

Reiner Anderl  
Peter Binde

CAD- und Berechnungsdaten  
sämtlicher Übungsbeispiele  
auf DVD

# Simulationen mit NX

Kinematik, FEM, CFD, EM und Datenmanagement.  
Mit zahlreichen Beispielen für NX 9



3., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Reiner Anderl, Peter Binde

## **Simulationen mit NX**



### **Blieben 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](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

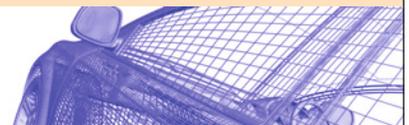
# News für CAX-Anwender!



**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](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)



Reiner Anderl  
Peter Binde

# Simulationen mit NX

Kinematik, FEM, CFD, EM und Datenmanagement  
Mit zahlreichen Beispielen für NX 9

3., aktualisierte und erweiterte Auflage



HANSER

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Technische Universität Darmstadt

Peter Binde, Dr. Binde Ingenieure, Design & Engineering GmbH, Wiesbaden



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 in folgedessen 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 benützt werden dürften.

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.

© 2014 Carl Hanser Verlag München

Gesamtlektorat: Julia Stepp

Sprachlektorat: Sandra Gottmann, Münster-Nienberge

Herstellung: Andrea Reffke

Umschlagkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Umschlagrealisation: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

ISBN 978-3-446-43921-4

E-Book-ISBN 978-3-446-43952-8

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

# Inhalt

<b>■</b>	<b>Vorwort</b> .....	1
<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	3
1.1	Lernaufgaben, Lernziele und wichtige Voraussetzungen für die Arbeit mit dem Buch. ....	5
1.2	Arbeitsumgebungen .....	8
1.3	Arbeiten mit dem Buch .....	9
<b>2</b>	<b>Motion-Simulation (MKS)</b> .....	13
2.1	<b>Einführung und Theorie</b> .....	13
2.1.1	Berechnungsmethode .....	14
2.1.2	Einschränkungen .....	16
2.1.3	Klassifikationen bei MKS .....	16
2.2	<b>Lernaufgaben zur Kinematik</b> .....	18
2.2.1	Lenkgetriebe .....	18
2.2.2	Top-down-Entwicklung der Lenkhebelkinematik .....	37
2.2.3	Kollisionsprüfung am Gesamtmodell der Lenkung .....	55
2.3	<b>Lernaufgaben zur Dynamik</b> .....	65
2.3.1	Fallversuch am Fahrzeugrad .....	65
2.4	<b>Lernaufgaben zur Co-Simulation</b> .....	75
2.4.1	Balancieren eines Pendels .....	75
<b>3</b>	<b>Design-Simulation FEM (Nastran)</b> .....	85
3.1	<b>Einführung und Theorie</b> .....	86
3.1.1	Lineare Statik .....	87
3.1.2	Nichtlineare Effekte .....	89
3.1.3	Einfluss der Netzfeinheit .....	92
3.1.4	Singularitäten .....	93
3.1.5	Eigenfrequenzen .....	94
3.1.6	Thermotransfer .....	95
3.1.7	Lineares Beulen .....	96

<b>3.2</b>	<b>Lernaufgaben zu Design-Simulation</b> .....	97
3.2.1	Kerbspannung am Lenkhebel (Sol101) .....	97
3.2.2	Temperaturfeld in einer Rakete (Sol153) .....	150
<b>4</b>	<b>Advanced Simulation (FEM)</b> .....	161
<b>4.1</b>	<b>Einführung</b> .....	162
4.1.1	Sol 101: Lineare Statik und Kontakt .....	163
4.1.2	Sol 103: Eigenfrequenzen .....	163
4.1.3	Sol 106: Nichtlineare Statik .....	164
4.1.4	Sol 601/701: Advanced nichtlinear .....	164
<b>4.2</b>	<b>Lernaufgaben lineare Analyse und Kontakt (Sol 101/103)</b> .....	167
4.2.1	Steifigkeit des Fahrzeugrahmens .....	167
4.2.2	Auslegung einer Schraubenfeder .....	200
4.2.3	Eigenfrequenzen des Fahrzeugrahmens .....	215
4.2.4	Klemmsitzanalyse am Flügelhebel mit Kontakt .....	224
<b>4.3</b>	<b>Lernaufgaben Basic nichtlineare Analyse (Sol 106)</b> .....	248
4.3.1	Analyse der Blattfeder mit großer Verformung .....	248
4.3.2	Plastische Verformung des Bremspedals .....	260
<b>4.4</b>	<b>Lernaufgaben Advanced Nichtlinear (Sol 601)</b> .....	270
4.4.1	Schnapphaken mit Kontakt und großer Verformung .....	270
<b>5</b>	<b>Advanced Simulation (CFD)</b> .....	295
<b>5.1</b>	<b>Prinzip der numerischen Strömungsanalyse</b> .....	296
<b>5.2</b>	<b>Lernaufgaben (NX-Flow)</b> .....	297
5.2.1	Strömungsverhalten und Auftrieb am Flügelprofil .....	297
<b>6</b>	<b>Advanced Simulation (EM)</b> .....	323
<b>6.1</b>	<b>Prinzipien elektromagnetischer Analysen</b> .....	324
6.1.1	Elektromagnetische Modelle .....	325
6.1.2	Maxwell-Gleichungen .....	326
6.1.3	Materialgleichungen .....	328
6.1.4	Modellauswahl .....	330
6.1.5	Elektrostatik .....	332
6.1.6	Elektrokinetik .....	332
6.1.7	Elektrodynamik .....	333
6.1.8	Magnetostatik .....	333
6.1.9	Magnetodynamik .....	334
6.1.10	Full Wave (Hochfrequenz) .....	334

