) zu speichern und sie für die Konstruktion weiterer Elemente, z.B. Kurvenscheiben, verwenden zu können.



Das Dialogfenster zum Einstellen einer Spuraufzeichnung verlangt zuerst als URSPRUNG eine Punktangabe, z.B. einen Eck- oder Zentrumspunkt.

Die REFERENZ gibt an, mit welchem Bezug die Bahnaufzeichnung erfolgen soll. Grundsätzlich ist das Koordinatensystem der Spur gleich dem des Bauteils bzw. der Baugruppe. Im Abrollfenster können die jeweiligen Elemente als Referenzen gewählt oder mit dem Eintrag NEU... kann ein neuer Referenzrahmen erstellt werden.

Mit den beiden Icons, SPUR ANZEIGEN (links, Anzeige im Grafikfenster) und SPURWERT AUSGEBEN (rechts, Anzeige im Ausgabediagramm), können sowohl die Art der Spur als

auch die beabsichtigte Ausgabe eingestellt werden. Die Auswahlmöglichkeiten „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ sind zwar für beide Anzeigen vorhanden, trotzdem können diese beiden Werte nur im Ausgabediagramm angezeigt werden.

Während die Bewegungsbahn immer im Maßstab 1:1 erstellt wird, können für die Bewegungswerte sowohl die Darstellungsfarbe als auch der MASSSTAB festgelegt werden. Beide Parameter können jedoch später auch im Ausgabediagramm so eingestellt werden, dass man optisch sinnvolle Darstellungen erreicht.

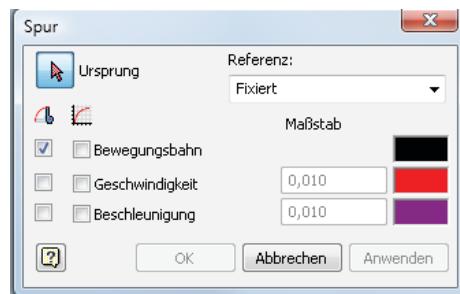
Zur Demonstration soll an der Kurbelschwinge ein Schwingeneckpunkt mit dieser Funktion untersucht werden. Auch wenn hinter diesem kurzen Beispiel wenig Praxisrelevanz besteht, zeigt sie doch das Vorgehen und die Möglichkeiten, die diese Technik bietet.

Mit dem Button SPUR wird das Dialogfenster aufgerufen.

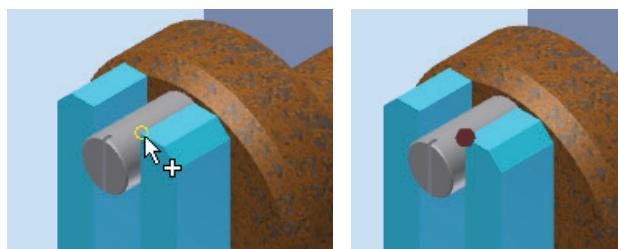
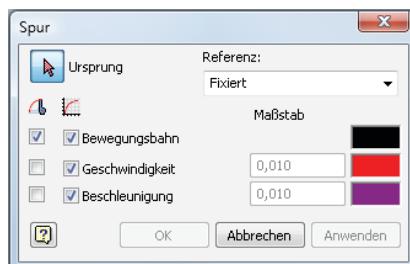
Als auszugebende Größen wählen wir alle drei Kinematikwerte, die Bewegungsbahn, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung, aus.

Die Ausgabe der Bewegung erfolgt im Grafikfenster und im Ausgabediagramm. Die anderen beiden Werte werden ohnehin nur im Ausgabediagramm angezeigt, weswegen das Setzen der Häkchen in diesen Feldern keinen Sinn macht.

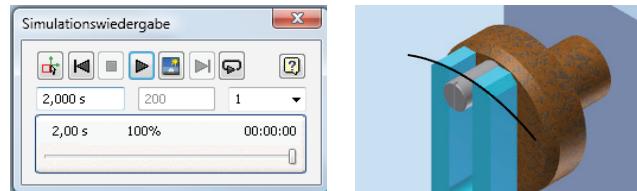
Als Referenz bleibt die Vorgabe FIXIERT stehen, sie nimmt das Koordinatensystem der Baugruppe als Referenz für die Bewegungskurve.



Spur



Den URSPRUNG, also den Punkt, dessen Kinematikdaten aufgezeichnet werden, bildet ein Eckpunkt der Schwinge. Nach der Selektion wird dieser Punkt als dicker Klecks angezeigt. Wurde bereits eine Simulation durchgeführt, erscheint nach dem Klick auf OK sofort die Bewegungskurve dieses Punktes im Grafikfenster. Andernfalls muss ein Simulationsdurchlauf erfolgen, damit die Ergebnisse sichtbar werden.



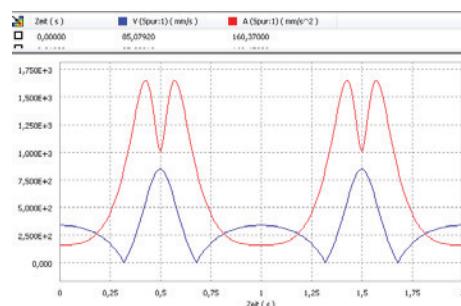
Die Bahnkurve des gewählten Punktes ist natürlich nur ein Kreisbogen, mit dessen Geometrie man bestenfalls den Schwenkwinkel und den Radius ermitteln kann. Genauso würden jedoch auch komplizierte Kurven zur Anzeige gebracht werden.

Interessanter ist das AUSGABEDIAGRAMM für die beiden restlichen Kurven, das wir jetzt mit der entsprechenden Schaltfläche aufrufen.

Spurwerte im Ausgabediagramm

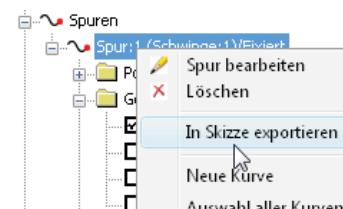
Im Objektbrower des Ausgabediagramms finden wir den Ordner SPUREN und darunter die Einträge und Auswahlfelder für die von uns ausgewählten Größen.

Die beiden Kurven zeigen den Geschwindigkeitsverlauf (blau), dessen Größendarstellung über die KURVENEIGENSCHAFTEN mit dem MULTIPLIKATOR 4 ausgestattet wurde, und den Beschleunigungsverlauf (rot) des gewählten Eckpunktes.

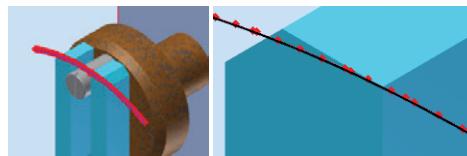


Spur in Skizze überführen

Im Kontextmenü einer ausgezeichneten Spur besteht auch die Möglichkeit, die Bewegungsbahn mit der Funktion IN SKIZZE EXPORTIEREN einem Bauteil als neue Skizze zuzuordnen. Tut man das, so fordert der Inventor zum Zeigen einer Komponente auf, der diese Skizze angefügt werden soll.



Komponente zum Erstellen der Spur skizze auswählen



Die Skizze erscheint sofort danach im Grafikfenster und besteht bei näherer Betrachtung aus vielen Punkten, die durch eine Spline-Kurve miteinander verbunden sind.

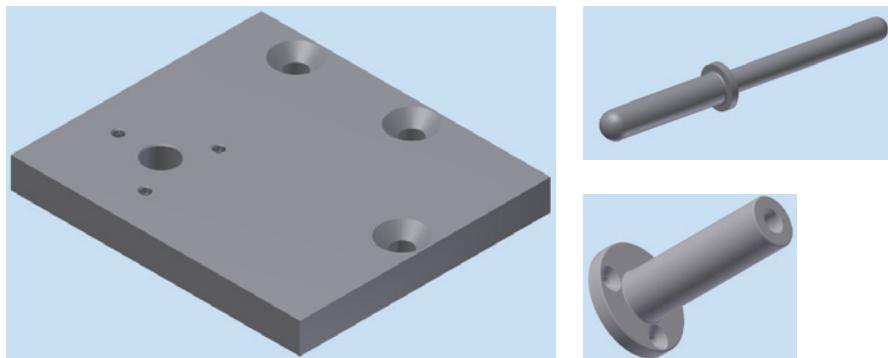
21

Schiebevorrichtung

Um die Kurbelschwinge aus Kapitel 20 doch noch für eine praktische Aufgabe anwendbar zu machen, soll sie zu einer Schiebevorrichtung, wie sie z.B. an Transportbändern eingesetzt wird, weiterkonstruiert werden.

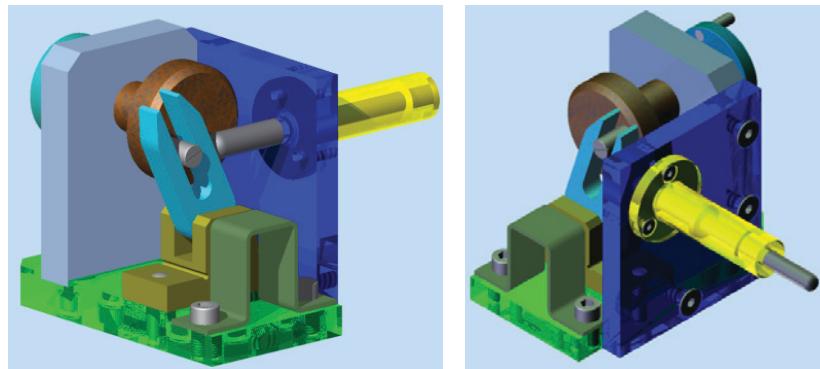
■ 21.1 Die Bauteile

Neben einigen Schrauben aus dem Inhaltscenter sind für diesen Umbau nur noch drei wesentliche Teile und eine Feder erforderlich.

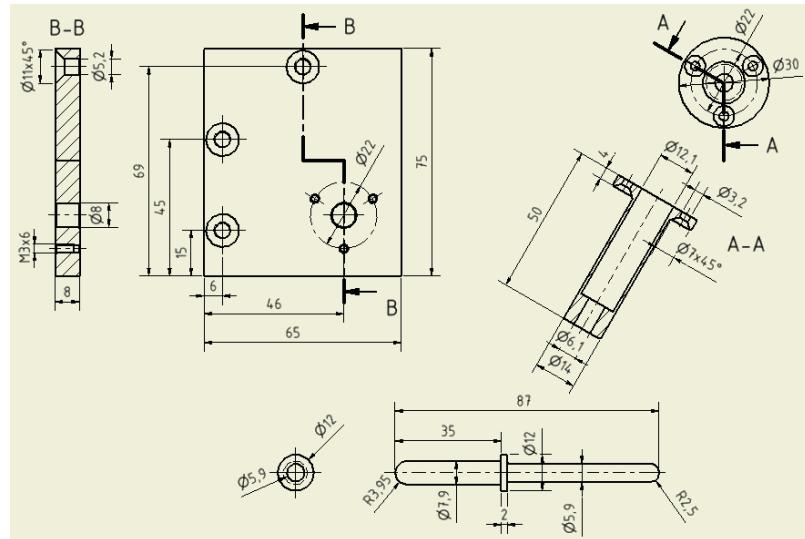


Links sehen Sie die **Seitenplatte**, die adaptiv an die Kurbelschwinge konstruiert wird, rechts oben den **Schieber** und darunter die **Führung** für den Schieber.

Der Zusammenbau und die neue Baugruppe sind aus den folgenden Bildern zu ersehen. Die Schwinge wurde an den oberen Enden nachgearbeitet.

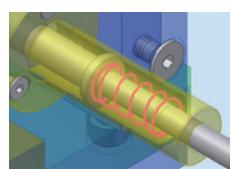


Die einzelnen Teile haben die in den Zeichnungen angegebenen Dimensionen.

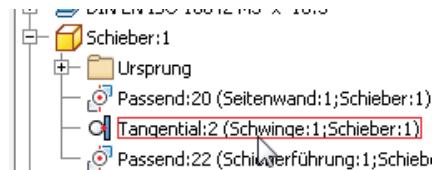


21.2 Die Funktion

Die grundsätzliche Funktion des Schiebers ist einfach und gut zu erkennen. Die Schwinge schiebt den Schieber, der durch die Schieberführung geführt wird, nach außen.



Schwingt die Schwinge zurück, so soll der Schieber ebenfalls zurückgeschoben werden. Dieses Zurückschwingen des Schiebers funktioniert in der Baugruppe mithilfe der Abhängigkeit *Tangential* sehr gut, leider aber nicht praxiskonform, denn zwischen der Schwinge



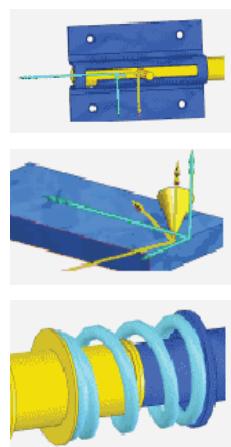
und dem Schieber besteht ja keine Verbindung, der Schieber wird lediglich durch den Druck der Schwinge nach außen geschoben.

Eine **Feder** muss hier Abhilfe schaffen und den Schieber, wenn die Schwinge zurück schwingt, wieder in seine Ausgangsposition drücken. Das wiederum funktioniert, wie schon an anderen Stellen besprochen, in der Baugruppe leider nicht so ohne Weiteres, dafür aber umso besser in der Simulationsumgebung.

■ 21.3 Gelenke einfügen

Damit die Bewegung des Schiebers wie gewünscht funktioniert, werden drei zusätzliche Gelenke benötigt:

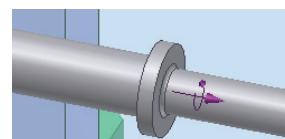
- ein **zylindrisches Schiebegelenk** zwischen der Schieberführung und dem Schieber
- ein **Punkt-Ebene-Gelenk** zwischen der kugelförmigen Stirnfläche des Schiebers und der Außenfläche der Schwinge
- eine **Druckfeder** in der Schieberführung, die den Schieber gegen die Schwinge drückt, sodass er wieder zurückgeschoben wird.



21.3.1 Zylindrisches Schiebegelenk

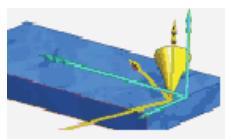
Das zylindrische Schiebegelenk wird aufgrund der Abhängigkeiten in der Baugruppe automatisch beim Wechsel in die Simulationsumgebung erzeugt. Im Moment müssen wir uns um dieses Gelenk nicht weiter kümmern.

Der Schieber erhält mit diesem Gelenk noch zwei Freiheitsgrade, die beabsichtigte Längsbewegung und eine Rotation um seine Längsachse.



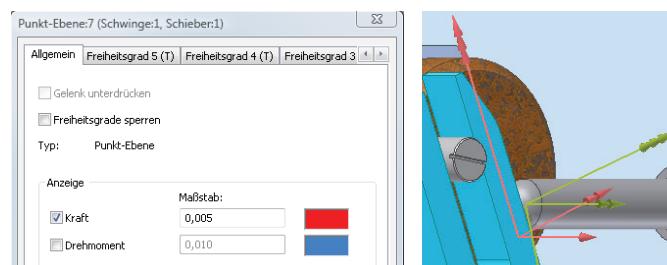
 **Freiheitsgrade**

Die Schaltfläche **FREIHEITSGRADE** auf der Registerkarte **ANSICHT** macht die Symbolik für die existierenden Freiheitsgrade eines jeden Bauteils sichtbar, sie kann allerdings aus nicht verständlichen Gründen nur in der Baugruppen- und nicht in der Simulationsumgebung betätigt werden.



21.3.2 Punkt-Ebene-Gelenk

Auch das Punkt-Ebene-Gelenk wird aufgrund der tangentialen Abhängigkeit in der Baugruppe zwischen der Schwinge und der Schieberkuppe automatisch erzeugt.



In den Eigenschaften dieses Gelenks wurde die Anzeige der Kraft aktiviert, sodass während der Simulation der Kraftvektor angezeigt wird. Der Maßstab für die Kraft wurde auf den Wert 0,05 geändert, da sonst die Darstellung zu groß wird.

Ein Punkt-Ebene-Gelenk hat fünf Freiheitsgrade, die im Dialogfenster auf Registerkarten zu finden sind.

Freiheitsgrad	Darstellung	Beschreibung
Freiheitsgrad 1 (R)		Rotation um die Y-Achse des Haupt-Koordinatensystems, die der Längsachse des Schiebers entspricht Dieser Freiheitsgrad wird zwar nicht benötigt, beim Sperren zeigt das Programm jedoch eine Warnung wegen einer Überbestimmung.
Freiheitsgrad 2 (R)		Rotation um die Z-Achse des Haupt-Koordinatensystems Dieser Freiheitsgrad wird zwar nicht benötigt, beim Sperren zeigt das Programm jedoch eine Warnung wegen einer Überbestimmung, da der Schieber in der Führung gegen diese Rotation gesperrt ist.
Freiheitsgrad 3 (R)		Rotation um die X-Achse des Haupt-Koordinatensystems Dieser Freiheitsgrad wird benötigt.
Freiheitsgrad 4 (T)		Translation in Richtung der X-Achse des Haupt-Koordinatensystems Dieser Freiheitsgrad wird zwar nicht benötigt, beim Sperren zeigt das Programm jedoch eine Warnung wegen einer Überbestimmung.

Freiheitsgrad	Darstellung	Beschreibung
Freiheitsgrad 5 (T)		Translation in Richtung der äußenen Schiebe-fläche auf der Schwinge Dieser Freiheitsgrad wird benötigt.

21.3.3 Druckfeder

Weil die Feder in der Schieberführung platziert werden muss, ist es der Übersichtlichkeit halber für diese Aktion vorteilhaft, die Schieberführung im Halbschnitt sehen zu können, damit die Feder problemlos eingefügt werden kann.

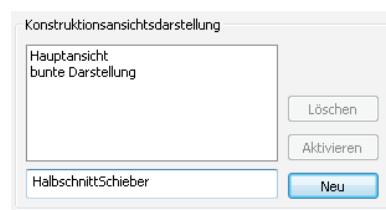
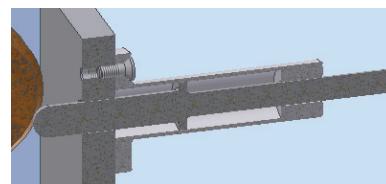
Über die Registerkarte ANSICHT und die Schaltfläche ANSICHT HALBER SCHNITT ist dies zusammen mit der [vertikalen Ursprungsebene](#) der Schieberführung leicht möglich. Man erhält damit zwar eine Darstellung, in der die gesamte Baugruppenansicht in dieser Ebene geschnitten ist, was aber für unsere Absicht kein Problem darstellt. Sinnvoll ist es auch, diese Ansicht zu speichern, damit sie jederzeit mit einem Tastendruck wieder aktiviert werden kann.

Ebenfalls auf der Registerkarte ANSICHT befindet sich hierzu die Schaltfläche KONSTRUKTIONANSICHTSDARSTELLUNGEN, mit der sich das abgebildete Dialogfenster öffnen lässt.

Der Eintrag HALBSCHNITTSCHIEBER und ein Klick auf den Button NEU sichert die Darstellung, die jetzt jederzeit mit dem erneuten Aufruf dieses Dialogfensters und dem Button AKTIVIEREN wieder auf den Bildschirm gerufen werden kann.

