

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

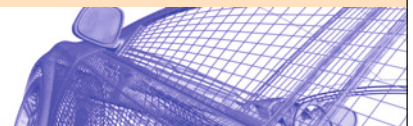
News für CAX-Anwender!



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



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 infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

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

Inhalt

| | | |
|----------|--|----|
| ■ | Vorwort | 1 |
| 1 | Einführung | 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 |
| 2 | Motion-Simulation (MKS) | 13 |
| 2.1 | Einführung und Theorie | 13 |
| 2.1.1 | Berechnungsmethode | 14 |
| 2.1.2 | Einschränkungen | 16 |
| 2.1.3 | Klassifikationen bei MKS | 16 |
| 2.2 | Lernaufgaben zur Kinematik | 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 | Lernaufgaben zur Dynamik | 65 |
| 2.3.1 | Fallversuch am Fahrzeugrad | 65 |
| 2.4 | Lernaufgaben zur Co-Simulation | 75 |
| 2.4.1 | Balancieren eines Pendels | 75 |
| 3 | Design-Simulation FEM (Nastran) | 85 |
| 3.1 | Einführung und Theorie | 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 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 3.2 | Lernaufgaben zu Design-Simulation | 97 |
| 3.2.1 | Kerbspannung am Lenkhebel (Sol101) | 97 |
| 3.2.2 | Temperaturfeld in einer Rakete (Sol153) | 150 |
| 4 | Advanced Simulation (FEM) | 161 |
| 4.1 | Einführung | 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 |
| 4.2 | Lernaufgaben lineare Analyse und Kontakt (Sol 101/103) | 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 |
| 4.3 | Lernaufgaben Basic nichtlineare Analyse (Sol 106) | 248 |
| 4.3.1 | Analyse der Blattfeder mit großer Verformung | 248 |
| 4.3.2 | Plastische Verformung des Bremspedals | 260 |
| 4.4 | Lernaufgaben Advanced Nichtlinear (Sol 601) | 270 |
| 4.4.1 | Schnapphaken mit Kontakt und großer Verformung | 270 |
| 5 | Advanced Simulation (CFD) | 295 |
| 5.1 | Prinzip der numerischen Strömungsanalyse | 296 |
| 5.2 | Lernaufgaben (NX-Flow) | 297 |
| 5.2.1 | Strömungsverhalten und Auftrieb am Flügelprofil | 297 |
| 6 | Advanced Simulation (EM) | 323 |
| 6.1 | Prinzipien elektromagnetischer Analysen | 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 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 6.2 | Installation und Lizenz | 335 |
| 6.3 | Lernaufgaben (EM) | 337 |
| 6.3.1 | Spule mit Kern, achsensymmetrisch | 337 |
| 6.3.2 | Spule mit Kern, 3D | 338 |
| 6.3.3 | Elektromotor..... | 358 |
| 7 | Management von Berechnungs- und Simulationsdaten.. | 381 |
| 7.1 | Einführung und Theorie | 381 |
| 7.1.1 | CAD/CAE-Integrationsproblematik | 381 |
| 7.1.2 | Lösungen mit Teamcenter for Simulation | 382 |
| 7.2 | Lernaufgaben zu Teamcenter for Simulation | 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 |
| 8 | Manuelle Berechnung eines FEM-Beispiels | 401 |
| 8.1 | Aufgabenstellung | 401 |
| 8.2 | Idealisierung und Wahl einer Theorie | 402 |
| 8.3 | Analytische Lösung | 402 |
| 8.4 | Raumdiskretisierung für FEM | 403 |
| 8.5 | Aufstellen und Lösen des FEA-Gleichungssystems | 404 |
| 8.6 | Vergleich der analytischen Lösung mit der aus FEA | 406 |
| 9 | Farbplots | 409 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 425 |
| | Index | 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) und dem Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion im Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt (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

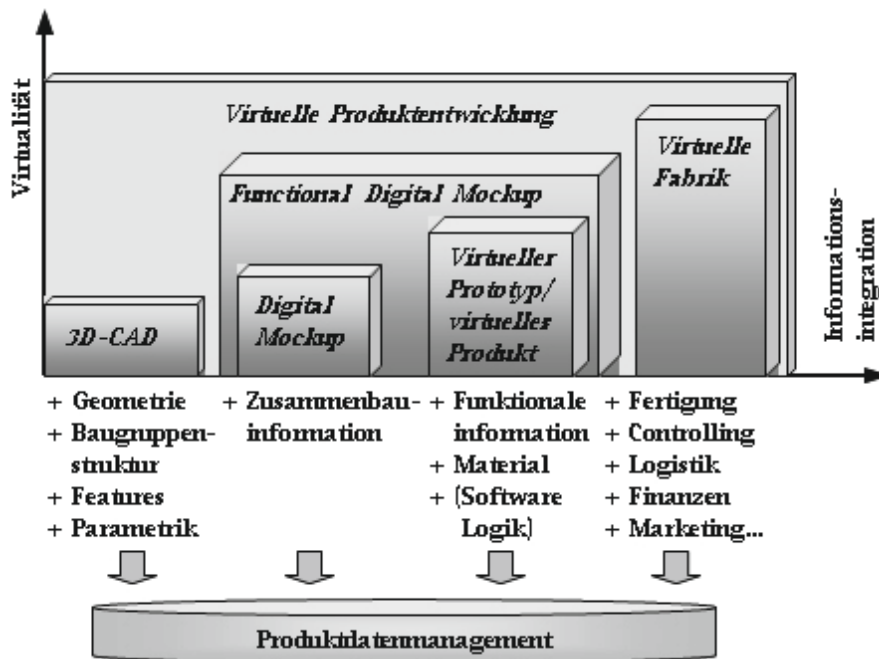
- der schnellen Informationsgewinnung aus weltweit verfügbaren Quellen,
- der Verfügbarkeit von neuen, rechnerbasierten Methoden zur Produktentwicklung und Konstruktion, zum Beispiel zur Produktmodellierung (CAD), zur Auslegungs- und Nachweisrechnung (FEM, MKS, CFD), zur schnellen Validierung und Verifikation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

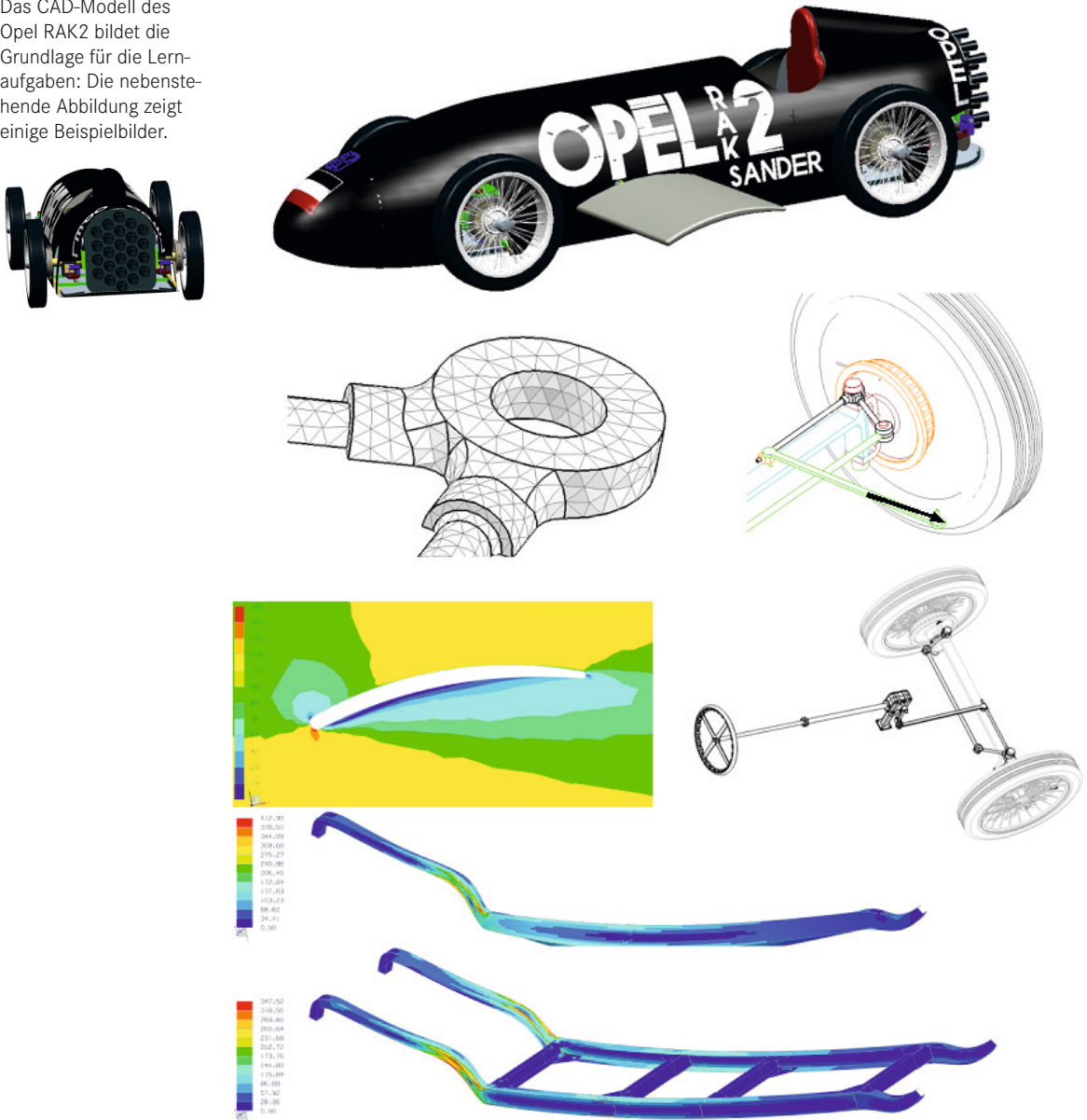


Bild 9.1 aus Kapitel 9, „Farbplots“, zeigt eine farbige Darstellung der Abbildung.