<b>6.2</b>	<b>Installation und Lizenz</b> .....	335
<b>6.3</b>	<b>Lernaufgaben (EM)</b> .....	337
6.3.1	Spule mit Kern, achsensymmetrisch .....	337
6.3.2	Spule mit Kern, 3D .....	338
6.3.3	Elektromotor.....	358
<b>7</b>	<b>Management von Berechnungs- und Simulationsdaten..</b>	381
<b>7.1</b>	<b>Einführung und Theorie</b> .....	381
7.1.1	CAD/CAE-Integrationsproblematik .....	381
7.1.2	Lösungen mit Teamcenter for Simulation .....	382
<b>7.2</b>	<b>Lernaufgaben zu Teamcenter for Simulation</b> .....	385
7.2.1	Durchführung einer NX CAE-Analyse in Teamcenter .....	385
7.2.2	Welches CAD-Modell gehört zu welchem FEM-Modell? .....	393
7.2.3	Revisionieren .....	395
<b>8</b>	<b>Manuelle Berechnung eines FEM-Beispiels</b> .....	401
<b>8.1</b>	<b>Aufgabenstellung</b> .....	401
<b>8.2</b>	<b>Idealisierung und Wahl einer Theorie</b> .....	402
<b>8.3</b>	<b>Analytische Lösung</b> .....	402
<b>8.4</b>	<b>Raumdiskretisierung für FEM</b> .....	403
<b>8.5</b>	<b>Aufstellen und Lösen des FEA-Gleichungssystems</b> .....	404
<b>8.6</b>	<b>Vergleich der analytischen Lösung mit der aus FEA</b> .....	406
<b>9</b>	<b>Farbplots</b> .....	409
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	425
	<b>Index</b> .....	429



# Vorwort

Die Virtuelle Produktentwicklung hat durch die integrierte Anwendung von volumenorientierten 3D-CAD-Modellierungsverfahren sowie 3D-Berechnungs- und Simulationsverfahren enorm an Bedeutung gewonnen. 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 unverzichtbaren Bestandteil geworden. Seit 2003 ist die Technische Universität Darmstadt als PACE-Universität ausgewählt und Teil des internationalen PACE-Verbundes. PACE steht für *Partners for the Advancement of Collaborative Engineering Education* und ist ein Förderprogramm der Firmen General Motors Corp. (in Deutschland Adam Opel GmbH), Autodesk, HP (Hewlett Packard), Siemens, Oracle sowie weiterer unterstützender Firmen. Die Förderung durch das PACE-Programm ermöglichte das Entstehen dieser Expertise, insbesondere durch die Integration der 3D-Modellierungstechniken in die Berechnungs- und Simulationsverfahren. Diese Veröffentlichung entstand aus einer Kooperation zwischen Dr. Binde Ingenieure - Design & Engineering GmbH ([www.drbinde.de](http://www.drbinde.de)) 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 Herrn Haiko Klause für seine kritische Durchsicht und Unterstützung bei Kapitel 7 sowie bei Herrn Andreas Rauschnabel für seine Vorarbeiten bei der Aktualisierung der Motion- und FEM-Beispiele für die Version 9 von NX™. 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 dritte Auflage gefordert haben. Wir wünschen allen Lesern viel Erfolg bei der Lösung der Lernaufgaben und der Nutzung der erworbenen Erkenntnisse im Studium wie auch in der industriellen Praxis!

Im Januar 2014

*Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl*

*Dr.-Ing. Peter Binde*



# 1

## Einführung

In den Ingenieurwissenschaften hat sich in den vergangenen 20 Jahren ein signifikanter Wandel vollzogen. Dieser Wandel ist durch den Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnik geprägt, die sowohl in den Bereichen der Produktentwicklung wie 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

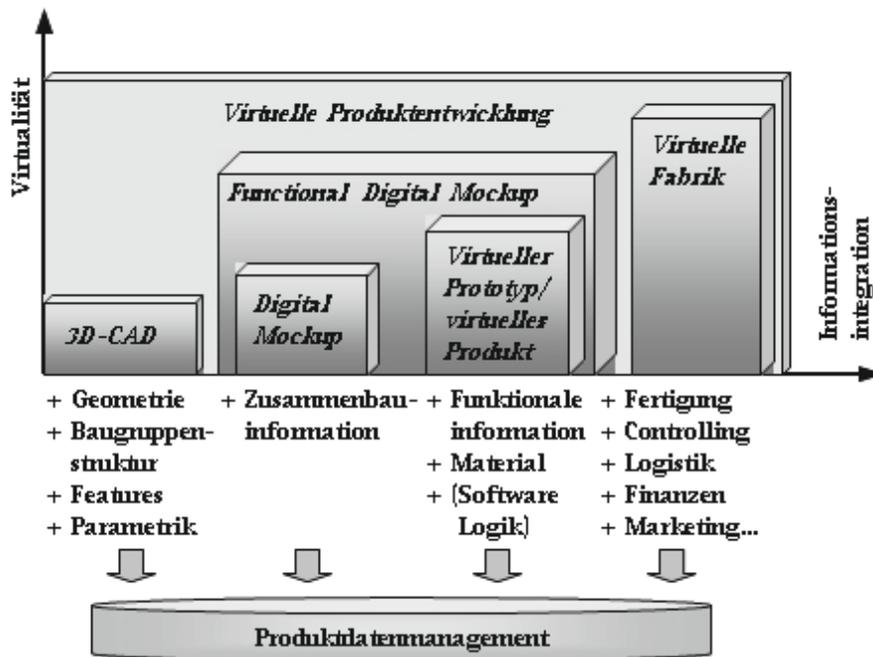
- der schnellen Informationsgewinnung aus weltweit verfügbaren Quellen,
- der Verfügbarkeit von neuen, rechnerbasierten Methoden zur Produktentwicklung und Konstruktion, zum Beispiel zur Produktmodellierung (CAD), zur Auslegungs- und Nachweisrechnung (FEM, MKS, CFD), zur schnellen Validierung und Verifikation (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 (siehe nachfolgende Abbildung). Sie führen über