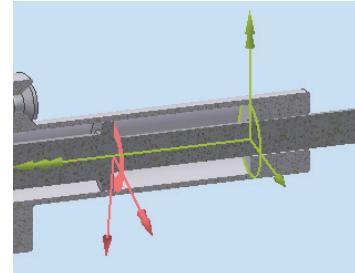
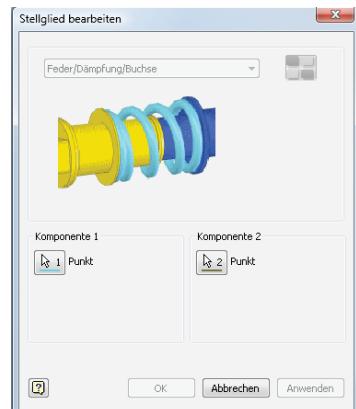
Die anderen hier eingetragenen Ansichten können natürlich ebenso aktiviert werden, sodass man sehr einfach zwischen allen gespeicherten Ansichten wechseln kann.

Über die Funktion GELENK EINFÜGEN und die Auswahl FEDER/DÄMPFUNG/BUCHSE wird jetzt die Druckfeder eingefügt. Sie soll sich einer-



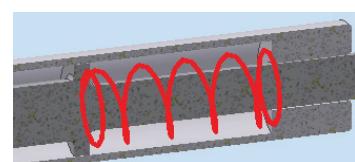
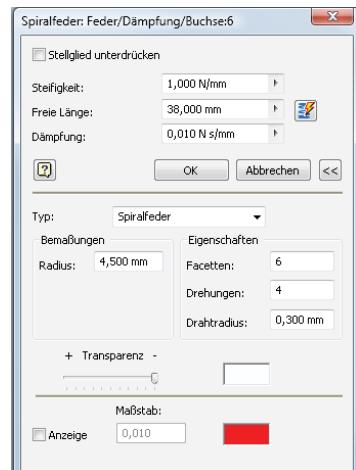
seits an der inneren hinteren Kreisringfläche der Schieberführung und andererseits am mittleren Ring des Schiebers abstützen.

Die beiden verlangten Komponenten, die als Punkte auf den jeweiligen Bauteilen anzugeben sind, sind also genau diese, wobei das Selektieren eines Kreises der Übergabe eines Zentrumspunktes entspricht.



Die innere hintere Kreisringfläche bzw. der Kreis entspricht der KOMPONENTE 1 und ist grün, die am Schieber entspricht der KOMPONENTE 2 und ist rot eingetragen.

schehen ist und mit OK quittiert wurde, wird eine Feder eingepasst, die allerdings in der Regel noch einer Nachbearbeitung bedarf.



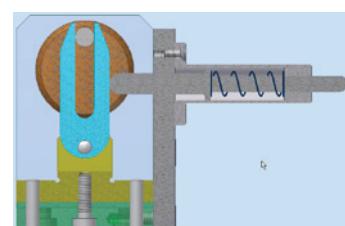
Die Feder muss nur das Eigengewicht bzw. die Reibungskraft des Schiebers in der Führung überwinden, weswegen die geringe STEIFIGKEIT von 1 N/MM völlig ausreichend ist.

Die FREIE LÄNGE ermittelt das Programm automatisch, im Beispiel ist es mit 38 MM eingetragen.

Auch die DÄMPFUNG spielt bei dieser Anwendung keine große Rolle, der Eintrag von 0,01 NS/MM kann so übernommen werden.

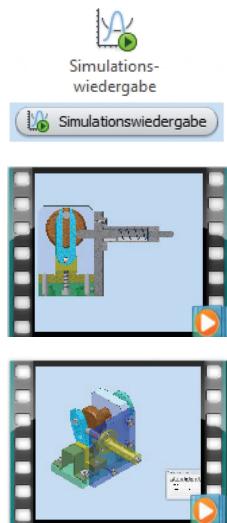
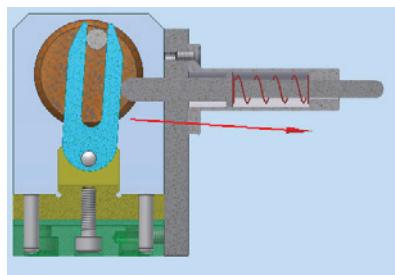
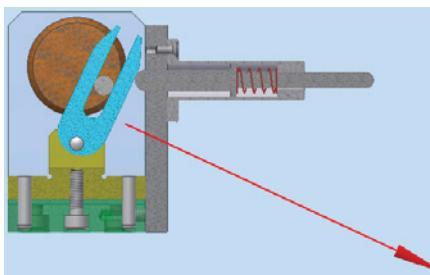
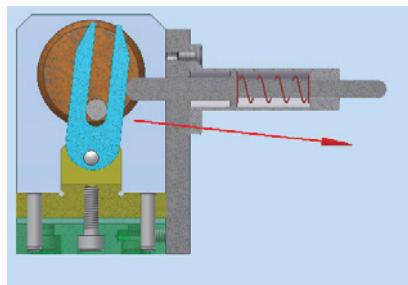
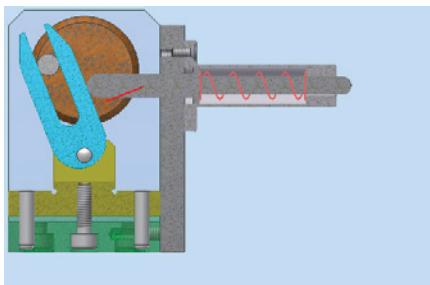
Die Geometrie der Feder sollte in Relation zu den Bauteilen eher klein ausfallen. Der RADIUS mit 4,5 MM ist dem Schieberdurchmesser anzupassen, 4 DREHUNGEN (Windungen) und ein DRAHTRADIUS von 0,3 MM ergibt eine optisch passende Feder.

Die Anzahl der FACETTEN steuert nur die Auflösung der kreisförmigen Windungen und ist völlig unerheblich. Die TRANSPARENZ kann je nach Geschmack eingestellt werden.



■ 21.4 Die erste Simulation

Die Animation, insbesondere der Film auf der DVD, zeigt sehr schön den Kraftvektor des Punkt-Ebene-Gelenks zwischen der Schwinge und dem Schieber. Diese Anzeige erfolgt, weil wir im Dialogfenster zu den Eigenschaften dieses Gelenks das entsprechende Auswahlfeld mit einem Haken versehen haben.



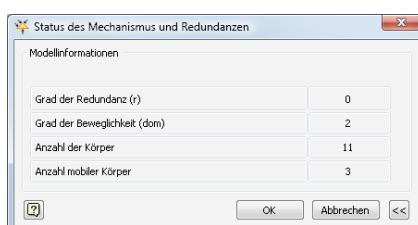
Animationen auf DVD

Der Kraftvektor befindet sich im Ursprung des Gelenkkoordinatensystems, das sich aus unerklärlichen Gründen nicht im Berührungs punkt der Bauteile befindet.

■ 21.5 Status des Mechanismus

Auf der Registerkarte VERBINDUNG befindet sich die Schaltfläche STATUS DES MECHANISMUS, mit dem wir uns in diesem Abschnitt etwas beschäftigen wollen, da dieser einige aufschlussreiche Angaben verbirgt.

Das Dialogfenster im oberen Bereich enthält eher allgemeine Informationen.



Der GRAD DER REDUNDANZ (R) ($r = \text{redundancy}$) gibt die Anzahl der Überbestimmungen an, die in unserem Beispiel nicht vorhanden sind, später aber noch untersucht werden sollen.



Der GRAD DER BEWEGLICHKEIT (DOM, dom = dimensions of mobility) zählt die Anzahl der Kinematikketten (Gelenkketten). Eine typische geschlossene Viergelenkkette zeigt die nebenstehende Abbildung, bei der ein Element der Kette, die Basis mit den beiden Lagerstellen, festgelegt ist. Werden mehrere Gelenkketten funktional miteinander verbunden, dann gibt der Grad der Beweglichkeit ihre Anzahl an.

Die ANZAHL DER KÖRPER gibt die Summe der fixierten und beweglichen Körper in der Simulationsumgebung an, die ANZAHL MOBILER KÖRPER gibt nur die Summe der Körper im Ordner BEWEGLICHE GRUPPEN an. Die Zahlenwerte haben nicht unbedingt etwas mit der tatsächlichen Anzahl der Bauteile zu tun, da mehrere fest miteinander verbundene Bauteile zu jeweils einer GESCHWEISSTEN GRUPPE zusammengefasst werden, die dann als ein Körper gezählt wird.

Der untere Bereich des Dialogfensters, der mit der Doppelpfeil-Schaltfläche geöffnet werden kann, zeigt Informationen zu den in der Baugruppe enthaltenen Gelenkketten an.

Unsere Kurbelschwinge mit dem Schieber besteht aus zwei Gelenkketten, deren Eigenschaften bzw. Mitglieder getrennt betrachtet werden können. Die im Dialogfenster als erste geschlossene Kette (Kette 1/2) bezeichnete Gelenkkette besteht aus den folgenden vier Elementen:

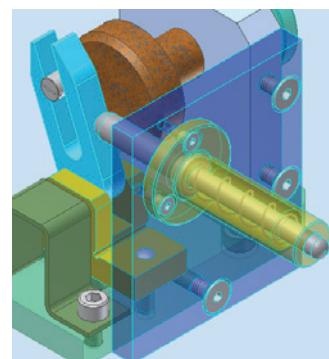
Geschweißte Gruppe:2 → Schwinge:1 → Schieber:1 → Geschweißte Gruppe:3

Die Geschweißte Gruppe:2 stellt den Lagerbock der Schwinge mit seinen Befestigungsteilen dar, die Geschweißte Gruppe:3 die Seitenwand mit der Schieberführung. Da sich die beiden geschweißten Gruppen im Ordner FIXIERT befinden und miteinander verbunden sind, können sie als ein Element betrachtet werden. Die Beweglichkeit dieser Drei-Element-Kette wird durch die Punkt-Ebene-Verbindung zwischen der Schwinge und dem Schieber gewährleistet.



Mit einem Klick auf das rautenförmige Viergelenkketten-Symbol kann man die Elemente dieser Kette sichtbar machen.

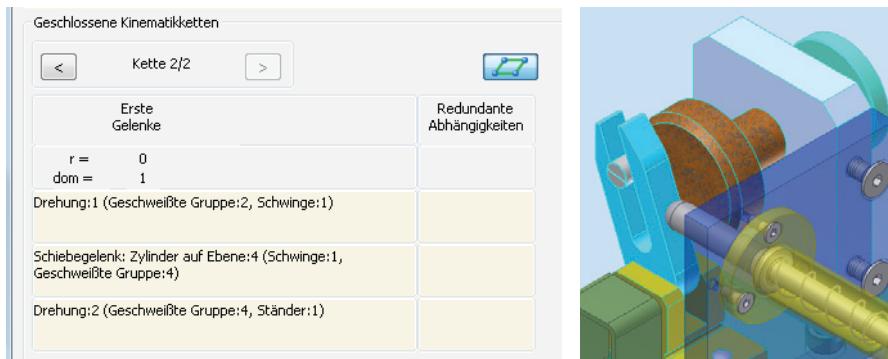
Geschlossene Kinematikketten	
Kette 1/2	
Erste Gelenke	Redundante Abhängigkeiten
$r = 0$ dom = 2	
Drehung:1 (Geschweißte Gruppe:2, Schwinge:1)	
Punkt-Ebene:7 (Schwinge:1, Schieber:1)	
Zylindrisch:3 (Geschweißte Gruppe:3, Schieber:1)	



Die Informationen zur zweiten in der Baugruppe enthaltenen Gelenkkette (Kette 2/2) erhält man mit einem Klick auf die Pfeiltaste. Sie besteht aus den folgenden vier Elementen:

Geschweißte Gruppe:2 → Schwinge:1 → Geschweißte Gruppe:4 → Ständer

Die Geschweißte Gruppe:2 verbindet den Lagerbock der Schwinge mit seinen Befestigungsteilen und den Ständer fest miteinander, welche somit als ein Element betrachtet werden können. Die Geschweißte Gruppe:4 gehört zu den beweglichen Bauteilen und besteht aus dem Handrad und dem Drehbolzen mit ihren Zubehörteilen.



■ 21.6 Redundante Abhängigkeiten

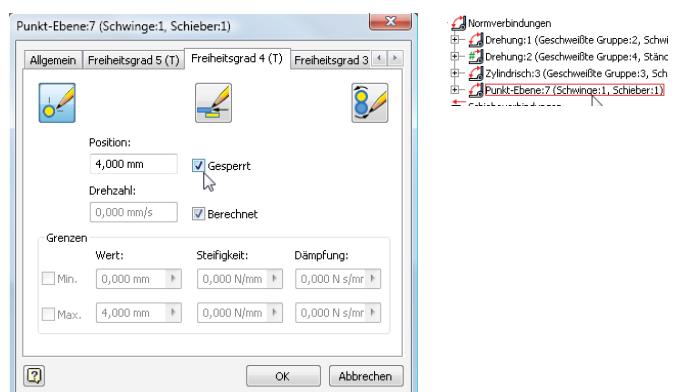
Von besonderer Bedeutung im Dialogfenster STATUS DES MECHANISMUS ist im erweiterten Bereich die Spalte REDUNDANTE ABHÄNGIGKEITEN, die im Beispiel der Kurbelschwinge mit Schieber leer ist, da keine Redundanzen vorhanden sind.

Diesen eigentlich optimalen Status wollen wir nun ändern, indem wir zu Demonstrationszwecken der Baugruppe eine Überbestimmung hinzufügen.

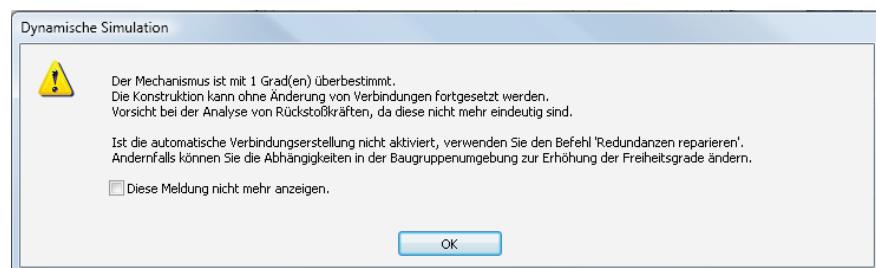
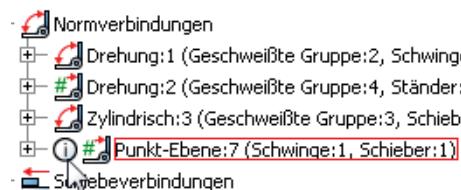
21.6.1 Redundanz hinzufügen

Das Gelenk PUNKT-EBENE:7, das den Schieber mit der Schwinge verbindet, bietet sich für diese Aktion an, weil es erstens viele Freiheitsgrade besitzt und zweitens diese im vorherigen Abschnitt alle schon beschrieben wurden, weswegen man die entsprechende Meldung gut nachvollziehen kann.

Über die EIGENSCHAFTEN des Gelenks sperren wir vorübergehend den Freiheitsgrad 4 (T), die seitliche Bewegung des Schiebers in Richtung der X-Achse des Hauptkoordinatensystems.



Eine Überbestimmung tritt deshalb auf, weil diese Bewegung auch schon durch die zylin- drische Führung des Schiebers in der Schieberführung unterbunden wurde. Sofort wird das Gelenk im Browser als redundant markiert.

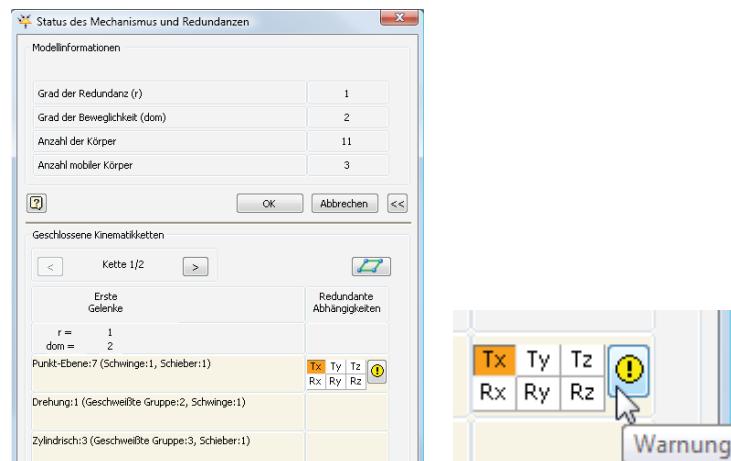


Die ebenfalls sofort erscheinende Meldung warnt entsprechend, sagt aber auch aus, dass der Mechanismus trotzdem weiter betrieben werden könne.

21.6.2 Redundanz untersuchen

Status des Mechanismus

Wird jetzt das Dialogfenster STATUS DES MECHANISMUS noch einmal aufgerufen, dann zeigt es erstens den Grad der REDUNDANZ (R) mit dem Wert 1 an, und zweitens wird im erweiterten Bereich bei den Informationen zur KETTE 1/2 der Freiheitsgrad orange markiert, der überbestimmt ist.



In unserem Fall ist es natürlich der Freiheitsgrad TX, also die Translation in X-Richtung, die wir bewusst gesperrt haben.

Die folgenden Kürzel werden verwendet:

- T = Translationsabhängigkeit
- R = Drehabhängigkeit
- RIT = Rollabhängigkeit
- TG = Tangentenabhängigkeit
- X, Y, Z = Koordinatenachsen

Das Ausrufezeichen im gelben Kreis macht extra noch einmal auf die Überbestimmung aufmerksam. Die Inventor-Hilfe gibt dazu folgende Anweisung: „Klicken Sie auf das Symbol, um Vorschläge zur Lösung der Redundanz anzuzeigen.“

Tatsächlich sieht der Lösungsvorschlag selbst bei so einfachen Fällen wie folgt aus:



Vergessen Sie nicht, den gesperrten Freiheitsgrad wieder zu entsperren, damit weitere Warnmeldungen bei den nächsten Übungen unterbleiben.

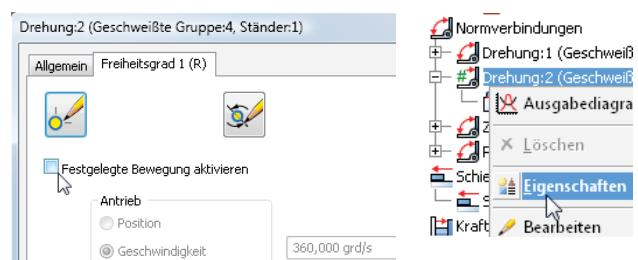
■ 21.7 Gelenkdrehmoment aktivieren

Bisher haben wir das Handrad, respektive den Drehbolzen (GESCHWEISSTE GRUPPE:4), über die Normverbindung DREHUNG:2 mit einer konstanten Drehzahl angetrieben. Die auftretenden Kräfte durften dabei beliebig groß werden.

Dies ist bei einem Antrieb mit hoher Leistung und konstanter Drehzahl auch angesagt.

Steht allerdings nicht genügend Leistung für den Antrieb zur Verfügung, so bremsen die Kräfte der Feder und die Reibung in den Gelenken den Antrieb derart, dass eine Funktion u. U. nicht mehr gewährleistet ist.

In diesem Abschnitt wollen wir deshalb die konstante Drehzahl abschalten und stattdessen mit einem Antriebsmoment arbeiten. Zum Abschalten, ohne dass der vorher eingegebene Wert verloren geht, genügt es, im Eigenschaftsfenster des Gelenks, unter dem rechten



Button des Freiheitsgrades, den Haken bei FESTGELEGTE BEWEGUNG AKTIVIEREN zu entfernen. Ein Gelenkdrehmoment im selben Eigenschaftsfenster unter dem mittleren Button kann erst eingegeben werden, wenn ein Haken bei GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN gesetzt wurde.



