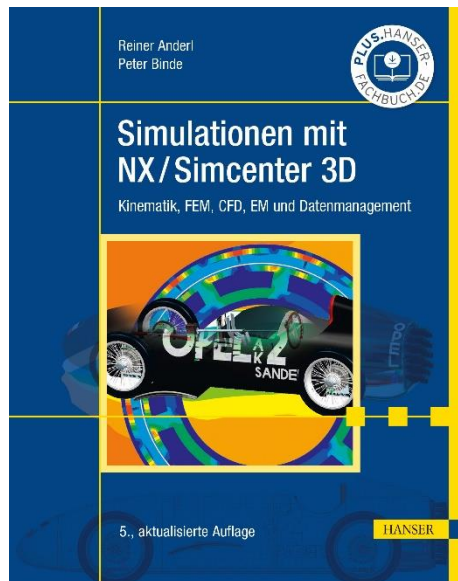


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Simulationen mit NX / Simcenter 3D

von Reiner Anderl und Peter Binde

Print-ISBN: 978-3-446-47344-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-47451-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446473447>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Lernaufgaben, Lernziele und wichtige Voraussetzungen für die Arbeit mit dem Buch .....	4
1.2 Arbeitsumgebungen .....	6
1.3 Arbeiten mit dem Buch .....	7
<b>2 NX/Simcenter 3D Motion (MKS)</b> .....	<b>11</b>
2.1 Einführung und Theorie .....	11
2.1.1 Berechnungsmethode .....	12
2.1.2 Einschränkungen .....	14
2.1.3 Klassifikationen bei MKS .....	15
2.2 Lernaufgaben zur Kinematik .....	16
2.2.1 Lenkgetriebe .....	16
2.2.1.1 Aufgabenstellung .....	16
2.2.1.2 Überblick über die Funktionen .....	17
2.2.1.3 Überblick über die Lösungsschritte .....	22
2.2.1.4 Erzeugung der NX/Simcenter 3D Motion-Datei .....	22
2.2.1.5 Wahl des Lösungstyps .....	25
2.2.1.6 Definition der Bewegungskörper (Motion Bodies) .....	26
2.2.1.7 Definition von Drehgelenken .....	28
2.2.1.8 Ermittlung unbestimmter Freiheitsgrade .....	30
2.2.1.9 Testlauf mit zwei unbestimmten Freiheitsgraden .....	30
2.2.1.10 Definition eines kinematischen Antriebs .....	32
2.2.1.11 Erzeugung eines Zahnradpaars .....	34
2.2.1.12 Visuelle Kontrolle durch Nutzung der Artikulation .....	34

2.2.2	Top-down-Entwicklung der Lenkhebelkinematik	35
2.2.2.1	Aufgabenstellung	36
2.2.2.2	Überblick über die Lösungsschritte	36
2.2.2.3	Vorbereitungen	37
2.2.2.4	Erzeugung einer Prinzipskizze der Lenkhebel	37
2.2.2.5	Erzeugung der NX/Simcenter 3D Motion-Datei	38
2.2.2.6	Definition der Bewegungskörper durch Skizzenkurven	39
2.2.2.7	Erzeugung von Drehgelenken	41
2.2.2.8	Testlauf mit einem unbestimmten Freiheitsgrad	42
2.2.2.9	Bedeutung redundanter Freiheitsgrade	43
2.2.2.10	Einbau eines Kugelgelenks	45
2.2.2.11	Einbau eines Zylindergelenks	45
2.2.2.12	Erzeugung eines kinematischen Antriebs	46
2.2.2.13	Durchführung der Artikulation	46
2.2.2.14	Graphenerstellung der Radwinkelbewegung	47
2.2.2.15	Erstellung von Baugruppenkomponenten aus Prinzipkurven	50
2.2.2.16	Hinzufügen der neuen Komponenten zum Motion-Modell	52
2.2.3	Kollisionsprüfung am Gesamtmodell der Lenkung	53
2.2.3.1	Aufgabenstellung	54
2.2.3.2	Erstellung der Motion-Datei	54
2.2.3.3	Import der Motion-Untermodele	54
2.2.3.3.1	Art des Imports	54
2.2.3.3.2	Untermechanismus hinzufügen	55
2.2.3.3.3	Nachbereitungen	56
2.2.3.4	Hinzufügen der Lenkstange	57
2.2.3.5	Erzeugung des Drehkreuzes mit einem Hilfskörper	57
2.2.3.6	Erzeugung eines Kugelgelenks	58
2.2.3.7	Artikulation des Gesamtsystems	59
2.2.3.8	Mechanismus für das Einfedern zufügen	59
2.2.3.8.1	Erzeugung eines Schiebegelens am Querträger	59
2.2.3.8.2	Umreferenzierung der Drehgelenke an den Lenkhebeln	60
2.2.3.9	Durchfahren der Bewegungen beim Einfedern und Lenken	61
2.2.3.10	Kollisionsprüfung	61
<b>2.3</b>	<b>Lernaufgaben zur Dynamik</b>	<b>62</b>
2.3.1	Fallversuch am Fahrzeugrad	62
2.3.1.1	Aufgabenstellung	63
2.3.1.2	Vorbereitungen	63
2.3.1.3	Zuordnung von Masseneigenschaften	64
2.3.1.4	Definition der Bewegungskörper (Motion Bodies)	65
2.3.1.5	Funktionsweise des 3D-Kontakts	66
2.3.1.6	Funktionsweise der Reibung am 3D-Kontakt	67
2.3.1.7	Funktionsweise der Dämpfung am 3D-Kontakt	68
2.3.1.8	Erzeugung eines 3D-Kontakts	68
2.3.1.9	Lösung und Animation der Ergebnisse	69
2.3.1.10	Erzeugung einer Bewegungsspur	70

<b>2.4</b>	<b>Lernaufgaben zur Co-Simulation</b>	72
2.4.1	Balancieren eines Pendels	72
2.4.1.1	Aufgabenstellung	73
2.4.1.2	Anpassung der Anwenderstandards	73
2.4.1.3	Start der Anwendung für Co-Simulation	73
2.4.1.4	Erzeugung der Bewegungskörper und Gelenke	74
2.4.1.5	Marker und Sensor erzeugen	75
2.4.1.6	Messgrößenausgang für Simulink erzeugen	77
2.4.1.7	Messgrößeneingang erzeugen und mit Kraft verknüpfen	77
2.4.1.8	Lösung der Co-Simulation	78
2.4.1.9	Postprocessing für einen P-Regler	78
2.4.1.10	Ergebnisse bei einem PD-Regler	79
2.4.1.11	Ergebnisse bei einem PID-Regler	80
<b>3</b>	<b>NX Design Simulation (FEM)</b>	<b>81</b>
<b>3.1</b>	<b>Einführung und Theorie</b>	82
3.1.1	Lineare Statik	83
3.1.2	Nichtlineare Effekte	85
3.1.2.1	Kontakt-Nichtlinearität	86
3.1.2.2	Nichtlineares Material	86
3.1.2.3	Große Verformungen bzw. nichtlineare Geometrie	87
3.1.3	Einfluss der Netzfeinheit	87
3.1.4	Singularitäten	88
3.1.5	Eigenfrequenzen	89
3.1.6	Thermotransfer	91
3.1.7	Lineares Beulen	92
<b>3.2</b>	<b>Lernaufgaben zur Design-Simulation</b>	92
3.2.1	Kerbspannung am Lenkhebel (Sol 101)	93
3.2.1.1	Aufgabenstellung	93
3.2.1.2	Laden und Vorbereiten der Baugruppe	94
3.2.1.3	Starten der FE-Anwendung und Erstellen der Dateistruktur	95
3.2.1.4	Wahl der Lösungsmethode	97
3.2.1.5	Umgang mit dem Simulation Navigator	98
3.2.1.5.1	Navigation in der Dateistruktur	99
3.2.1.5.2	Der Knoten der Simulationsdatei	99
3.2.1.5.3	Der Knoten Polygon Geometry	100
3.2.1.5.4	Der Knoten Simulation Object Container	100
3.2.1.5.5	Die Knoten Load Container und Constraint Container	100
3.2.1.5.6	Der Knoten Solution	101
3.2.1.6	Überblick über die Lösungsschritte	102
3.2.1.7	Vorbereitungen der Geometrie	102
3.2.1.7.1	Erfordernisse an die CAD-Geometrie	103
3.2.1.7.2	Voraussetzungen für Geometrieänderungen in der FE-Umgebung	104

3.2.1.7.3	Erzeugung eines Wave-Geometrie-Links des Bauteils	105
3.2.1.7.4	Symmetrieschnitt am Hebel	105
3.2.1.7.5	Freischnitt irrelevanter Geometrieteile	106
3.2.1.7.6	Detaillierung im Bereich der Kerbe	108
3.2.1.7.7	Vergrößern der Geometrie	108
3.2.1.8	Allgemeines zur Vernetzung	109
3.2.1.9	Erzeugung der Standardvernetzung	110
3.2.1.10	Definition der Materialeigenschaften	112
3.2.1.11	Erzeugung der Last	114
3.2.1.12	Überblick über weitere Lasttypen	115
3.2.1.13	Erzeugung der fixen Einspannung	116
3.2.1.14	Erzeugung der drehbaren Lagerung	117
3.2.1.15	Erzeugung der Bedingung für eine Spiegelsymmetrie	118
3.2.1.16	Vollständigkeit der Einspannung prüfen	118
3.2.1.17	Überblick über weitere Zwangsbedingungen	119
3.2.1.18	Berechnung der Ergebnisse	120
3.2.1.19	Überblick über den Postprozessor	120
3.2.1.20	Beurteilung der Verformungsergebnisse	123
3.2.1.21	Vorläufige Spannungsergebnisse ablesen	125
3.2.1.22	Gemittelte und ungemittelte Knotenspannungen	126
3.2.1.23	Vergleich der FE-Ergebnisse mit der Theorie	127
3.2.1.24	Beurteilung der FE-Netzgüte	129
3.2.1.24.1	Visuelle Kontrolle	129
3.2.1.24.2	Kontrolle durch automatische Prüfung der Elementformen	130
3.2.1.24.3	Kontrolle durch Vergleich der gemittelten und ungemittelten Spannungen	131
3.2.1.25	Möglichkeiten zur Verbesserung des FE-Netzes	131
3.2.1.25.1	Verringerung der Gesamtelementgröße	132
3.2.1.25.2	Lokale Verfeinerung mithilfe von 2D-Oberflächennetzen	132
3.2.1.25.3	Lokale Verfeinerung mit der Gittersteuerung	132
3.2.1.25.4	Lokale Verfeinerung durch Volumenpartitionierung	133
3.2.1.26	Volumenpartitionierung am interessierenden Bereich	133
3.2.1.27	Vernetzung der unterteilten Körper	134
3.2.1.28	Nacharbeitung an den Randbedingungen	135
3.2.1.29	Neuberechnung	135
3.2.1.30	Weitere Verfeinerungen bis zur Konvergenz	136
3.2.1.31	Gegenüberstellung der Ergebnisse und Bewertung	136
3.2.1.32	Der Effekt von Singularitäten	138
3.2.2	Temperaturfeld in einer Rakete (Sol 153)	140
3.2.2.1	Aufgabenstellung	141
3.2.2.2	Laden der Teile	141
3.2.2.3	Erzeugung der Dateistruktur	142
3.2.2.4	Überlegungen zu Symmetrie und Lösungstyp	142