Stufen der Virtuellen Produktentwicklung

- 3D CAD,
- Digital Mock-Ups,
- Virtuelle Prototypen bis zum
- Virtuellen Produkt und auch zur
- Virtuellen Fabrik.



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.

DMU

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 Ausbavorgängen sowie für Kollisionsprüfungen eingesetzt.

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 (CFD, im Englischen als *Computational Fluid Dynamics* bezeichnet). Als letztes Verfahren ist die Elektromagnetische Simulation, kurz EM, zu nennen, welche ebenfalls die FEM verwendet und erstmals in dieser Auflage behandelt wird.

Die wichtigsten Simulationsverfahren sind die FEM, MKS und CFD.

Der Begriff „Virtuelles Produkt“ fasst mehrere physikalische Eigenschaften eines Produktes 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.

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 Aufgabenbereichen 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

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 Model-

Die Lerninhalte werden anhand von Methodikbeispielen vermittelt.

lierung, Berechnungen und Simulationen dargestellt wird. Die dabei aufgezeigten Szenarien basieren auf dem 3D-CAD-System NX9 und den darin integrierten Berechnungs- und Simulationsmodulen.

Das CAD-Modell des Opel RAK2 bildet die Grundlage für die Lernaufgaben: Die nebenstehende Abbildung zeigt einige Beispielbilder.

