

Inhalt

1	Einleitung	17
1.1	Beispielsammlung, Voraussetzungen und Lernziele.....	19
1.2	Der Opel RAK2	21
1.3	Arbeitsumgebungen.....	21
1.4	Arbeiten mit dem Buch.....	22
2	Motion-Simulation (MKS).....	25
2.1	Einführung, Theorie	25
2.1.1	Berechnungsmethode	26
2.1.2	Einschränkungen	28
2.1.3	Klassifikationen bei MKS.....	29
2.2	Lernaufgaben Kinematik.....	30
2.2.1	Lenkgetriebe.....	30
2.2.1.1	Aufgabenstellung	31
2.2.1.2	Überblick über die Funktionen.....	31
2.2.1.3	Überblick über die Lösungsschritte	36
2.2.1.4	Erzeugen der Motion-Simulationsdatei.....	36
2.2.1.5	Wahl der Umgebung.....	40
2.2.1.6	Definition der Bewegungskörper (Links).....	41
2.2.1.7	Definition von Drehgelenken	43
2.2.1.8	Ermittlung unbestimmter Freiheitsgrade	45
2.2.1.9	Testlauf mit zwei unbestimmten Freiheitsgraden.....	46
2.2.1.10	Definition eines kinematischen Antriebs.....	48
2.2.1.11	Erzeugung eines Zahnrädpaares	50
2.2.1.12	Visuelle Kontrolle durch Nutzung der Artikulation	51
2.2.2	Top-down-Entwicklung der Lenkhebelkinematik.....	52
2.2.2.1	Aufgabenstellung	53
2.2.2.2	Überblick über die Lösungsschritte	53
2.2.2.3	Vorbereitungen.....	53
2.2.2.4	Erzeugen einer Prinzipskizze der Lenkhebel	54
2.2.2.5	Erzeugen der Motion-Simulationsdatei.....	55
2.2.2.6	Definition der Bewegungskörper durch Skizzenkurven	56
2.2.2.7	Erzeugung von Drehgelenken	58

Inhalt

2.2.2.8	Testlauf mit einem unbestimmten Freiheitsgrad	60
2.2.2.9	Bedeutung redundanter Freiheitsgrade	61
2.2.2.10	Einbau eines Kugelgelenks	63
2.2.2.11	Einbau eines Zylindergelenks	64
2.2.2.12	Erzeugung eines kinematischen Antriebs	64
2.2.2.13	Durchführung der Artikulation	65
2.2.2.14	Graphenerstellung der Radwinkelbewegung	66
2.2.2.15	Erstellung von Baugruppenkomponenten aus Prinzipkurven	69
2.2.2.16	Zufügen der neuen Komponenten zum Motion-Modell	71
2.2.3	Kollisionsprüfung am Gesamtmodell der Lenkung	72
2.2.3.1	Aufgabenstellung	73
2.2.3.2	Erstellen der Motion-Datei	73
2.2.3.3	Importieren der Motion-Untermodelle	74
2.2.3.4	Zufügen der Lenkstange	77
2.2.3.5	Erzeugung des Drehkreuzes mit einem Hilfskörper	77
2.2.3.6	Erzeugung eines Kugelgelenks	78
2.2.3.7	Artikulation des Gesamtsystems	79
2.2.3.8	Mechanismus für das Einfedern zufügen	79
2.2.3.9	Durchfahren der Bewegungen beim Einfedern und Lenken	82
2.2.3.10	Kollisionsprüfung	82
2.3	Lernaufgaben zur Dynamik	83
2.3.1	Fallversuch am Fahrzeugrad	83
2.3.1.1	Aufgabenstellung	84
2.3.1.2	Vorbereitungen	84
2.3.1.3	Zuordnung von Masseneigenschaften	85
2.3.1.4	Definition der Bewegungskörper (Links)	86
2.3.1.5	Funktionsweise des 3D-Kontakts	88
2.3.1.6	Funktionsweise der Reibung am 3D-Kontakt	89
2.3.1.7	Funktionsweise der Dämpfung am 3D Kontakt	89
2.3.1.8	Solver Voreinstellungen für Kontakte und Genauigkeit	90
2.3.1.9	Erzeugung eines 3D Kontakts	90
2.3.1.10	Lösen und Animation der Ergebnisse	91
2.3.1.11	Erzeugung einer Bewegungsspur	91
2.4	Lernaufgaben Co-Simulation	93
2.4.1	Balancieren eines Pendels	94
2.4.1.1	Aufgabenstellung	94
2.4.1.2	Anwenderstandards anpassen	95
2.4.1.3	Start der Anwendung für Co-Simulation	95
2.4.1.4	Erzeugen der Bewegungskörper und Gelenke	96
2.4.1.5	Marker und Sensor erzeugen	97