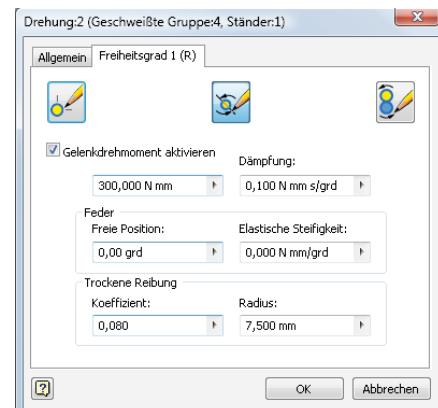
Simulations-
wiedergabe



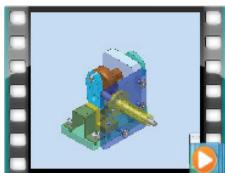
Als MOMENT wurden 300 NMM und als DÄMPFUNG 0,1 NMMS/GRD eingegeben. Die Dämpfung bewirkt nur ein weicheres Anfahr- und Endverhalten und hat sonst wenig Bedeutung in Bezug auf die Leistung. Eine federnde Wirkung hat das Gelenk nicht.

Die TROCKENE REIBUNG wurde, gut geschmiert, mit dem KOEFFIZIENT 0,8 bei einem RADIUS von 7,5 MM eingetragen. Der Radius ergibt sich aus dem Lagerdurchmesser von 15 mm.

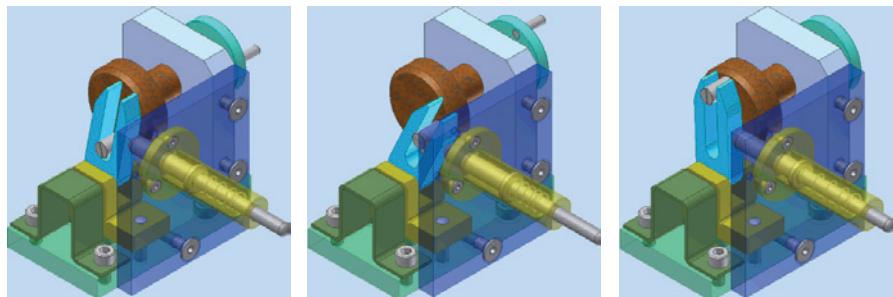
Die eingegebenen Daten sind insofern grenzwertig, als es so der Kurbelschwinge gerade noch gelingt, den Schieber zu betätigen. Schon ein etwas erhöhter Reibwert bringt sie zum Stillstand.



■ 21.8 Die zweite Simulation

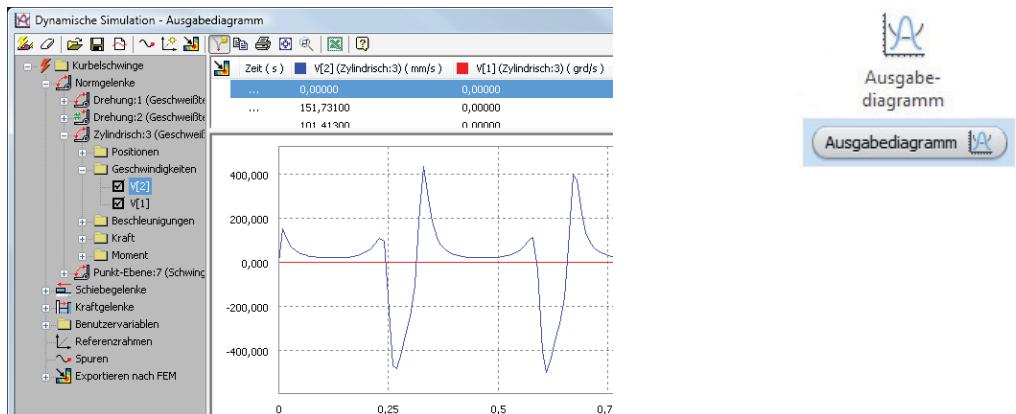


Animation auf DVD



Die Stellung im mittleren Bild zeigt die Position, bei der die maximale Gegenkraft wirkt und die Kurbelschwinge fast stehen bleibt.

Im abgebildeten Ausgabediagramm ist der Geschwindigkeitsverlauf des Schiebers dargestellt.

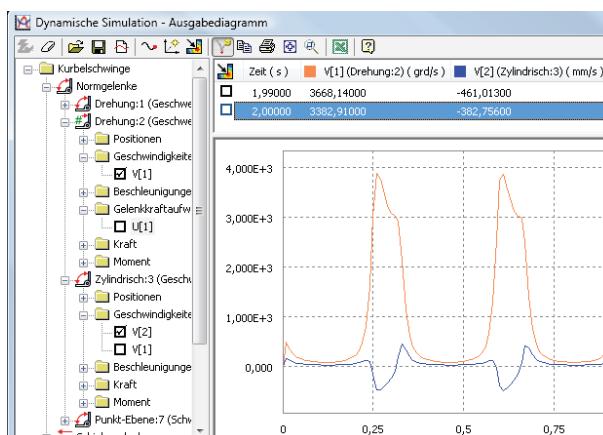


Dass im Objektbrowser zwei Geschwindigkeiten dargestellt sind (V[2] und V[1]), hat den Hintergrund, dass der Schieber zwei Freiheitsgrade besitzt, einmal die Translation und zum Zweiten die Rotation um seine Längsachse.

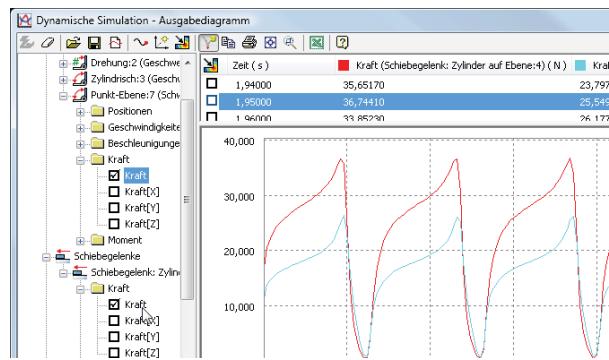
Die Rotationsgeschwindigkeit V[1] (rot) hat dementsprechend die Einheit GRD/S (siehe Kopfzeile) und den Wert 0.

Die Translationsgeschwindigkeit V[2] (blau) beschreibt die Schieberbewegung, die zu Beginn kurz ansteigt, aber sofort wieder bis fast auf null abfällt (maximale Federkraft), um dann zum Nulldurchgang (Wendepunkt) hin und danach, durch die Federunterstützung stark beschleunigt, über den zweiten Wendepunkt hinweg wieder in die Anfangsposition zu kommen.

Die orange dargestellte Antriebsdrehzahl verhält sich entsprechend: Sie steigt kurz an, fällt dann auf fast null ab und erreicht ihr Maximum bei ca. 3900 grd/s.



Der Kraftverlauf in der Schwinge (Schiebegelenk) und der Kraftverlauf zwischen Schwinge und Schieber (Punkt-Ebene) sind bis auf die Größe identisch. In der Schwinge wirken allerdings höhere Kräfte als an ihrer Außenfläche.



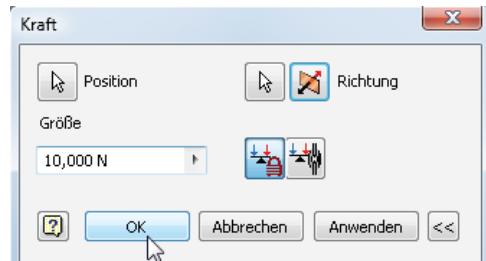
■ 21.9 Externe Belastung

Damit der Schieber nicht nur Luftsäulen hin und her schiebt, wollen wir ihm etwas zu tun geben. Als Ersatz für eine realistische Aufgabe setzen wir an seinem Ende eine externe Kraft an, gegen die er schieben soll.

21.9.1 Externe Kraft definieren



Kraft

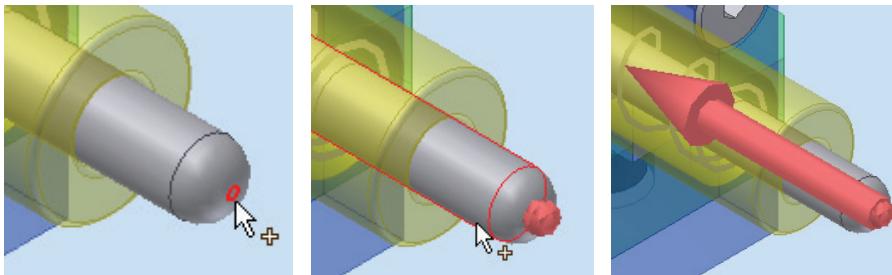


Die POSITION soll sich am Ende des Schiebers an der Kuppenfläche befinden.

Die RICHTUNG wird durch die Längsachse des Schiebers bestimmt.

Der RICHTUNGSSINN ist so einzustellen, dass die Kraft gegen den Mechanismus wirkt.

Die GRÖSSE der Kraft soll 10 N als konstanter Wert betragen.



Wurden alle Daten der externen Kraft eingegeben, dann ist das Fenster mit OK zu schließen. Leider ist danach von der definierten Kraft im Grafikfenster nichts mehr zu sehen. Das Auswahlfeld ANZEIGE im erweiterten Dialogfenster sorgt auch nur dafür, dass der Kraftvektor während einer laufenden Simulation eingeblendet wird.

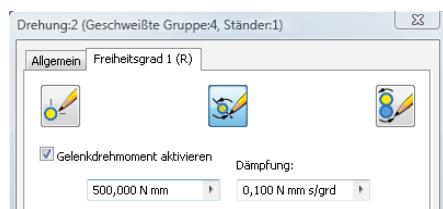
Im Objektbrowser dagegen befindet sich im Ordner EXTERNE BELASTUNGEN der neue Eintrag KRAFT:1, über den auch die Eigenschaften der Kraft verändert werden können. U.a. wäre es hier möglich, die Kraft über das Eingabediagramm variabel zu definieren.



21.9.2 Antriebsmoment anpassen

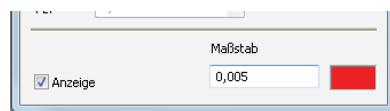
Im vorherigen Abschnitt haben wir das Gelenkmoment im Gelenk Drehung:2, das als Antriebsmoment fungiert, auf 300 Nmm festgelegt und festgestellt, dass dies gerade so ausreicht, um die Federkraft zu überwinden. Erwartungsgemäß ist dieses Moment jetzt zu schwach, und eine ausgeführte Simulation bleibt nach einem kurzen Moment in ihrer Gleichgewichtslage stehen.

Das Antriebsmoment muss also über die Eigenschaften der Normverbindung Drehung:2 erhöht werden. Dazu tragen Sie im Dialogfenster für den Freiheitsgrad und mit dem mittleren Button den Wert 500 NMM als neues Antriebsmoment ein. Alle anderen Einträge bleiben unverändert stehen.



21.9.3 Die dritte Simulation

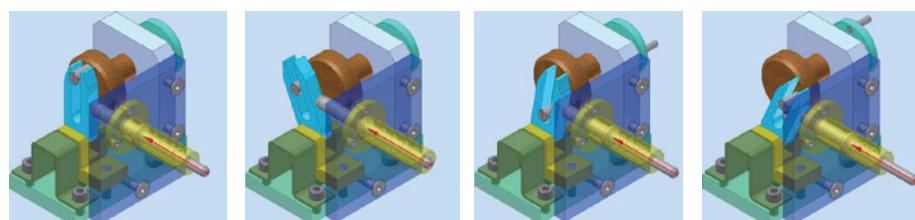
Damit wir bei der Simulation etwas von der externen Kraft zu sehen bekommen, rufen wir über ihr Kontextmenü im Objektbrowser BEARBEITEN auf und markieren das Auswahlfeld ANZEIGE. Gleichzeitig setzen wir den MASSSTAB auf den Wert 0,005 zurück, damit der Kraftvektor in einer angenehmen Größe angezeigt wird, und stellen die Farbe der Anzeige auf Rot.





Animation auf DVD

Die Simulation selbst unterscheidet sich ansonsten nicht groß von der vorherigen.



500 Nmm Antriebsmoment sorgen für einen kontinuierlichen Durchlauf, auch wenn die Federkraft die Schiebergeschwindigkeit wieder sehr beeinflusst.

21.9.4 Das Ausgabediagramm



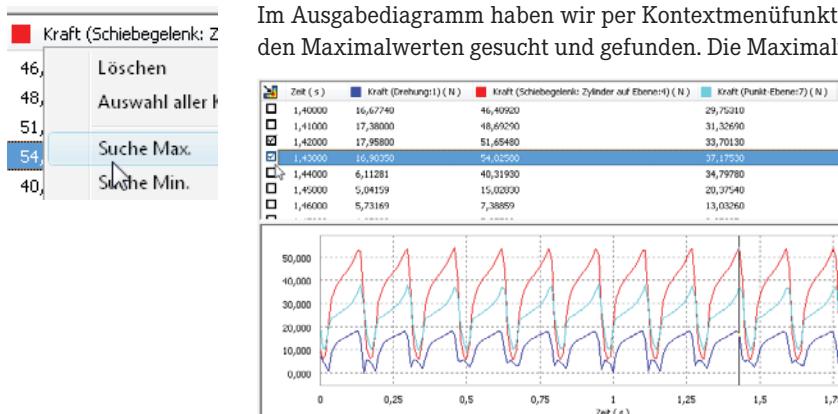
Im AUSGABEDIAGRAMM sind jetzt die drei Kräfte zur Anzeige markiert, mit denen die Schwinge belastet wird.

Das Normgelenk DREHUNG:1 befindet sich im Lagerbock und stellt das Schwingenlager (blau) dar, das SCHIEBEGELENK:ZYLINDER AUF EBENE:4 ist die Verbindung zwischen dem Exzenterbolzen und der Schwinge (rot), und die PUNKT-EBENE:7-Verbindung ist das Berührungsgelenk zwischen dem Schieber und der Schwinge (cyan).

Im Ausgabediagramm haben wir per Kontextmenüfunktion SUCHE MAX. eine Stelle mit den Maximalwerten gesucht und gefunden. Die Maximalwerte der Kräfte liegen fast, aber

nicht ganz, übereinander. Bei der Zeit 1,42 Sekunden hat das Schwingengelenk, bei 1,43 Sekunden haben das Schiebe- und das Punkt-Ebene-Gelenk ihre Maxima.

Ganz links im Diagramm wurden diese beiden Werte für eine nachfolgende Festigkeitsuntersuchung der Schwinge mit Haken versehen.

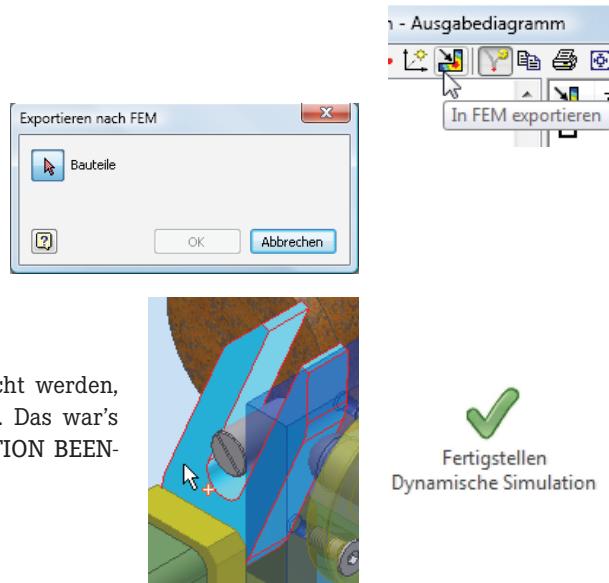


■ 21.10 Export nach FEM

Der Export nach FEM kann direkt aus dem Ausgabediagramm heraus erfolgen, indem man die entsprechende Schaltfläche betätigt.

Exportiert werden die beiden Zeitschritte, die im letzten Abschnitt im Ausgabediagramm markiert wurden. Nach dem Buttonklick müssen im ersten Schritt die Bauteile selektiert werden, für die der Export stattfinden soll.

In unserem Beispiel soll nur die Schwinge untersucht werden, weswegen auch nur dieses Bauteil auszuwählen ist. Das war's schon. Mit der Schaltfläche DYNAMISCHE SIMULATION BEENDEN verlassen wir jetzt die Simulationsumgebung.



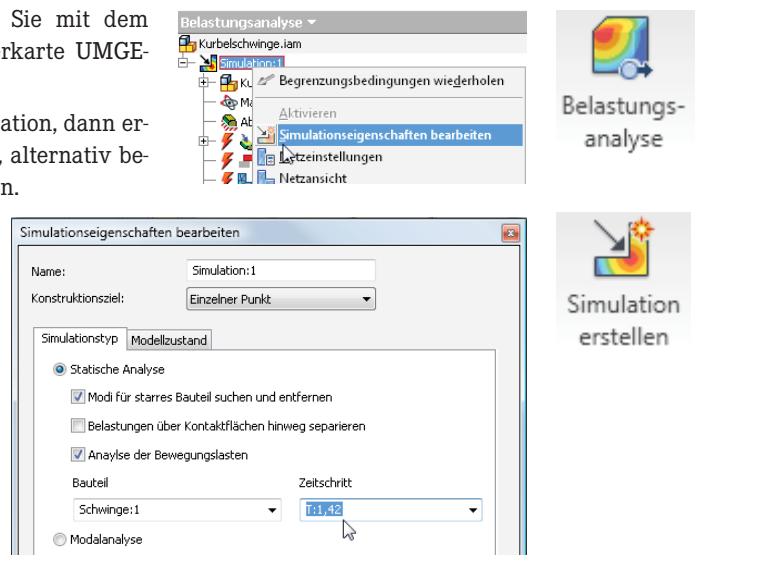
■ 21.11 Die FE-Analyse der Schwinge

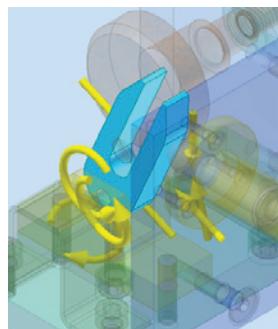
Die BELASTUNGSANALYSE starten Sie mit dem gleichnamigen Icon über die Registerkarte UMGEBUNG.

Existiert bereits eine Belastungssimulation, dann erstellen Sie jetzt eine neue Simulation, alternativ bearbeiten Sie die bestehende Simulation.

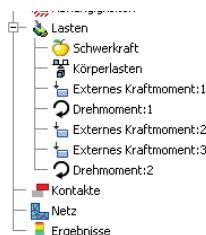
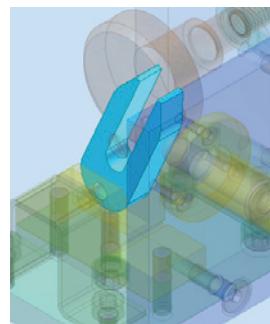
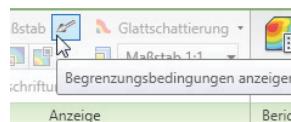
In den Simulationseigenschaften aktivieren Sie das Auswahlfeld ANALYSE DER BEWEGUNGSDATEN. Als einziges BAUTEIL ist die SCHWINGE:1 ohnehin eingetragen, darüber hinaus wählen Sie einen ZEITSCHRITT, z.B. T:1,42, aus.

Sofort nach dem Schließen des Fensters wird die Schwinge als einzige aktives Bauteil der Baugruppe angezeigt, allerdings mit allen Lastpfeilen, welche die Darstellung relativ unübersichtlich erscheinen lassen.