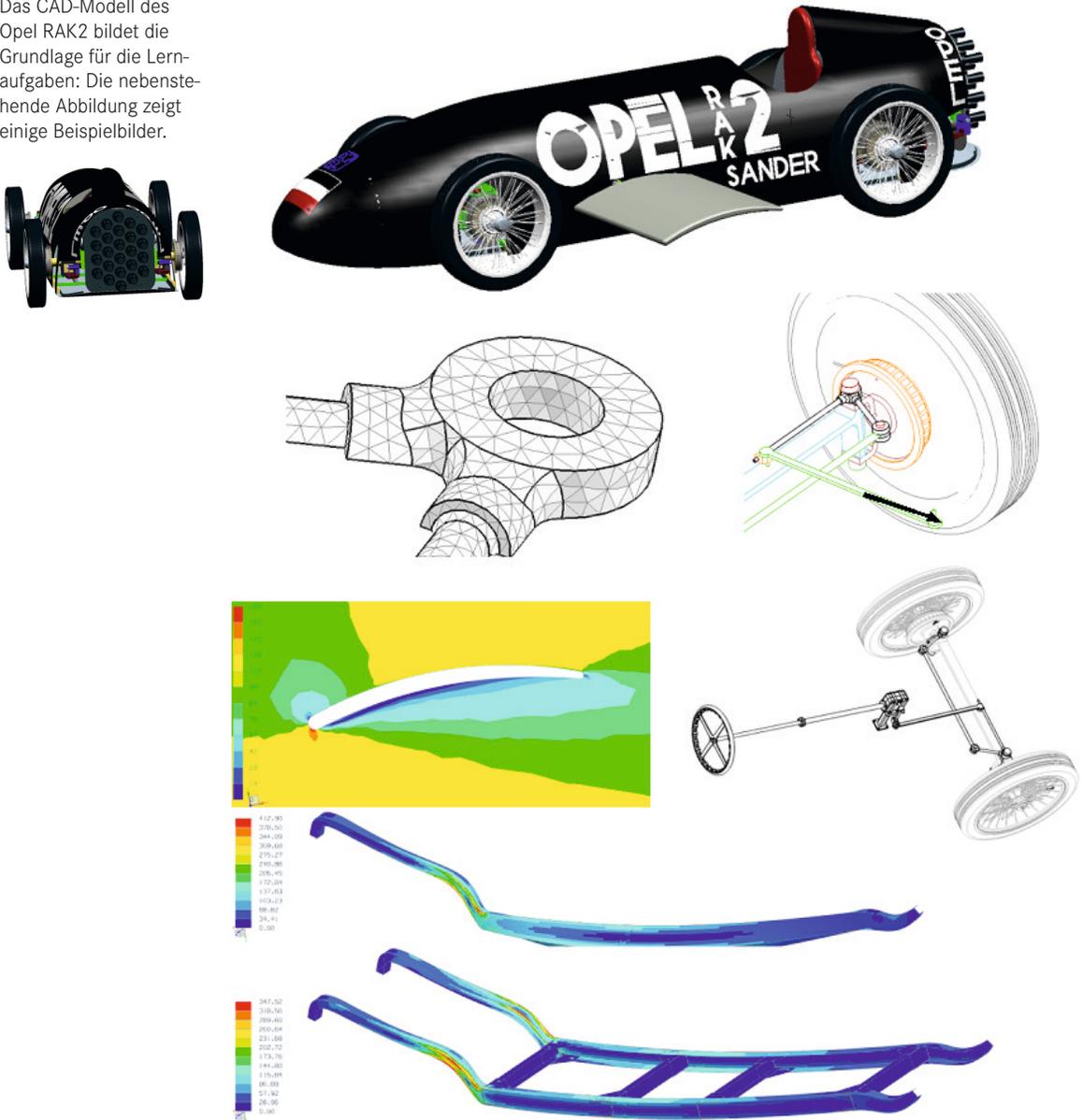


Bild 9.1 aus Kapitel 9, „Farbplots“, zeigt eine farbige Darstellung der Abbildung.

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, 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.

Alle CAD- und Berechnungsdaten, die in den Lernaufgaben gebraucht oder erstellt werden, liegen auf der beiliegenden DVD vor und sollten zum Nachvollziehen der Beispiele genutzt werden.

Voraussetzungen für die Arbeit mit dem Buch

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.

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 NX9, 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.

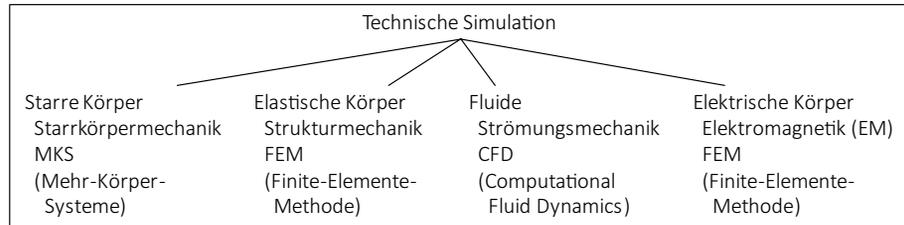
Lernziel ist es, dem Studenten, Konstrukteur oder Berechnungsingenieur das Wissen zu vermitteln, das er benötigt, um einfache Aufgaben der Finite-Elemente-Methode, der Mehrkörpersimulation und der Strömungssimulation mit NX selbst zu lösen und ein Verständnis für diese Technologien zu entwickeln. Es 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.

Lernziel ist der Aufbau eines grundlegenden Erfahrungsschatzes.

## ■ 1.2 Arbeitsumgebungen

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

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. Diese sind (neben einigen anderen, die hier nicht behandelt werden):

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

- Motion-Simulation
- Design-Simulation
- Advanced Simulation (FEM)
- Advanced Simulation (CFD)
- Advanced Simulation (EM)
- Manuelle Berechnung eines FEM-Beispiels

Aufbau des Buches

An erster Stelle widmen wir uns der Motion-Simulation (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 Motion werden die Gelenkkräfte berechnet.

Die Kapitel können weitgehend unabhängig voneinander durchgearbeitet werden. D.h., wer sich nicht für Bewegungssimulation interessiert, kann das Kapitel überspringen. Lediglich die FEM-interessierten Leser, die mit „Advanced Simulation (FEM)“ (Kapitel 4) arbeiten möchten, sollten vorher auch „Design-Simulation FEM (Nastran)“ (Kapitel 3) 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, verdeutlichen und erweitern sie. Eilige Leser können die Einführungen daher auch überspringen und gleich zu den Lernaufgaben übergehen.

Eilige Leser können gleich mit den Beispielen starten.



Die dem Buch beiliegende DVD enthält den Ordner *RAK2*. Dieser enthält alle beschriebenen Lernaufgaben der Bereiche Bewegungs-, Struktur-, Thermo- und Strömungssimulation. Ein zweiter Ordner mit dem Namen *EM* enthält Installationsdateien und Beispiele für die Elektromagnetik. Es sind auch Lösungsdateien auf der DVD vorhanden, damit evtl. darin nachgesehen werden kann. Für das Durcharbeiten sollte die gesamte DVD in ein Verzeichnis auf die Festplatte des Rechners kopiert werden.

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

Das jeweils erste Beispiel ist von grundlegendem Charakter.

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 Stecknadelsymbol zu Stecknadelsymbol springen.

NX-Installation und Rechnerleistung

Für das Durcharbeiten der Lernaufgaben sollte ein Rechner mit NX-Installation zur Verfügung stehen. Die Beispiele wurden mit der NX9 durchgerechnet, sollten aber auch in anderen NX-Versionen, z.B. NX8.5 oder 10, funktionieren. Bei einer normalen Installation des NX9-Systems werden alle erforderlichen Module der Simulation, insbesondere die 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 wird die Ausnutzung mehrerer Prozessoren unterstützt.
- Arbeitsspeicher: FEM, Thermo- und Strömungsanalysen brauchen viel Hauptspeicher. Es gilt die einfache Regel: Je mehr, desto besser. Um die Beispiele dieses Buchs durchzuarbeiten, 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 [nxn\_paral] über Parallelprocessing und [nxn\_num] über effiziente Speichernutzung mit NX/Nastran.