2.4.1.6	Messgrößenausgang für Simulink erzeugen.....	99
2.4.1.7	Messgrößeneingang erzeugen und mit Kraft verknüpfen	99
2.4.1.8	Co-Simulation lösen.....	100
2.4.1.9	Postprocessing für P-Regler	101
2.4.1.10	Ergebnisse bei PD-Regler	101
2.4.1.11	Ergebnisse bei PID-Regler	102
3	Design-Simulation FEM (Nastran).....	103
3.1	Einführung, Theorie	104
3.1.1	Lineare Statik.....	105
3.1.2	Nichtlineare Effekte.....	108
3.1.2.1	Kontakt-Nichtlinearität.....	108
3.1.2.2	Nichtlineares Material	109
3.1.2.3	Große Verformungen bzw. nichtlineare Geometrie.....	109
3.1.3	Einfluss der Netzfeinheit.....	110
3.1.4	Singularitäten.....	111
3.1.5	Eigenfrequenzen	112
3.1.6	Thermotransfer.....	113
3.1.7	Lineares Beulen	114
3.2	Lernaufgaben zu Design-Simulation.....	115
3.2.1	Kerbspannung am Lenkhebel (Sol101).....	115
3.2.1.1	Aufgabenstellung	116
3.2.1.2	Laden und Vorbereiten der Baugruppe.....	117
3.2.1.3	Starten der FE-Anwendung und Erstellen der Dateistruktur	117
3.2.1.4	Wählen der Lösungsmethode.....	120
3.2.1.5	Umgang mit dem Simulation Navigator.....	121
3.2.1.6	Überblick über die Lösungsschritte	124
3.2.1.7	Vorbereitungen der Geometrie	125
3.2.1.8	Allgemeines zur Vernetzung.....	133
3.2.1.9	Standardvernetzung erzeugen.....	134
3.2.1.10	Materialeigenschaften definieren	136
3.2.1.11	Erzeugen der Last	138
3.2.1.12	Überblick über weitere Lasttypen	139
3.2.1.13	Erzeugen der fixen Einspannung	141
3.2.1.14	Erzeugen der drehbaren Lagerung	141
3.2.1.15	Erzeugen der Bedingung für Spiegelsymmetrie	143
3.2.1.16	Konflikte der Randbedingungen lösen	143
3.2.1.17	Vollständigkeit der Einspannung prüfen.....	144
3.2.1.18	Überblick über weitere Zwangsbedingungen	145
3.2.1.19	Ergebnisse berechnen.....	146