Ein Klick auf den Button
BEGRENZUNGS-
BEDINGUNGEN ANZEIGEN
ändert diesen Umstand.

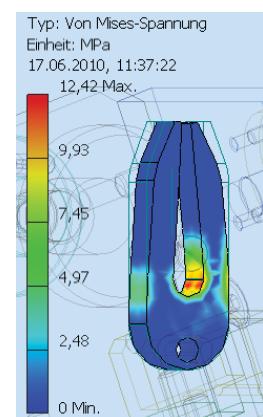
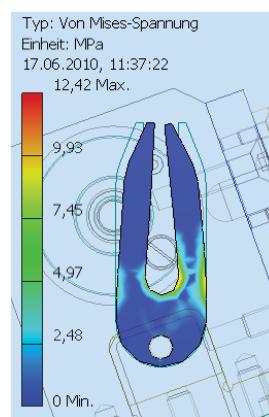
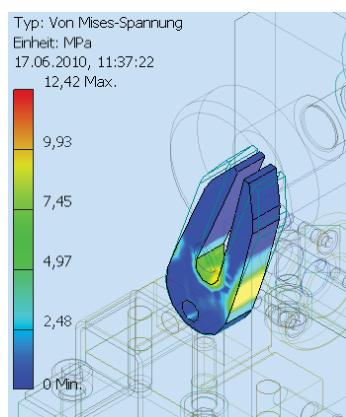


Nach einer Aktualisierung der Einträge im Objektbrowser erscheinen dort alle an der Schwinge angreifenden Lasten. Diese sind zwar neutral benannt, beim Überfahren mit dem Mauszeiger werden die jeweiligen Angriffsstellen jedoch am Bauteil hervorgehoben.

Die eigentliche Simulation ist jetzt der nächste Schritt, der über das Markierungs menü oder mit der Schaltfläche SIMULIEREN gestartet wird. Nach einer kurzen Zeit der Berechnung erscheinen die Ergebnisse.

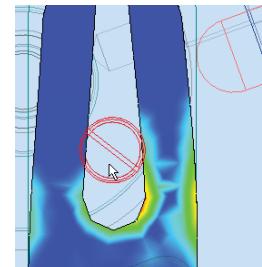
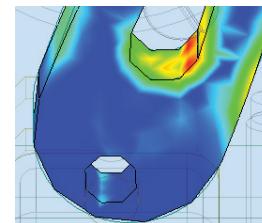
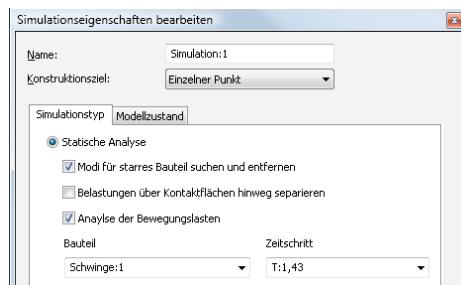


Simulieren



Die Spannungswerte der Von-Mises-Spannung sind aufgrund der geringen Kräfte natürlich gering, jedoch lassen sich sehr gut die Stellen an der Schwinge erkennen, an denen die maximalen Beanspruchungen auftreten.

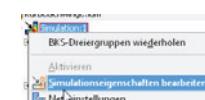
Das Schwingenlager wird auch bei den Maximalkräften nur wenig beansprucht. Interessant ist jedoch, dass an der Schwingengabel die maximalen Beanspruchungen weder an der Stelle auftreten, wo der Exzenterbolzen liegt, noch dort, wo sich der Schieber befindet, sondern außen und innen, jeweils am Fuß der Gabel. Die Begründung dafür ist natürlich, dass an dieser Stelle die Biegemomente am größten sind.



Wird über die Bearbeitung der Simulationseigenschaften der zweite exportierte Zeitschritt T:1,43 im Dialogfenster eingestellt, dann muss die Simulation neu gestartet werden.

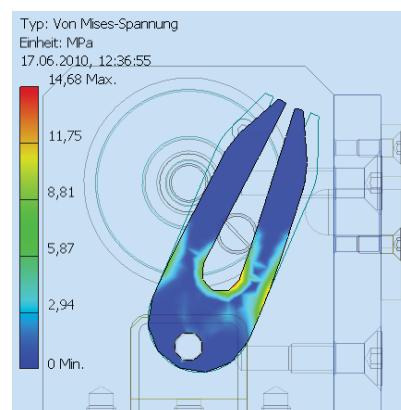


TIPP: Alternativ könnte mit diesem Zeitschritt auch eine neue Simulation erstellt werden, man könnte dann zwischen den Ergebnissen beider Analysen hin und her schalten.



Die Stellen an der Schwinge, an der die maximalen Beanspruchungen liegen, ändern sich natürlich kaum, der Zeitunterschied beträgt gerade mal eine hundertstel Sekunde.

Allerdings ist der ermittelte Maximalwert der Von-Mises-Spannung mit 14,68 MPa gegenüber dem vorherigen Maximalwert von 12,42 MPa um knapp 20% höher, was eine genaue Untersuchung aller Maxima-Stellen im Ausgabediagramm der dynamischen Simulation recht sinnvoll erscheinen lässt.

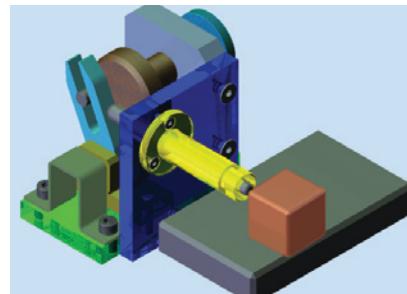


22

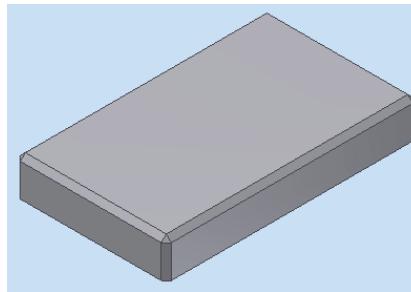
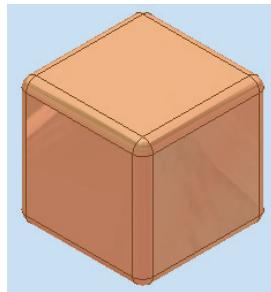
Kurbelschwinge, die Dritte

Der Kurbelschwinge soll in diesem letzten kurzen Beispiel ein pseudo-praktischer Sinn gegeben werden, indem sie nun tatsächlich ein Objekt mit dem Schieber bewegt.

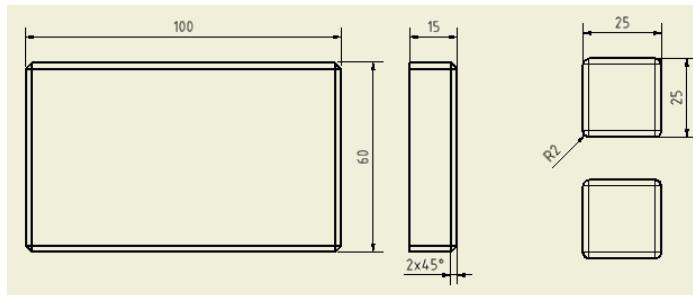
Eine weitere Grundplatte, auf der sich ein Würfel aus Kupfer befindet, wird der Baugruppe hinzugefügt. Der durch die Kurbelschwinge angetriebene Schieber soll den Würfel von der Platte schieben.



■ 22.1 Die Bauteile



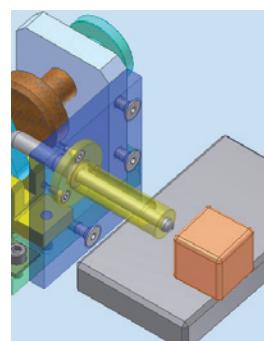
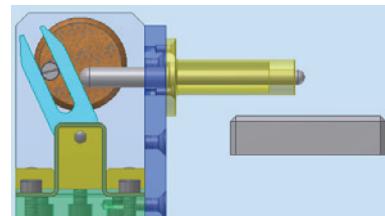
Die beiden Bauteile sind schnell erstellt und beschrieben. Der Würfel hat die Kantenlänge 25 MM und die Grundplatte die Abmessungen 100 X 60 X 15 MM. Der Würfel besteht aus Kupfer, die Grundplatte aus Stahl. Die Zeichnungsableitung der beiden Bauteile zeigt auch die weitere Bearbeitung.



■ 22.2 Die Baugruppe

Positionieren Sie die Grundplatte der 3D-Abhängigkeit FLUCHTEND so, dass sie 25 MM über der Basisfläche der Kurbelschwinge angeordnet ist. Die vorderen beiden Stirnflächen richten Sie ebenfalls mit der 3D-Abhängigkeit FLUCHTEND koplanar aus, den Abstand der Seitenfläche der Grundplatte von der Seitenplatte der Kurbelschwinge stellen Sie mit der 3D-Abhängigkeit PASSEND und einem Abstand von ebenfalls 25 mm ein.

Der Würfel wird frei, d.h. ohne Abhängigkeiten, positioniert. Er soll sich natürlich über der Grundplatte und in einem geringen Abstand vom eingefahrenen Schieber befinden. Dass er genau auf der Grundfläche liegt, ist nicht wichtig und ohne Abhängigkeiten sowieso nicht hinzubekommen. Die Schwerkraft wird später dafür sorgen, dass er seine Unterlage findet.



■ 22.3 Die Simulationsumgebung



Dynamische
Simulation

Wie schon so oft starten wir die Simulationsumgebung über die Registerkarte UMGEUNG und die Schaltfläche DYNAMISCHE SIMULATION.

Gegenüber der letzten Version hat sich im Objektbrowser nicht viel verändert. Lediglich im Ordner FIXIERT sind jetzt zusätzlich die GRUNDPLATTESCHIEBETEIL:1 und der WÜRFEL:1 zu finden.

Dass die Grundplatte fixiert ist, ist richtig, der Würfel sollte aber beweglich sein. Da der Würfel völlig ohne Abhängigkeiten in der Baugruppe platziert wurde, konnte das Simulationsprogramm auch keine Abhängigkeiten in Gelenke umwandeln, insofern wurde er den fixierten Bauteilen zugeordnet. Dieser Umstand wird sich ändern, sobald der Würfel mithilfe von Gelenken eine Verbindung zum Rest der Baugruppe bekommt.



■ 22.4 Gelenke einfügen

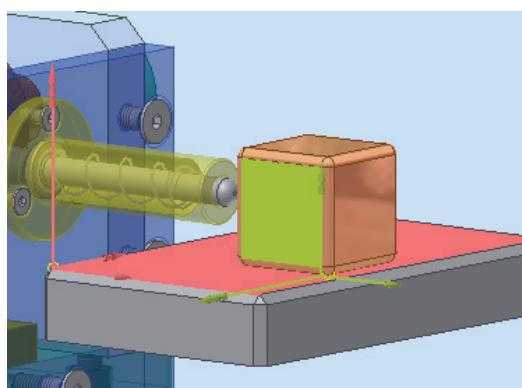
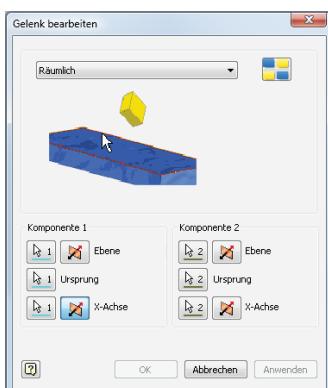
Der Würfel benötigt mehrere Verbindungen zur Grundplatte und zum Schieber.

22.4.1 Räumliches Gelenk

Der Würfel soll alle Freiheitsgrade behalten, er soll sich in jede Richtung bewegen und um jede Achse rotieren können. Trotzdem benötigt er einen Bezug zur Grundplatte, damit die Bewegungskoordinaten einen Zusammenhang mit den Koordinatensystemen der Kurbelschwinge herstellen können. Das Gelenk, das den Würfel mit der Grundplatte verbindet, kann somit nur ein räumliches Gelenk sein.

Mit GELENK EINFÜGEN und der Auswahl RÄUMLICH wird diese Aktion eingeleitet. Die beiden Komponenten sind natürlich die Grundplatte und der Würfel. Die gewählten Flächen, der Ursprung und die X-Achse, sind unerheblich, da diese Verbindung ja ohnehin alle Bewegungsmöglichkeiten offenhält.

Das Gelenk taucht nach der Definition im Objektbrower unter NORMVERBINDUNGEN als RÄUMLICH:9 auf.

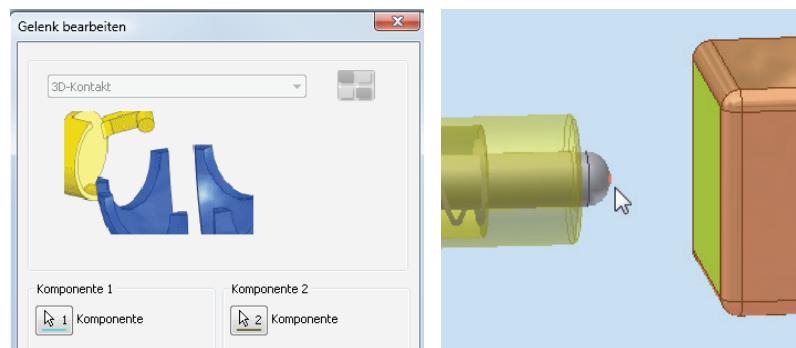


22.4.2 3D-Kontakte

Im Weiteren soll der Würfel zwar frei bleiben, jedoch die Grundplatte und den Schieber als Bauteile wahrnehmen, die nicht zu durchdringen sind. Der 3D-Kontakt erfüllt diese Bedingung, weswegen diese Pseudoverbindung zweimal eingetragen werden muss. Die Einfügung der 3D-Kontakte ist einfach, es müssen jeweils nur die beiden Komponenten selektiert werden, zwischen denen der Kontakt hergestellt werden soll.

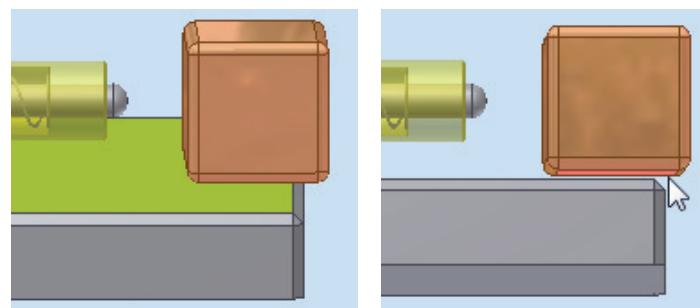


Der Aufruf erfolgt wieder über die Schaltfläche **GELENK EINFÜGEN**, diesmal mit der Auswahl **3D-KONTAKT**. Für den ersten 3D-Kontakt klicken Sie die vorderste Kuppe des Schiebers als eine und eine Würfelfläche als zweite Komponente an.



Mit dem Button **ANWENDEN** bleibt das Dialogfenster offen, und es kann gleich im Anschluss der zweite Kontakt definiert werden.

Den zweiten 3D-Kontakt zwischen der Grundplatte und dem Würfel stellen Sie in gleicher Art und Weise her. Mit **OK** schließen Sie den Vorgang ab.

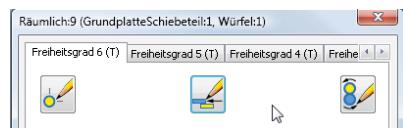


■ 22.5 Reibung definieren

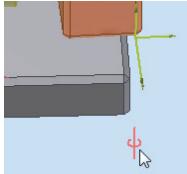
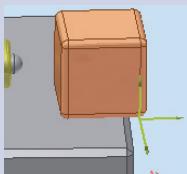
Falls die externe Kraft aus Kapitel 21 noch im System definiert ist, sollte diese gelöscht werden, denn jetzt geht die aufzuwendende Kraft vom Würfel aus, der mit seiner Massenträgheit und den Reibungswerten für die Belastung sorgen soll.

Die Reibungswerte müssen allerdings erst noch definiert werden. Sie sind dem räumlichen Gelenk zwischen der Grundplatte und dem Würfel zuzuordnen.

Da dieses Gelenk jedoch alle sechs Freiheitsgrade besitzt, müssen Sie zuerst die Freiheitsgrade suchen, für die Reibungskräfte relevant sein können. Bei relevanten Freiheitsgraden versehen Sie jeweils über den mittleren Button im Eigenschaftsfenster des Gelenks und den entsprechenden Freiheitsgrad das Auswahlfeld GELENKKRAFT AKTIVIEREN mit einem Haken und geben den KOEFFIZIENTEN der Reibung ein.



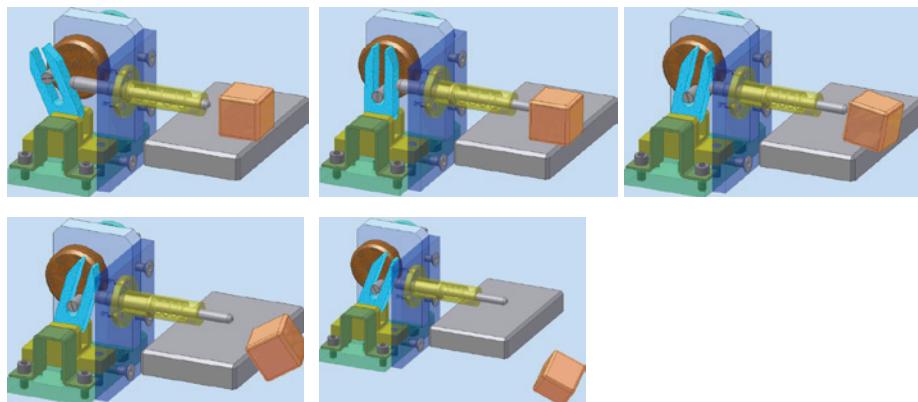
Freiheitsgrad	Darstellung	Relevanz	Reibung
Freiheitsgrad 6 (T)		Translation in Z-Richtung, nicht relevant	Trockene Reibung Koeffizient: 0,000
Freiheitsgrad 5 (I)		Translation in X-Richtung, relevant	Trockene Reibung Koeffizient: 0,200
Freiheitsgrad 4 (R)		Translation in Y-Richtung, relevant	Trockene Reibung Koeffizient: 0,200
Freiheitsgrad 3 (R)		Rotation um die X-Achse, nicht relevant	Trockene Reibung Koeffizient: 0,000

Freiheitsgrad	Darstellung	Relevanz	Reibung
<input type="checkbox"/> Freiheitsgrad 2 (R)		Rotation um die Z-Achse, relevant	Trockene Reibung Koeffizient: 0,200
<input type="checkbox"/> Freiheitsgrad 1 (R)		Rotation um die Y-Achse, nicht relevant	Trockene Reibung Koeffizient: 0,000

■ 22.6 Die Simulation



Jetzt kann die Simulation gestartet werden. Im ersten Moment fällt der Würfel, der etwas über der Grundplatte schwebt, aufgrund seines Gewichts und der Schwerkraft auf die Grundplatte, während die Kurbelschwinge anfängt sich zu bewegen. Der Würfel bleibt so lange auf der Platte liegen, bis der Schieber so weit ausgefahren ist, dass er ihn berührt. Nun schiebt der Schieber den Würfel an die Kante der Grundplatte, über die er kippt und ins Bodenlose fällt.



Eine Spielerei? Ja, vielleicht in diesem Beispiel, praktische Anwendungen gibt es jedoch genug, in denen solche oder ähnliche Vorgänge stattfinden. Es kommt auch nicht so sehr auf dieses konkrete Beispiel an. Die Schritte, die dahin führen, sind von Bedeutung, und die können in jeder Anwendung so ähnlich wiederholt werden.