Voreinstellung des Motion-Solvers

Für Motion-Analysen stehen zwei Solver-Typen zur Verfügung: *Adams* und *Recurdyne*. Die Lernaufgaben dieses Buches wurden mit dem Recurdyne Solver durchgeführt, können jedoch auch mit Adams laufen.

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

## Verwendete Literatur

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



# 2

## Motion-Simulation (MKS)

In Abschnitt 2.1 werden zunächst die 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 behandelt dynamische Sachverhalte sowie die Simulation von Kontakt (Abschnitt 2.3.1), und die letzte Aufgabe behandelt die Kopplung von NX-Motion mit MATLAB®-Simulink® zur sogenannten Co-Simulation (Abschnitt 2.4.1).

Inhalt des Kapitels

### ■ 2.1 Einführung und Theorie

Motion-Simulation 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.

Einsatzszenarien und Nutzen für Motion-Simulationen in der Praxis

Aber auch und gerade in der frühen Phase der Konstruktion, wenn erst grobe Designwürfe vorliegen, ist der Einsatz kinematischer Analysen sinnvoll. Mithilfe der Motion-Simulation 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.

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

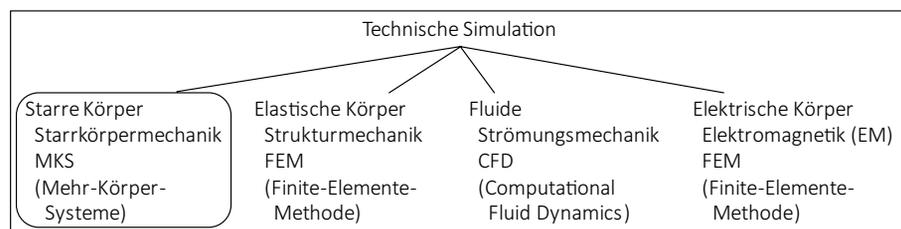
Masseneigenschaften der Bauteile erweitern das Gebiet in die Dynamik hinein.

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 Motion-Simulation 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.

Unterteilung der technischen Simulation in vier Teile

Motion-Simulation 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 dabei *Mehrkörpersimulation*.



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

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 auch für die Definition von beispielsweise Kurvenscheiben oder sonstigen Steuerungselementen genutzt werden.

## 2.1.1 Berechnungsmethode

Weiterführende Literatur

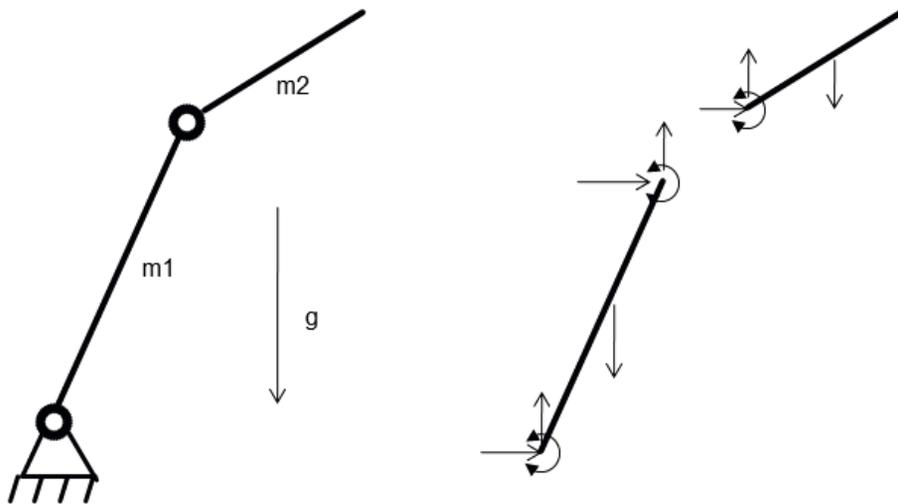
Es lässt sich schwer sagen, wie die MKS-Methode im allgemeinen Fall funktioniert, weil die verschiedenen Solver (Recurdyne, ADAMS) durchaus unterschiedlich arbeiten. Für ADAMS finden Sie in [adams1] aufschlussreiche Erklärungen, an die wir uns anlehnen. Für Recurdyne finden Sie in [recurdyne1] weiterführende Informationen.

Programmintern werden die Bewegungskörper, Gelenke und Antriebe in ein mathematisches Differentialgleichungssystem überführt, das aufgelöst wird, und woraus sich die gesuchten Größen ergeben. Als Ergebnis erhält der Anwender die Wege, Geschwindigkei-

ten und Beschleunigungen der Bewegungskörper und Gelenke sowie Reaktionskräfte an den Gelenken.

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.



Ein Differentialgleichungssystem wird aufgestellt.

Motion-Antriebe, die den Weg, die Geschwindigkeit oder Beschleunigung vorgeben, führen ebenfalls zur Reduktion von Unbekannten. Ein Drehantrieb, der eine Geschwindigkeit von 360 Grad/sec 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.

Antriebe und Constraints verringern die Zahl der Unbekannten.

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 den Gelenktypen in das System eingebracht werden. Während sich einfache Gelenktypen wie Dreh-, Schiebe- oder Kugelgelenke linear verhalten, bringen komplexere Gelenke wie

Manche Gelenktypen bringen Nichtlinearität in das Gleichungssystem.