Inhalt

3.2.1.20	Überblick über den Postprozessor	147
3.2.1.21	Verformungsergebnisse beurteilen	149
3.2.1.22	Vorläufige Spannungsergebnisse ablesen.....	151
3.2.1.23	Gemittelte und ungemittelte Knotenspannungen	153
3.2.1.24	Vergleich der FE-Ergebnisse mit der Theorie	154
3.2.1.25	Beurteilung der FE-Netzgüte.....	155
3.2.1.26	Möglichkeiten zur Verbesserung des FE-Netzes.....	158
3.2.1.27	Volumenpartitionierung am interessierenden Bereich	160
3.2.1.28	Vernetzen der unterteilten Körper.....	161
3.2.1.29	Nacharbeiten an den Randbedingungen.....	162
3.2.1.30	Neuberechnen.....	162
3.2.1.31	Weitere Verfeinerungen bis zur Konvergenz.....	162
3.2.1.32	Gegenüberstellung der Ergebnisse und Bewertung	163
3.2.1.33	Der Effekt von Singularitäten.....	165
3.2.2	Temperaturfeld in einer Rakete (Sol153)	168
3.2.2.1	Aufgabenstellung.....	169
3.2.2.2	Laden der Teile.....	169
3.2.2.3	Erzeugen der Dateistruktur	170
3.2.2.4	Überlegungen zu Symmetrie und Lösungstyp	170
3.2.2.5	Lösung erzeugen	171
3.2.2.6	Erzeugen eines Wave-Geometrie-Links.....	171
3.2.2.7	Erzeugen der Symmetrieschnitte	172
3.2.2.8	Materialeigenschaften erzeugen und zuordnen	172
3.2.2.9	Netzverbindung erzeugen	173
3.2.2.10	Vernetzung erzeugen.....	175
3.2.2.11	Temperaturrandbedingung erzeugen	175
3.2.2.12	Konvektionsrandbedingung erzeugen.....	176
3.2.2.13	Die thermische Symmetrierandbedingung	176
3.2.2.14	Ergebnisse berechnen und anzeigen	177
4	Advanced Simulation (FEM)	179
4.1	Einführung	180
4.1.1	Sol 101: Lineare Statik und Kontakt	181
4.1.2	Sol 103: Eigenfrequenzen	181
4.1.3	Sol 106: Nichtlineare Statik	182
4.1.4	Sol 601/701: Advanced nichtlinear	182
4.2	Lernaufgaben lineare Analyse und Kontakt (Sol 101/103)	185
4.2.1	Steifigkeit des Fahrzeugrahmens.....	185
4.2.1.1	Aufgabenstellung Teil 1	186
4.2.1.2	Vorüberlegungen zur Baugruppenstruktur	186

4.2.1.3	Überlegungen zur Vernetzung.....	187
4.2.1.4	Erzeugen der Dateistruktur für Schalenelement-Simulation	188
4.2.1.5	Markierungen für spätere Randbedingungen erzeugen.....	189
4.2.1.6	Entfernen unrelevanter Formelemente	190
4.2.1.7	Erzeugen der Mittelfläche	192
4.2.1.8	Unterteilen der Fläche für den Lastangriff.....	194
4.2.1.9	Polygoneometrie für die Mittelfläche hinzufügen	195
4.2.1.10	2D-Vernetzen des Flächenmodells	196
4.2.1.11	Angeben der Wandstärke.....	197
4.2.1.12	Verbinden des Netzes mit den Lagerungspunkten.....	197
4.2.1.13	Materialeigenschaften.....	199
4.2.1.14	Erzeugen der Last	199
4.2.1.15	Erzeugen der Lagerungen.....	200
4.2.1.16	Lösungen berechnen und bewerten	201
4.2.1.17	Verifikation anhand einfacher Balkentheorie.....	203
4.2.1.18	Aufgabenstellung Teil 2	205
4.2.1.19	Möglichkeiten für Baugruppen-FEMs.....	206
4.2.1.20	Aufbau einer Assembly FEM.....	207
4.2.1.21	Erzeugen von Modellen für Nietverbindungen	210
4.2.1.22	Vereinigen doppelter Knoten	212
4.2.1.23	Auflösen von Nummerierungskonflikten	213
4.2.1.24	Erzeugen einer Simulationsdatei	214
4.2.1.25	Einen Fehler im Modellaufbau finden und lösen	215
4.2.1.26	Lösungen berechnen	216
4.2.1.27	Gegenüberstellen von zwei verschiedenen Ergebnissen	217
4.2.2	Auslegung einer Schraubenfeder.....	219
4.2.2.1	Aufgabenstellung	220
4.2.2.2	Überblick über die Lösungsschritte	220
4.2.2.3	Aufbau des parametrischen CAD-Modells	221
4.2.2.4	Überlegungen zur Vernetzungsstrategie	221
4.2.2.5	Überlegungen zu Randbedingungen	222
4.2.2.6	Erzeugung der Dateistruktur und der Lösungsmethode	222
4.2.2.7	Vorbereitungen für Randbedingungen	223
4.2.2.8	Vernetzung mit Balkenelementen	224
4.2.2.9	Zuordnen von Material	226
4.2.2.10	Erstellen und Zuordnen eines Balkenquerschnitts.....	227
4.2.2.11	Erzeugen der Einspannung	229
4.2.2.12	Erzeugen der aufgezwungenen Verschiebung	229
4.2.2.13	Lösungen berechnen	231
4.2.2.14	Ermitteln der Reaktionskraft.....	231
4.2.2.15	Ermitteln der maximalen Zughauptspannung	232
4.2.2.16	Schlussfolgerungen für die Konstruktion	234