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.

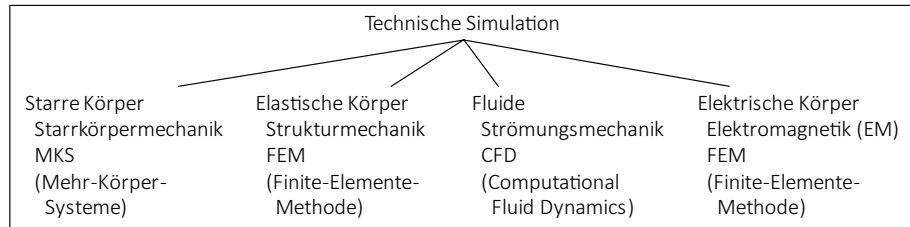
Lernziel ist es, dem Studenten, Konstrukteur oder Berechnungsingenieur das Wissen zu vermitteln, das er benötigt, um einfache Aufgaben der Finite-Elemente-Methode, der Mehrkörpersimulation und der Strömungssimulation mit NX selbst zu lösen und ein Verständnis für diese Technologien zu entwickeln. Es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

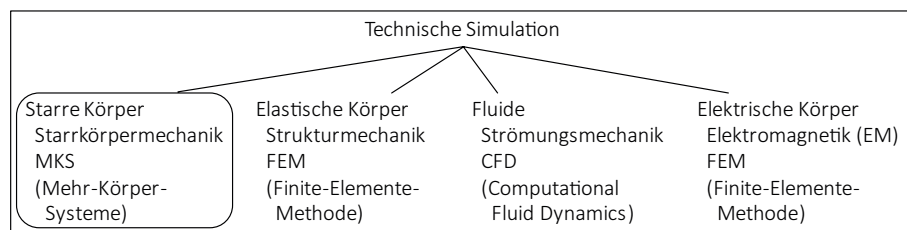
Masseneigenschaften der Bauteile erweitern das Gebiet in die Dynamik hinein.

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.

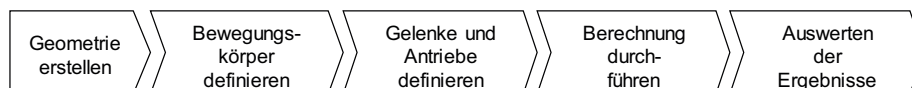
Unterteilung der technischen Simulation in vier Teile

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

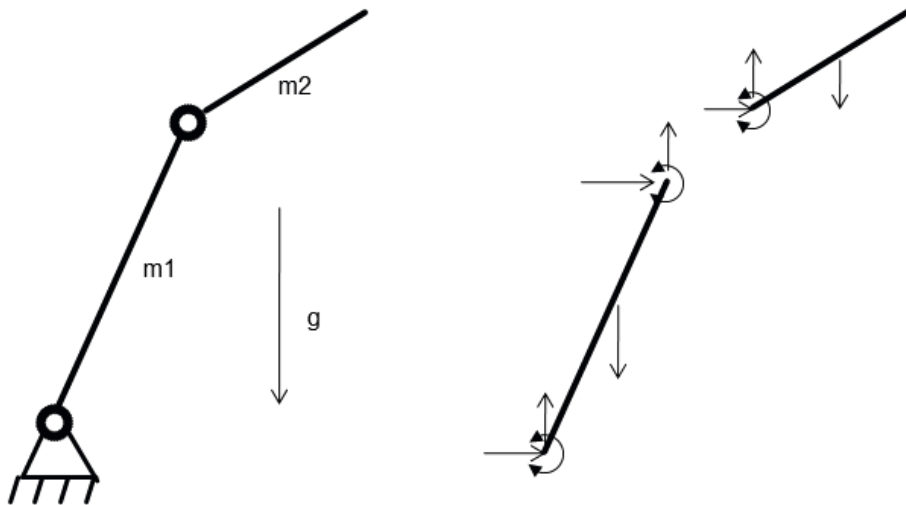
Es lässt sich schwer sagen, wie die MKS-Methode im allgemeinen Fall funktioniert, weil die verschiedenen Solver (Recurdyne, ADAMS) durchaus unterschiedlich arbeiten. Für ADAMS finden Sie in [adams1] aufschlussreiche Erklärungen, an die wir uns anlehnen. Für Recurdyne finden Sie in [recurdyne1] weiterführende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

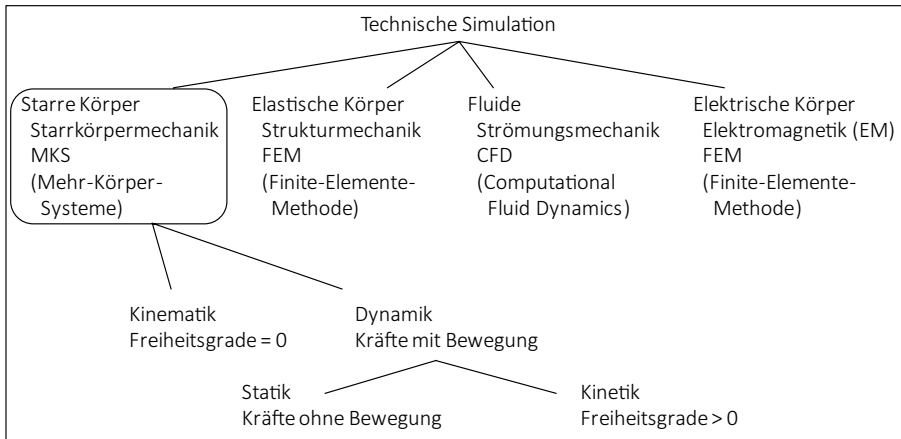
Zwar kann Spiel auch in MKS berücksichtigt werden, jedoch müssen die beteiligten Teile dynamisch betrachtet und Kontakte mit Rückstellkräften einbezogen werden. Dann existieren offene Freiheitsgrade im System, und die Aufgabe wird erfahrungsgemäß deutlich schwieriger in der Handhabung.

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 Freiheitsgrade¹ 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

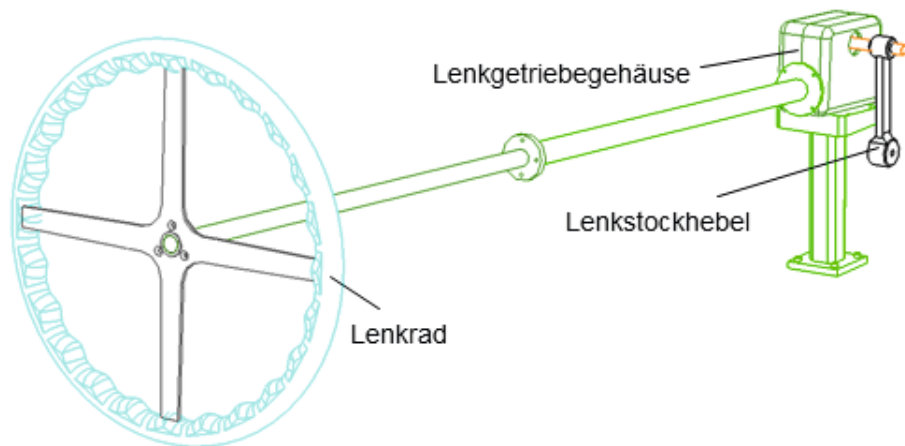
Kinetische Systeme liegen dann vor, wenn ein oder mehr Freiheitsgrade unbestimmt sind. Die Bewegung ergibt sich dann aufgrund von Kräften (ungefesselte Bewegung). Beispielsweise führt die Schwerkraft zum Schwingen eines gelenkig gelagerten Hebels. Im Fall der Kinetik wird daher auch von kraftgetriebenen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

¹ 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.