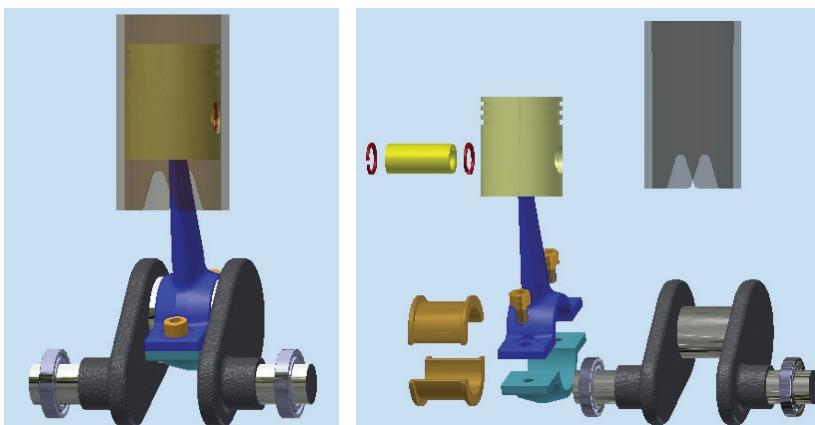
23

Hubkolben-Triebwerk

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 beiden 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.

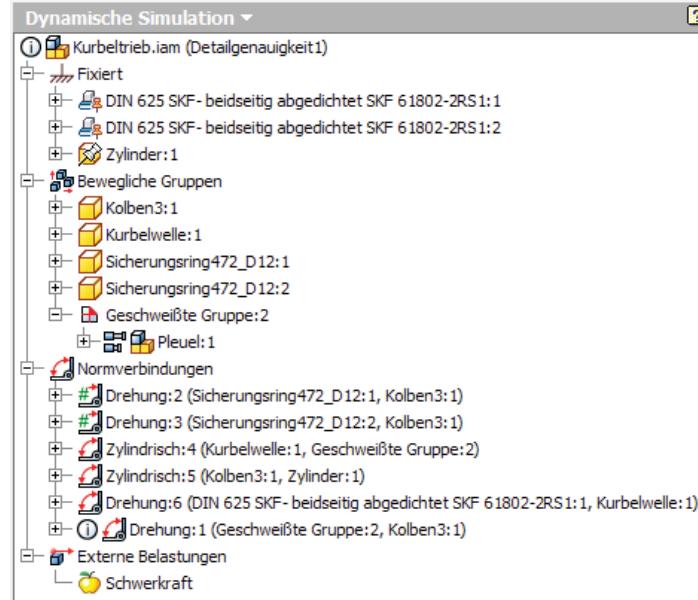


TIPP: Sollen jedoch in einer Simulation die Unterbaugruppen einer Baugruppe eigene funktionsgemäße Bewegungen ausführen, so ist dies nur möglich, wenn sie die Eigenschaft **FLEXIBEL** besitzen.



Dynamische
Simulation

■ 23.2 Die Simulationsumgebung



Der erste Blick in der Simulationsumgebung gehört dem Objektbrowser.

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.

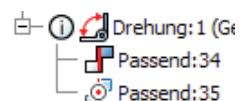
Das zuletzt angezeigte Gelenk, Drehung:1, zwischen der Pleuel-Baugruppe und dem Kolben, wird als **Redundant** (überbestimmt) angezeigt und soll deswegen näher untersucht werden.



■ 23.3 Untersuchung der Redundanz

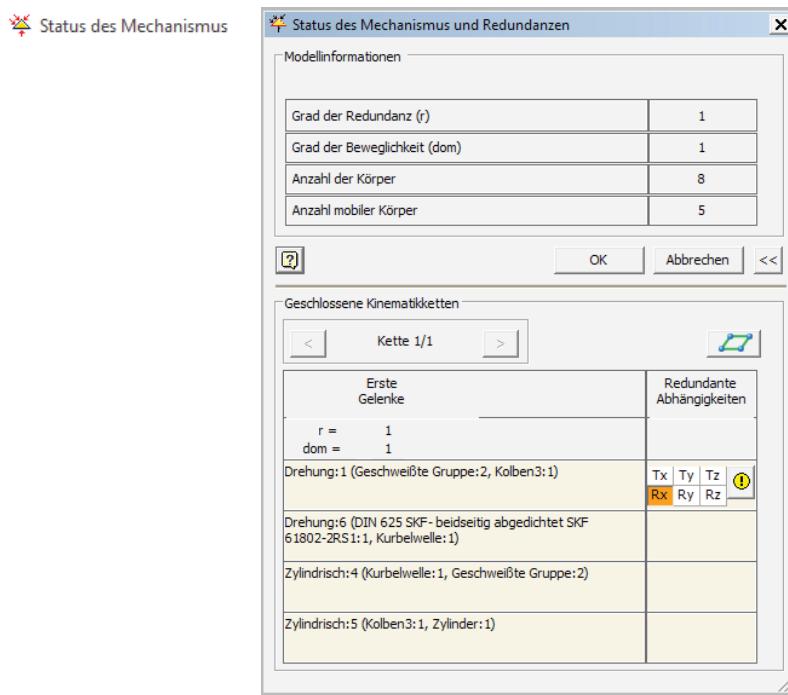
Die Verbindung (Abhängigkeiten) zwischen der Pleuel-Baugruppe und dem Kolben wurde mit zwei Abhängigkeiten versehen.

- 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.

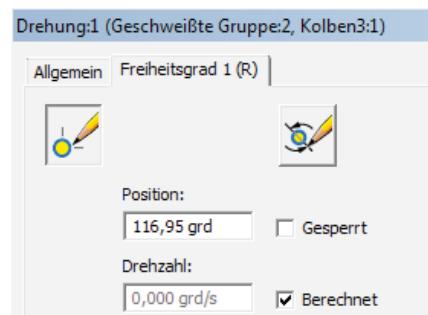
23.3.1 Status des Mechanismus



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.

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 auf die EIGENSCHAFTEN dieses Gelenks zeigt uns, dass es nur diesen einen Freiheitsgrad (R) hat, und genau dieser Freiheitsgrad wird für die Funktion benötigt.

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

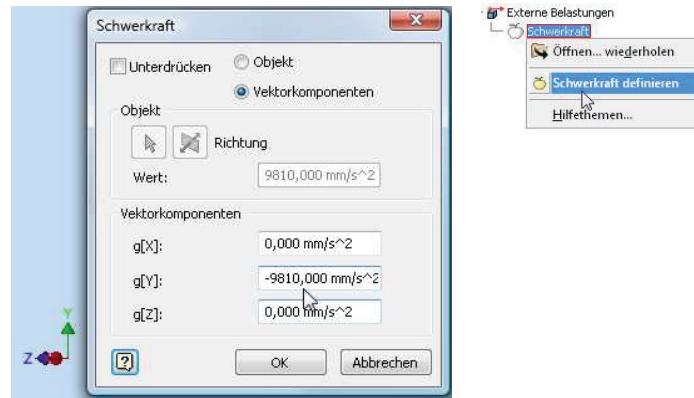
des Zylinders) bestimmt, wodurch die Rotation des Kolbens um die Mittelachse des Kolbenbolzens verhindert wird. Dieser Umstand ist jedenfalls nicht praxikonform, da Kolben in Zylinderlaufbuchsen etwas Spiel haben und somit kippen (was bei Motorenbauern häufig zu Problemen führt).

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.

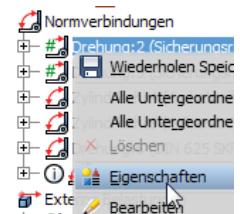
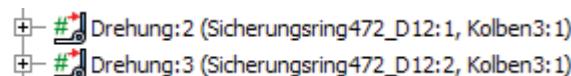
Als Definitionsobjekte für die Schwerkraft sollen die VEKTORKOMPONENTEN dienen. Die Y-Achse G[Y] ist die vertikale Achse in Bezug auf die Baugruppe, insofern wird in deren Eingabefeld die Erdbeschleunigung eingetragen. Da die Richtung der Schwerkraft nach unten definiert werden muss, ist der Wert mit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



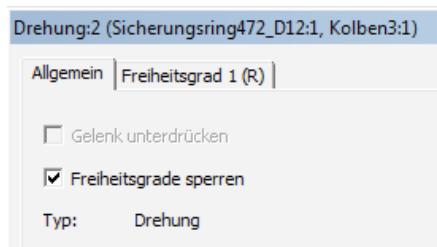
23.3.3 Gelenke überprüfen und bearbeiten

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

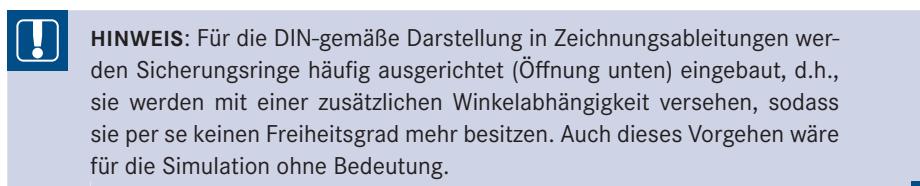
23.3.3.1 Sicherungsringe



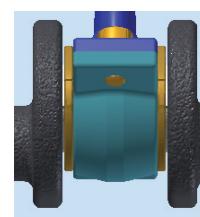
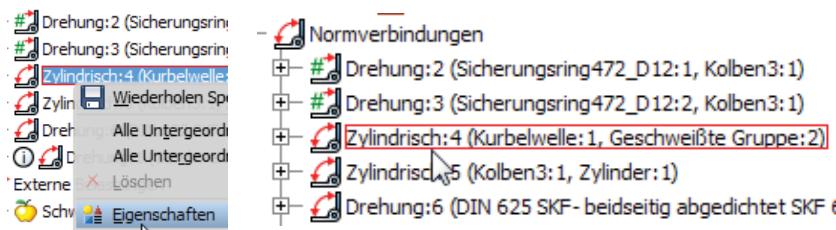
Von oben beginnend betrachten wir zuerst die beiden Drehgelenke, die der Inventor den Sicherungsringen zugeordnet hat. Sicherungsringe werden in ihrer Nut drehbar montiert, eine Funktion hat diese Drehbarkeit jedoch nicht, weswegen diese Freiheitsgrade gesperrt werden.



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.



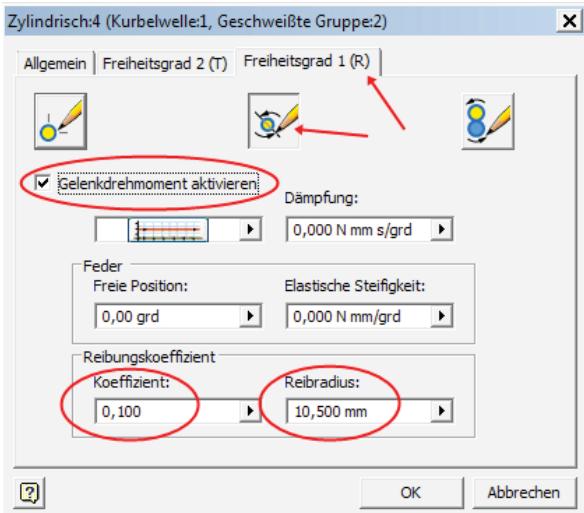
23.3.3.2 Pleuellager an der Kurbelwelle



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

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.

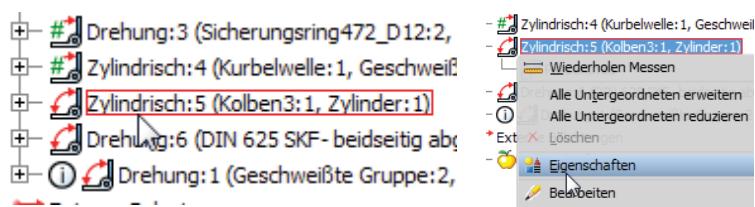
Die Eingaben bestätigen Sie mit **OK**.

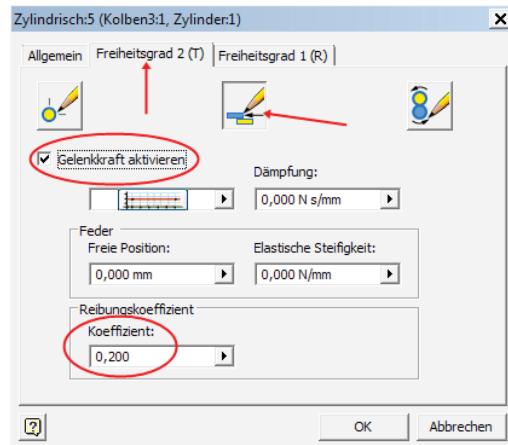
23.3.3.3 Der Kolben im Zylinder

In der Reihenfolge des Objektbrowsers ist als nächstes Gelenk die zylindrische Führung des Kolben im Zylinders (**Zylindrisch:5**) an der Reihe.

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.

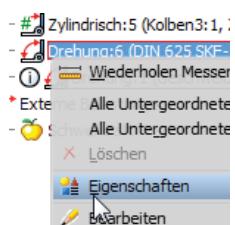
Die Rotationsmöglichkeit im Zylinder ist tatsächlich vorhanden, jedoch nur, wenn der Kolben ohne das Pleuel montiert werden würde. Für die Simulation ist dieser Fall jedoch irrelevant, weswegen der Freiheitsgrad der Rotation in diesem Gelenk unberücksichtigt bleiben kann.





Im Dialogfenster EIGENSCHAFTEN dieses Gelenks selektieren Sie also die Registerkarte FREIHEITSGRAD 2 (T) und auf dieser den mittlere Button GELENKKRAFT BEARBEITEN. 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.



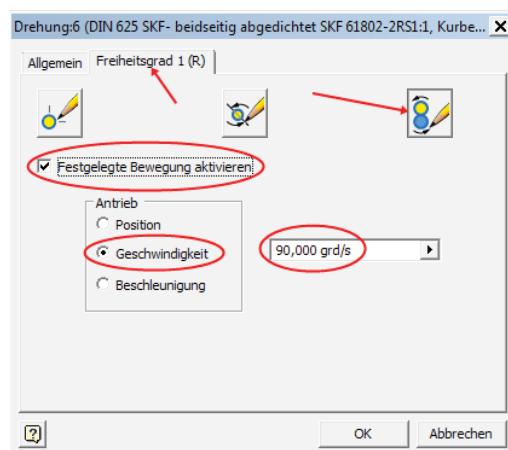
23.3.3.4 Kurbelwellenlagerung

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.

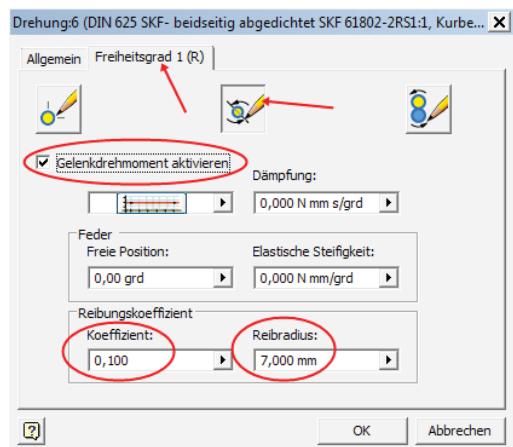
Der Antrieb



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

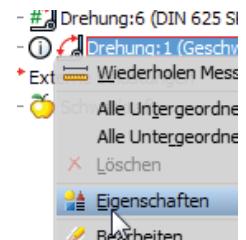
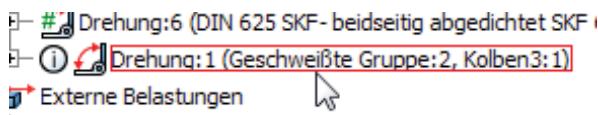


Die Definition der Reibung erfolgt prinzipiell wie bei den Gelenken vorher. Da es sich jetzt wieder um ein Drehgelenk handelt, ist der Radius der Reibkraft anzugeben.

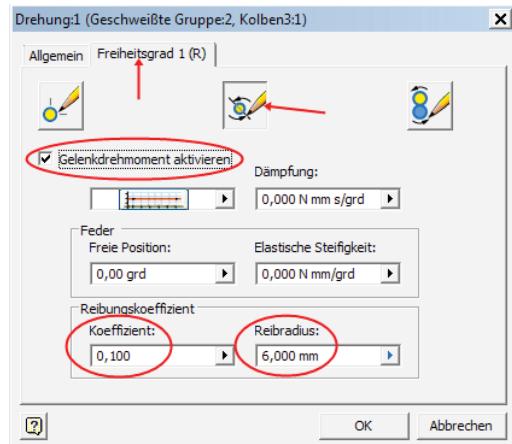
Der Lagerzapfen der Kurbelwelle hat einen Durchmesser von 14 mm, weswegen Sie hier den RADIUS 7 MM eingeben müssen. Der KOEFFIZIENT der Lagerreibung der Rillenkugellager soll beispielsweise 0,1 sein.

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 am Anfang 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 Optionsfeld **GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN** aus und tragen als **Koeffizient** der Reibung z.B. den Wert 0,1 ein.

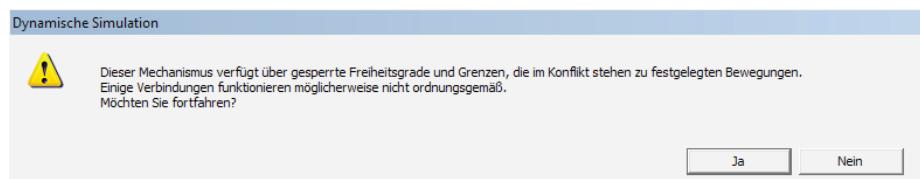
Der Kolbenbolzen hat einen Durchmesser von 12 mm, weswegen Sie den **REIBRADIUS** mit 6 MM angeben müssen.

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 Kurbelwelle durchgeführt. Die Simulationszeit wurde auf acht Sekunden eingestellt, damit zwei volle Umdrehungen des Kurbeltriebs stattfinden.

Folgende Meldung erscheint:



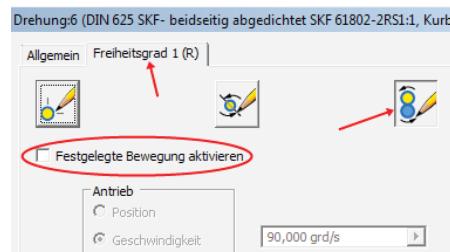
Sie ist durch die gesperrten Sicherungsringe begründet und kann mit JA bestätigt werden. Möchten Sie die Meldung verhindern, dann sind die Freiheitsgrade der Sicherungsringe einfach freizugeben.



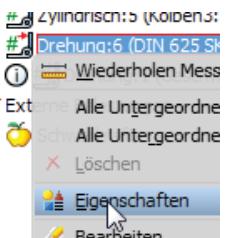
■ 23.5 Zweites Beispiel: Antrieb durch den Kolben

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.



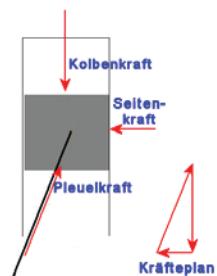
Für evtl. spätere Aktionen bleibt dabei der vorher eingegebene Bewegungswert erhalten und kann jederzeit wieder reaktiviert werden.



23.5.1 Externe Kraft wirken lassen

Die Kolbenkraft kann durch zwei unterschiedliche Maßnahmen simuliert werden. Entweder

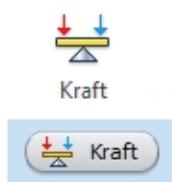
- Sie definieren eine externe Kraft, die auf den Kolben wirkt, oder
- Sie definieren über die Eigenschaften des Gelenks ZYLINDRISCH:5, das die Translation des Kolbens im Zylinder ermöglicht, eine Gelenkkraft.