Inhalt

4.2.2.17 Änderung der Konstruktion und Neuanalyse	234
4.2.3 Eigenfrequenzen des Fahrzeugrahmens.....	235
4.2.3.1 Aufgabenstellung.....	235
4.2.3.2 Klonen eines ähnlichen Modells.....	236
4.2.3.3 Erzeugen einer Punktmasse am Rahmen	237
4.2.3.4 Einfügen einer Lösung für Eigenfrequenzen	238
4.2.3.5 Zuweisen der Randbedingungen zur neuen Lösung	240
4.2.3.6 Berechnen und Bewerten der Schwingungsformen und Frequenzen	241
4.2.3.7 Bewerten sonstiger Ergebnisgrößen.....	242
4.2.4 Klemmsitzanalyse am Flügelhebel mit Kontakt	244
4.2.4.1 Aufgabenstellung.....	244
4.2.4.2 Notwendigkeit für nichtlinearen Kontakt und Alternativen	245
4.2.4.3 Funktionsweise des nichtlinearen Kontakts.....	246
4.2.4.4 Laden der Baugruppe und Erzeugen der Dateistruktur.....	248
4.2.4.5 Kontakt spezifische Parameter in der Lösungsmethode	249
4.2.4.6 Teil 1: Grobanalyse mit Tetraedern.....	251
4.2.4.7 Geometrievereinfachungen für Symmetrie	252
4.2.4.8 Polygoneometrien nachträglich zufügen.....	253
4.2.4.9 Materialeigenschaften	253
4.2.4.10 Vernetzung für grobe Analyse.....	253
4.2.4.11 Definition von Symmetrierandbedingungen	254
4.2.4.12 Weiche Federlagerungen für statische Bestimmtheit zufügen	255
4.2.4.13 Definition des Kontaktbereichs.....	256
4.2.4.14 Erzeugung der Schraubenkraft	259
4.2.4.15 Ausgabe von Kontaktpressung anfordern.....	259
4.2.4.16 Lösungen berechnen und Ergebnisse beurteilen.....	260
4.2.4.17 Teil 2: Alternative Vernetzung mit Hex-Tet-Übergang	260
4.2.4.18 Körperunterteilungen für Hexaedervernetzung erzeugen.....	262
4.2.4.19 Erzwingen einer übereinstimmenden Vernetzung im Kontaktbereich	264
4.2.4.20 Vernetzung mit Hexaederelementen.....	265
4.2.4.21 Vernetzung mit Pyramidenübergang und Tetraederelementen.....	267
4.2.4.22 Weitere Schritte bis zum Ergebnis.....	268
4.3 Lernaufgaben Basic nichtlineare Analyse (Sol 106).....	269
4.3.1 Analyse der Blattfeder mit großer Verformung	269
4.3.1.1 Aufgabenstellung.....	269
4.3.1.2 Notwendigkeit für geometrisch nichtlineare Analyse.....	270
4.3.1.3 Funktionsweise der geometrisch nichtlinearen Analyse.....	270
4.3.1.4 Überblick über die Lösungsschritte.....	271
4.3.1.5 Vorbereitungen und Erzeugung der Lösung für lineare Statik.....	271
4.3.1.6 Mittelfläche erzeugen und der Polygoneometrie zufügen	272
4.3.1.7 Kantenunterteilung an der Polygoneometrie	273