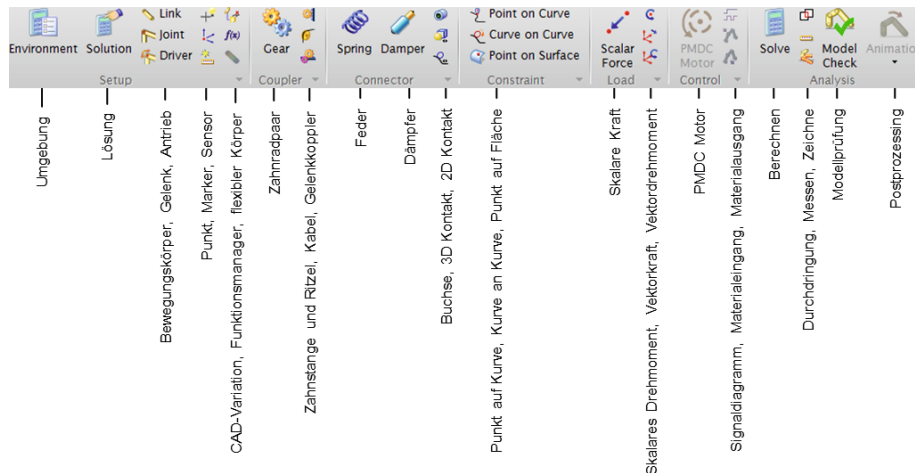
In dieser Aufgabe wird das Lenkgetriebe des RAK2 sowie dessen Lenkrad und Lenkstockhebel verwendet. Das Lenkgetriebe ist in einem Gehäuse untergebracht und verbindet Lenkrad mit Lenkstockhebel.

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 *Schiebereglер (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)*,

-  *Kabel (Cable)*
-  *2-3 Gelenkkoppler (2-3 Joint Coupler)*
- *Zahnstange und Ritzel* verbindet einen Dreher mit einem Schieber, das *Zahnradpaar* verbindet zwei Dreher und das *Kabel* zwei Schieber miteinander. Der *2-3 Gelenkkoppler* kann für beliebige Kopplungen zwischen zwei oder drei Gelenken verwendet werden. In jedem der Gelenke kann dabei das Verhältnis der Übersetzung eingestellt werden.




Elemente für den Anschluss sind in einer Gruppe.

Die nächste Gruppe von Gelenk-Spezialtypen fasst Anschlüsse zusammen:

-  *Feder (Spring)*
-  *Dämpfer (Damper)*
-  *Buchse (Bushing)*: eine zylinderartige Kombination aus Federn und Dämpfern
-   Der *3D-Kontakt* und der *2D-Kontakt* sind besondere Kontaktfunktionen, da sie das Auftreffen aufeinander sowie das Abheben voneinander erlauben. Genau genommen sind es gar keine Gelenke, sondern Kraftobjekte, die im Fall eines Kontaktes mit Rückstellkräften reagieren. Hierbei kann auch Reibung und Dämpfung eine Rolle spielen und anhand von Parametern nachgebildet werden. Während der *3D-Kontakt* auf ganze Solids angewendet wird, stellt der *2D-Kontakt* eine Vereinfachung dar, die im Fall von ebenen Kurven eingesetzt werden kann. Diese beiden Kontakte sind aufgrund ihrer Komplexität mit Vorsicht einzusetzen. Wenn möglich sollten bevorzugt die anderen Kontakte verwendet werden.

Verschiedene Arten von Zwangsbedingungen

Nun folgt eine Gruppe, in der Zwangsbedingungen zusammengefasst sind. Dazu gehören:


-  *Punkt auf Kurve (Point on Curve)* zwingt einen Punkt eines Teils dazu, auf einer beliebigen Raumkurve zu gleiten.
-  *Kurve an Kurve (Curve on Curve)*: Hier werden zwei Kurven gezwungen, tangential aufeinander zuzugleiten. Die beiden Kurven müssen jedoch in einer Ebene liegen. Hiermit werden die meisten Kurvenscheibenaufgaben realisiert.
-  Bei *Punkt auf Fläche (Point on Surface)* wird ein Punkt eines Bewegungskörpers gezwungen, auf einer Fläche zu gleiten.




Federn, Dämpfer und Kräfte

Zu den weiteren Motion-Features in der Toolbar zählt die Gruppe der Lasten. Dazu gehören:

-  *Kräfte (Force)*
-  *Momente (Torque)*, die in verschiedenen Ausführungen verfügbar sind

Einige erweiterte Funktionen sind nur nach entsprechender Einstellung der Umgebung verfügbar. Dazu gehören:

-  *PMDC-Motor*: definiert die elektrischen Parameter eines Motors, wie Spannung, Widerstand und Induktion




-  *Signaldiagramm (Signal Chart)*: übergibt dem PMDC-Motor ein Eingangssignal
-  *Plant Input*: definiert die Regelgrößen, die aus der optionalen Matlab-Simulink-Regelung ausgelesen und dem MKS-Modell, zum Beispiel als Antrieb, bereitgestellt werden
-  *Plant Output*: Meßgröße, die dem Matlab-Simulink-Regelkreis zugeführt wird

Um die Berechnung durchzuführen, wird erst eine Lösung erstellt und dann folgende Funktion aufgerufen:

-  *Berechnen (Solve)*






Die Lösung wird nun berechnet, und die Ergebnisse stehen daraufhin zur Verfügung.

Die vorletzte Funktionsgruppe stellt Funktionen zur geometrischen Analyse zur Verfügung. Dazu gehören folgende Funktionen:


-  *Durchdringung (Interference)* zum Erzeugen von Durchdringungskörpern
-  *Messen (Measure)* zum Messen von Abständen oder Winkeln
-  *Zeichnen (Trace)* zum Aufzeichnen von Geometrie während der Bewegung

Die letzte Funktionsgruppe stellt fünf Methoden zum Postprocessing zur Verfügung:

Hilfen für das
Postprocessing

-  *Animation* für die zeitabhängige Simulation
-  *Graphenerstellung (Graphing)* für das grafische Auswerten von Bewegungsgrößen
-  *Kalkulationstabelle ausfüllen (Populate Spreadsheet)* zum Bearbeiten, Weiterverwenden und Speichern von Bewegungen über Tabelleneingabe
-  *Sequenz erzeugen (Create Sequence)* speichert eine im Motion erzeugte Animation in der Masterdatei ab und macht sie somit auch von anderen Bereichen aus zugänglich
-  *Lasttransfer (Load Transfer)* zum Übertragen von Reaktionskräften aus der Kinematikanalyse in die FEM-Anwendung

2.2.1.3 Überblick über die Lösungsschritte

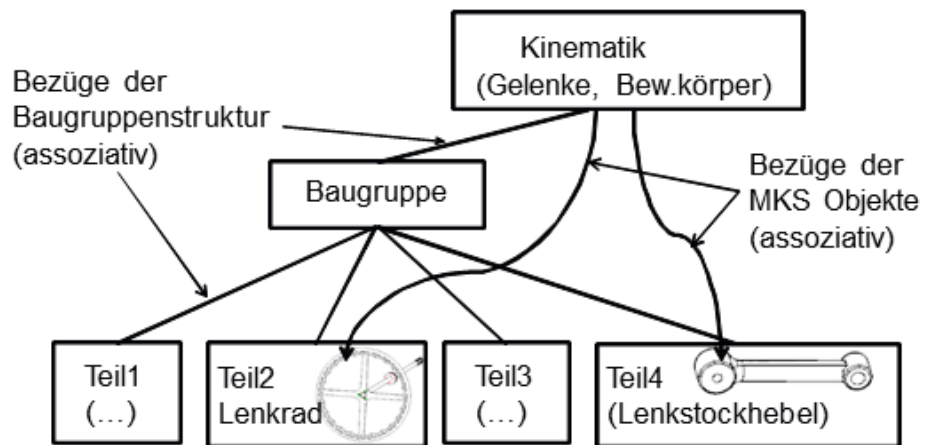
Für die Lösung dieser Lernaufgabe wird zunächst eine Motion-Simulationsdatei im NX-System angelegt. Hier werden dann anhand der Funktion *Bewegungskörper*  (*Link*) die Geometrieobjekte definiert, die beweglich sein sollen. Es folgt die Erzeugung zweier Drehgelenke, eines Getriebegelenks sowie des Antriebs am Lenkrad. Zum Finden von wesentlich unbestimmten Freiheitsgraden wird die zeitabhängige *Normale Ausführung* und zum manuellen Bewegen des Antriebs am Lenkrad die Funktion *Artikulation* eingesetzt.