3.2.2.5	Erzeugung der Lösung	142
3.2.2.6	Erzeugung eines WAVE-Links	143
3.2.2.7	Erzeugung der Symmetrieschnitte	144
3.2.2.8	Erzeugung und Zuordnung der Materialeigenschaften	144
3.2.2.9	Erzeugung der Netzverbindung	145
3.2.2.10	Erzeugung der Vernetzung	146
3.2.2.11	Erzeugung der Temperaturrandbedingung	146
3.2.2.12	Erzeugung der Konvektionsrandbedingung	147
3.2.2.13	Die thermische Symmetrierandbedingung	148
3.2.2.14	Berechnung und Anzeige der Ergebnisse	148

## **4 NX/Simcenter 3D FEM** ..... **151**

<b>4.1</b>	<b>Einführung</b>	<b>152</b>
4.1.1	Sol 101: Lineare Statik und Kontakt	154
4.1.2	Sol 103: Eigenfrequenzen	154
4.1.3	Sol 106: Nichtlineare Statik	154
4.1.4	Sol 401/402: Multi-Step Nonlinear	155
<b>4.2</b>	<b>Lernaufgaben zur linearen Analyse und Kontaktfunktion (Sol 101/103)</b>	<b>158</b>
4.2.1	Steifigkeit des Fahrzeugrahmens	158
4.2.1.1	Aufgabenstellung (Teil 1)	159
4.2.1.2	Vorüberlegungen zur Baugruppenstruktur	159
4.2.1.3	Überlegungen zur Vernetzung	159
4.2.1.4	Erzeugung der Dateistruktur für die Schalenelement-Simulation	160
4.2.1.5	Markierungen für spätere Randbedingungen erzeugen	161
4.2.1.6	Entfernung unrelevanter Formelemente	162
4.2.1.7	Erzeugung der Mittelfläche	164
4.2.1.8	Unterteilung der Fläche für den Lastangriff	166
4.2.1.9	Polygoneometrie für die Mittelfläche hinzufügen	167
4.2.1.10	2D-Vernetzen des Flächenmodells	168
4.2.1.11	Angabe der Wandstärke	169
4.2.1.12	Verbindung des Netzes mit den Lagerungspunkten	169
4.2.1.13	Materialeigenschaften	170
4.2.1.14	Erzeugung der Last	170
4.2.1.15	Erzeugung der Lagerungen	171
4.2.1.16	Berechnung und Bewertung der Lösungen	172
4.2.1.17	Verifikation anhand einfacher Balkentheorie	174
4.2.1.18	Aufgabenstellung (Teil 2)	176
4.2.1.19	Möglichkeiten für Baugruppen-FEMs	177
4.2.1.20	Aufbau einer Assembly-FEM	177
4.2.1.21	Erzeugung von Modellen für Nietverbindungen	180
4.2.1.22	Vereinigung doppelter Knoten	182
4.2.1.23	Auflösung von Nummerierungskonflikten	184
4.2.1.24	Erzeugung einer Simulationsdatei	184

4.2.1.25	Einen Fehler im Modellaufbau finden und lösen	185
4.2.1.26	Berechnung der Lösungen	186
4.2.1.27	Gegenüberstellung von zwei verschiedenen Ergebnissen	186
4.2.2	Auslegung einer Schraubenfeder	189
4.2.2.1	Aufgabenstellung	189
4.2.2.2	Überblick über die Lösungsschritte	190
4.2.2.3	Aufbau des parametrischen CAD-Modells	190
4.2.2.4	Überlegungen zur Vernetzungsstrategie	190
4.2.2.5	Überlegungen zu Randbedingungen	192
4.2.2.6	Erzeugung der Dateistruktur und der Lösungsmethode	192
4.2.2.7	Vorbereitungen für Randbedingungen	193
4.2.2.8	Vernetzung mit Balkenelementen	194
4.2.2.9	Zuordnung von Material	195
4.2.2.10	Erstellung und Zuordnung eines Balkenquerschnitts	196
4.2.2.11	Erzeugung der Einspannung	197
4.2.2.12	Erzeugung der aufgezwungenen Verschiebung	198
4.2.2.13	Berechnung der Lösungen	199
4.2.2.14	Ermittlung der Reaktionskraft	199
4.2.2.15	Ermitteln der maximalen Zughauptspannung	200
4.2.2.16	Schlussfolgerungen für die Konstruktion	202
4.2.2.17	Änderung der Konstruktion und Neuanalyse	202
4.2.3	Eigenfrequenzen des Fahrzeugrahmens	203
4.2.3.1	Aufgabenstellung	203
4.2.3.2	Klonen eines ähnlichen Modells	203
4.2.3.3	Erzeugen einer Punktmasse am Rahmen	205
4.2.3.4	Einfügen einer Lösung für Eigenfrequenzen	206
4.2.3.5	Zuweisen der Randbedingungen zur neuen Lösung	207
4.2.3.6	Berechnen und Bewerten der Schwingungsformen und Frequenzen	208
4.2.3.7	Bewerten sonstiger Ergebnisgrößen	209
4.2.4	Klemmsitzanalyse am Flügelhebel mit Kontakt	210
4.2.4.1	Aufgabenstellung	211
4.2.4.2	Notwendigkeit für nichtlinearen Kontakt und Alternativen	211
4.2.4.3	Funktionsweise des nichtlinearen Kontakts	213
4.2.4.4	Laden der Baugruppe und Erzeugen der Dateistruktur	214
4.2.4.5	Kontaktspezifische Parameter in der Lösungsmethode	215
4.2.4.6	Teil 1: Grobanalyse mit Tetraedern	217
4.2.4.7	Geometrievereinfachungen für Symmetrie	217
4.2.4.8	Polygoneometrien nachträglich zufügen	218
4.2.4.9	Materialeigenschaften	219
4.2.4.10	Vernetzung mit Tetraedern	219
4.2.4.11	Symmetrie- und weitere Randbedingungen	220
4.2.4.12	Weiche Federlagerungen für statische Bestimmtheit zufügen	221
4.2.4.13	Definition des Kontaktbereichs	222
4.2.4.14	Erzeugung der Schraubenkraft	224

4.2.4.15	Ausgabe von Kontaktpressung anfordern	225
4.2.4.16	Lösungen berechnen und Ergebnisse beurteilen	225
4.2.4.17	Teil 2: Alternative Vernetzung mit Hex-Tet-Übergang	226
4.2.4.18	Körperunterteilungen für Hexaedervernetzung erzeugen	228
4.2.4.19	Erzwingen einer übereinstimmenden Vernetzung im Kontaktbereich	229
4.2.4.20	Vernetzung mit Hexaederelementen	231
4.2.4.21	Vernetzung mit Pyramidenübergang und Tetraederelementen	232
4.2.4.22	Weitere Schritte bis zum Ergebnis	233
<b>4.3</b>	<b>Lernaufgaben zur Basic Nonlinear Analysis (Sol 106)</b>	<b>234</b>
4.3.1	Analyse der Blattfeder mit großer Verformung	234
4.3.1.1	Aufgabenstellung	234
4.3.1.2	Notwendigkeit für geometrisch nichtlineare Analyse	235
4.3.1.3	Funktionsweise der geometrisch nichtlinearen Analyse	236
4.3.1.4	Überblick über die Lösungsschritte	236
4.3.1.5	Vorbereitungen und Erzeugung der Lösung für lineare Statik	236
4.3.1.6	Mittelfläche erzeugen und der Polygoneometrie zufügen	237
4.3.1.7	Kantenunterteilung an der Polygoneometrie	238
4.3.1.8	Vernetzung für Analysen mit nichtlinearer Geometrie	239
4.3.1.9	Erzeugung der Randbedingungen	240
4.3.1.10	Erzeugung der Lasten für zwei Lastfälle	240
4.3.1.11	Erzeugung einer zweiten Lösung für lineare Statik	241
4.3.1.12	Erzeugung der Lösungen für nichtlineare Statik	242
4.3.1.13	Automatisches Abarbeiten aller Lösungen	243
4.3.1.14	Gegenüberstellen und Bewerten der Ergebnisse	244
4.3.2	Plastische Verformung des Bremspedals	245
4.3.2.1	Aufgabenstellung	246
4.3.2.2	Modelle für Plastizität	246
4.3.2.3	Vorbereitungen und Erzeugen der Lösung	248
4.3.2.4	Vereinfachen der Geometrie	249
4.3.2.5	Vernetzung für plastische Analyse	250
4.3.2.6	Definieren der plastischen Materialeigenschaften	250
4.3.2.7	Definieren der Randbedingungen	252
4.3.2.8	Definieren der Lastschritte für Be- und Entlastung	253
4.3.2.9	Lösungen berechnen und bewerten	254
<b>4.4</b>	<b>Lernaufgaben zur Advanced Nonlinear Analysis – Multi-Step Nonlinear (Sol 401, 402)</b>	<b>255</b>
4.4.1	Schnapphaken mit Kontakt und großer Verformung	255
4.4.1.1	Aufgabenstellung	256
4.4.1.2	Vorbereitungen und Erzeugung der Lösung	256
4.4.1.3	Verändern der Baugruppenposition im idealisierten Teil	257
4.4.1.4	Vereinfachen und Unterteilen der Geometrie	258
4.4.1.5	Gitterverknüpfungen	258
4.4.1.6	Hexaedervernetzung des Gehäuses	259
4.4.1.7	Hexaedervernetzung des Schnapphakens	260



4.4.1.8	Vorbereitung für Reaktionskräfte zufügen	262
4.4.1.9	Materialeigenschaften für Kunststoff	262
4.4.1.10	Kontakt definieren	263
4.4.1.11	Allgemeines zu den Lösungen Multi-Step Nonlinear	264
4.4.1.12	Zeitschritte definieren	265
4.4.1.13	Definition eines zeitabhängigen Verfahrenswegs	266
4.4.1.14	Definieren der weiteren Randbedingungen	268
4.4.1.15	Aktivierung der Option für große Verformungen	269
4.4.1.16	Verstehen des Newton-Verfahrens	269
4.4.1.17	Verstehen des Lösungsverlaufs anhand des Lösungsmonitors	270
4.4.1.18	Möglichkeiten zur Erreichung einer konvergenten Lösung	272
4.4.1.19	Das automatische Zeitschrittverfahren	274
4.4.1.20	Optionales Unterbrechen der Lösung zur Prüfung	277
4.4.1.21	Postprocessing	277
4.4.1.22	Alternative vereinfachte Berechnungsmethoden	278