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 Gelenkkräften 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.

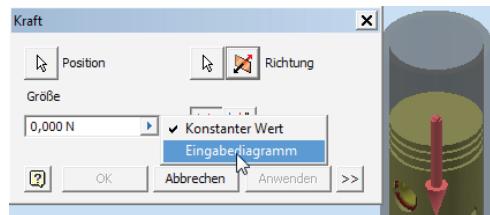


Über das Dialogfenster geben Sie zuerst die POSITION der Kraft an.

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.



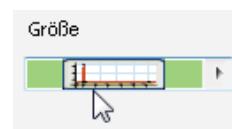
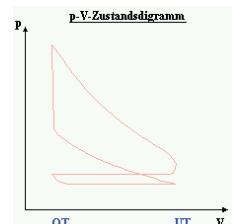
Die Kraftrichtung soll natürlich nach unten gerichtet sein und kann bei Bedarf mit dem Richtungsbutton umgekehrt werden. Als GRÖSSE der Kraft soll diesmal kein konstanter Wert, sondern ein Kraftverlauf über das EINGABEDIAGRAMM eingegeben werden.

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.

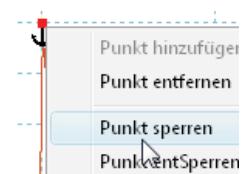


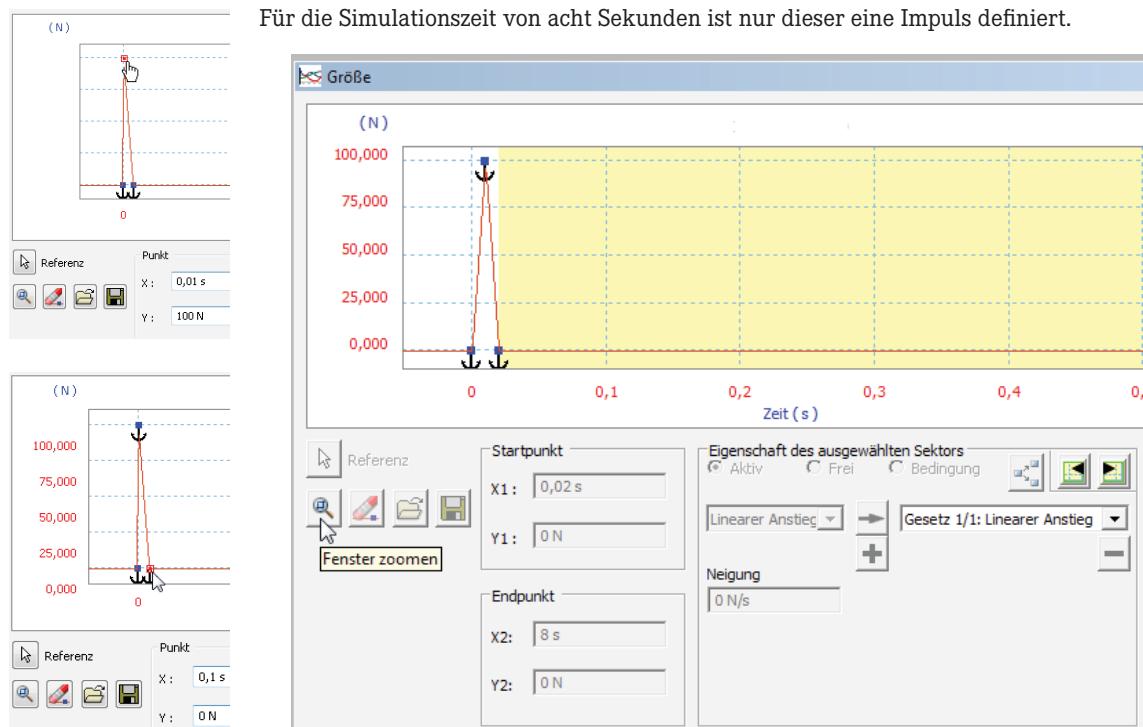
Das noch leere Diagrammfeld zeigt bereits den Anfangs- und Endpunkt über der definierten Simulationszeit von acht Sekunden an.

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.





Die gelb unterlegte Fläche in der 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

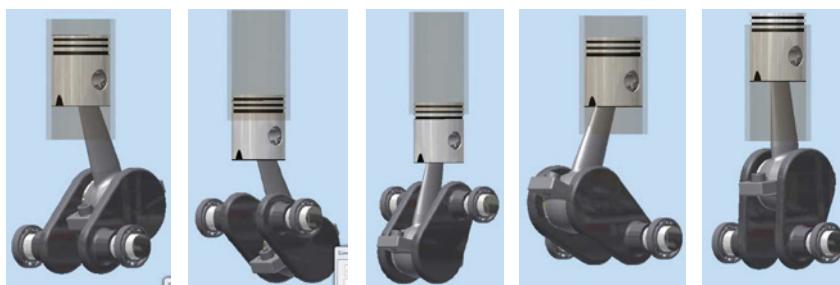
Alle Einstellungen aus der ersten Simulation bleiben erhalten.

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.

Der Kurbeltrieb läuft also nach diesem einmaligen Anstoß bis zum Stillstand aus. In den Abbildungen ist der Vorgang nicht zu erkennen, die Animation auf der DVD gibt das Beschleunigungs- und Drehzahlverhalten aber recht gut wieder.



Animation auf der DVD



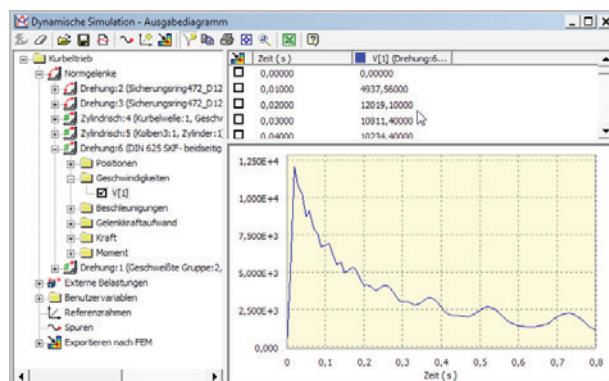
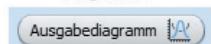
23.6.1 Das Ausgabediagramm

Im nachfolgenden AUSGABEDIAGRAMM ist die Drehzahl der Kurbelwelle dargestellt.

Über die Kontextmenüfunktion SUCHEN MAX. kann die maximal erreichte Drehzahl ermittelt werden, die in der Wertetabelle mit 12019,1 grd/s angezeigt wird. Dieser Wert entspricht $12019/360 =$ ungefähr 33 U/Sek., dies wären gut 2000 U/min. Allerdings entspricht dieser Wert nicht der realen Drehzahl, da er nur die Kolgengeschwindigkeit in dem betrachteten Moment darstellt.



Ausgabediagramm



Über die Diagrammoptionen lässt sich auch der relevante Ausschnitt im Ausgabediagramm gut betrachten.

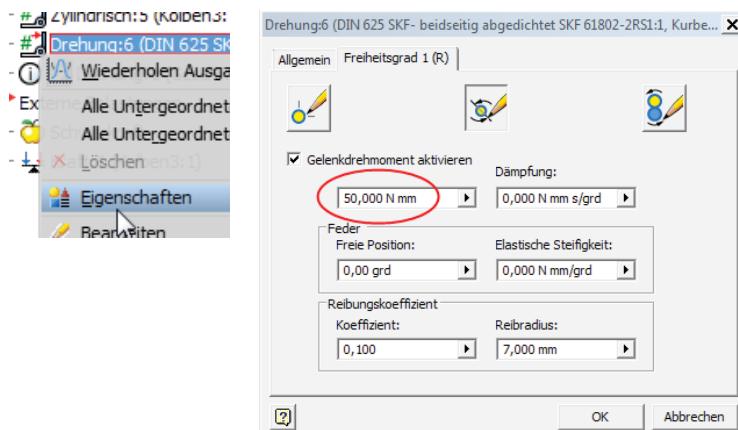
Der Schein dieser berechneten Werte trügt jedoch gleich zweimal. Erstens ist die Spitzengeschwindigkeit mit der tatsächlichen Drehzahl (als Mittelwert) nicht direkt vergleichbar, und zweitens läuft unser Kurbeltrieb im absoluten Leerlauf, d.h. völlig ohne Last, gebremst nur durch die Reibung.

■ 23.7 Beispiel: Verbrennungsmotor

Um in erster Näherung einen Verbrennungsmotor zu simulieren, sind einige Definitionen vorzunehmen:

- Es muss ein Lastmoment existieren, da sich die Drehzahl sonst „unendlich“ erhöhen würde.
- Es muss eine Impulskraft wie im Beispiel vorher existieren, die den Zündzeitpunkt und die Verbrennung simuliert.
- Der Impuls muss kontinuierlich, zyklisch pro Kurbelwellenumdrehung, erfolgen (Zweitaktmotor, bei Viertaktmotoren nach jeweils zwei Kurbelwellenumdrehungen).

23.7.1 Lastmoment hinzufügen



Das Lastmoment wirkt an der Kurbelwelle, von der z.B. bei einem Fahrzeug der Kraftfluss über Kupplung, Getriebe und Antriebsachse zu den Rädern läuft.

Am einfachsten erfolgt diese Definition über die EIGENSCHAFTEN des Kurbelwellengelenks DREHUNG:2, die Registerkarte FREIHEITSGRAD 1 (R) und den mittleren Button

GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN. Auf dieser Registerkarte sind bereits die Reibungsdaten des Gelenks eingetragen. In das Feld für das Drehmoment geben wir den konstanten Wert 50 NMM ein.

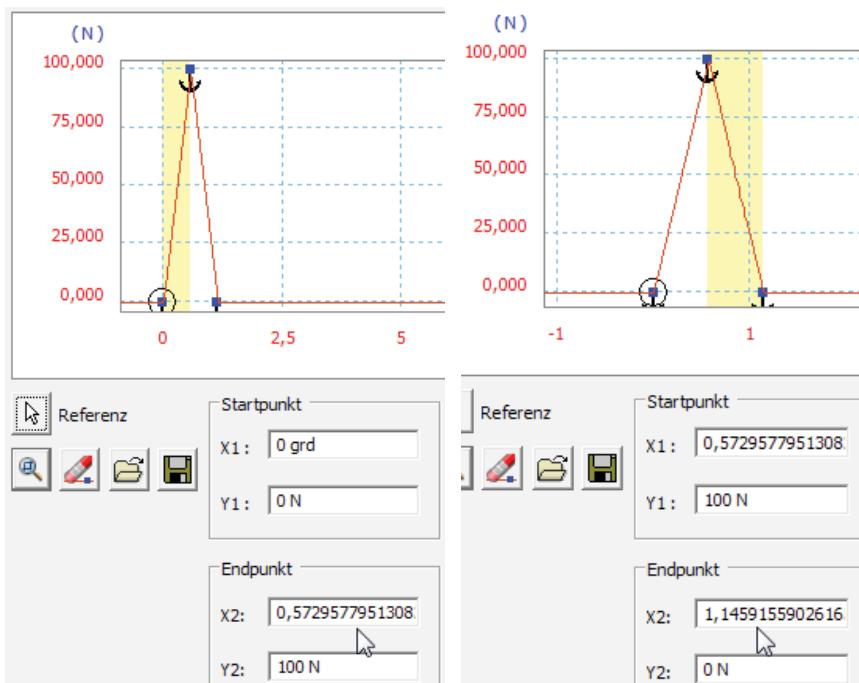
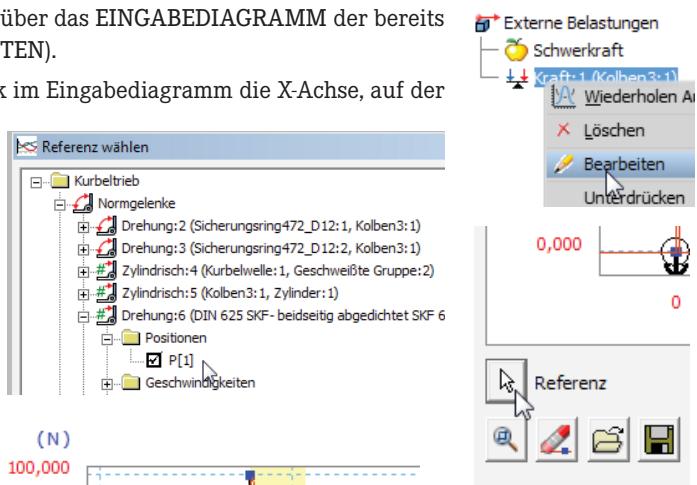
23.7.2 Zyklischen Antrieb hinzufügen

Näherungsweise realistisch wollen wir dem Kurbeltrieb nun einen zyklischen Antrieb verpassen, d.h., ähnlich wie bei einem Verbrennungsmotor soll jeweils in der Nähe des oberen Totpunktes des Kolbens der externe Kraftimpuls wirksam werden.

Die Definition der Antriebskraft kann wieder über das EINGABEDIAGRAMM der bereits definierten externen Kraft erfolgen (BEARBEITEN).

Im ersten Schritt müssen Sie zu diesem Zweck im Eingabediagramm die X-Achse, auf der aktuell die Zeit abgebildet ist, auf die Gradposition der Kurbelwelle umstellen. Die Schaltfläche REFERENZ gibt uns die Möglichkeit dazu.

Als Referenz für die X-Achse selektieren Sie im Auswahlfeld innerhalb der NORMGELENKE das Drehgelenk der Kurbelwelle/ des Kurbelwellenlagers (DREHUNG:6) und davon die POSITION P[1].



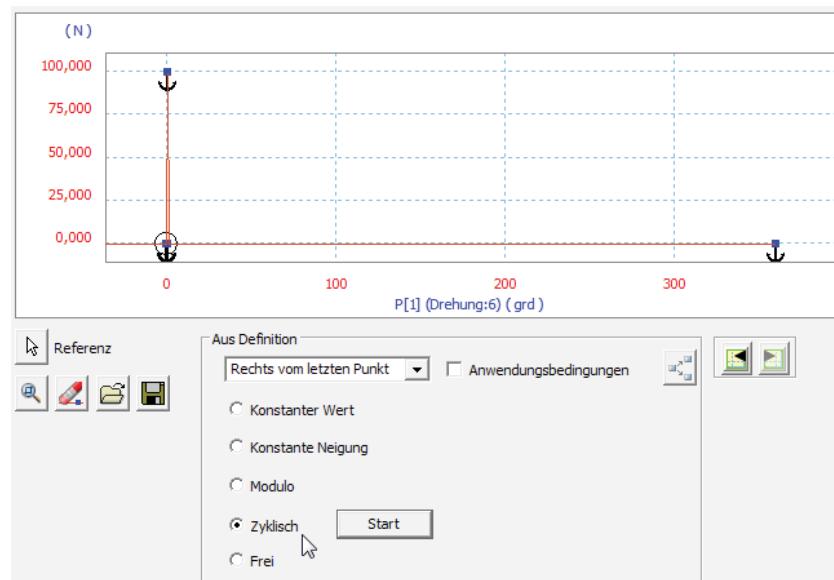
Die Einheit der X-Achse schaltet nach dieser Aktion sofort auf eine Gradanzeige um und anstelle der Zeit von 0,01 Sekunden für den Impulsanstieg auf 100 N werden jetzt ca. 0,5 Grad angezeigt.

Der Abfall der externen Kraft im zweiten Sektor ist weiterhin symmetrisch und endet bei ca. 1,14 Sekunden.



Im nächsten Schritt fügen Sie jetzt einen VIERTEN PUNKT in Eingabediagramm ein, und zwar bei 360 GRAD mit einer Kraft von 0 N.

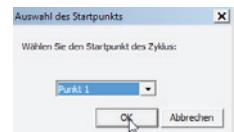
Pro Kurbelwellenumdrehung wird jetzt bei 0 Grad der Kraftimpuls kurz wirksam und danach läuft der Mechanismus eine volle Umdrehung nur durch seine Schwungmasse. Dieser Vorgang soll jedoch nicht nur einmalig stattfinden, sondern sich ständig wiederholen.



Wenn Sie im Bereich der Diagrammanzeige in die weiße Fläche neben dem Koordinatensystem klicken, dann erscheinen im unteren Bereich des Dialogfensters die Optionen zur weiteren Kurvendefinition.

Im Listenfeld wählen Sie RECHTS VOM LETZTEN PUNKT aus und als Methode selektieren Sie die Option ZYKLISCH. Über die Schaltfläche START geben Sie jetzt noch an, dass der Zyklus am PUNKT 1 beginnen soll.

Mit dieser Definition wurde festgelegt, dass sich über den gesamten Simulationszeitraum (acht Sekunden) jeweils nach 360 Grad der Impuls wiederholt.



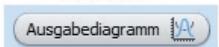
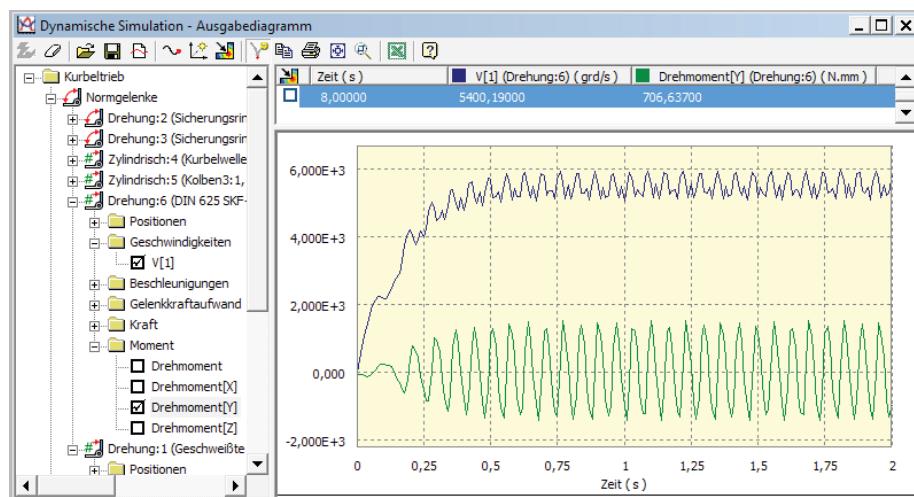
TIPP: Bei aufwendigen Definitionen im Eingabediagramm ist es sinnvoll, diese als Datei zu speichern. Das Disketten-Symbol im Dialogfenster ermöglicht dies und gestattet es, die gespeicherten Definitionen mit dem Öffnen-Symbol jederzeit wieder zu laden.

23.7.3 Die Simulation

Das Ausgabediagramm, das nach der Simulation mit den obigen Einstellungen angezeigt werden kann, ist sehr aussagekräftig.