Die Schritte der
Lernaufgabe

2.2.1.4 Erzeugen der Motion-Simulationsdatei


Gemäß dem Master-Model-Konzept werden alle Elemente, die zur Bewegungsanalyse anfallen (Bewegungskörper, Gelenke, Antriebe), in einer eigenen Datei (Kinematikdatei, siehe nachfolgende Abbildung) gespeichert. Diese Kinematikdatei wird über einen Baugruppenbezug mit der Baugruppendatei verbunden, d.h., die Kinematikdatei ist eine Quasi-Baugruppe, die als einzige Komponente das Baugruppenteil enthält, das analysiert werden soll. Über diese Baugruppenbezüge hinaus kommen aber noch weitere solcher assoziativen Verbindungen hinzu, denn die in der Kinematikdatei definierten Gelenk- und Bewegungskörperobjekte enthalten auch assoziative Bezüge zu den Geometrieobjekten der Einzelteile (geschwungene Pfeile in der Abbildung). Die Motion-Anwendung ist also, wie beispielsweise auch die Zeichnungserstellung, vollständig in das Master-Model-Konzept integriert.

Mithilfe des Master-Model-Konzepts wird das gesamte Produkt digital abgebildet. Intern werden Bezüge zwischen Geometrie und MKS-Gelenken gehalten.



Hier beginnt die Lernaufgabe.

Solch eine Motion-Struktur wird automatisch erstellt, indem der Anwender eine Simulation erzeugt. Dazu gehen Sie wie folgt vor:

- ✦ Laden Sie im NX-System die Baugruppe, von der Sie eine Bewegungssimulation erstellen wollen. Für unsere Lernaufgabe ist dies die Datei *ls_lenkgetriebe.prt*. Die Dateien befinden sich im *RAK2*-Verzeichnis der DVD.
- ✦ Starten Sie nun die Anwendung *Bewegung*  (*Motion-Simulation*).

In der Palettenleiste erscheint ganz oben der *Bewegungs-Navigator* (*Motion Navigator*). Dieser unterstützt die Arbeit mit der Motion-Anwendung, indem er alle Features darstellt und Möglichkeiten zu ihrer Manipulation bietet.

Der Navigator zeigt an, dass bereits eine Motion-Datei mit dem Namen *motion_1* existiert. Dabei handelt es sich um die schon fertige Lösung dieser Aufgabe. Da Sie eine eigene Lösung erzeugen werden, sollten Sie diese Datei löschen.

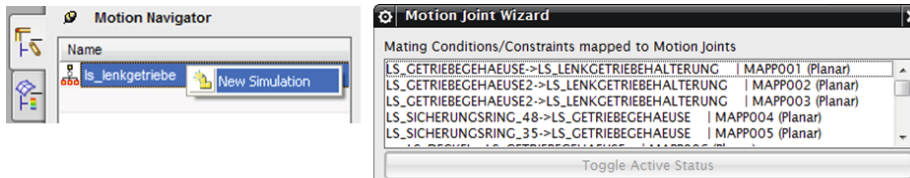
- ✦ Löschen Sie die vorhandene Simulation *motion_1*, indem Sie das Kontextmenü des Knotens aufrufen und die Funktion *Löschen* (*Delete*) ausführen.

Nun zeigt der Motion Navigator nur noch den Masterknoten an, d.h. die Baugruppe, die Sie geöffnet haben.

- ✚ Erzeugen Sie eine erste Simulation, indem Sie auf diesen Masterknoten klicken und in dessen Kontextmenü die Funktion *Neue Simulation* aufrufen.
- ✚ Bestätigen Sie das nachfolgende Menü *Umgebung (Environment)* zunächst mit OK. Wir werden später noch einmal darauf zurückkommen.

Nach diesem Funktionsaufruf erstellt das System eine Simulationsdatei, die über eine Baugruppenstruktur mit dem Master-Modell verknüpft ist.

Darüber hinaus wird automatisch die Funktion *Assistent: Kinematikverbindung (Motion Joint Wizard)* aufgerufen, die versucht, aus den vorhandenen Baugruppenverknüpfungsbedingungen (*Mating Conditions*) entsprechende Bewegungskörper (*Links*) und Gelenke (*Joints*) zu erzeugen.



Der Navigator zeigt die Struktur des Modells und erlaubt die Manipulation der Features.

Der Motion Joint Wizard setzt die Baugruppenverknüpfungen in Gelenke um.

Die Funktion *Motion Joint Wizard* analysiert jedes Verknüpfungssset bezüglich der Freiheitsgrade, die zwischen den betroffenen Baugruppenkomponenten bestehen. Besteht lediglich ein unbestimmter Drehfreiheitsgrad, so wird ein Drehgelenk (*Revolute*) erzeugt. Besteht ein unbestimmter Translationsfreiheitsgrad, so wird ein Schiebegelenk (*Slider*) erzeugt. Eine Baugruppenverknüpfung, die beispielsweise einen Punkt mit einem anderen Punkt verknüpft, wird durch den *Motion Joint Wizard* in ein kugelförmiges Gelenk (*Spherical*) übersetzt. Eine Baugruppenverknüpfung, die alle Freiheitsgrade zwischen zwei Teilen festlegt, wird in ein Festgelenk übersetzt. Auf entsprechende Weise können noch einige weitere Gelenke automatisch erzeugt werden.

Der *Motion Joint Wizard* kann daher automatisch das Motion-Modell oder Teile davon erstellen, wenn die zugrunde liegende Baugruppe derart aufgebaut wurde, dass die Verknüpfungen (*Matings*) die gewünschten Bewegungen der Teile schon beschreiben. Diese Methode kann durchaus sinnvoll sein. Allerdings sind folgende Nachteile zu berücksichtigen:

- Die vom *Motion Joint Wizard* automatisch erzeugten Gelenke (*Joints*) sind nicht assoziativ zur Geometrie, d.h., bei Änderungen am Master-Modell müssen die Gelenke manuell angepasst werden. Ein manuelles Herstellen der Assoziativität der Gelenke ist nachträglich möglich.
- Es werden nur die Baugruppenverknüpfungen der obersten Baugruppe analysiert und umgewandelt. Verknüpfungen aus den Unterbaugruppen werden nicht berücksichtigt.
- Baugruppenverknüpfungen werden meist auch für Teile eingesetzt, die hinsichtlich des Motion-Modells irrelevant sind, wie z.B. kleine Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben. Im Fall der automatischen Übersetzung durch den *Motion Joint Wizard* werden all

Vor- und Nachteile des Motion Joint Wizards

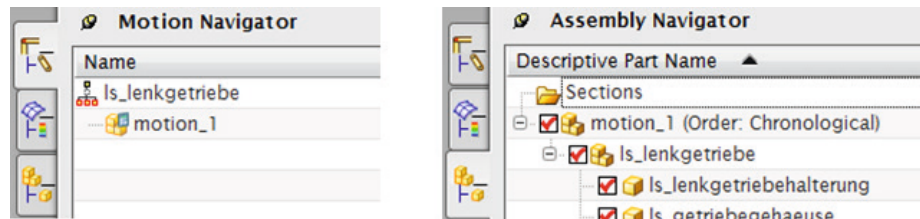
diese Teile zu Bewegungskörpern. Das Motion-Modell wird dadurch erheblich komplexer, als es sein müsste. Eine Abhilfe hierfür schafft die Möglichkeit, im *Motion Joint Wizard* einzelne Bedingungen zu deaktivieren.

Wir nutzen den Motion Joint Wizard nicht.

Aus diesen Gründen soll der *Motion Joint Wizard* für die Lösung unserer Aufgabe nicht genutzt werden.

✚ Brechen Sie den *Motion Joint Wizard* mit der Funktion CANCEL ab.

Der Motion Navigator zeigt nun eine Struktur wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



Charakteristisch für den Motion Navigator ist, dass das Motion-Modell unter dem Master-Modell dargestellt wird. Dies geschieht aus Gründen der Übersichtlichkeit, denn die zu erzeugenden Motion-Features werden im Navigator unterhalb des Motion-Modells dargestellt. Außerdem können auf diese Weise mehrere Motion-Modelle übersichtlich nebeneinander dargestellt werden.

Das Motion-Modell ist eine Quasi-Baugruppe des Master-Modells.

Das NX-System hat also automatisch eine neue Datei erzeugt, die entsprechend dem Master-Modell-Konzept mit dem Master-Modell verknüpft ist. Daher kann nun auch der Baugruppennavigator genutzt werden, um die neue Struktur darzustellen oder damit zu arbeiten. Die Abbildung rechts neben dem Motion Navigator zeigt den Baugruppennavigator, der das Motion-Modell nun als oberste Baugruppe darstellt.


Des Weiteren sollten Sie prüfen, in welchen Betriebssystemverzeichnis die neue Datei abgelegt wurde. Dazu stellen Sie im Windows Explorer den Ordner dar, in dem die Masterdatei zu finden ist. Nachfolgende Abbildung zeigt auf der linken Seite die Masterdatei *ls_lenkgetriebe.prt*, die in einem beliebigen Ordner des Betriebssystems liegt. Sobald ein Motion-Modell erzeugt wird, erzeugt das NX-System in diesem Ordner einen Unterordner, der den gleichen Namen wie das Master-Modell trägt. In diesem neuen Ordner werden alle Daten abgelegt, die für diese Motion-Simulation benötigt werden. In diesem Ordner ist nun die Datei für das Motion-Modell zu finden, die den Namen *motion_1.sim* trägt.