## **5** NX/Simcenter 3D CFD ..... 281

### **5.1** Prinzip der numerischen Strömungsanalyse ..... 282

### **5.2** Lernaufgaben (Simcenter Flow) ..... 283

5.2.1	Strömungsverhalten und Auftrieb am Flügelprofil	283
5.2.1.1	Aufgabenstellung	283
5.2.1.2	Vorbereitung des CAD-Modells des Windkanals	283
5.2.1.3	Erstellung der Dateistruktur und Auswahl der Lösung	284
5.2.1.4	Zeitschrittgröße und Konvergenzgrenze	285
5.2.1.5	Auswahl eines Turbulenzmodells	287
5.2.1.6	Anforderung des Y+-Ergebnisses	289
5.2.1.7	Weitere Optionen des Lösungselements	289
5.2.1.8	Strategien für die Erstellung des Strömungsraums	290
5.2.1.9	Strategien für die Vernetzung bei Strömungen	290
5.2.1.10	Erzeugung einer Vernetzung der Luft	291
5.2.1.11	Definition von Randschichten für die Vernetzung	292
5.2.1.12	Materialeigenschaften für Strömungen	293
5.2.1.13	Übersicht über Strömungsrandbedingungen	294
5.2.1.13.1	Körperwände	294
5.2.1.13.2	Öffnungen, Ein- und Auslass	296
5.2.1.14	Einlass mit Geschwindigkeitsrandbedingung definieren	297
5.2.1.15	Definition der Auslassöffnung	298
5.2.1.16	Randbedingung für das Flügelprofil	298
5.2.1.17	Randbedingung für die Windkanalwand	299
5.2.1.18	Symmetrierandbedingung an den Schnittwänden	300
5.2.1.19	Anforderung von Ergebnissen während der Lösungsiterationen	300
5.2.1.20	Durchführung der Lösung	301
5.2.1.21	Beobachtung des Lösungsfortschritts	301
5.2.1.22	Kontrolle des Y+-Ergebnisses	303

5.2.1.23	Verbesserung und Neuberechnung des Gitterwandabstands . . .	304
5.2.1.24	Ergebnis der statischen und der totalen Druckverteilung . . . . .	304
5.2.1.25	Ergebnis der Strömungskräfte . . . . .	305
5.2.1.26	Darstellung der Geschwindigkeiten . . . . .	306

## **6 NX/Simcenter 3D EM . . . . . 309**

<b>6.1</b>	<b>Prinzipien elektromagnetischer Analysen . . . . .</b>	<b>311</b>
6.1.1	Elektromagnetische Modelle . . . . .	311
6.1.2	Maxwell-Gleichungen . . . . .	312
6.1.2.1	Ampere-Gesetz . . . . .	312
6.1.2.2	Faraday-Gesetz . . . . .	313
6.1.2.3	Erhaltung der magnetischen Flussdichte . . . . .	314
6.1.3	Materialgleichungen . . . . .	314
6.1.4	Modellauswahl . . . . .	315
6.1.5	Elektrostatik . . . . .	318
6.1.6	Elektrokinetik . . . . .	318
6.1.7	Elektrodynamik . . . . .	318
6.1.8	Magnetostatik . . . . .	319
6.1.9	Magnetodynamik . . . . .	319
6.1.10	Full Wave (Hochfrequenz) . . . . .	320
<b>6.2</b>	<b>Installation und Lizenz . . . . .</b>	<b>320</b>
<b>6.3</b>	<b>Lernaufgaben (EM) . . . . .</b>	<b>322</b>
6.3.1	Spule mit Kern, achsensymmetrisch . . . . .	322
6.3.1.1	Aufgabenstellungen . . . . .	323
6.3.1.2	2D-achsensymmetrische Methode . . . . .	324
6.3.1.3	Erstellung der Dateistruktur und der Lösungen . . . . .	324
6.3.1.4	Vernetzungen und physikalische Eigenschaften . . . . .	326
6.3.1.5	Randbedingungen und Lasten . . . . .	334
6.3.1.6	Durchführung der Berechnung . . . . .	336
6.3.1.7	Flussdichte und weitere Ergebnisse . . . . .	336
6.3.2	Spule mit Kern, 3D . . . . .	340
6.3.2.1	Erstellung der Dateistruktur und der Lösungen . . . . .	340
6.3.2.2	Vernetzungen und physikalische Eigenschaften . . . . .	340
6.3.2.3	Randbedingungen und Lasten . . . . .	343
6.3.2.4	Durchführung der Berechnung und Auswertung . . . . .	344
6.3.3	Hochfrequenz-(Full-Wave-)Schirmung, EMV . . . . .	344
6.3.3.1	CAD-Modell . . . . .	345
6.3.3.2	Vernetzungen . . . . .	346
6.3.3.3	Full Wave Setup . . . . .	346
6.3.3.4	Abschätzung der Frequenz für Wellenablösung . . . . .	347
6.3.3.5	Finden von Peaks durch Frequenz-Sweep . . . . .	348
6.3.4	Elektromotor . . . . .	350
6.3.4.1	Aufgabenstellung . . . . .	350
6.3.4.2	CAD-Vorbereitungen für Automatisierungen . . . . .	351

6.3.4.3	Erstellung der Dateistruktur und der Lösungen	353
6.3.4.4	Vernetzungen und Spulenschema	353
6.3.4.5	Physikalische Eigenschaften	357
6.3.4.6	Rotorbewegung	360
6.3.4.7	Definition des Dreiphasenstroms	363
6.3.4.8	Umgebungsbedingung	364
6.3.4.9	Finden der Rotor-Startstellung	364
6.3.4.10	Berechnung des Drehmomentverlaufs	366
6.3.4.11	Darstellung der Flussdichte und der Bewegung des Rotors	367
6.3.4.12	Ermittlung des Spannungsverlaufs der Phasen	367
6.3.4.13	Ermittlung der Verluste	369

## **7** Management von Berechnungs- und Simulationsdaten **373**

<b>7.1</b>	<b>Einführung und Theorie</b>	<b>373</b>
7.1.1	CAD/CAE-Integrationsproblematik	373
7.1.2	Lösungen mit Teamcenter for Simulation	374
7.1.2.1	Das CAE-Datenmodell in Teamcenter for Simulation	375
7.1.2.2	Weitere Lösungen	376
<b>7.2</b>	<b>Lernaufgaben zu Teamcenter for Simulation</b>	<b>377</b>
7.2.1	Durchführung einer NX CAE-Analyse in Teamcenter	377
7.2.1.1	Aufgabenstellung	377
7.2.1.2	Import eines CAD-Teils in Teamcenter	377
7.2.1.3	Erstellung der Teamcenter CAE-Struktur	378
7.2.1.3.1	FEM-Datei/CAEModelRevision	378
7.2.1.3.2	Idealisierte Datei/CAEGeometryRevision	379
7.2.1.3.3	SIM-Datei/CAEAnalysisRevision	380
7.2.1.3.4	Erzeugung einer JT-Visualisierung	382
7.2.1.4	Schritte in der FEM-Datei	383
7.2.1.5	Schritte in der Simulationsdatei	383
7.2.2	Welches CAD-Modell gehört zu welchem FEM-Modell?	385
7.2.2.1	Darstellung der Beziehungen in den Details	386
7.2.2.2	Darstellung der Beziehungen im CAE-Manager	387
7.2.3	Revisionierung	388
7.2.3.1	Revisionierung des CAD-Modells, berechnungsrelevant	388
7.2.3.2	Prüfung des FEM-Modells auf neue CAD-Revisionen	389
7.2.3.3	Aktualisierung und Revisionierung des FEM-Modells	389
7.2.3.4	Revisionieren des CAD-Modells, nicht berechnungsrelevant	391
7.2.3.5	Verknüpfung des alten FEM-Modells mit dem geänderten CAD-Modell	391

<b>8</b>	<b>Manuelle Berechnung eines FEM-Beispiels</b> .....	<b>393</b>
8.1	Aufgabenstellung .....	393
8.2	Idealisierung und Wahl einer Theorie .....	394
8.3	Analytische Lösung .....	394
8.4	Raumdiskretisierung für FEM .....	395
8.5	Aufstellung und Lösung des FEA-Gleichungssystems .....	396
8.6	Vergleich der analytischen Lösung mit der Lösung aus der Finite-Elemente-Analyse .....	398
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>401</b>
	<b>Index</b> .....	<b>405</b>



# Vorwort

Die virtuelle Produktentwicklung hat durch die integrierte Anwendung von volumenorientierten 3D-CAD-Modellierungsverfahren sowie 3D-Berechnungs- und Simulationsverfahren enorm an Bedeutung gewonnen und ist für die industrielle Praxis unverzichtbar geworden. Flankiert durch die rasante Weiterentwicklung der modernen Informations- und Kommunikationstechnologien ist die anwendungsintegrierende virtuelle Produktentwicklung sowohl in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung als auch in der industriellen Aus- und Fortbildung zu einem integralen Bestandteil geworden. Hinzu kommen die überaus wichtigen und auch neuen Ansätze aus der Initiative Industrie 4.0, die zu einer neuen Stufe der Wertschöpfung führt und alle Bereiche der Produktlebensphasen betrifft. Gerade in diesem Zusammenhang spielt die Erstellung und Nutzung sogenannter digitaler Zwillinge eine besondere Bedeutung. Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentationen (Abbilder) individueller, realer Bauteile und Produkte. Sie bilden die Grundlage für vielfältige Berechnungen und Simulationen und erlauben insbesondere auch die Untersuchung realer Bauteile und Produkte unabhängig von deren Einsatzort. Präventive Wartung, Instandhaltung sowie vorab testbare Reparaturen werden dadurch auf eine neue Grundlage gestellt.

Von 2003 bis 2019 fungierte die Technische Universität Darmstadt als PACE-Universität und war Teil des internationalen PACE-Verbundes. PACE steht für *Partners for the Advancement of Collaborative Engineering Education* und war ein Förderprogramm der Firmen General Motors Corp. (in Deutschland Adam Opel AG), Autodesk, Hewlett Packard Enterprise, Siemens, Oracle sowie weiterer unterstützender Firmen. Die Förderung durch das PACE-Programm ermöglichte das Entstehen dieser Expertise, insbesondere durch die Integration der 3D-Modellierungstechniken mit Berechnungs- und Simulationsverfahren.

Diese Veröffentlichung entstand aus einer Kooperation zwischen Dr. Binde Ingenieure – Design & Engineering GmbH ([www.Simcenter.expert](http://www.Simcenter.expert)) und dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion im Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt ([www.dik.maschinenbau.tu-darmstadt.de](http://www.dik.maschinenbau.tu-darmstadt.de)).

Wir bedanken uns ganz herzlich bei den Mitarbeitern der Firma Dr. Binde Ingenieure und den Mitarbeitern des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion für ihre tatkräftige Mitarbeit bei der Erarbeitung dieser neuen Auflage.

Auch dem Hanser Verlag und insbesondere Frau Julia Stepp danken wir für die wohlwollende Unterstützung bei der Erstellung dieses Werkes. Wir möchten uns auch ganz herzlich bei all unseren Lesern bedanken, die nach wenigen Jahren eine fünfte Auflage gefordert haben.