Ausgabediagramm



Ausgabediagramm

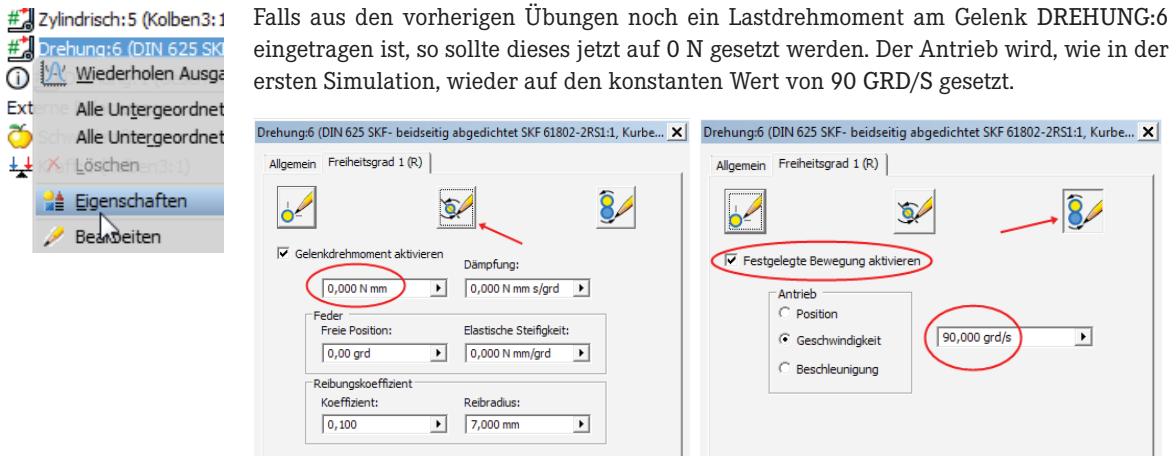
Für das Kurbelwellenlager (Drehung:6) wurden die Geschwindigkeit (blau) und das Drehmoment (grün) für die Anzeige ausgewählt.

Die Drehgeschwindigkeit bewegt sich im Mittel um 5.500 grd/s, d.h. mit etwas über 900 Umdrehungen pro Minute. Das Drehmoment-Maximum liegt bei etwa 1.500 Nmm.

■ 23.8 Variante mit Feder

Die Funktion eines Kompressors können wir am besten verdeutlichen, wenn auf den Kolben keine konstante Kraft und erst recht kein Impuls, sondern eine der zunehmenden Kompression entsprechende Federkraft wirkt. Auch diese Variante wollen wir testen.

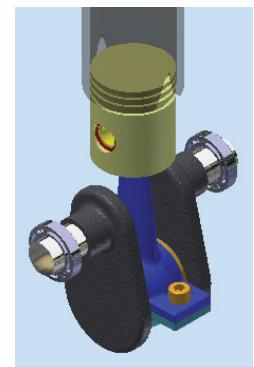
23.8.1 Festgelegte Bewegung aktivieren

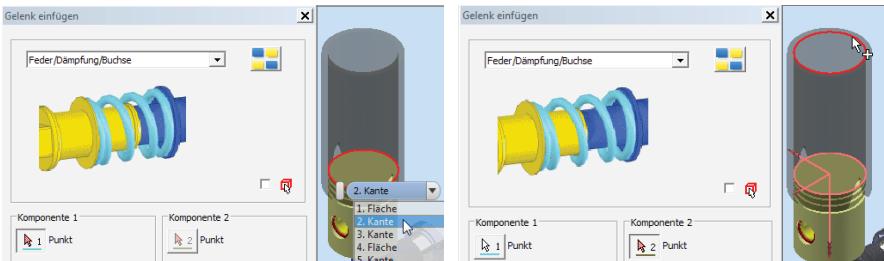


Die EXTERNE KRAFT, die im vorherigen Beispiel eingefügt wurde, müssen wir UNTERDRÜCKEN.

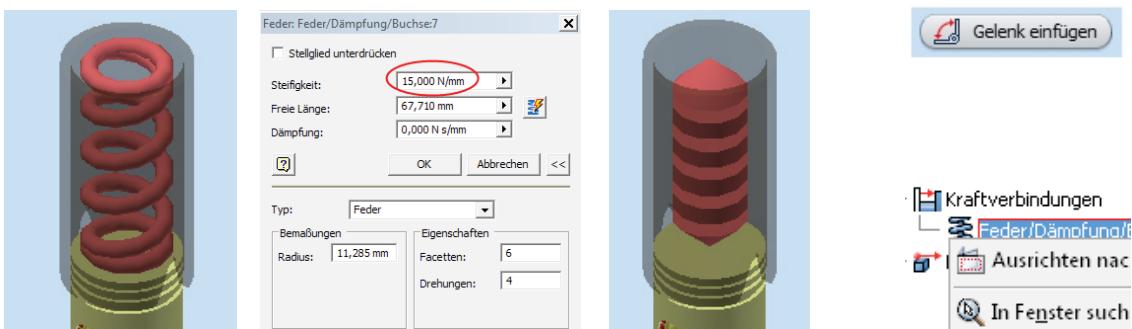
23.8.2 Feder einfügen

Damit die Feder vom Inventor automatisch in ihrer maximalen Länge eingesetzt wird, sollte man den Kolben in den unteren Totpunkt fahren. Dies geschieht einfach dadurch, dass Sie den Kolben mit der Maus „anfassen“ und ihn mit dem Gummiband-Kraftvektor kräftig nach unten ziehen, bis er sich nicht mehr bewegt. Alternativ könnte man natürlich auch den Kolbenhub berechnen und die Höhe des toten Raumes im Zylinder über dem Kolben-OT messen.





Das Einfügen der Feder mittels der Funktion GELENK EINFÜGEN und der Auswahl FEDER/DÄMPFUNG/BUCHSE geschieht durch die Auswahl der beiden Komponenten, den oberen Kreisring am Kolben und den oberen Kreisring an der Zylinderlaufbuchse.



Über die EIGENSCHAFTEN der neu eingefügten Feder gelangt man zur Dateneingabe.

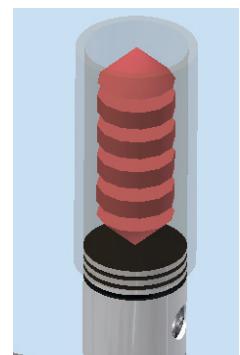
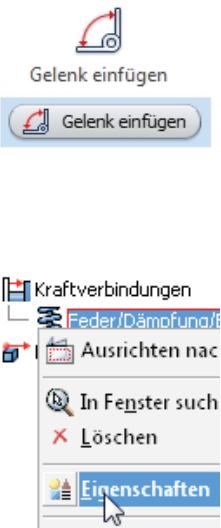
Die STEIFIGKEIT wird testhalber mit 15 N/MM definiert.

Die FREIE LÄNGE ermittelt das Programm automatisch, sie kann jedoch mit dem Button daneben auf die derzeitige Einstellung aktualisiert werden. Im Beispiel beträgt sie ca. 67 MM.

Eine DÄMPFUNG wurde vorerst nicht eingegeben.

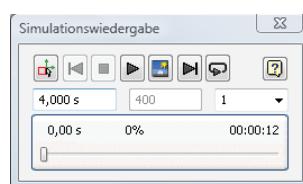
Im unteren Bereich wurde anstelle der Vorgabe einer Spiralfeder der TYP FEDER eingestellt. Dieses Bauteil stellt optisch eher ein komprimierbares Medium dar als eine Spiralfeder.

RADIUS, FACETTEN und DREHUNGEN können unverändert übernommen werden.

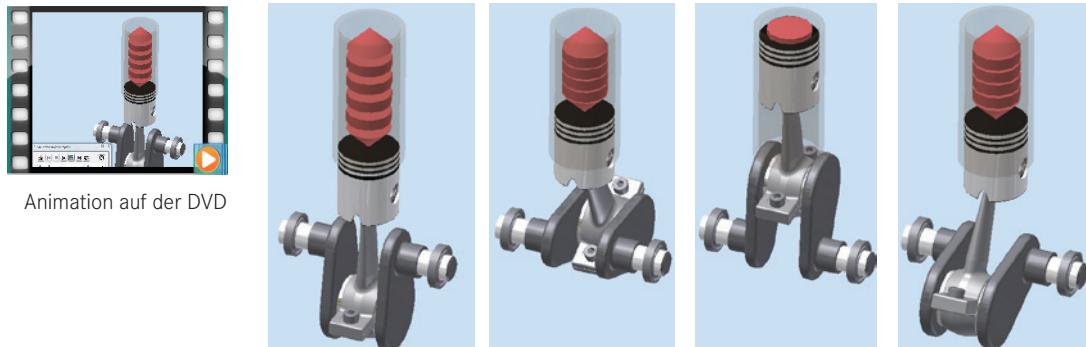


23.8.3 Die Simulation

Die Simulationszeit ist auf vier Sekunden angelegt, d.h., da die Antriebsgeschwindigkeit 90 grd/s beträgt, wird

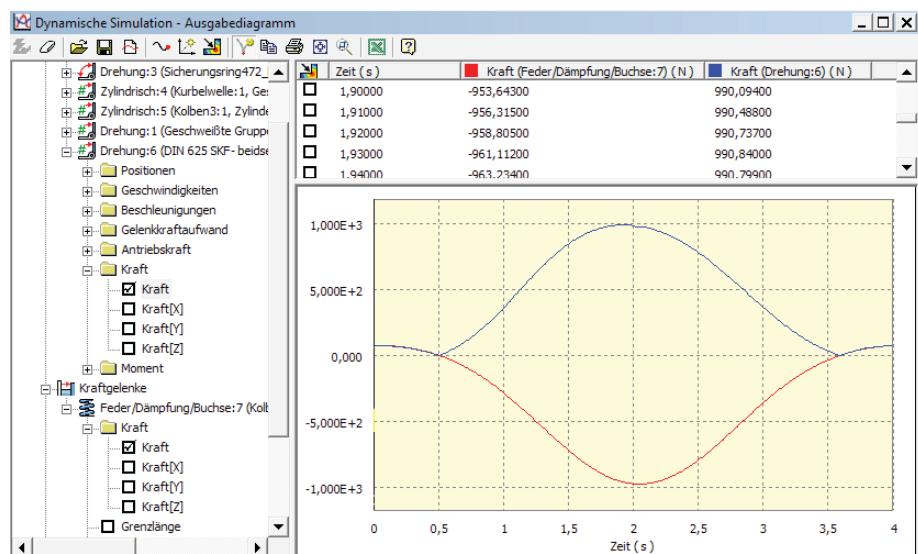


genau eine Umdrehung dargestellt. Der Verlauf der Simulation zeigt sehr schön den Komprimierungsvorgang eines Mediums.



Animation auf der DVD

23.8.4 Das Ausgabediagramm



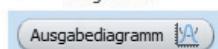
Im ersten AUSGABEDIAGRAMM sind der Kraftverlauf der Federkraft (blau) und der Kraftverlauf im Kurbelwellenlager Drehung:2 (rot) dargestellt.

Beide Verläufe sind spiegelsymmetrisch und erreichen ihre Maxima im oberen Totpunkt mit ca. 990 N.

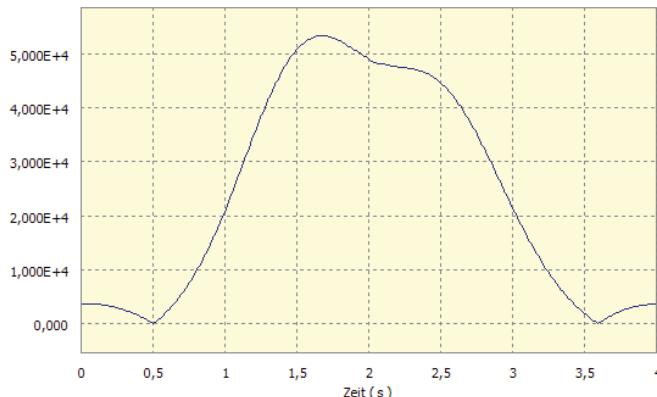
Mit einem Kolbenhub von 67 mm und der Federsteifigkeit von 15 N/mm ergäbe sich ein Wert von 1005 N. Bei der Komprimierung der Feder ist diese kleine Abweichung trotzdem



Ausgabediagramm



nicht ganz zu verstehen, im Kurbelwellenlager schon eher, denn hier kommen die Reibungskräfte noch hinzu.



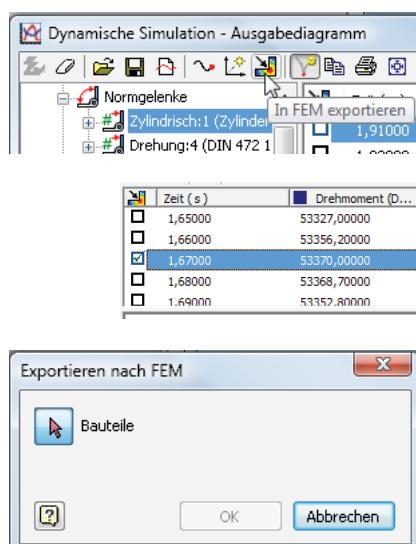
Das zweite Ausgabediagramm zeigt den Drehmomentverlauf am Kurbelwellenlager Drehung:6, dessen Maximum aus ebenfalls nicht erklärlichen Gründen schon vor dem oberen Totpunkt auftritt. Der kleine Knick direkt am OT könnte theoretisch mit der Feder-Hysterese zu erklären sein, im Beispiel wurde jedoch für die Feder die Dämpfung 0,0 Ns/mm, also keine Dämpfung eingetragen. Somit dürfte es auch keine Hysterese geben.

23.9 Export nach FEM

Über den Button IN FEM EXPORTIEREN wollen wir nun versuchen, die Kurbelwelle in der Belastungsanalyse zu untersuchen.

Mit der Funktion SUCHE MAX. stellen wir erstens das maximale Drehmoment fest, zweitens markieren wir diesen Zeitschritt für den Export in die FE-Analyse.

Das Fenster zur Bauteilselektion öffnet sich nach dem Klick auf den Export-Button. Als Bauteile wählen wir die Kurbelwelle und den Kolben aus.



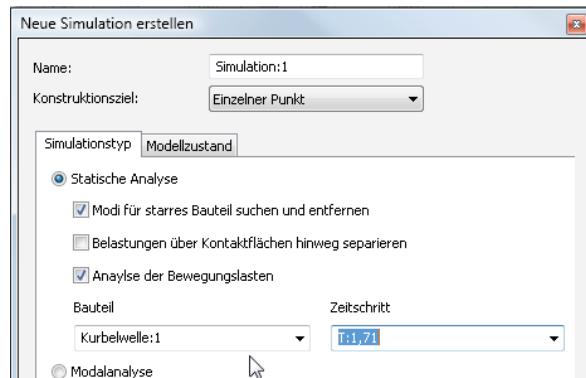
Dynamische Simulation beenden

Belastungsanalyse

Simulation erstellen

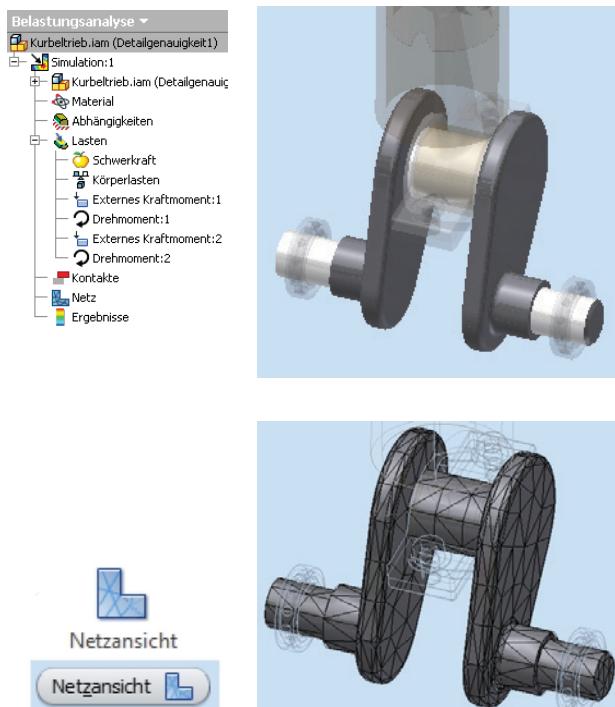
Die nächsten drei Schritte sind: die Simulationsumgebung verlassen → auf der Registerkarte UMGEBUNG die Belastungsanalyse starten → eine neue Simulation erstellen.

23.9.1 Die FE-Analyse der Kurbelwelle



Die wichtigste Einstellung für die neue Simulation wird über die Aktivierung des Auswahlfelds ANALYSE DER BEWEGUNGSDATEN erreicht.

Damit können das BAUTEIL und der ZEITSCHRITT ausgewählt werden.



Als Bauteil wählen wir zunächst die KURBELWELLE und den einzigen dafür exportierten Zeitschritt. Sobald das Dialogfenster NEUE SIMULATION ERSTELLEN mit OK verlassen wurde, wird die Kurbelwelle aus der Baugruppe extrahiert, d.h., alle anderen Bauteile werden abgeblendet.

Der Objektbrowser zeigt vor allem die Lasten an, mit denen die Kurbelwelle beansprucht wird.

Die SCHWERKRAFT und die KÖRPERLASTEN (Gewichts- bzw. Massekräfte) sind eindeutig.

Das EXTERNE KRAFTMOMENT:1 betrifft die Biegelast, das DREHMOMENT:1 betrifft das Torsionsmoment am Lagerzapfen.

Das EXTERNE KRAFTMOMENT:2 und das DREHMOMENT:2 haben dieselbe Bedeutung für den Kurbelzapfen.

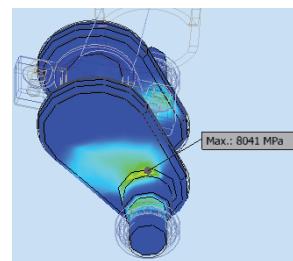
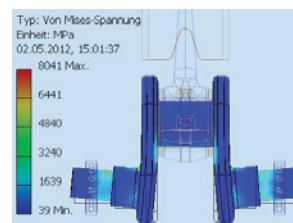
Soll vor der eigentlichen Belastungsanalyse das FE-Netz generiert werden, etwa um zu untersuchen, ob irgendwo Netzverfeinerungen angebracht werden sollen, so ist dies über die Schaltfläche NETZANSICHT möglich.

Die gesamte Rechenzeit wird durch die vorgezogene Netzerstellung nicht verlängert, da die FE-Analyse auf ein bereits berechnetes Netz zurückgreift.

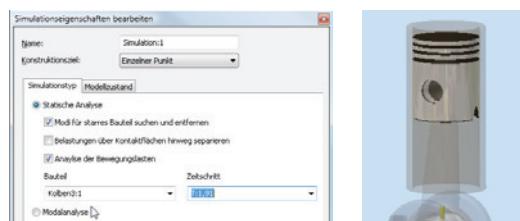
Wenn das generierte Netz als tauglich empfunden wird, kann die eigentliche Simulation gestartet werden.

Das Ergebnis zeigt sehr große Spannungen, weil unsere Kurbelwelle für die Belastung absolut unterdimensioniert ist. Im Zuge der ersten Optimierung ist es jedoch vor allem wichtig, die Stellen der maximalen Beanspruchung und die Art der Beanspruchung an diesen Stellen zu kennen.

Wir erkennen im nebenstehenden Bild, dass die Biegung am angetriebenen Lagerzapfen die Hauptbeanspruchung darstellt. An diesen Stellen muss also unabhängig von der Höhe der Beanspruchung nachgearbeitet werden.



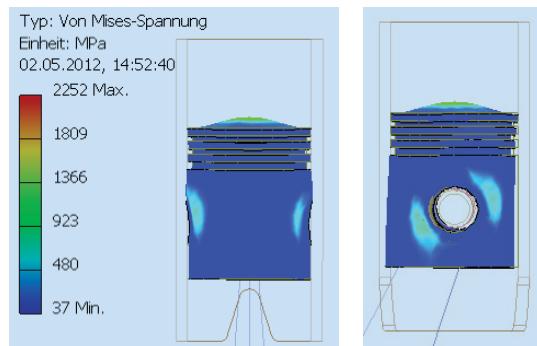
23.9.2 Die FE-Analyse des Kolbens



Die Einstellungen im Dialogfenster SIMULATIONSEIGENSCHAFTEN BEARBEITEN entsprechen denen der vorherigen Analyse der Kurbelwelle, nur dass jetzt als Bauteil der Kolben ausgewählt werden muss.