*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 Postprozessing zur Verfügung:

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

## 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. Weil 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.

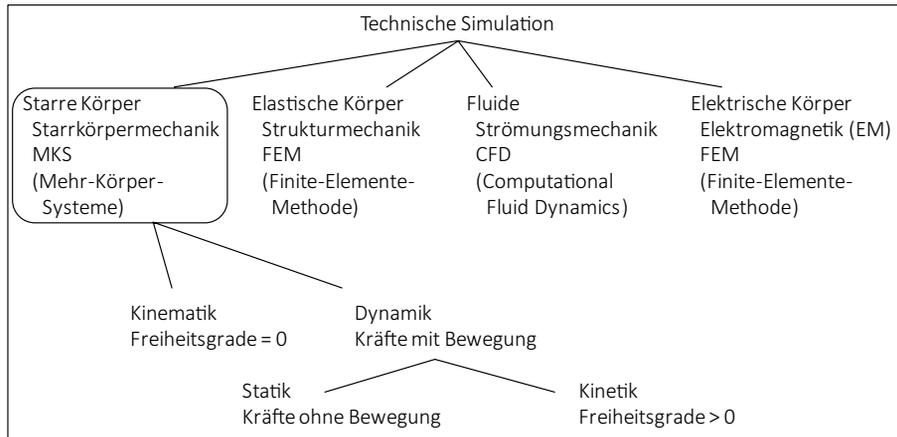
Zwar kann Spiel auch in MKS berücksichtigt werden, jedoch müssen die beteiligten Teile dynamisch betrachtet und Kontakte mit Rückstellkräften einbezogen werden. Dann existieren offene Freiheitsgrade im System, und die Aufgabe wird erfahrungsgemäß deutlich schwieriger in der Handhabung.

## 2.1.3 Klassifikationen bei MKS

Klassifikation der Mechanik

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.

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.



Klassifikation von MKS-Simulationen

All diese Phänomene können mit NX 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 werden 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 Bewegungskörpers bestimmt sind. Diese Bestimmung kann entweder durch Gelenke oder durch Antriebsgesetze vorgenommen werden. Ein solches System läuft gewissermaßen vorhersehbar. Es wird auch von bewegungsgetriebenen Systemen (gefesselte Bewegung) gesprochen.

Bestimmte und unbestimmte Freiheitsgrade

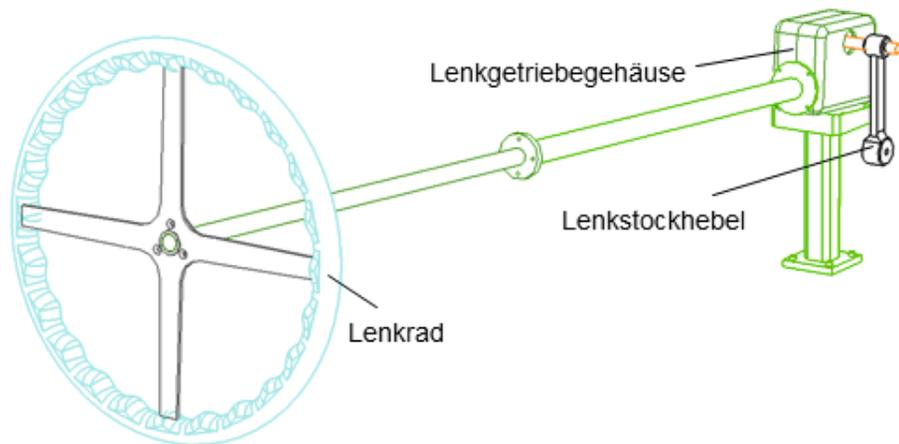
*Kinetische Systeme* liegen dann vor, wenn ein oder mehr Freiheitsgrade unbestimmt sind. Die Bewegung ergibt sich dann aufgrund von Kräften (ungefesselte Bewegung). Beispielsweise führt die Schwerkraft zum Schwingen eines gelenkig gelagerten Hebels. Im Fall der Kinetik wird daher auch von kraftgetriebenen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

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

## ■ 2.2 Lernaufgaben zur Kinematik

### 2.2.1 Lenkgetriebe

An diesem Grundlagenbeispiel werden die wichtigsten Sachverhalte erklärt, die für eine einfache Bewegungsanalyse mit dem NX-System erforderlich sind. Das Beispiel führt den Anwender durch den Prozess der Erzeugung von Bewegungskörpern, grundlegenden Gelenken und nutzt als Antrieb die Funktion *Artikulation*, die sehr gut für rein kinematische Bewegungssimulationen geeignet ist. Darüber hinaus wird auch die Funktion für dynamische Analysen eingesetzt, allerdings wird dies lediglich als Methode zum Erkennen unbestimmter Freiheitsgrade ausgenutzt.



Dieses Kinematikmodell wird zunächst als einzelner Mechanismus erzeugt. In einem späteren Beispiel wird dieser Mechanismus modulartig mit anderen Mechanismen zu einem zusammengesetzten Mechanismus zusammengefügt.



**HINWEIS:** Dieses Grundlagenbeispiel sollte von allen Anwendern durchgearbeitet werden, die mit Motion-Simulation arbeiten werden.