Wir wünschen allen Lesern viel Erfolg bei der Lösung der Lernaufgaben und der Nutzung der erworbenen Erkenntnisse im Studium sowie in der industriellen Praxis!

Im April 2022

*Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl*

*Dr.-Ing. Peter Binde*

# 1

## Einführung

In den Ingenieurwissenschaften hat sich in den vergangenen 25 Jahren ein signifikanter Wandel vollzogen. Dieser Wandel ist durch den Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnik geprägt, die sowohl in den Bereichen der Produktentwicklung und der Produktion als auch in den Produkten selbst zu einem integralen Bestandteil geworden ist. Eine wichtige Rolle spielen dabei die Verfahren der rechnerunterstützten virtuellen Produktentwicklung. Sie umfassen eine aufeinander abgestimmte Vorgehensweise zur 3D-Modellierung, Berechnung, Simulation und Optimierung.

Die Entwicklung innovativer Produktlösungen steht hierbei im Vordergrund und ist Ziel der rechnerunterstützten virtuellen Produktentwicklung. Entscheidend ist auch die Einbettung der rechnerunterstützten Methoden in den Arbeitsablauf (Workflow) der virtuellen Produktentwicklung.

Die konstruktive Auslegung, Gestaltung und Detaillierung ist für die rechnerunterstützte Entwicklung innovativer Produkte eine Kernaufgabe. Ebenso wichtig ist jedoch die Voraussage des Produktverhaltens unter unterschiedlichen Nutzungsszenarien und für verschiedene Betriebszustände. Gerade vor dem Hintergrund der rasanten Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie gelingt es immer besser, rechnerunterstützte Konstruktionsverfahren und rechnergestützte numerische Berechnungs- und Simulationsverfahren aufeinander abzustimmen.

Die Informations- und Kommunikationstechnologie hat einen entscheidenden Einfluss auf das Leistungsprofil der virtuellen Produktentwicklung bekommen. Dieser Einfluss resultiert aus

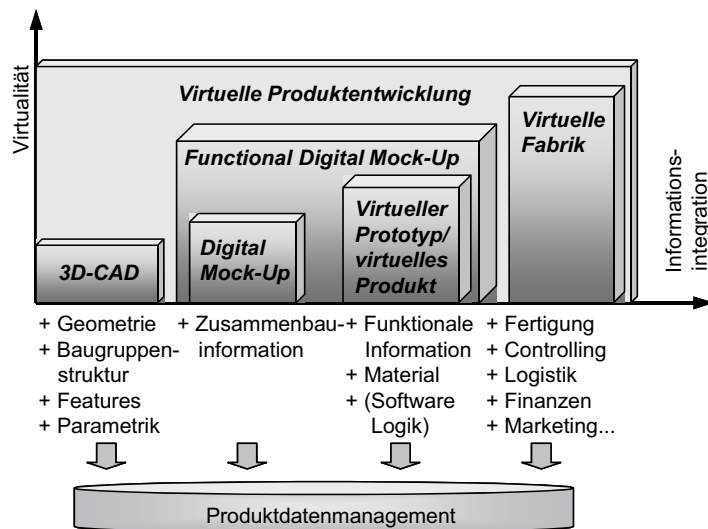
- der schnellen Informationsgewinnung aus weltweit verfügbaren Quellen,
- der Verfügbarkeit von neuen, rechnerbasierten Methoden zur Produktentwicklung und Konstruktion, zum Beispiel zur Produktmodellierung (CAD), zur Auslegungs- und Nachweisrechnung (FEM, MKS, CFD), zur schnellen Validierung und Verifikation (z. B. über Digital Mock-Ups, DMU), zur schnellen Prototypenherstellung (Virtual und Rapid Prototyping) sowie den Methoden zur Weiterverarbeitung von Produktdaten in Prozessketten (CAX-Prozessketten) und
- der Abbildung aufbau- und ablauforganisatorischer Strukturen in Produktdatenmanagementsystemen (PDM) mit der Bereitstellung der Produktentwicklungsergebnisse per Mausklick.

Einfluss der Informationstechnik auf die Produktentwicklung



Durch den bereits sehr hohen Durchdringungsgrad des Produktentwicklungsprozesses mit Methoden der Rechnerunterstützung wurde auch der Begriff der virtuellen Produktentwicklung geprägt. Die virtuelle Produktentwicklung kann über mehrere Stufen erreicht werden (Bild 1.1). Sie führen über

- 3D-CAD,
- Digital Mock-Ups sowie
- virtuelle Prototypen bis zum
- virtuellen Produkt und auch zur
- virtuellen Fabrik.



**Bild 1.1** Stufen der virtuellen Produktentwicklung

Hinzu kommt, dass Berechnung und Simulation aufgrund der Industrie 4.0 immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die Initiative Industrie 4.0 steht für die 4. Industrielle Revolution und hebt die Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über alle Phasen des Lebenszyklus von Produkten auf eine neue Stufe. Der Schwerpunkt liegt auf der Steigerung der Flexibilität der Produktion und der Realisierung von individualisierten Kundenwünschen. Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit der erforderlichen Informationen in Echtzeit, um den Wertschöpfungsstrom optimal zu steuern. Dazu sind vernetzte und kommunikationsfähige Systeme erforderlich. Dieser Ansatz erfordert außerdem sogenannte digitale Zwillinge, die ein digitales Abbild von real existierenden Bauteilen und Produkten darstellen, und diese auch beim Durchlaufen der verschiedenen Produktionsschritte repräsentieren. Digitale Zwillinge bieten somit ideale Voraussetzungen, um möglichst realitätsgetreue Berechnungen und Simulationen durchführen zu können. Damit gewinnt auch der Ansatz der virtuellen Fabrik einen neuen, höheren Stellenwert.

3D-CAD ist die Grundlage.

Der Einsatz von 3D-CAD ist die Grundlage zur meist volumenorientierten, dreidimensionalen Beschreibung der Produktgeometrie. Diese Produktbeschreibung bezieht sich sowohl auf die Einzelteilmodellierung wie auch auf die Baugruppenmodellierung. Vielfach erfolgt diese Modellierung featurebasiert und parametrisch.

Digital Mock-Ups (kurz DMU, im Deutschen auch als digitale Attrappe bezeichnet) repräsentieren hauptsächlich die Produktstruktur sowie die approximierten Geometrie der Einzelteile und Baugruppen auf Basis von Volumen- und Flächengeometrien. Wurden dem Volumen auch Materialeigenschaften zugewiesen, so sind Gewicht, Schwerpunktlagen sowie Trägheitsmomente und -tensoren berechenbar. Digital Mock-Ups werden insbesondere zur Simulation von Ein- und Ausbautvorgängen sowie für Kollisionsprüfungen eingesetzt.

DMU

Digitale Prototypen besitzen neben der Repräsentation der dreidimensionalen Geometrie von Einzelteilen und Baugruppen, der Materialeigenschaften sowie der Produktstruktur auch physikalische Eigenschaften. Dadurch ist es möglich, im Rahmen der modellierten Merkmale eine Simulation des physikalischen Produktverhaltens zu berechnen und das Produktverhalten grafisch darzustellen. Digitale Prototypen werden meist disziplinspezifisch erstellt, z. B. für die mechanische Festigkeitsberechnung, die Bewegungssimulation oder die Strömungssimulation. Die wichtigsten dazu eingesetzten Verfahren sind die Finite-Elemente-Methode (FEM, im Englischen auch häufig als *Finite Element Analysis*, kurz FEA, bezeichnet), die Mehrkörpersimulation (MKS, im Englischen als *Multi Body Simulation*, kurz MBS, bezeichnet) und die Strömungssimulation (im Englischen als *Computational Fluid Dynamics*, kurz CFD, bezeichnet). Als letztes Verfahren ist die Elektromagnetische Simulation (kurz EM), zu nennen, welche ebenfalls die FEM verwendet und in Kapitel 6 dieses Buches behandelt wird.

Die wichtigsten Simulationsverfahren sind FEM, MKS und CFD.

Der Begriff „Virtuelles Produkt“ fasst mehrere physikalische Eigenschaften eines Produkts zusammen, ergänzt auch logische Abhängigkeiten und vereinigt sie interoperabel in einem gemeinsamen Produktmodell.

Der Begriff „Virtuelle Fabrik“ bezieht sich auf die modellhafte Abbildung der Objekte einer Fabrik mit ihren physikalischen Eigenschaften und ihren Herstellungsprozessen. Auch hierbei ist das Ziel, mithilfe von Simulationsverfahren die einzelnen Abläufe der Fertigung, der Montage und auch der Prüfung simulieren zu können.

Während sich die Begriffe „digitaler Prototyp“ und „virtuelles Produkt“ auf digitale Repräsentationen von noch nicht real existierenden Produkten beziehen und der Entwicklung optimierter Produktlösungen dienen, bezeichnet der Begriff „digitaler Zwilling“ digitale Repräsentationen von real existierenden Produkten mit ihren realen Ist-Maßen und Ist-Eigenschaften.

Die in den jeweiligen Anwendungssoftwaresystemen entstehenden Produktdaten werden schließlich nach den aufbau- und ablauforganisatorischen Strukturen in einem Produktdatenmanagementsystem (kurz PDM-System) gespeichert.

Im PDM-System werden alle anfallenden Produktdaten gespeichert.

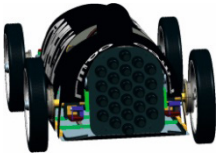
Durch die zunehmende Einführung von 3D-CAD-Systemen in die industrielle Praxis zeigt sich auch, dass der Bedarf an integrierten numerischen Berechnungs- und Simulationsverfahren steigt. Das Ziel ist es dabei, die 3D-Produktdaten in vielfältigen Aufgabebereichen weiterzuverarbeiten, um das Ergebnis des Produktentwicklungsprozesses bereits in der digitalen Welt zu optimieren und damit das geforderte Anforderungsprofil möglichst maximal zu erfüllen.

## ■ 1.1 Lernaufgaben, Lernziele und wichtige Voraussetzungen für die Arbeit mit dem Buch

Die Lerninhalte werden anhand von Methodikbeispielen vermittelt.

Ausgehend von der Zielsetzung, 3D-CAD-Daten zur Nachrechnung, Simulation und Optimierung zu verwenden, ergibt sich die Frage, wie 3D-CAD-Daten weiter genutzt werden können. Dazu wurden in diesem Buch repräsentative Beispielszenarien für die Verfahren der Finite-Elemente-Methode, der Mehrkörpersimulation, der Strömungssimulation und der elektromagnetischen Simulation entwickelt, anhand derer die Integration von Modellierung, Berechnungen und Simulationen dargestellt wird. Die dabei aufgezeigten Szenarien basieren auf dem Programm Simcenter 3D 2022.1 bzw. dem 3D-CAD-System NX 2007 und den darin integrierten Berechnungs- und Simulationsmodulen.