Die entstehenden Dateien für die Simulation werden in einem Ordner abgelegt.



Bei der nachfolgenden Simulation fallen noch weitere Dateien an, die ebenfalls in diesem Ordner abgelegt werden.

2.2.1.5 Wahl der Umgebung

Als nächster Schritt soll die Umgebung für das Motion-Modell eingestellt werden. Dies geschieht anhand der Funktion *Umgebung*  (*Environment*). Hier existieren die beiden Möglichkeiten *Kinematik* und *Dynamik*, die den eingangs erklärten Klassen der Mechanik entsprechen.

Für die Anwendung in NX Motion sind bezüglich dieser beiden Klassen ein paar Hintergründe zu beachten.

Kinematik

Kennzeichen einer kinematischen Analyse ist, dass alle Freiheitsgrade des Gesamtsystems bestimmt sind. Mit Freiheitsgraden sind die drei translatorischen sowie die drei rotatorischen Bewegungsmöglichkeiten der Bewegungskörper (*Links*) gemeint. Wenn eine kinematische Simulation durchgeführt werden soll, muss der Anwender sicherstellen, dass kein einziger der Bewegungskörper (*Link*) eine freie Bewegungsmöglichkeit hat. Alle Bewegungsmöglichkeiten müssen durch Gelenke oder Antriebe bestimmt werden.

Selbstverständlich dürfen durch Gelenke oder Antriebe auch keine Konflikte in den Bewegungsmöglichkeiten entstehen. Überbestimmungen, die nicht zu Konflikten führen, nennt man redundante Freiheitsgrade. Diese sind zwar erlaubt, aber nicht empfehlenswert, weil kleinste Ungenauigkeiten schon zu Konfliktsituationen führen können. Diese sehr kleinen Ungenauigkeiten können auch bei sorgfältigem Arbeiten auftreten, schon alleine aufgrund von Rundungsfehlern (numerischer Schmutz) während der Berechnung. Die Erfahrung hat gezeigt, dass größere Kinematikmodelle nur korrekt funktionieren, wenn sie redundanzfrei aufgebaut sind. Kleinere laufen dagegen auch mit Überbestimmungen meist problemlos.

Vorteil der kinematischen Umgebung ist, dass für die Bewegungskörper (*Links*) keine Masseeigenschaften erforderlich sind. Nachteil ist, dass der Anwender gezwungen ist, sein Bewegungssystem exakt mit null Freiheitsgraden zu erstellen. Vorher kann noch nicht einmal ein Test durchgeführt werden.

Dynamik

Kennzeichen der dynamischen Analyse ist, dass unbestimmte Freiheitsgrade bzw. Bewegungsmöglichkeiten möglich sind. Solche Bewegungen werden ermittelt, indem die Masseeigenschaften der Bewegungskörper (*Links*) sowie die äußeren Kräfte, beispielsweise die Erdbeschleunigung, mit in die Analyse einbezogen werden.

Eine dynamische Analyse ermittelt also auch dann Ergebnisse, wenn unbestimmte Freiheitsgrade vorliegen, während die kinematische in solch einem Fall abbricht. Dies ist ein Vorteil, wenn es darum geht, schon in der Modellaufbauphase, in der noch nicht alle Gelenke erzeugt sind, eine Bewegung darzustellen. Allerdings müssen dann auch für jeden Bewegungskörper (*Link*) Masseneigenschaften zugeordnet und kontrolliert werden.

Aus diesen Gründen soll für die Lösung unserer Aufgabe die dynamische Umgebung gewählt werden, obwohl eigentlich keine unbestimmten Freiheitsgrade erwünscht sind. Lediglich für den leichteren Aufbau des Modells, d.h. für das Durchführen von Tests mit

Entscheidend ist, ob auch unbestimmte Freiheitsgrade verarbeitet werden sollen.

Überbestimmte und redundante Freiheitsgrade

Dynamik erlaubt die Berechnung auch unbestimmter Freiheitsgrade.

Beschreibung der erweiterten Lösungsoptionen

noch nicht vollständiger Bestimmung der Freiheitsgrade, wird diese Methode gewählt. Am Ende kann problemlos auf die kinematische Umgebung zurückgeschaltet werden.

Des Weiteren können in der Umgebung erweiterte Lösungsoptionen (*Advanced Solution Options*) ausgewählt werden. Dazu gehören der *Motor Driver*, der einen Elektromotor anhand seiner elektrischen Parameter definiert und dem ein Signaldiagramm übermittelt werden kann, die *Co-Simulation*, die es ermöglicht, regelungstechnische Steuerungen, die mit Matlab Simulink definiert wurden, an das NX-Motion-Modell zu koppeln, sowie *Flexible Body Dynamics*, mit denen es möglich ist, nicht nur mit starren Bewegungskörpern zu arbeiten, sondern diese teilweise flexibel zu gestalten. Hierfür ist jedoch eine vorherige FEM-Analyse der entsprechenden Teile erforderlich.

Außerdem kann eingestellt werden, ob es sich um eine *Komponentenbasierte Simulation* (*Component-based Simulation*) handelt. Dies ist sinnvoll, wenn Baugruppen simuliert werden sollen. Mit dieser Option wird der Bewegungskörper-Auswahlfilter auf Komponenten voreingestellt. Dieser kann aber jederzeit manuell wieder umgestellt werden.

2.2.1.6 Definition der Bewegungskörper (Links)

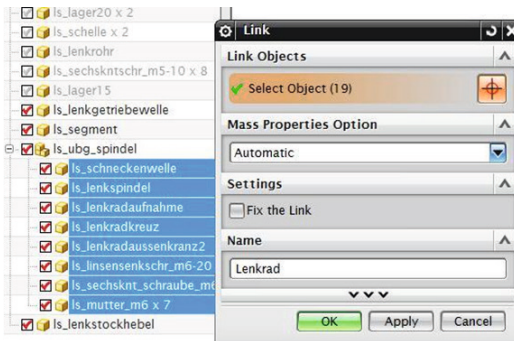
Nun werden die Bewegungskörper erstellt.

✚ Wählen Sie die Funktion *Bewegungskörper*  (*Link*).

Diese Funktion ist in der deutschen Sprachanpassung von NX mit dem Begriff *Verbindung* übersetzt worden. Da dieser Begriff sehr leicht zu Missverständnissen führt, sollte stattdessen der Begriff *Bewegungskörper* oder der englische Begriff *Link* gebraucht werden.

Zunächst soll ein Bewegungskörper definiert werden, der das Lenkrad beschreibt, daraufhin ein zweiter für den Lenkstockhebel.

Das Menü für die Erzeugung eines Bewegungskörpers



Sowohl Baugruppenkomponenten als auch Volumenkörper, einfache Kurven oder Punkte können bewegt werden.

Der erste Selektionsschritt betrifft die Auswahl der Geometrie, die zum Bewegungskörper gehören soll. Wenn nicht schon in den Umgebungseinstellungen der Filter für Komponenten gewählt wurde, sollte dieser jetzt eingestellt werden. Dies ermöglicht, später problemlos Änderungen an den Geometrieobjekten der Baugruppenteile durchzuführen, ohne dass die Bewegungskörper des Motion-Modells Gefahr laufen, ihre Referenzen zu verlieren.

✚ Nun selektieren Sie im Grafikenster die Baugruppenkomponenten, die zum Lenkrad gehören, d.h. die Teile, die sich gemeinsam mit dem Lenkrad bewegen sollen.

Gemeint sind die 19 Teile, die zu der Unterbaugruppe *ls_ubg_spindel* gehören. Zum Selektieren der Komponenten können Sie auch den Baugruppennavigator verwenden. Sie sollten jedoch nicht die Unterbaugruppe *ls_ubg_spindel* selbst selektieren, weil sich eine Unterbaugruppe später nicht mehr aus einem Bewegungskörper (*Link*) entfernen lässt.

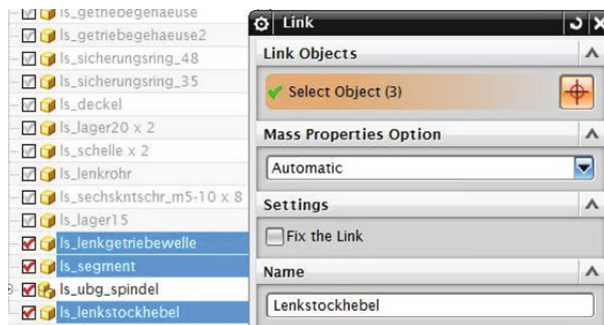
Nachdem Sie die Komponenten selektiert haben, können in den folgenden Selektionsschritten Masseneigenschaften des Bewegungskörpers definiert werden. Allerdings ist dies in diesem Fall nicht erforderlich, denn das System kann automatisch Masseneigenschaften berechnen, die auf der Geometrie und dem zugewiesenen Werkstoff bzw. der Dichte basieren. Da diese Eigenschaften hier nicht weiter interessieren, soll nicht darauf eingegangen werden und stattdessen die automatische Massenanalyse, die voreingestellt ist, genutzt werden. Daher behalten Sie die Einstellung *Automatisch* unter *Masseneigenschaften-Option* (*Mass Properties Option*) bei.