#### 2.2.1.1 Aufgabenstellung

Ziel ist die Kontrolle der Konstruktion.

Ein Konstrukteur hat die Hebel für das Lenkgetriebe neu konstruiert. Nun muss er prüfen, ob Kollisionen auftreten. Daher muss ein kinematisches Modell erstellt werden, das die Drehbewegung des Lenkrads und (damit verbunden) des Lenkstockhebels ermöglicht.

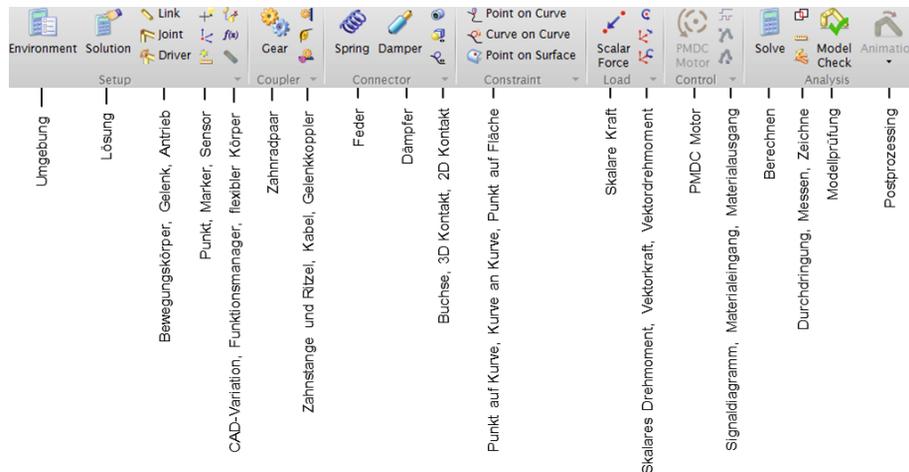
In dieser Aufgabe wird das Lenkgetriebe des RAK2 sowie dessen Lenkrad und Lenkstockhebel verwendet. Das Lenkgetriebe ist in einem Gehäuse untergebracht und verbindet Lenkrad mit Lenkstockhebel.

Für diese Aufgabe soll die Simulation nur zur visuellen Kontrolle genutzt werden, jedoch wären in weiterführenden Analysen Kollisionschecks, die Prüfung von Minimalabständen zu anderen Komponenten oder die Untersuchung der entstehenden Reaktionskräfte in den Gelenken möglich.

Nachfolgend werden zunächst einige Prinzipien erläutert. Daraufhin werden die Lösungsschritte für diese Aufgabenstellung dargestellt. Ganz eilige Leser können den nächsten Abschnitt auch überspringen und gleich zum Aufbau des Modells übergehen (siehe Abschnitt 2.2.1.4).

### 2.2.1.2 Überblick über die Funktionen

In der Anwendung *Kinematik* (Motion-Simulation) wird das kinematische oder kinetische Modell aufgebaut und die Simulation wird durchgeführt sowie ausgewertet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Toolbar *Motion*, die nach Aufruf des Moduls erscheint. Die Toolbar enthält alle Funktionen des *Motion*-Moduls, die gebraucht werden. Üblicherweise wird diese Toolbar am linken Rand des Fensters eingeklinkt.



Überblick und Kurzerklärung zu den wichtigsten Funktionen der Motion-Simulation

Nachfolgend geben wir einen Überblick über die wichtigsten Funktionen des *Motion*-Moduls, wobei schon auf den späteren Einsatz hingewiesen wird. Ganz eilige Leser können diesen Abschnitt auch überspringen und sofort zum Aufbau des Modells (Abschnitt 2.2.1.4) übergehen.

- Die Funktion *Umgebung* (*Environment*) ermöglicht die grundlegende Voreinstellung des Systems auf reine Kinematik oder auch kinetische Eigenschaften (hier als Dynamik bezeichnet). Für unsere Aufgabe werden wir „Dynamik“ einstellen, obwohl es sich eigentlich um ein kinematisches Modell handelt. Dies liegt darin begründet, dass dem Anwender dadurch Möglichkeiten eröffnet werden, die zum besseren Verständnis und zur Fehleridentifikation beitragen. Zusätzlich können in der Funktion *Umgebung* erweiterte Lösungsoptionen angewählt werden, z.B. die Option *Co-Simulation* für regelungstechnische Elemente mit MATLAB-Simulink, die Option *Antrieb* (*Motor Driver*) für den

Zugriff auf Motorbibliotheken oder die Option für *flexible Körperdynamik (Flexible Body Dynamics)*. Die Option *Komponentenbasierte Simulation* eignet sich für Baugruppen, da sie beim Erzeugen von Bewegungskörpern den Filter auf Baugruppenkomponenten aktiviert.