Um Ihnen das Verständnis für die Methodik zu erleichtern und die Einarbeitung zu verkürzen, wurde für die meisten Lernaufgaben dieses Buchs eine einzige zusammenhängende Baugruppe ausgewählt. Es handelt sich dabei um das CAD-Modell des legendären Opel RAK2 (Bild 1.2), das in der Vergangenheit am Institut für Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt) in studentischen Projekten als volumenorientiertes 3D-CAD-Modell erstellt wurde, wofür an dieser Stelle allen Beteiligten herzlich gedankt sein soll.

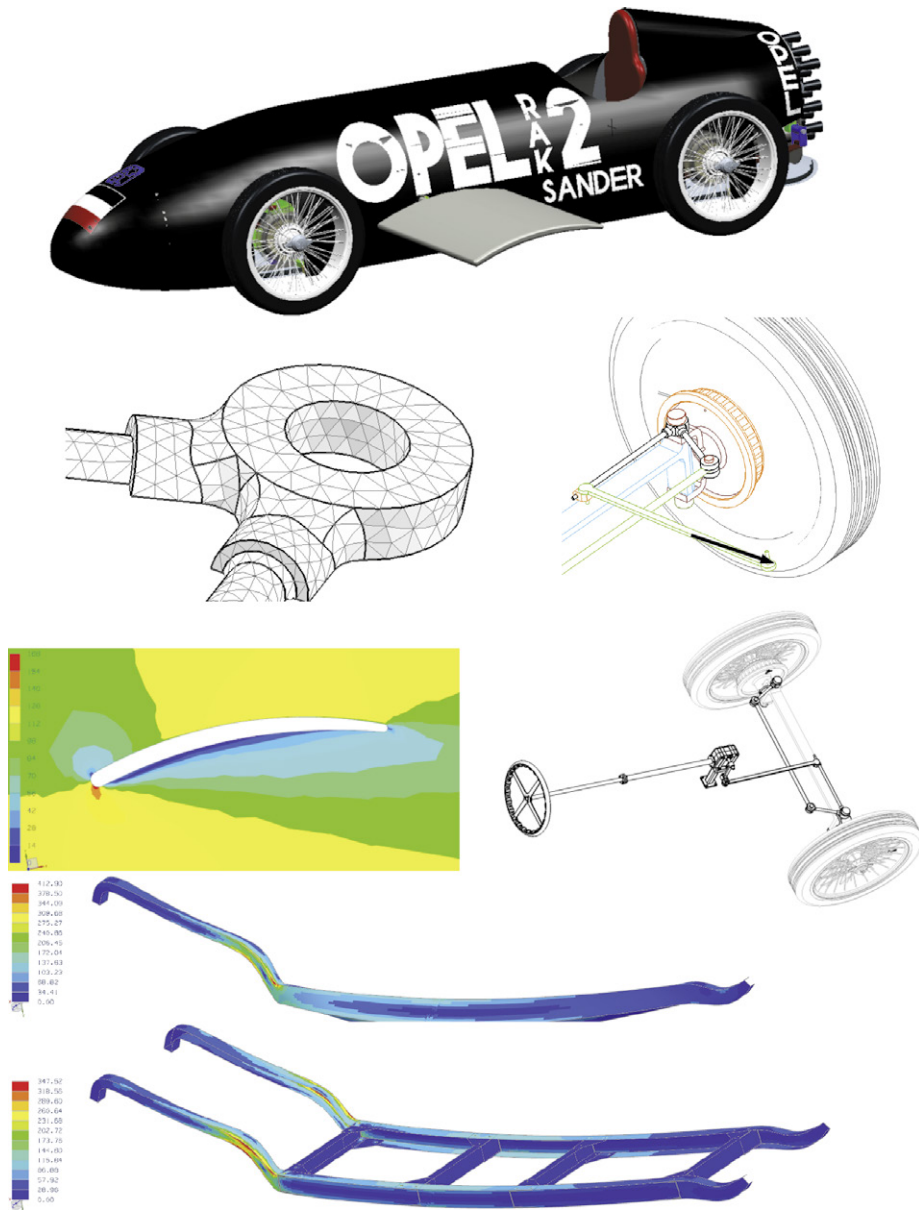


Fritz von Opel, ein Enkel von Adam Opel, baute 1928 die mit Raketen angetriebenen Autos RAK1 und RAK2 für Testzwecke. Mit dem RAK2 erreichte er auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke AVUS in Berlin am 23.05.1928 vor rund 3000 geladenen Gästen mit 238 km/h den damaligen Geschwindigkeitsrekord. Angetrieben wurde der RAK2 durch 24 Feststoffraketen, die mit 120 Kilogramm Sprengstoff gefüllt waren. Diesem Versuch, den Raketenantrieb zu etablieren, sollten noch weitere Versuche auf Straße, Schiene und Luft folgen.

Voraussetzungen für die Arbeit mit dem Buch

Alle CAD- und Berechnungsdaten, die in den Lernaufgaben gebraucht oder erstellt werden, stehen unter [plus.hanser-fachbuch.de](https://plus.hanser-fachbuch.de) zum Download bereit und sollten zum Nachvollziehen der Beispiele genutzt werden.

Die Lerninhalte werden anhand von praxisorientierten Beispielen vermittelt. Funktionen des NX-Systems werden also nicht isoliert, sondern immer in Zusammenhang mit einem Beispiel erläutert. Da dies dem Lernen anhand von realen Projekten ähnelt, ist diese Methode effizient, einprägsam und didaktisch modern.



**Bild 1.2** Das CAD-Modell des Opel RAK2 bildet die Grundlage für die Lernaufgaben.

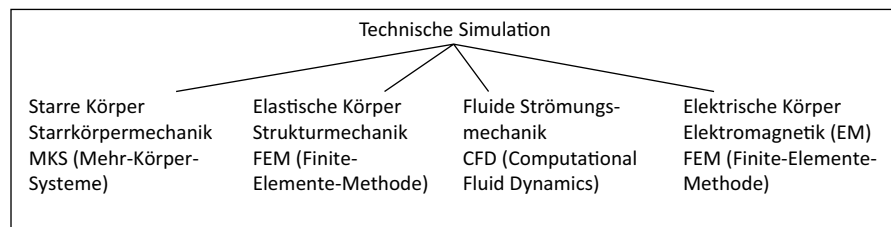
Die Kapitel sind so strukturiert, dass sie das didaktische Konzept des kontinuierlichen Lernfortschritts verfolgen, jedoch auf den Grundlagen im Arbeiten mit 3D-CAD, insbesondere dem System NX 2007/Simcenter 3D 2022.1, aufbauen. Vorausgesetzt werden daher Kenntnisse für den Aufbau von parametrischen 3D-Modellen und -Baugruppen sowie allgemeines technisches Verständnis, so wie es in technischen Berufsausbildungen üblicherweise vermittelt wird.

Lernziel ist der Aufbau eines grundlegenden Erfahrungsschatzes.

Lernziel ist es, dem Studenten, Konstrukteur oder Berechnungsingenieur das Wissen zu vermitteln, das er benötigt, um einfache Aufgaben der Finite-Elemente-Methode, der Mehrkörpersimulation und der Strömungssimulation mit NX selbst zu lösen und ein Verständnis für diese Technologien zu entwickeln. Es darf jedoch nicht erwartet werden, dass komplexe praktische Probleme mit dem vermittelten Wissen sofort lösbar sind. Dies wäre ein zu hoher Anspruch, der an das Buch gestellt würde. Vielmehr entwickelt sich ein Anfänger zum Experten, indem er möglichst viele praktische Aufgaben durcharbeitet und dadurch wertvolle Erfahrungen sammelt. Sein Erfahrungsschatz ergibt sich somit aus erfolgreich erarbeiteten Projekten. Dieses Buch vermittelt mit seinen Lernbeispielen wichtige grundlegende Erfahrungen und bildet so den Grundstock für einen systematisch erweiterbaren Erfahrungsschatz.

## ■ 1.2 Arbeitsumgebungen

Problemstellungen technischer Simulation erlauben eine Unterteilung in vier Klassen: starre Körper, elastische Körper, Fluide und elektromagnetische Körper. Starrkörpersysteme werden mit Mehrkörpersimulationsprogrammen (MKS), flexible Körper mit Programmen für die Finite-Elemente-Methode (FEM) und Strömungsaufgaben mit Computational Fluid Dynamics (CFD) berechnet (Bild 1.3).



**Bild 1.3** Die technische Simulation kann grob in vier Teile untergliedert werden.

Das CAD-System NX stellt für die technische Simulation drei Module bereit.

Dementsprechend gibt es im CAD-System NX mehrere Arbeitsumgebungen im Bereich der technischen Simulation. Dazu gehören folgende Arbeitsumgebungen (neben einigen anderen, die hier nicht behandelt werden):

- *Kinematik* (NX/Simcenter 3D Motion) für kinematische und dynamische Bewegungssimulationen mit MKS
- *FEM - Finite-Elemente-Methode* (NX Design Simulation) für einfache Struktur-, Thermo- und Eigenfrequenzanalysen, die konstruktionsbegleitend eingesetzt werden können

- *NX/Simcenter 3D für komplexe Simulationsaufgaben*: Dieses Modul wendet sich an Berechnungsingenieure oder Konstrukteure mit Berechnungsschwerpunkt. Zusätzliche Simulationsmöglichkeiten betreffen den Aufbau komplexer Baugruppensimulationsmodelle und die Wahl verschiedener Solver für die Beschreibung von unterschiedlichen physikalischen Phänomenen. Es lassen sich Aufgaben aus der Strukturmechanik, Thermodynamik, Strömungsmechanik und dem Elektromagnetismus (EM) lösen.

Die Arbeitsumgebungen haben jeweils eine gemeinsame Oberfläche und beinhalten immer nur solche Funktionen, die im gewählten Kontext sinnvoll sind.

In diesem Buch wird detailliert auf die genannten Arbeitsumgebungen eingegangen, die Möglichkeiten und Grenzen werden anhand von Beispielen erläutert.

## ■ 1.3 Arbeiten mit dem Buch

Das Buch enthält je ein Hauptkapitel zu den Themen:

- NX/Simcenter 3D Motion (MKS)
- NX Design Simulation (FEM)
- NX/Simcenter 3D FEM
- NX/Simcenter 3D CFD
- NX/Simcenter 3D EM
- Management von Berechnungs- und Simulationsdaten (Teamcenter for Simulation)
- Manuelle Berechnung eines FEM-Beispiels

Aufbau des Buches

An erster Stelle widmen wir uns der Bewegungssimulation mit NX/Simcenter 3D Motion (Kapitel 2), denn diese Analysen werden in der Konstruktionspraxis meist zuerst durchgeführt. Oft werden die Gelenkkräfte, die dabei ermittelt werden, in späteren Festigkeitsanalysen mit FEM weiterverwendet.

In der Bewegungssimulation werden die Gelenkkräfte berechnet.

Die Kapitel können weitgehend unabhängig voneinander durchgearbeitet werden. Das heißt, wer sich nicht für Bewegungssimulation interessiert, kann das Kapitel überspringen. Lediglich die FEM-interessierten Leser, die mit NX/Simcenter 3D FEM (Kapitel 4) arbeiten möchten, sollten vorher auch Kapitel 3 zu NX Design Simulation (FEM) durcharbeiten, weil hier notwendige Vorkenntnisse vermittelt werden.