- ✚ Im Feld „Name“ sollten Sie einen geeigneten Namen, beispielsweise „Lenkrad“, eintragen.

Für den Namen von Motion-Objekten sollten keine Umlaute, Leerzeichen oder sonstigen Sonderzeichen verwendet werden.

- ✚ Mit OK oder APPLY und ABBRECHEN wird der Bewegungskörper erzeugt und im Motion Navigator unter der Gruppe *Links* dargestellt.
- ✚ Auf die gleiche Weise erstellen Sie nun den nächsten Bewegungskörper. Fügen Sie die drei Komponenten *ls_lenkstockhebel*, *ls_segment* und *ls_lenkgetriebewelle* ein, und nennen Sie den Bewegungskörper „Lenkstockhebel“.


Masseneigenschaften werden bei Volumenkörpern automatisch ermittelt.



Mit diesen Arbeiten sind nun alle Bewegungskörper definiert, die für den Mechanismus benötigt werden. Es folgt die Definition von Gelenken.

2.2.1.7 Definition von Drehgelenken

Nun definieren wir eine drehbare Lagerung zwischen dem Bewegungskörper Lenkrad und der festen Umgebung. Auf ähnliche Weise können auch andere Gelenke erzeugt werden. Gehen Sie dazu folgendermaßen vor:

- ✚ Wählen Sie die Funktion *Gelenk*  (*Joint*). Es erscheint das nachfolgend dargestellte Menü.

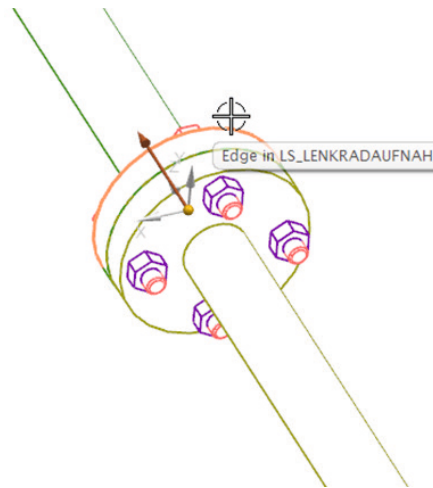
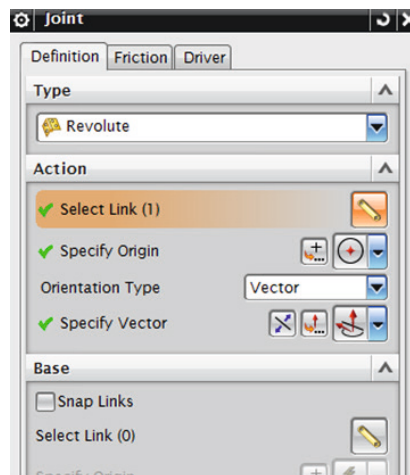
Beim Erzeugen von Drehgelenken sollte die Selektion an Kreisbögen erfolgen. Dann können Drehpunkt und Drehachse automatisch ermittelt werden.

Im oberen Bereich des Menüs kann der Typ des gewünschten Gelenks ausgewählt werden. Voreingestellt ist der Typ *Drehgelenk* (Revolute), d.h. ein Gelenk, das lediglich den Drehfreiheitsgrad unbestimmt lässt. Weil dies der gewünschte Typ ist, kann sofort mit der Abarbeitung der Selektionsschritte fortgesetzt werden.

Mit dem ersten Selektionsschritt soll der erste zu verbindende Bewegungskörper (*Link*), also das Lenkrad, angegeben werden. Prinzipiell kann das Lenkrad nun auf beliebige Weise im Grafikfenster selektiert werden, jedoch empfiehlt es sich, bei der Selektion folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Es empfiehlt sich, eine Geometrie zu selektieren, anhand der das System den gewünschten Gelenkmittelpunkt und die Drehachse ableiten kann. Dies ist beispielsweise bei einem Kreis möglich: Hierbei wird der Kreismittelpunkt der Drehpunkt und die Kreisnormale die Drehachse. Aber auch eine gerade Kante oder Kurve ist möglich: Hierbei wird der Drehpunkt der nächste Kontrollpunkt und die Drehachse die Richtung der Kante oder Kurve.
- Außerdem empfiehlt es sich, eine Geometrie zu selektieren, die in der weiteren Konstruktionsgeschichte möglichst wenigen Änderungen unterworfen wird. Denn falls die hier selektierte Geometrie einer Änderung unterworfen wird, ist nicht mehr sicher, ob das Gelenk noch assoziativ zur Geometrie ist und automatisch aktualisiert wird. Wird beispielsweise eine Kante selektiert, die später verrundet wird, so verliert das Gelenk seine Assoziativität zur Geometrie.

Am besten sollte an Kreiskanten selektiert werden. Dann kann der Mittelpunkt und die Richtung automatisch genutzt werden.



- ✦ Selektieren Sie daher einen Kreis am Lenkrad, der möglichst nicht mehr größeren Änderungen unterworfen wird.

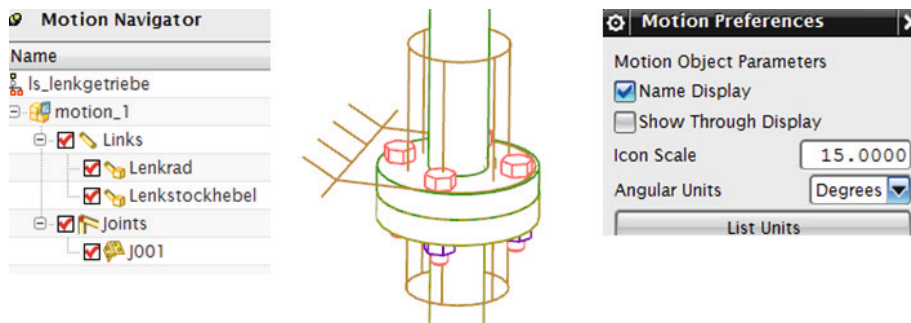
Ein Gelenk, das mit der festen Umgebung verbunden ist, kann an dem Symbol erkannt werden.

Im zweiten Schritt sollen Ursprung und Orientierung des Gelenks angegeben werden, also im Fall des Drehgelenks der Drehpunkt und die Drehachse. Weil diese beiden Informationen aber schon bei der ersten Selektion angegeben wurden, braucht diese Frage nicht mehr beantwortet zu werden.

Im dritten Selektionsschritt soll der zweite zu verbindende Bewegungskörper angegeben werden. Falls hier keine Selektion stattfindet, nimmt das System an, dass das Gelenk den ersten Bewegungskörper mit der festen Umgebung verbinden soll. Weil dies hier gewünscht ist, wird im dritten Schritt keine Selektion vorgenommen.

✚ Bestätigen Sie mit OK, woraufhin das Drehgelenk erzeugt wird.

Im Grafikfenster und im Motion Navigator wird das Gelenk nun dargestellt.

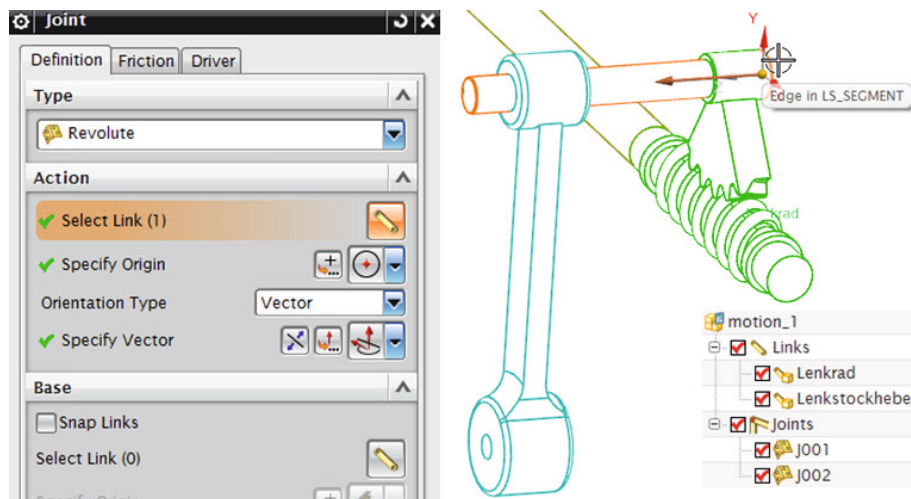


Ein Gelenk kann oft mit nur zwei Mausklicks erzeugt werden.