4.3.1.8	Vernetzung für Analysen mit nichtlinearer Geometrie.....	275
4.3.1.9	Erzeugung der Randbedingungen.....	275
4.3.1.10	Erzeugung der Lasten für zwei Lastfälle.....	276
4.3.1.11	Erzeugung einer zweiten Lösung für lineare Statik.....	276
4.3.1.12	Erzeugung der Lösungen für nichtlineare Statik.....	277
4.3.1.13	Automatisches Abarbeiten aller Lösungen.....	278
4.3.1.14	Gegenüberstellen und Bewerten der Ergebnisse	279
	Plastische Verformung des Bremspedals.....	279
4.3.1.15	Aufgabenstellung	280
4.3.1.16	Modelle für Plastizität	281
4.3.1.17	Vorbereitungen und Erzeugen der Lösung	283
4.3.1.18	Vereinfachen der Geometrie	283
4.3.1.19	Vernetzung für plastische Analyse	284
4.3.1.20	Definieren der plastischen Materialeigenschaften	285
4.3.1.21	Definieren der Randbedingungen	287
4.3.1.22	Definieren der Lastschritte für Be- und Entlastung	288
4.3.1.23	Lösungen berechnen und bewerten	289
4.4	Lernaufgaben advanced nichtlinear (Sol 601)	290
4.4.1	Schnapphaken mit Kontakt und großer Verformung	290
4.4.1.1	Aufgabenstellung	291
4.4.1.2	Vorbereitungen und Erzeugung der Lösung.....	291
4.4.1.3	Verändern der Baugruppenposition im idealisierten Teil	292
4.4.1.4	Vereinfachen und Unterteilen der Geometrie	293
4.4.1.5	Gitterverknüpfungsbedingungen	294
4.4.1.6	Hexaedervernetzung des Gehäuses.....	294
4.4.1.7	Hexaedervernetzung des Schnapphakens	295
4.4.1.8	Vorbereitung für Reaktionskräfte zufügen.....	297
4.4.1.9	Materialeigenschaften für Kunststoff	298
4.4.1.10	Kontakt definieren	299
4.4.1.11	Allgemeines zu den Lösungen ADVNLIN.....	300
4.4.1.12	Zeitschritte definieren.....	301
4.4.1.13	Definition eines zeitabhängigen Verfahrwegs	301
4.4.1.14	Definieren der weiteren Randbedingungen	303
4.4.1.15	Aktivierung der Option für große Verformungen	304
4.4.1.16	Lösungsversuch ohne automatisches Zeitschrittverfahren	304
4.4.1.17	Verstehen des Newton-Verfahrens	305
4.4.1.18	Verstehen des Lösungsverlaufs anhand des Lösungsmonitors	306
4.4.1.19	Möglichkeiten zur Erreichung einer konvergenten Lösung.....	308
4.4.1.20	Lösung mit automatischem Zeitschrittverfahren.....	310
4.4.1.21	Optionales Unterbrechen der Lösung zur Prüfung.....	312