Zu Beginn jedes Kapitels wird eine Einführung in die Prinzipien des jeweiligen Themas gegeben. Für den Berechnungsneuling mögen sich diese Erklärungen sehr theoretisch und schwierig anhören. Dies sollte aber nicht davor abschrecken, mit den Lernaufgaben zu diesem Thema zu beginnen, auf denen der Schwerpunkt liegt. Erklärungen in den Lernaufgaben knüpfen meist an die Prinzipien der Einführungen an und verdeutlichen bzw. erweitern sie. Eilige Leser können die Einführungen daher auch überspringen und gleich zu den Lernaufgaben übergehen.

Eilige Leser können gleich mit den Beispielen starten.



Unter *plus.hanser-fachbuch.de* ist der Ordner *RAK2* zu finden, der alle beschriebenen Lernaufgaben der Bereiche Bewegungs-, Struktur-, Thermo- und Strömungssimulation enthält. Ein zweiter Ordner mit dem Namen *EM* enthält Installationsdateien und Beispiele für die Elektromagnetik. Es sind auch Lösungsdateien vorhanden, damit eventuell darin nachgesehen werden kann. Für das Durcharbeiten sollten die gesamten Zusatzmaterialien unter *plus.hanser-fachbuch.de* in ein Verzeichnis auf die Festplatte des Rechners kopiert werden.

Das jeweils erste Beispiel ist von grundlegendem Charakter.

Die Lernaufgaben eines Kapitels sollten am besten in der vorgegebenen Reihenfolge durchgearbeitet werden, weil die Lerninhalte aufeinander aufbauen. Bei der Motion- und Design-Simulation sowie bei EM ist die jeweils erste Lernaufgabe ein Grundlagenbeispiel. Hier werden alle wichtigen Prinzipien und Grundlagen vermittelt, auf denen die folgenden Lernaufgaben aufbauen.

Stecknadelsymbole kennzeichnen durchzuführende Schritte.

Bei der Beschreibung der Lernaufgaben wird zwischen Hintergrunderklärungen und durchzuführenden Schritten (Mausklicks im NX-System) unterschieden. Durchzuführende Schritte sind immer mit dem Stecknadelsymbol gekennzeichnet:

✚ Hier wird ein durchzuführender Schritt beschrieben.

Ganz eilige Leser können daher auch die Hintergrunderklärungen überspringen (vielleicht kann ja auch intuitiv schon einiges verstanden werden) und direkt von Stecknadel-symbol zu Stecknadelsymbol springen.

NX-Installation und Rechnerleistung

Für das Durcharbeiten der Lernaufgaben sollte ein Rechner mit NX/Simcenter-Installation zur Verfügung stehen. Die Beispiele wurden mit NX 2007 und Simcenter 3D 2022.1 durchgerechnet, sollten aber auch in anderen NX-Versionen, z. B. NX 12 und voraussichtlich nachfolgenden Versionen, funktionieren. Bei einer normalen Installation des Simcenter- oder NX 2007-Systems werden alle erforderlichen Module der Simulation, insbesondere der NX Nastran-Solver, automatisch mit durchgeführt. Es ist dann, im Gegensatz zu früheren NX-Versionen, auch kein manuelles Definieren von besonderen Umgebungsvariablen für die Simulation mehr erforderlich.

Lediglich für die elektromagnetische Simulation (Kapitel 6) ist die Installation einiger zusätzlicher Dateien erforderlich, was jedoch zu Beginn des Kapitels erklärt wird.

Darüber hinaus sollte die Hardware des Rechners möglichst gut ausgestattet sein. Folgende Empfehlungen möchten wir geben:

- Prozessor: Eine möglichst hohe Taktfrequenz ist für alle Simulationsaufgaben wichtig.
- Multiprozessor: Für FEM-Analysen und einige thermische Berechnungen sowie EM wird die Nutzung mehrerer Prozessoren unterstützt.
- Arbeitsspeicher: FEM, EM, Thermo- und Strömungsanalysen brauchen viel Hauptspeicher. Es gilt die einfache Regel: Je mehr, desto besser. Um die Beispiele dieses Buchs durcharbeiten, empfehlen wir mindestens 4 GB Hauptspeicher.
- Festplatte: Auch hier sollte genügend freier Speicher zur Verfügung stehen. Für die Beispiele des Buchs empfehlen wir mindestens 2 GB.
- 32-/64-Bit-Betriebssystem: Für mittlere bis große Analysemodelle ist die 64-Bit-Architektur zu wählen, weil hier mehr Arbeitsspeicher adressiert werden kann. Die EM-Installation ist nur unter 64-Bit lauffähig.

Für genauere Informationen zu diesen Themen empfehlen wir die Lektüre der Dokumente über Parallel Processing [nxn\_parallel] und über effiziente Speichernutzung mit NX/Nastran [nxn\_num].

Für Motion-Analysen stehen drei Solver-Typen zur Verfügung: Adams, RecurDyn und Simcenter 3D Motion. Die Lernaufgaben dieses Buches wurden mit dem Simcenter 3D Motion-Solver durchgeführt, können jedoch auch mit Adams oder RecurDyn laufen.

Voreinstellung des  
Simcenter 3D Motion-  
Solvers

Damit ist unsere Einführung abgeschlossen. Wir wünschen Ihnen viel Spaß und Erfolg beim Lernen!

## Literatur

[nxn\_num] NX Nastran Numerical Methods User's Guide. Online-Dokumentation zu NX Nastran

[nxn\_parallel] NX Nastran Parallel Processing User's Guide. Online-Dokumentation zu NX Nastran





# 2

## NX/Simcenter 3D Motion (MKS)

In Abschnitt 2.1 werden zunächst Theorie, Grenzen, spezielle Effekte und Regeln dieser Disziplin dargestellt. Daraufhin folgen Lernaufgaben zur Kinematik, die zunächst mit einem Grundlagenbeispiel beginnen (Abschnitt 2.2.1). In der zweiten Lernaufgabe werden Prinzipskizzen und Kinematik genutzt, um die frühe Konstruktionsphase zu unterstützen (Abschnitt 2.2.2). In der dritten Aufgabe werden Kollisionen behandelt und das Zusammensetzen verschiedener Unterkinematiken (Abschnitt 2.2.3). Die vierte Lernaufgabe bearbeitet dynamische Sachverhalte sowie die Simulation von Kontakt (Abschnitt 2.3.1), und die letzte Aufgabe erörtert die Kopplung von *NX/Simcenter 3D Motion* mit MATLAB® Simulink® zur sogenannten Co-Simulation (Abschnitt 2.4.1).

Inhalte des Kapitels

### ■ 2.1 Einführung und Theorie

*NX/Simcenter 3D Motion* bietet dem Konstrukteur die Möglichkeit, Bewegungen seiner bis dahin statisch konstruierten Maschine zu kontrollieren. Dadurch kann ein besseres Verständnis für die Maschine erlangt werden, und es kann kontrolliert werden, ob es zu Kollisionen der bewegten Teile kommt. Außerdem kann nachgesehen werden, ob die Maschine die gewünschte Bewegung überhaupt ausführen bzw. gewisse Positionen erreichen kann. Häufig ist es Aufgabe, die geometrischen Abmessungen geeignet einzustellen. Dabei ist die Nutzung der CAD-Parametrik oft ein wichtiges Hilfsmittel, um Varianten zu erstellen. Doch auch und gerade in der frühen Phase der Konstruktion, wenn erst grobe Designentwürfe vorliegen, ist der Einsatz kinematischer Analysen sinnvoll. Mithilfe von *NX/Simcenter 3D Motion* können Prinzipskizzen oder einfache Kurven bewegt und deren Maße optimiert werden. So werden aus den Prinzipskizzen der frühen Konstruktionsphase bewegungskontrollierte Steuerskizzen. Im weiteren Verlauf der Konstruktion kann die Kinematik immer wieder zur Absicherung der bis dahin fertiggestellten Maschine genutzt werden.

Einsatzszenarien und Nutzen für *NX/Simcenter 3D Motion* in der Praxis

Sobald der CAD-Geometrie Masseneigenschaften zugeordnet sind, können Bewegungsanalysen auch zu dynamischen Analysen ausgeweitet werden. Dabei können Lagerkräfte, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ermittelt werden. Motion-Analysen sind da-

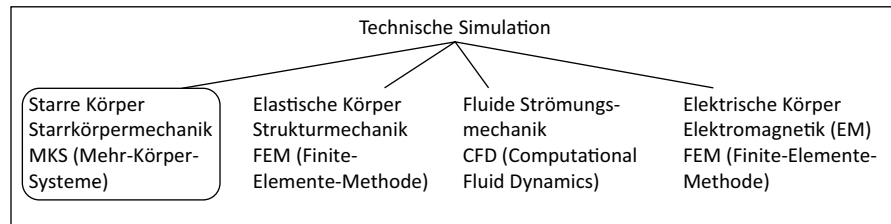
Masseneigenschaften der Bauteile erweitern das Gebiet in die Dynamik hinein.

her auch oftmals Vorbereitungen für FEM-Analysen, weil dort Lagerkräfte als Randbedingungen eingehen. Anhand der Ergebnisse (Kräfte und Wege) können auch Federn, Dämpfer, Zusatzmassen, Schwingungstilger, Lager (Tragfähigkeit) etc. aus Zulieferkatalogen ausgewählt werden.

Anwender von *NX/Simcenter 3D Motion* sollten Erfahrung in der Modellierung von Einzelteilen und Baugruppen mit dem NX-System mitbringen. Dies ist erforderlich, weil die Beispiele dieses Kapitels nicht nur auf fertigen Baugruppen aufsetzen, sondern teilweise auch in die Konstruktionsmethodik eingreifen. Sonst sind jedoch keine Vorkenntnisse erforderlich.

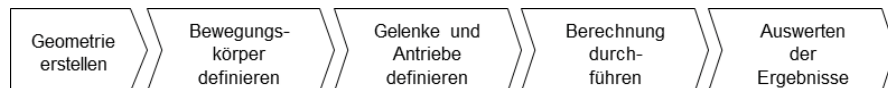
*NX/Simcenter 3D Motion* deckt den Teil der Mechanik ab, der sich mit starren Körpern beschäftigt. In der Regel handelt es sich um mehrere starre Körper, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Solche Problemstellungen tauchen z.B. bei Fahrwerken von Kraftfahrzeugen auf. Die Software zur Berechnung solcher Aufgabenstellungen wird mit dem Begriff MKS-Programm bezeichnet. MKS bedeutet Mehrkörpersimulation (Bild 2.1).

Unterteilung der technischen Simulation in vier Teile



**Bild 2.1** Die verschiedenen Disziplinen der gängigen technischen Simulation

Der Anwender definiert auf Basis des CAD-Modells Bewegungskörper, Gelenke, Antriebe und eventuell außen angreifende Kräfte oder Zwangsbedingungen. Auch Federn und Dämpfer können eine Rolle spielen (Bild 2.2).