Falls das Gelenk sehr klein dargestellt wird, kann unter den Voreinstellungen für Motion (MAIN MENU > PREFERENCES > MOTION) die Größenangabe unter *Symbolmaßstab* (*Icon Scale*) vergrößert werden.

✚ In der gleichen Weise erstellen Sie nun ein Drehgelenk, das den Lenkstockhebel mit der festen Umgebung verbindet (siehe nachfolgende Abbildung).

Nun haben Sie einen ersten Mechanismus aus zwei Bewegungskörpern mit jeweils einem Drehgelenk zur Umgebung erstellt. Die Aufgabe ist damit noch nicht gelöst. Nachfolgend sollen deshalb einige Testläufe durchgeführt werden, die dem besseren Verständnis dienen.



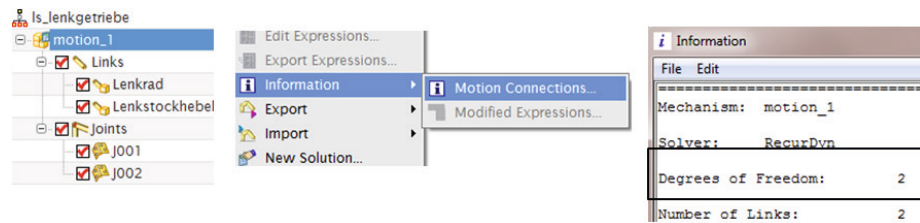
Der Lenkstockhebel wird ebenfalls mit einem Drehgelenk an der Umgebung befestigt.

2.2.1.8 Ermittlung unbestimmter Freiheitsgrade

Aufgrund des fehlenden Antriebs sowie der fehlenden Getriebeverknüpfung ist der bis dahin fertiggestellte Mechanismus noch unterbestimmt. Die Anzahl der unbestimmten Freiheitsgrade kann entweder durch Plausibilitätsbetrachtungen festgestellt werden oder durch einen Funktionsaufruf, wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt wird.

- Wählen Sie im Kontextmenü des Motion-Modells im Motion Navigator die Funktion *Information, Motion-Verbindungen (Information, Motion Connections)* aus. Im folgenden Informationsfenster erscheint die Angabe über die Anzahl der unbestimmten Freiheitsgrade des Mechanismus (*Degree of Freedom*).

Bei komplexen Mechanismen ist das Finden von unbestimmten Freiheitsgraden schwierig. Die Funktion *Information, Motion-Verbindungen (Information, Motion Connections)* hilft dabei.



In diesem Falle sind es zwei Freiheitsgrade, denn sowohl das Lenkrad als auch der Lenkstockhebel können noch frei um ihre jeweilige Achse drehen.

2.2.1.9 Testlauf mit zwei unbestimmten Freiheitsgraden

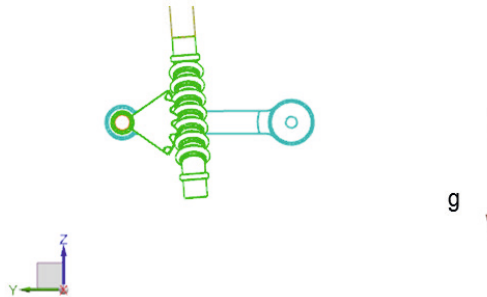
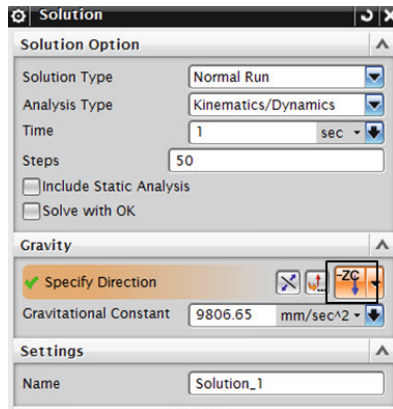
Bei einem dynamischen Lauf lassen sich unbestimmte Freiheitsgrade immer leicht erkennen.

In Fällen komplexerer Mechanismen ist es oftmals schwer, die unbestimmten Freiheitsgrade eines Mechanismus lediglich aus Plausibilitätsbetrachtungen zu erkennen. Daher soll nun mit den beiden offenen Freiheitsgraden ein Testlauf durchgeführt werden, der zum besseren Verständnis des unfertigen Mechanismus beiträgt. In vielen Fällen ist eine solche Vorgehensweise hilfreich.

- Wählen Sie die Funktion *Lösung* (Solution). Nun erscheint der Dialog zur Definition der Lösung.

In diesem Dialog werden Sie aufgefordert, den *Lösungstyp (Solution Type)* auszuwählen. Es stehen Ihnen die *Normale Ausführung (Normal Run)*, die *Artikulation* und die Option *Tabellenkalkulation ausführen (Spreadsheet Run)* zur Verfügung. Wir akzeptieren den voreingestellten Typ *Normale Ausführung*, um eine Analyse unter Berücksichtigung von Zeit und Schwerkraft durchzuführen. Des Weiteren können hier die *Simulationszeit (Time)* sowie die *Anzahl der Unterteilungen (Steps)* angegeben werden. Darüber hinaus können Sie bei *Analysetyp (Analysis Type)* wählen, ob Sie eine *bewegte Simulation (Kinematic/Dynamic Analysis)* oder eine *Analyse der statischen Gleichgewichtslage (Static Equilibrium Analysis)* durchführen möchten. Außerdem kann die Richtung und der Betrag der Erdschleunigung überprüft und geändert werden. Diese wollen wir nun anpassen:

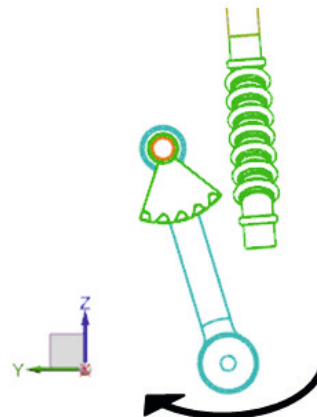
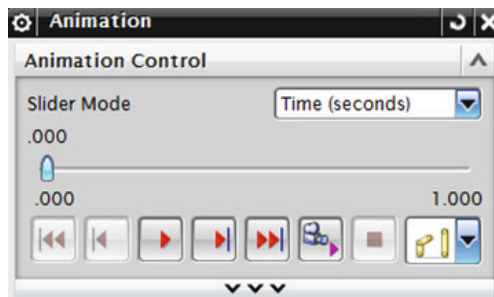
- Stellen Sie im Dialog bei *Gravitation* den Vektor auf *-ZC* und prüfen Sie die korrekte Darstellung der Pfeilrichtung.



Die Richtung der Schwerkraft ist bei unbestimmten Freiheitsgraden wichtig.

Diese Gravitationsrichtung entspricht zwar nicht der Realität, aber auf diese Weise sollte der Lenkstockhebel auf jeden Fall in Schwingungen geraten, was wir im Folgenden prüfen wollen.

- ✦ Für unser Beispiel lassen Sie alle anderen Einstellungen bestehen und wählen OK. Daraufhin wird die Lösung erstellt.
- ✦ Nachdem Sie die Lösung erstellt haben, wählen Sie die Funktion *Berechnen* (Solve). Die Berechnung sollte in kurzer Zeit abgeschlossen sein.
- ✦ Jetzt können Sie die Funktion *Animation* starten. Es erscheint das dargestellte Menü zur Darstellung der Bewegung.
- ✦ Mithilfe der Funktion *Abspielen* (Play) werden die Ergebnisse der Simulationszeit von einer Sekunde dargestellt.



Das Menü *Animation* ist für die Darstellung sämtlicher Bewegungen verantwortlich.

Es sollte erkennbar sein, dass der Hebel ungefähr eine volle Schwingung durchführt. Aufgrund der Simulation ist leicht erkennbar, dass hier noch ein unbestimmter Freiheitsgrad existiert. Der andere unbestimmte Freiheitsgrad lässt sich auf diese Weise leider nicht entdecken, weil aufgrund der symmetrischen Eigenschaften kein Grund für eine Bewegung des Lenkrads besteht.

- ✦ Brechen Sie die Animationsfunktion mit SCHLIESSEN (CLOSE) ab.

2.2.1.10 Definition eines kinematischen Antriebs

Als Nächstes wird am Lenkrad ein Antrieb definiert. Solch ein Antrieb kann für die Simulationsmethode *Normale Ausführung* sowie auch für die *Artikulation* genutzt werden. In der normalen Ausführung wird er zeitabhängig, in der Artikulation nach manueller Angabe ausgeführt.