Inhalt

4.4.1.22	Postprocessing	312
4.4.1.23	Alternative vereinfachte Berechnungsmethoden	313
5	Advanced Simulation (CFD).....	315
5.1	Prinzip der numerischen Strömungsanalyse	316
5.2	Lernaufgaben (NX-Flow)	317
5.2.1	Strömungsverhalten und Auftrieb am Flügelprofil	317
5.2.1.1	Aufgabenstellung.....	317
5.2.1.2	Vorbereiten des CAD-Modells des Windkanals	318
5.2.1.3	Erstellen der Dateistruktur und Auswahl der Lösung.....	318
5.2.1.4	Zeitschrittgröße und Konvergenzgrenze.....	320
5.2.1.5	Auswahl eines Turbulenzmodells	321
5.2.1.6	Y+-Ergebnis anfordern.....	323
5.2.1.7	Einige weitere Optionen des Lösungselements.....	323
5.2.1.8	Strategien für die Erstellung des Strömungsraums	324
5.2.1.9	Strategien für die Vernetzung bei Strömungen	325
5.2.1.10	Erzeugen und Visualisieren einer Fluid-Domain-Vernetzung	325
5.2.1.11	Definieren von Randschichten für die Vernetzung	327
5.2.1.12	Materialeigenschaften für Strömungen.....	329
5.2.1.13	Übersicht über Strömungsrandbedingungen	329
5.2.1.14	Einlass mit Geschwindigkeitsrandbedingung definieren.....	332
5.2.1.15	Auslassöffnung definieren.....	333
5.2.1.16	Randbedingung für das Flügelprofil	334
5.2.1.17	Randbedingung für die Windkanalwand.....	335
5.2.1.18	Symmetrierandbedingung an den Schnittwänden.....	336
5.2.1.19	Anfordern von Ergebnissen während der Lösungsiterationen	337
5.2.1.20	Durchführen der Lösung	337
5.2.1.21	Beobachten des Lösungsfortschritts	337
5.2.1.22	Kontrollieren des Y+-Ergebnisses	341
5.2.1.23	Verbessern des Gitterwandabstands und neu berechnen	341
5.2.1.24	Ergebnis der statischen und der totalen Druckverteilung.....	341
5.2.1.25	Ergebnis der Strömungskräfte.....	343
5.2.1.26	Darstellen der Geschwindigkeiten	344
6	Management von Berechnungs- und Simulationsdaten	347
6.1	Einführung, Theorie.....	347
6.1.1	CAD/CAE-Integrationsproblematik	347
6.1.2	Lösungen mit Teamcenter for Simulation	348

6.1.2.1 Das CAE Datenmodell in Teamcenter for Simulation.....	349
6.1.2.2 Weitere Lösungen.....	350
6.2 Lernaufgaben zu Teamcenter for Simulation	351
6.2.1 Durchführung einer NX CAE-Analyse in Teamcenter.....	351
6.2.1.1 Aufgabenstellung	351
6.2.1.2 Import eines CAD-Teils in Teamcenter	352
6.2.1.3 Erstellung der Teamcenter CAE Struktur	353
6.2.1.4 Schritte in der FEM-Datei	354
6.2.1.5 Schritte in der Simulationsdatei	355
6.2.2 Welches CAD-Modell gehört zu welchem FEM-Modell?.....	358
6.2.2.1 Beziehungen in den Details darstellen.....	358
6.2.2.2 Beziehungen im CAE-Manager darstellen	359
6.2.3 Revisionieren	361
6.2.3.1 Revisionieren des CAD-Modells, berechnungsrelevant	361
6.2.3.2 FEM-Modell auf neue CAD-Revisionen prüfen.....	362
6.2.3.3 FEM-Modell aktualisieren und ebenfalls revisionieren	363
6.2.3.4 Revisionieren des CAD-Modells, nicht berechnungsrelevant	364
6.2.3.5 Altes FEM-Modell mit geändertem CAD-Modell verknüpfen.....	365
7 Anhang.....	367
7.1 Ein FEM-Beispiel manuell gerechnet	367
7.1.1 Aufgabenstellung	367
7.1.2 Idealisierung und Wahl einer Theorie.....	367
7.1.3 Analytische Lösung	368
7.1.4 Raumdiskretisierung für FEM.....	369
7.1.5 Aufstellen und Lösen des FEA-Gleichungssystems.....	370
7.1.6 Vergleich der analytischen Lösung mit der aus FEA.....	372
Literatur	374
Funktionsindex der Lernaufgaben.....	378
Farbplots	388
Begriffsindex	406