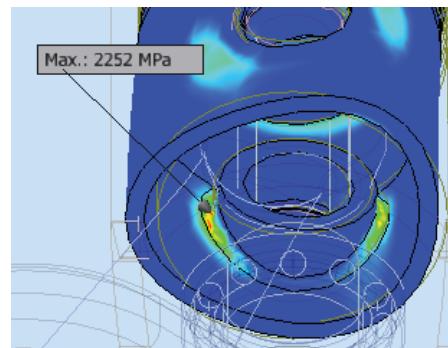
Nach diesem Vorgang wird der Kolben als zu untersuchendes Bauteil freigestellt, und alle anderen Bauteile werden abgeblendet.

Die FE-Analyse kann jetzt sofort mit der Schaltfläche SIMULIEREN gestartet werden.



Das Ergebnis zeigt, wie auch schon bei der Kurbelwelle, einen spannungsmäßig unterdimensionierten Kolben im Spannungsbe- reich bis über 2000 MPa. Interessant ist je- doch, dass die meisten Bereiche des Kolbens im Bereich bis zu 500 MPa liegen und die maximale Beanspruchung auf den ersten Blick nicht sichtbar ist.

Erst ein Blick ins Innere offenbart die Prob- lemzone am Übergang des Kolbenbolzenau- ges zur Innenwand des Kolbens.



Index

Symbole

- 0,2%-Dehngrenze 37
- 2D-Kontakt 201
- 3D-Abhängigkeiten 25, 157
- 3D-Kontakt 201, 273
- 3D-Printing 11
- *.BMP 4, 5
- *.DWL 4, 5
- *.DWG 5
- *.DXF 5
- FEM, parametrisch 111
- *.GIF 4, 5
- *.IGES 4
- *.JPEG 5
- *.JT 4
- *.PNG 5
- *.SAT 5
- *.STEP 5
- *.STL 5
- *.TIFF 5
- *.XGL 5
- *.ZGL 5

A

- Abhängigkeiten 25, 78, 224
- Abhängigkeitsnamen 150
- Abhängig machen 208
- Abscheren 38
- Achsenintervalle 233
- Aktualisierung 139
- Analysearten 13
- Analyse der Bewegungsdaten 263, 313
- Anfangsbedingungen 212, 248
- Anfangsbedingungen bearbeiten 247, 288
- Animationsablaufprogramm 180

- Animationsoptionen 180
- ANSYS 12, 65
- Anwendungsoptionen 150
- Anzahl der wichtigen Ziffern 233
- Approximation 66
- Arbeit 32
- Ausgabediagramm 289
- automatische Kontaktkonvertierung 148
- AVI-Rate 163

B

- Baugruppe bewegen 243
- Baugruppenvereinfachung 183
- Bauteilanalysen 13
- Bauteilparameter 111
- Beanspruchung 37
- Begrenzungsbedingungen anzeigen 314
- Belastung des Körpers 80
- Berechnet 217
- Bereichsangaben 116
- Beschleunigung 31
- Bestimmung 25
- Betriebssystem 7
- Betriebstemperatur 42
- Beulen 42
- Bewegliche Gruppen 194, 224
- Bewegungsbahn 294
- Bewegungslehre 31
- Bewegungsschraube 201
- Bewegungssimulationen 161
- Biegung 38
- Blechtraverse 123
- Bruchdehnung 37
- Buchse 195

C

- CC 11
- Constrains 25
- Contour Crafting 11

D

- Dämpfung 195, 214, 216, 256
- Daten nach Excel exportieren 237
- Dauerfestigkeit 38
- DesignSpace 12
- Diagrammachsen 233
- Diagrammoptionen 232
- Dokumentparameter-tabelle 121
- Drahtradius 255, 256
- Drehmoment 79, 196
- Drehung 195, 199
- Drehungen 255
- Drehzahl 31, 212, 217, 248
- Druck 24, 38, 79
- Duktile (zähe) Werkstoffe 38
- Dünne Körper suchen 125
- Durchdringung 243
- DVD 7
- Dynamik 32
- dynamisches Grundgesetz 32
- dynamische Simulation 224

E

- Eben 195
- Ebene 195, 199
- Einfügen 199
- Eingabediagramm 32
- Einspannung 24
- Einspannungen 43, 78

- Elastizität 62, 214
- Elastomere 62
- E-Modul 37
- Energieerhaltungssatz 32
- Ergebnisparameter 121
- Ersatzfläche 126
- Erwärmung 42
- Excel 237
- Explosionsdarstellung 323
- Exponentendarstellung 233
- externe Belastungen 196
- externe Einwirkungen 196
- externes Kraftmoment 80

F

- Fabber 10
- Facetten 255, 256
- Farbskala 132
- Fasern 63
- FDM 11
- Feder 195
- Feder/Dämpfung/Buchse 195, 202
- Federn 28
- Festigkeitshypothesen 38
- Festgelegte Bewegung 212
- Festgelegte Bewegung bearbeiten 282
- Festlager 24
- Fixiert 194, 224
- Flächenabschnitt 44
- Flächenanalysen 13
- Flächenaufteilung 44
- Flächenfehler 18
- Flächenlast 24, 85
- Flächenpressung 159
- Flächenträgheitsmoment 89
- Flächentrennung 124

Fliehkraftregler 239
 Frei Länge 255, 256
 Freiheitsgrad-Analyse 27
 Freiheitsgrade 24, 300
 Freiheitsgrade animieren 27
 Freiheitsgrade sperren 224
 Frequenzermittlung iterativ 139
 Führungen 79
 funktionelle Bewegungen 161
 Funktionsanalyse 90
 Fused Deposition Modeling 11

G

GEH 38
 Gelenkdrehmoment 212
 Gelenkdrehmoment
 aktivieren 229
 Gelenkdrehmoment
 bearbeiten 229, 287
 Gelenke 25
 Gelenk einfügen 203
 Gelenkkette 304
 Gelenkkraft 212
 Gelenkkraft bearbeiten 248
 Gelenkkraftvektor 257
 Genauigkeitssteigerung 65
 gesamte Geometrie 113
 geschweißte Gruppe 196, 249
 Geschwindigkeit 31, 212, 217
 Gesperrt 217
 Gestaltänderungsenergie 39
 Gestaltänderungsenergie-
 hypothese 38, 43
 Gestaltfestigkeit 97
 Getrennt 154
 Gitternetz 65
 Glasfaser 43
 Gleichgewichtsbedingungen 78
 Gleitverbindungen 79
 G-Modul 37
 Gravitation 32
 Grenze 142
 Grenzen der GEH 43
 Grundfrequenzen 138
 Gruppieren 170
 Gummi 270

H

Halbschnitt 154
 Hauptträgheitsmomente 33
 H-Methode 66
 Holz 63
 Hookesche Gesetz 65

I

Impuls 336
 In FEM exportieren 261
 Inkrement 163
 In Skizze exportieren 296
 intelligenter Konfigurations-
 satz 118
 Inventor Studio 161, 172
 iProperties 33
 - iterative Frequenzermitt-
 lung 138

K

Kantenlast 83
 Kegel 200
 Kinematik 31
 Knicken 42
 Knickung 156
 Knotenzahl 43
 Kohlefaser 43
 Kollisionserkennung 163
 Komponenten 167
 Konfiguration simulieren 120
 Konstanter Wert 219
 Konstruktionsabhängig-
 keiten 113
 Kontakt bearbeiten 149
 Kontaktbedingungen 43
 Kontaktgelenke 195
 Kontakttyp Getrennt 149
 Konvergenzeinstellungen 43
 Kraft 24, 79, 196, 310
 Kraftangriffspunkt 81
 Kraftfluss 241, 286
 Kraftverbindungen 195
 Krümmungsanalyse 15
 Krümmungsverhältnisse 18
 kugelförmig 199
 Kurve 195, 201
 Kurveneigenschaften 258
 kurvenförmige Netzelemente
 erstellen 77

L

Lagerbedingungen 43
 Lagerbelastung 79
 Laminated Object Modeling 11
 Länge 256
 Lasersintern 11
 Lastangriffsbedingungen 43
 Lastwechsel 38
 Leistung 32
 Linie-Ebene 199

lokale Aktualisierung 139
 lokale Netzsteuerung 44, 77
 LOM 11
 Loslager 24

M

Massenkräfte 32
 Massenmomente 33
 Materialanpassung 98
 Materialbeanspruchung 39
 Materialdaten 43
 Max. 248
 Megapascal 37
 mehrachsiger Spannungs-
 zustand 39
 Min. 248
 minimaler Wert 113
 Mittelfläche 125
 Modalanalyse 141
 Moment 24
 MPa 37
 Multi Jet Modeling 11
 Multiplikator 258

N

nach Excel exportieren 237
 Netzeinstellungen 73
 Netzmassenanzahl 43
 NH 38
 Normalspannung 37
 Normalspannungshypothe-
 se 38
 Normverbindungen 195, 224

O

Oberflächenqualität 13
 Oberspannung 37
 Objektbrowser 224
 OpenGL 5

P

parametrische Bemaßung 141
 parametrische FEM 111
 parametrische Tabelle 138
 Pascal 37
 Passend 199
 Perpetuum mobile 226
 Personal Fabricator 10
 Pin-Abhängigkeit 79
 plastische Verformung 38, 156
 P-Methode 66

polymere Werkstoffe 62
 Polynomgrad 66
 Position 212, 217
 Präsentationsumgebung 161
 prismatisch 199
 problematische Materialien 44,
 58
 Problembereiche 44
 Punktauflager 43
 Punkt-Ebene 200
 Punktlast 43, 81
 Punkt-Linie 199
 Punktschweißen 156

Q

Querkontraktion 43
 Querschnittsanalysen 13

R

Radius 255, 256
 Rapid Prototyping 10
 räumlich 200
 Redundanz 195
 Referenz 222
 Reibung 249, 286, 321
 Reibungslos 79
 Reibungsverluste 30
 Riemen 195, 201
 Rollgelenk 195, 200
 Rollverbindungen 195
 Rotation 31

S

Scheitelpunkt 81
 Schiebegelenk 201
 Schiebeverbindungen 195
 Schiebevorrichtung 297
 Schneckengetriebe 201
 Schneckenrad 195, 201
 Schraube 195, 201
 Schubspannung 37, 38
 Schubspannungshypothese 38
 Schwerkraft 80, 196, 225
 Schwerpunkt 89
 Schwingung 214
 Sequenz 170
 SH 38
 Sicherheitsfaktor 37, 113
 Simulationen mit dünnwandigen
 Teilen 126
 Simulation kopieren 70
 Simulationsumgebung 161

Simulieren 139
 Singularität 67
 sinusförmige Bewegung 32
 SLA 11
 SLS 11
 Space Puzzle Molding 11
 Spannungen 99
 Spannungsschwankungen 37
 Spannungsspitzen 151
 Spannungsverhältnis 37
 Spatialverbindung 195
 Spiralfeder 255
 Splines 32
 SPM 11
 spröde Werkstoffe 38
 Spur 294
 Starrkörpersystem 270
 statische Beanspruchungen 37
 Steifigkeit X , 214, 215, 248, 256
 Stereolithografie 11
 Stirnrad 200
 STL 11
 Streckgrenze 37, 38
 Streifenmuster 15

T
 tangential 199
 Temperatureinflüsse 42
 Torsion 38
 Trägheit 32
 Trägheitstensor 89
 Translation 31
 Transparenz 257
 Trennbruch 38
 Trockene Reibung 249, 287
 Typ 256

U
 überbestimmt 25
 Überbestimmung 262, 286
 Überstimmung 196
 Umfangsgeschwindigkeit 31
 Umgebungstemperatur 42
 Ungenauigkeiten 44
 Ungenauigkeiten, Unmöglichkeiten 23
 Unterspannung 37
 Ursprung 204

V
 Verankern 79
 Verbunden 154
 Verbundwerkstoffe 43
 Vereinfachungsfunktionen 183
 Vergleichsspannung 38, 39
 Versatz 126
 Verschweißt 200
 Videoausgabe 172
 Viergelenkkette 304
 von Hand bewegen 161
 von-Mises-Spannung 39

W
 Wärmeausdehnungen 42
 Wärmeenergie 32
 Wärmewirkungen 42
 Weg 31
 Werkstoffkennwerte 38
 Wertetabelle 233
 Windungen 256
 Winkel 31
 Winkelbeschleunigung 31

Winkelgeschwindigkeit 31
 Wirkungsgrad 32

X
 X-Achse 204

Z
 Zahnstange 200
 Zeichen 233
 Zeit 31
 Zeitachse 289
 Zeitfestigkeit 38
 Zeitschritt 313
 Zug 38
 Zugfestigkeit 37
 Zusammenfügen 208
 Zylinder 195, 200
 Zylindrisch 195, 199

Inventor 2012 – Grundlagen und Methodik



Günter Scheuermann

Inventor 2012

Grundlagen und Methodik in zahlreichen Konstruktionsbeispielen

3., vollständig überarbeitete Auflage

432 Seiten. Mit DVD

ISBN 978-3-446-42716-7

Mit vielen neuen Funktionen, vor allem im Bereich Benutzeroberfläche und Bedienbarkeit, präsentiert sich die aktuelle Inventor-Version 2012. Und genauso präsentiert sich die dritte Auflage dieses Lehrbuchs: komplett überarbeitet, mit vielen neuen Themen und Beispielen und um knapp 150 Seiten im Umfang erweitert.

Das Werk eignet sich hervorragend als unterrichtsbegleitende Lektüre und zur Prüfungsvorbereitung für Studierende technischer Fachrichtungen. Die Thematik reicht von einfachen und komplexeren Bauteilen und Baugruppen bis zur Arbeit mit dem Rahmengenerator, zur FEM-Analyse und zum Kabelverlegungsmodul.

Fünf große Übungsbeispiele - ein Rollenständer, eine Abziehvorrichtung, ein mehrteiliges Kunststoffgehäuse, eine Zahnstangenpresse und eine Bügelflasche - zeigen Ihnen in allen einzelnen Konstruktionsschritten das gesamte Spektrum der 3D-Arbeitstechniken.

Inventor 2011 – der Schnelleinstieg



Günter Scheuermann

**Inventor 2011 - Bauteile, Baugruppen,
Zeichnungen**

3., aktualisierte Auflage

208 Seiten. Mit CD-ROM

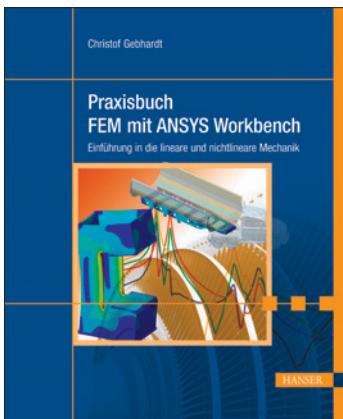
ISBN 978-3-446-42364-0

Dieses Übungs- und Nachschlagewerk stellt die zentralen Funktionalitäten des 3D-CAD-Systems Inventor vor und erläutert zugleich die Grundlagen der 3D-Technik.

Viele Beispiele zeigen ausführlich die verschiedenen Arbeitstechniken in allen einzelnen Konstruktionsschritten: von der Skizzenerstellung über die Bauteilgenerierung und -bearbeitung bis zu Baugruppen, Zusammenbauten und der Zeichnungsableitung. Anhand zahlreicher Übungen und Aufgaben kann sich der Leser, learning by doing, in kurzer Zeit in die wichtigsten Programmbereiche einarbeiten.

Das Buch empfiehlt sich Technikern, Ingenieuren und Zeichnern für das Selbststudium, eignet sich aber auch bestens für Trainings- und Schulungsmaßnahmen.

Beschleunigte Produktentwicklung mit ANSYS Workbench



Christof Gebhardt
Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench
Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik
372 Seiten
ISBN 978-3-446-42517-0

Auf Basis der simulationsgetriebenen Produktentwicklung werden neue Produkte schneller, zu geringeren Kosten und mit höherer Qualität auf den Markt gebracht. ANSYS Workbench ist eine der meistverbreiteten Softwarelösungen für strukturmechanische Simulationen und ermöglicht bereits während der Entwicklung die Verbesserung des mechanischen Verhaltens, noch bevor der erste Prototyp gebaut ist.

Dieses Buch richtet sich an Ingenieure und technisch Verantwortliche aus der Entwicklung. Auf leicht verständliche Weise werden die Grundlagen der Finite-Elemente-Methode (FEM) vermittelt und die Anwendungsgebiete lineare und nichtlineare Statik sowie lineare und nichtlineare Dynamik erläutert.

Der Schwerpunkt des Buches liegt auf der praktischen Anwendung von ANSYS Workbench, bezogen auf die Version 13. Dazu gehören die geeignete Vernetzung, die Definition und Kontrolle von Last- und Lagerbedingungen, aber auch die Wahl des passenden Berechnungsansatzes (lineare/nichtlineare oder implizite/explizite Lösung).

Günter Scheuermann

Simulationen mit Inventor

Autodesk Inventor Simulation ermöglicht Konstrukteuren, die reale Leistungsfähigkeit virtueller Produkte zu testen und mithilfe von statischen und dynamischen Belastungsanalysen, Finite-Elemente-Methoden, Visualisierungen sowie dynamischen Simulationen zu optimieren.

Dieses Praxisbuch basiert auf der Inventor Professional bzw. Simulation Suite 2013 und richtet sich an Anwender und technisch Verantwortliche aus der CAD-Konstruktion und Produktentwicklung sowie an Studenten technischer Fachrichtungen.

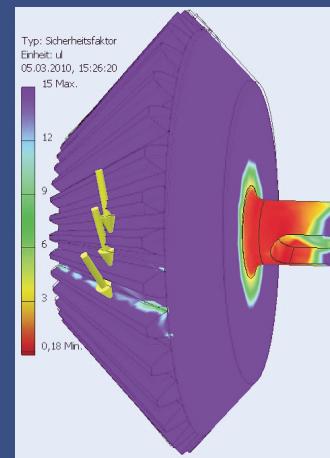
Kompakt und leicht verständlich führt das Buch in die Mechanik, die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Simulationsgrundlagen ein. Alle wichtigen Zusammenhänge können in zahlreichen Beispielen und Übungen Schritt für Schritt nachvollzogen und praktisch erprobt werden.

Die Thematik reicht von einfachen und komplexeren Bauteil- und FE-Analysen über Bewegungssimulationen bis hin zu dynamischen Simulationen umfassender Baugruppen und Festigkeitsuntersuchungen mit dynamischen Lasten.

Auf der beiliegenden DVD befinden sich:

- Alle im Buch beschriebenen Übungs- und Beispieldateien, die Sie bis auf wenige Ausnahmen auch mit den Inventor-Versionen 2011 und 2012 bearbeiten können
- Viele Animationen (AVI-Filme), die dem besseren Verständnis der Bewegungsabläufe dienen und sich hervorragend zur Präsentation eignen
- Autodesk Inventor View 2013

Dipl.-Ing. Günter Scheuermann ist CAD-Entwickler und Autor zahlreicher CAD-Bücher. Er sammelte Erfahrungen als selbstständiger Konstrukteur, betreute umfangreiche CAD-Projekte und unterrichtete das Fach Konstruktion an der Fachschule für Techniker in Erlangen.



HANSER

www.hanser-fachbuch.de

€ 49,90 [D] | € 51,30 [A]

ISBN 978-3-446-43333-5



9 783446 433335