**Bild 2.2** Prozessschritte bei der MKS-Analyse

Für die Bewegungskörper wird meist CAD-Geometrie (Einzelteile und Baugruppen) genutzt. Das CAD-System mit seinen mächtigen Möglichkeiten kann aber beispielsweise auch für die Definition von Kurvenscheiben oder sonstigen Steuergesetzen genutzt werden.

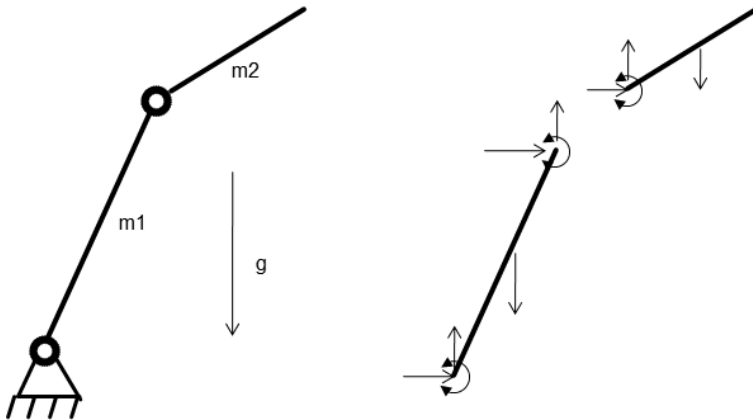
### 2.1.1 Berechnungsmethode

Weiterführende Literatur

Es lässt sich schwer sagen, wie die MKS-Methode im allgemeinen Fall funktioniert, weil die verschiedenen Solver (Simcenter 3D Motion, RecurDyn, Adams) durchaus unterschiedlich arbeiten. Für Adams finden Sie in [adams1] aufschlussreiche Erklärungen, an die wir uns anlehnen. Für RecurDyn bietet Ihnen [recurdyn1] weiterführende Informationen, und für Simcenter 3D Motion enthält die NX-Online-Hilfe eine Dokumentation.

Für unsere nachfolgenden Beispiele verwenden wir den Simcenter 3D Motion-Solver und für das Co-Simulationsbeispiel den RecurDyn-Solver.

Programmintern werden die Bewegungskörper, Gelenke und Antriebe in ein mathematisches Differentialgleichungssystem überführt, das aufgelöst wird und woraus sich die gesuchten Größen ergeben (Bild 2.3). Als Ergebnis erhält der Anwender die Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Bewegungskörper und Gelenke sowie Reaktionskräfte an den Gelenken.



**Bild 2.3** Ein Differentialgleichungssystem wird aufgestellt.

Jeder definierte Bewegungskörper wird dafür freigeschnitten. Es werden sechs dynamische Gleichungen (Beziehungen der Kräfte zu den Beschleunigungen) und sechs kinematische Gleichungen (Beziehung der Positionen zu den Geschwindigkeiten) in den Translations- und Rotationsrichtungen aufgestellt. Alle Gleichungen werden in ein Gleichungssystem zusammengefügt.

Die Zahl der Unbekannten wird nun durch Einarbeiten von Constraints verringert. Jedes Gelenk, das die Bewegungsmöglichkeit zweier Körper restringiert, kann in Form von zusätzlichen Gleichungen im Gleichungssystem ausgedrückt werden. Zum Beispiel führt ein Drehgelenk zwischen zwei Bewegungskörpern zu einer Reduktion von fünf Unbekannten im Gesamtsystem, weil nur noch ein Drehfreiheitsgrad übrig bleibt, wo vorher sechs waren.

Motion-Antriebe, die den Weg, die Geschwindigkeit oder Beschleunigung vorgeben, führen ebenfalls zur Reduktion von Unbekannten. Ein Drehantrieb, der eine Geschwindigkeit von  $360^\circ/\text{s}$  erzwingt, verringert die Zahl der Unbekannten z. B. um eins. Kräfte und Momente hingegen, die auf das Motion-Modell wirken, bringen keine zusätzlichen Unbekannten in das System ein und reduzieren auch keine.

Auf diese Weise reduzieren sich die Unbekannten entweder auf null (dann kann das Gleichungssystem direkt aufgelöst werden) oder auf eine Zahl größer null. Im zweiten Fall lässt sich das System lösen, indem Anfangsbedingungen eingearbeitet und die Gleichungen nach der Zeit integriert werden. Im Fall von null Freiheitsgraden wird von einem kinematischen, ansonsten von einem dynamischen System gesprochen.

Es soll noch darauf hingewiesen werden, dass das entstehende Gleichungssystem entweder linear oder auch nichtlinear sein wird – je nachdem, welche Zusammenhänge von

Antriebe und Constraints verringern die Zahl der Unbekannten.

Manche Gelenktypen bringen Nichtlinearität in das Gleichungssystem.

den Gelenktypen in das System eingebracht werden. Während sich einfache Gelenktypen wie Dreh-, Schiebe- oder Kugelgelenke linear verhalten, bringen komplexere Gelenke wie *Punkt auf Kurve* nichtlineare Gleichungen ein. Für die Lösung des MKS-Gleichungssystems sind daher keine linearen Gleichungslöser anzuwenden, wie sie bei FEM-Systemen in der Regel zum Einsatz kommen, sondern solche mit Fähigkeiten zur Reduktion der Ordnung.

Nach der Lösung des Gleichungssystems stehen also folgende Größen für das Postprocessing zur Verfügung:

- Translationsgeschwindigkeiten
- Rotationsgeschwindigkeiten
- Schwerpunktkoordinaten
- Orientierungswinkel zur Beschreibung der Raumlage
- aufgebrachte äußere Kräfte
- Gelenk- bzw. Constraint-Kräfte

## 2.1.2 Einschränkungen

Beschränkung bei MKS-Systemen und Abgrenzung zu FEM

Eine ganz grundlegende Eigenschaft und Einschränkung ist bei MKS durch die Starrheit der betrachteten Körper gegeben. Ein Bewegungskörper kann im Raum bewegt, aber nicht deformiert werden. Reale Körper werden bei MKS auf ihre Massen, Trägheitseigenschaften und geometrischen Abmessungen reduziert, ihre Verformungseigenschaft wird jedoch vernachlässigt. Dies ist der grundsätzliche Unterschied zur Strukturmechanik, bei der mithilfe der Finite-Elemente-Methode flexible Körper, also Deformationen und Beanspruchungen, betrachtet werden. Nachteil der FEM gegenüber der MKS ist jedoch, dass mit linearer FEM keine Bewegungen, sondern nur kleine Deformationen möglich sind. Die Annahme von Starrheit der Bewegungskörper bei MKS bringt den Vorteil der Einfachheit der Berechnung. Daher lassen sich auch komplexe Bewegungen an großen Baugruppen analysieren.

Spiel, Toleranz und flexible Teile können bei MKS nur mit größerem Aufwand modelliert werden.

Allerdings gibt es einige Effekte in der Realität, die sich nur schwer mit MKS behandeln lassen. Dies sind Effekte wie Spiel, Toleranz und Flexibilität. Da solche Effekte im MKS-Modell meist nicht berücksichtigt werden, kommt es in manchen Fällen am MKS-Modell beispielsweise zu Klemmsituationen, wobei in Wirklichkeit geringfügiges Spiel in den Gelenken oder die Flexibilität eines Körpers für problemlose Bewegung sorgt.

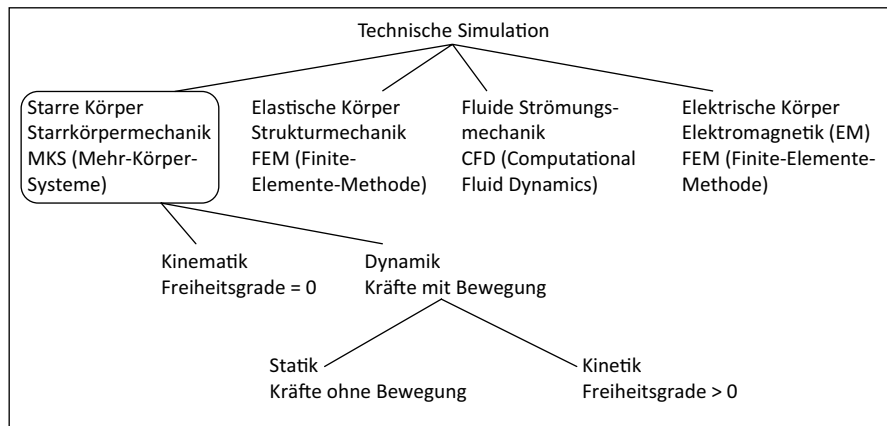
Zwar kann Spiel auch in MKS berücksichtigt werden, jedoch müssen die beteiligten Teile dynamisch betrachtet und Kontakte mit Rückstellkräften einbezogen werden. Dann existieren offene Freiheitsgrade im System, und die Aufgabe wird erfahrungsgemäß deutlich schwieriger in der Handhabung.

### 2.1.3 Klassifikationen bei MKS

Für eine Klassifikation von Bewegungssimulation lehnen wir uns an die Klassifikation der Mechanik an, wie sie z. B. in [HaugerSchnellGross] beschrieben wird. Demnach kann die Mechanik in Kinematik und Dynamik unterteilt werden.

Klassifikation der Mechanik

Die *Kinematik* ist die Lehre vom geometrischen und zeitlichen Bewegungsablauf, ohne dass auf Kräfte als Ursache oder Wirkung der Bewegung eingegangen wird. Die *Dynamik* befasst sich hingegen mit dem Zusammenspiel von Kräften und Bewegungen. Sie wird wiederum in die *Statik* und die *Kinetik* unterteilt. Die Statik beschäftigt sich mit den Kräften an ruhenden Körpern (z. B. ein Stabwerk im Gleichgewicht), während die Kinetik tatsächliche Bewegungen unter der Wirkung von Kräften untersucht (Bild 2.4).



**Bild 2.4** Klassifikation von MKS-Simulationen

All diese Phänomene können mit *NX/Simcenter 3D Motion* analysiert werden, wobei wir uns bei der MKS auf starre Körper beschränken. Jedoch wollen wir darauf hinweisen, dass seit der NX-Version 7.5 auch die Möglichkeit besteht, einzelne flexible Körper in der MKS zu berücksichtigen. Diese Körper müssen vorher mittels FEM vorbereitet werden, d. h., deren Steifigkeitsmatrix (in vereinfachter Form) muss ermittelt und dann als sogenannter *Flexibler Körper* (Flexible Body) in das MKS-System eingefügt werden.

Elastische Körper sind ein Sonderfall.

*Kinematische Systeme* zeichnen sich dadurch aus, dass alle Freiheitsgrade<sup>1</sup> eines Bewegungkörpers bestimmt sind. Diese Bestimmung kann entweder durch Gelenke oder durch Antriebsgesetze vorgenommen werden. Ein solches System läuft vorhersehbar. Es wird auch von bewegungsgetriebenen Systemen (gefesselte Bewegung) gesprochen.