-  Die Funktion *Lösung (Solution)* muss vom Anwender aufgerufen werden, um anzugeben, welche Art von Lösung gewünscht wird. Zu den Möglichkeiten zählen die *Normale Ausführung (Normal Run)*, die *Artikulation* und andere.
-  Die wichtigsten Elemente für den Aufbau des Bewegungsmodells sind die *Bewegungskörper (Link)*. Hiermit definiert der Anwender, welche Geometrie beweglich sein soll. Bei der deutschen Sprachanpassung wird hier ungeschickterweise der irreführende Begriff *Verbindung* eingesetzt, den wir im Folgenden nicht verwenden wollen.
-  Neben den Bewegungskörpern werden vom Anwender *Gelenke (Joint)* definiert, die beschreiben, wie sich die Bewegungskörper zueinander bewegen können. In diesem Zusammenhang verwendet man auch die Funktion *Fahrer (Driver)*, die zum Antrieb eines Gelenks genutzt werden kann. Wird der Knopf *Gelenk* aufgerufen, so befinden sich darunter eine Menge verschiedener Gelenkarten. Dies sind die wichtigsten Gelenkarten:
  - Das *Drehgelenk (Revolute)* lässt lediglich Drehung zu.
  - Der *Schieberegler (Slider)* lässt translatorische Verschiebung zwischen zwei Teilen zu.
  - Das *Gelenk Zylindrisch (Cylindrical)* lässt Drehung und Verschiebung zu.
  - Eine *Schraube (Screw)* zwingt zwei Teile zur Drehung, wenn sie sich aufeinander zu bewegen.
  - *Universal (Universal)* entspricht einem Kreuz- oder Kardangelenke und lässt Kippbewegungen zweier Teile zu, jedoch wird eine in der Hauptachse liegende Drehung auf das andere Teil übertragen. Wie auch in der Realität kommt es beim Kardan je nach Winkelstellung der Achsen zu ungleichmäßigen Drehgeschwindigkeiten. Diese Ungleichmäßigkeit kann durch Einsatz des nachfolgend beschriebenen Gelenks *Konstante Geschwindigkeit* vermieden werden.
  - Ein *Kugelförmiges Gelenk (Spherical)* lässt alle Drehbewegungen zweier Teile zueinander zu.
  - Das *Planargelenk (Planar)* erlaubt das reibungsfreie Gleiten zweier Teile zueinander auf einer ebenen Fläche.
  - Das *Festgelenk (Fixed)* verbindet zwei Teile so, dass überhaupt keine Bewegung mehr zwischen ihnen möglich ist.

Die sogenannten Gelenk-„Primitive“

Zusätzlich zu diesen sehr bildlichen Gelenktypen, die realen Gelenkarten nachempfunden sind, gibt es noch eine Reihe von *Hilfsgelenken (Primitive Joints)*, die eher geeignet sind, um den direkten Zugriff auf Freiheitsgrade zu ermöglichen. Allgemein kann mithilfe der *Primitive* jeder Freiheitsgrad einzeln blockiert oder zugelassen werden.

Dies sind einige nützliche Primitivgelenke:

-  *Konstante Geschwindigkeit (Constant Velocity)*: Dieses Gelenk funktioniert ganz ähnlich dem vorangehend beschriebenen Universal- oder Kardangelenke. Im Gegensatz zum Universalgelenk bleibt die Geschwindigkeit auf beiden Seiten immer gleich, und auch Winkel über 90° sind möglich.
-  *Innen (Inline)* blockiert zwei translatorische Freiheitsgrade, sodass sich die Links auf einer Achse aufeinander zu bewegen können (ähnlich wie *Punkt auf Kurve*).
-  *Parallel*: Ein Gelenk, das zwei Flächen oder Linien parallel hält, d.h., zwei rotatorische Freiheitsgrade werden blockiert
-  Das Primitiv *Orientierung (Orientation)* verknüpft die Drehfreiheitsgrade zweier Bewegungskörper, erlaubt jedoch die Translationen.

Weitere Funktionen sind:

Sensoren usw.

-  *intelligenter Punkt (Smart Point)*: ein gewöhnlicher CAD-Punkt, der auch über Baugruppen hinweg Assoziativität besitzt
-  *Markierung (Marker)*: wird eingesetzt, um an bestimmten Positionen des Bewegungskörpers Ergebnisse wie Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen zu messen
-  *Sensor*: ist in der Lage, an den Gelenken die Verschiebung/Verdrehung, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft in bestimmten Richtungen zu messen

Weitere Funktionen der Menüleiste sind:

-  Die Funktion *Master-Modell-Bemaßung (Master Model Dimension)* kann genutzt werden, um in einem Motion-Modell die CAD-Parameter des zugrunde liegenden CAD-Modells zu verändern. Das Besondere an dieser Funktion ist, dass die Änderungen lediglich im Motion-Modell wirken, das zugrunde liegende CAD-Modell selbst wird dabei nicht geändert. Diese Funktion kann daher für „Was-wäre-wenn“-Studien eingesetzt werden.
-  Der *Funktionsmanager* dient zum Definieren komplexerer Funktionen, anhand derer beispielsweise ein Antrieb zeitabhängig oder bewegungsabhängig gesteuert werden kann. Einfachere Funktionen sind dagegen meist direkt in den entsprechenden Motion-Features verfügbar. Hier wird der Funktionsmanager also nicht gebraucht.
-  Die Funktion *Flexible Bewegungskörper (Flexible Link)*, ermöglicht es, flexible, d.h. vorher mit FEM berechnete Bewegungskörper (anstelle von ausschließlich starren) zu verwenden.

Eine weitere Gruppe von Gelenk-Spezialtypen stellen die Koppler und Getriebe dar. Hier kann der Anwender zwischen folgenden Möglichkeiten auswählen:

Koppler bzw. Verzahnungen

-  *Zahnradpaar (Gear)*,
-  *Zahnstange und Ritzel (Rack and Pinion)*,