Bestimmte und unbestimmte Freiheitsgrade

*Kinetische Systeme* liegen dann vor, wenn ein oder mehr Freiheitsgrade unbestimmt sind. Die Bewegung ergibt sich dann aufgrund von Kräften (ungefesselte Bewegung). Beispielsweise führt die Schwerkraft zum Schwingen eines gelenkig gelagerten Hebels. Im Fall der Kinetik wird daher auch von kraftgetriebenen Systemen gesprochen.

<sup>1</sup> Es wird auch von DOF (Degree of Freedom) gesprochen.

# Index

## Symbole

3D-Kontakt 20, 66  
64 Bit 8

## A

abhebende Kontakte 63  
achsensymmetrisch 142, 322  
Adams 9  
Ampere-Gesetz 312  
analytische Lösung 394  
Animation 22  
Anlaufverhalten 362  
Anregung 209  
Ansatzfunktion 393, 395ff.  
Antrieb 32  
Antwortsimulation 153  
Arbeitsspeicher 8  
Artikulation 16  
Artikulationsantrieb 33  
Assistent: Kinematikverbindung 23  
aufgezwungene Bewegung 362  
Auftrieb 289, 304  
Auslassöffnung 298  
AUTOMPC 185

## B

Balken 191  
Balkenelement 191, 194  
Balkentheorie 175  
benannte Referenzen 375, 385  
Beschränkung bei MKS 14

bestimmte Freiheitsgrade 15  
bewegungsgetriebene Systeme 15  
Bewegungskörper 18, 26, 65  
Bewertung der Genauigkeit 93  
Bibliothek 64  
Blattfeder 234  
Buchse 20

## C

CAEAnalysis 375, 387  
CAEGeometry 375  
CAE-Manager 387, 389ff.  
CAEModel 375, 387  
CFD 281  
CGAP 212

## D

Dämpfer 12, 19  
Dämpfung 68, 209  
Datenmodell 376, 385f.  
Datensicherung 374  
dielektrische Beziehung 314  
dielektrische Permeabilität 314  
Differentialgleichungssystem 13  
Digital Mock-Ups (DMU) 3  
Direct Matrix Abstraction  
  Programming 153  
DMAP 153  
Drehantrieb 13  
drehbare Lagerung 117  
Drehfreiheitsgrad 182  
Drehgelenk 18, 28

Druckverteilung 304  
 Durchdringung 21  
 Dynamik 26, 62

## E

Eddy Currents 317  
 Eigenfrequenz 89, 203  
 Einlass 297  
 Eisenverluste 369  
 Elastizitätsmodul 113  
 elektrische Leitfähigkeit 314  
 Elektrodynamik 311, 317f.  
 Elektrokinetik 309, 311, 317f.  
 elektromagnetische Feldberechnungen 153  
 Elektrostatik 309, 311, 315, 317f.  
 elektrotechnische Feldtheorie 309  
 elektrotechnische Komponenten 309  
 EMAG 153  
 Ergebnistransfer an FEM 22  
 Erhaltungsgleichungen 282

## F

f06-Datei 270  
 Fachwerktheorie 394  
 Faraday-Gesetz 313  
 Feder 12, 19  
 ferromagnetisch 314  
 Festgelenk 18, 24, 66  
 Finite-Volumen-Methode (FVM) 282  
 Fläche auf Fläche kleben 212  
 Flächenkörper 165  
 Flächenunterteilungen 103  
 Fläche zu Fläche kleben 212  
 Fläche-zu-Fläche-Kontakt 212  
 Freigabeprozesse 376  
 Freigabe- und Änderungsprozesse 374  
 Full Wave (Hochfrequenz) 309, 312, 317,  
 320  
 Funktion 33  
 Funktionsmanager 19  
 FVM 282

## G

Gap-Elemente 154  
 gekoppelte Systeme 152  
 General Motion 360  
 geometrisch nichtlineare Analyse 235  
 Gestaltänderungsenergiehypothese 125  
 Gitterpunkt 193  
 Gitterverknüpfungsbedingung 145  
 Gitterverknüpfungsverbindung 212  
 Gleichgewichtsbedingung 394  
 Graphenerstellung 22, 47  
 Grenzschicht 292, 299  
 große Verformung 87, 152, 234

## H

harmonischer Antrieb 33  
 Hexaederelemente 129  
 Hexaedervernetzung 259  
 Hookesches Gesetz 85, 87, 394

## I

Induktionsgesetz 313  
 Induktivität 311f., 339  
 Innen 18  
 Installation 320ff.  
 intelligenter Punkt 19

## K

Kabel 19  
 Kalkulationstabelle ausfüllen 22  
 Kantenunterteilung 238  
 Kapazität 311f.  
 Kerbfaktor 128  
 Kerbspannung 93  
 Klemmsituationen 14  
 Klonen 203  
 Kollisionen 16  
 Kollisionsprüfung 61  
 komponentenbasierte Simulation 23  
 Kondensator 311  
 konstante Geschwindigkeit 18  
 Kontakt-Nichtlinearität 86  
 Konvektionsrandbedingung 147  
 Konvergenz 136



Konvergenzkriterium 285f.  
Konvergenznachweis 137  
Konvergenzsteuerung 302  
Kopplungselemente 180  
Körperwände 294  
Kräfte 21  
Kuchenstück 143  
kugelförmiges Gelenk 18  
Kugelgelenk 58  
Kurve an Kurve 20  
Kurvenscheiben 12

## L

Lasttypen 115  
Leitungsverluste 332, 350, 369  
Lernaufgaben 4  
lineares Beulen 92  
lineare Statik 83  
Lizenz 320  
lokale Netzverfeinerung 133

## M

MAGNETICS 153  
magnetische Beziehung 314  
magnetische Permeabilität 314  
Magnetodynamik 309, 311f., 317, 319  
Magnetostatik 309f., 312, 315, 317,  
319  
Markierung 19  
Maschinenportale 191  
Masseneigenschaften 27  
Master-Modell-Konzept 22  
Materialeigenschaften 112, 144, 293  
Materialgleichungen 314  
Matrizenform 397  
maximale Zughauptspannung 200  
Maxwell-Gleichungen 311  
Mehrkörpersimulation 12  
Mesh Point 193  
Messen 21  
Mittelfläche 164  
Mittelknotenelemente 129  
MKS-Programm 12  
Momente 21  
Motion Joint Wizard 23

Motion-Verbindungen 30  
Moving Band 352, 360ff.  
Multiprozessor 8

## N

Netzfeinheit 87  
Netzverbindung 145  
Newton-Verfahren 269  
nichtlineare Effekte 82, 85  
nichtlinearer Kontakt 211, 213  
nichtlineares Material 86f.  
nichtlineares Spannungsdehnungs-  
verhalten 262  
Nietverbindungen 180  
NX/Thermal 153

## O

Oberflächenrauigkeit 295  
Öffnungen 294, 296  
Ohm-Gesetz 314  
Ohm-Widerstand 311, 315, 350, 369  
Opel RAK2 5  
Orientierung 19

## P

Parallel 18  
Parametrisierung 190  
PDM 3  
perfekte Isolation 148  
Phasenspannungen 364  
Phasenverschiebungen 363  
Planargelenk 18  
Plant Input 21  
Plant Output 21  
plastische Verformung 245  
Plastizität 246  
Polygoneometrie 134, 238  
Polygonkörper 100  
Postprozessor 120  
Presspassung 211  
Primitive Joints 18  
Prinzip der linearen FEM 84  
Prinzipien elektromagnetischer  
Analysen 311

Prinzip vom Minimum der potenziellen  
Energie 396  
Prozessor 8  
Prozessorientierung 374  
Prüfung der Elementformen 130  
Punkt auf Fläche 20  
Punkt auf Kurve 20  
Punktmasse 205

## Q

Querkontraktionszahl 113

## R

Randbedingungen 118f.  
Raumdiskretisierung 395  
Reaktionskraft 190, 199  
RecurDyn 9  
redundante Freiheitsgrade 25, 43  
Reibung 67  
reibungsfreies Gleiten 300  
Reifegradverfolgung 374  
Response Analysis 153  
Revisionen 375, 385, 388ff.  
Revisionieren 388, 391  
ringelementbasierte Methode 142  
Rotationsfreiheitsgrade 160

## S

Samcef 155  
Schalenelemente 159f.  
Schiebegelenk 59  
Schieberegler 18  
Schraube 18  
Schraubenfeder 189  
Schraubenkraft 224  
Sensor 19  
Sequenz erzeugen 22  
Simulation File View 99  
Simulationsdaten 373f.  
Simulationsdatenmanagement 374  
Singularitäten 88, 138  
Skin-Tiefe 317  
Sol 101 154  
Sol 103 154

Sol 106 154  
Sol 401 155  
Sol 402 155  
Sol 601 155  
Spannelement 211  
Spannungsdehnungsverhalten 394  
Spiel 14  
Spule 311ff., 315, 322f., 326, 331f.,  
334ff., 338, 340ff., 350f., 355, 357f.  
Standardvernetzung 110  
Steifigkeitsmatrix 397  
Steinmetz-Formel 315, 369  
Stich Edge 166  
Strömungsanalyse 282  
Strömungsrandbedingungen 294  
Strukturmechanik 14  
Superelemente 206  
Surface to Surface Contact 212  
Surface to Surface Glueing 212  
Symmetrie 142  
Synchronisation der Prozesse 374

## T

TC\_CAE\_Defining 375, 385  
TC\_CAE\_Source 375, 385  
TC\_CAE\_Target 376, 385  
Teamcenter 374ff., 385ff., 389, 391  
Temperaturfeld 140  
Temperaturgradient 148  
Temperaturrandbedingung 146  
thermodynamische Aufgaben 153  
Thermotransfer 91  
TMG 153  
Toleranzen 45  
Toolbar 17  
Top-down-Methode 37  
Totwassergebiet 306f.  
Transportgleichungen 282  
Turbulenzmodell 287

## U

überbestimmte Freiheitsgrade 25  
Überbestimmungen 25  
Umgebung 17  
unbestimmte Freiheitsgrade 15

Universal 18  
unterbestimmt 30

## V

Ventilatoren 296f.  
Verbindung 169, 180  
Verformungsergebnisse 123, 126  
Vergleichsspannungshypothese 125  
verkettete Phasenspannung 367  
Verluste 332, 350, 369  
Verschiebungsfunktion 393  
Versionsstand 374  
vierknotige Tetraeder 129  
virtuelle Produktentwicklung 2  
von Mises 121, 125  
Voreinstellung 9, 71  
vorgegebene Verschiebung 198  
vorgespannte Lagerungen 189

## W

Wandstärke 169  
Wärmefluss 148  
weiche Federlagerungen 220, 222  
Werkstoffgesetz 395  
Whitney-Elemente 326  
Widerstand 311f., 315  
Wirbelströme 317

## Z

Zahnradpaar 19, 34  
Zahnstange und Ritzel 19  
zehnknotige Tetraederelemente 129  
Zeichnen 21  
zeitabhängiger Fahrweg 266  
Zeitschritt 302  
Zeitschrittgröße 285  
Zeitschrittverfahren 274  
Zughauptspannung 125  
Zylindergelenk 45  
Zylindrisch 18