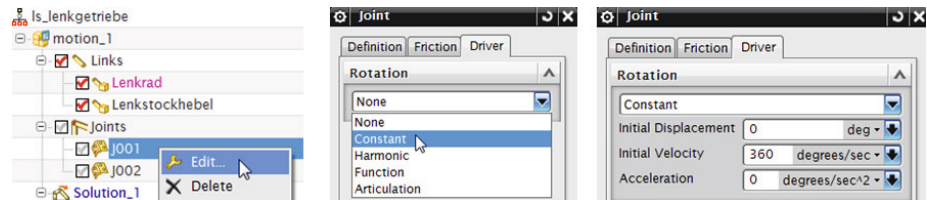
Ein Antrieb wirkt wie ein zusätzlicher Constraint.

Antriebe werden entweder direkt in den Gelenken oder über die Funktion *Fahrer (Driver)* definiert. Es ist zu bedenken, dass nicht alle Gelenke Antriebe haben können. Lediglich das Drehgelenk (Revolute), das Gelenk *Schieberegler (Slider)*, das *Zylindrische (Cylindrical)* und *Punkt auf Kurve (Point on Curve)* können mit Antrieben versehen werden. Falls andere Gelenke angetrieben werden sollen, so muss dies durch entsprechende Gelenkcombinationen realisiert werden. Im Drehgelenk wirkt der Antrieb als Drehantrieb, im Schiebегelenk entsprechend als Schiebeantrieb, und im zylindrischen ist eine Kombination aus Dreh- und Schiebeantrieb möglich. Im Folgenden wird dargestellt, wie ein Drehgelenk nachträglich mit einem Antrieb versehen werden kann.

- Wählen Sie dazu im Kontextmenü des Drehgelenks am Lenkrad die Option *Bearbeiten (Edit)* und wechseln Sie in das Register *Fahrer (Driver)*.

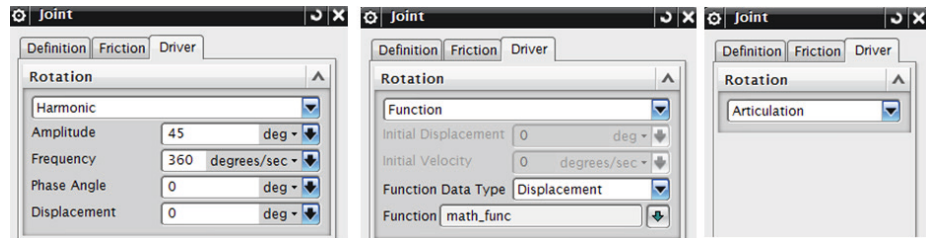
Es erscheint der Erzeugungsdialoگ des Drehgelenks. Von hier können alle Eigenschaften des Gelenks geändert werden. Unter *Fahrer (Driver)* können die nachfolgend aufgeführten Arten von Antrieben definiert werden.

Verschiedene Antriebsarten sind möglich, z.B. der Typ *Konstant*.





Der *konstante Antrieb (Constant)* führt beim Lösungstyp *Normale Ausführung* eine zeitlich konstante Bewegung bzw. Beschleunigung aus. Es können eine *Vorverstellung (Displacement)*, *Startgeschwindigkeit (Velocity)* sowie *Beschleunigung (Acceleration)* angegeben werden.

Der Typ *Harmonisch* erzeugt eine Schwingung.



Der *harmonische Antrieb (Harmonic)* führt bei der *Normalen Ausführung* eine harmonische Schwingung aus. Es können die *Schwingungsamplitude (Amplitude)*, die *Schwingungsfrequenz (Frequency)* sowie ein *Phasenwinkel (Phase Angle)* und eine *Vorverschiebung (Displacement)* angegeben werden.

Der Antrieb *Funktion (Function)* kann genutzt werden, um komplexere Funktionen mithilfe des *Funktionsmanagers*  zu definieren.

Der letzte mögliche Antrieb ist der *Artikulationsantrieb*. Dieser entspricht beim Lösungstyp *Normale Ausführung*  einer Fixierung des Freiheitsgrades, beim Typ *Artikulation* kann der Antrieb quasi manuell betätigt werden.


Alle Antriebstypen können für den Lösungstyp *Artikulation* genutzt werden. Die eingestellten Werte werden dann einfach zurückgesetzt und bleiben ohne Bedeutung. Für die visuelle Kontrolle in unserem Beispiel soll die Artikulationsfunktion genutzt werden. Daher könnte also ein beliebiger der vier Antriebe genutzt werden.

- ✚ Um für einfache Testläufe sowohl *Artikulation* als auch *Normale Ausführung* sinnvoll nutzen zu können, sollten Sie beispielsweise den konstanten Antrieb nutzen und eine Geschwindigkeit (*Velocity*) von 360 [Grad/sec] einsetzen. Stellen Sie dies entsprechend der vorangegangenen Abbildungen ein.
- ✚ Nachdem der Antrieb eingetragen wurde, verlassen Sie den Dialog mit einem Klick auf OK.

Mit diesen Einstellungen für den Antrieb wird bei einer Simulationszeit von einer Sekunde genau eine Umdrehung ausgeführt.

2.2.1.11 Erzeugung eines Zahnradpaares

Das Zahnradpaar verbindet die beiden Drehgelenke und macht ihre Drehbewegungen voneinander abhängig.

- ✚ Erzeugen Sie das Zahnradpaar, indem Sie die Funktion *Zahnradpaar*  (*Gear*) aufrufen.
- ✚ Der erste Selektionsschritt fordert Sie auf, das erste Drehgelenk zu selektieren, beispielsweise das Gelenk des Lenkrads. Sie können das Gelenk im Grafikenfenster oder auch im Motion Navigator selektieren. Nach der Selektion springt der Selektionsschritt auf die zweite Frage.
- ✚ Hier selektieren Sie das zweite Drehgelenk, also das Gelenk des Lenkstockhebels.
- ✚ Unter *Rate (Ratio)* tragen Sie das gewünschte Über- oder Untersetzungsverhältnis ein. Für unser Beispiel tragen Sie hier $0,25$ ein.
- ✚ Bestätigen Sie mit OK. Das Gelenk wird nun erzeugt.



HINWEIS: Das Gelenk *Zahnradpaar (Gear)* hat leider folgende Einschränkung: Es kann nur dann erzeugt werden, wenn die beiden Drehgelenke die gleiche Basis haben. Mit der Basis eines Drehgelenks ist der Bewegungskörper gemeint, der bei der Erzeugung des Gelenks als zweiter Körper gewählt wurde. In Fall unseres Beispiels handelt es sich hierbei um die Umgebung.

Der Typ *Funktion* erlaubt den Zugriff auf erweiterte Funktionen.

Artikulation ist ein besonderer Antrieb. Hiermit kann quasi ferngesteuert bewegt werden.

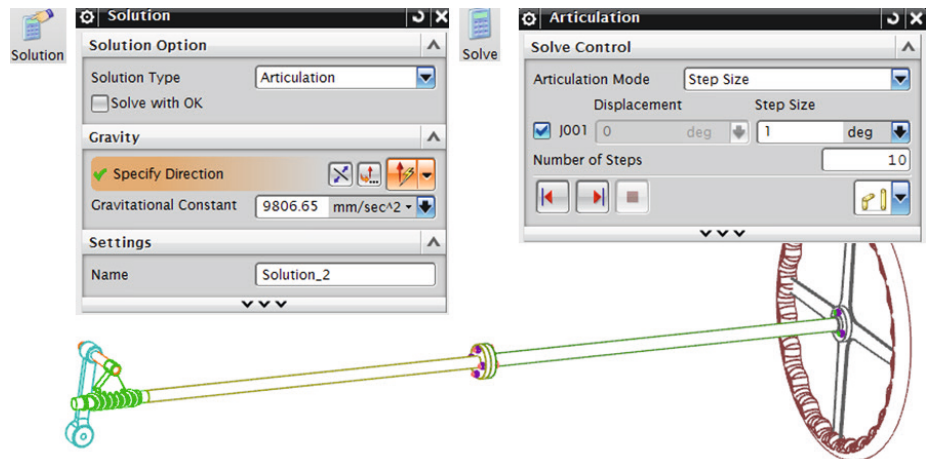
Zwei Drehgelenke können über ein Getriebe-gelenk verbunden werden.

2.2.1.12 Visuelle Kontrolle durch Nutzung der Artikulation

Nachdem das Motion-Modell vollständig erstellt wurde, kann es mithilfe der Artikulationsfunktion manuell bewegt werden.

- ✚ Dazu erzeugen Sie eine neue Lösung und wählen als *Lösungstyp (Solution Type)* die Option *Artikulation*. Bestätigen Sie daraufhin mit OK.
- ✚ Wählen Sie jetzt *Berechnen (Solve)* aus. Nun erscheint der in der nachfolgenden Abbildung dargestellte Dialog.

Die Funktion *Artikulation* eignet sich gut für die Kontrolle von Bewegungsabläufen.



Dabei kann schrittweise vor- und rückwärts gefahren werden.

- ✚ Um den einzigen Antrieb des Modells manuell zu bewegen, schalten Sie zunächst den Schalter für das Gelenk *J001* ein.
- ✚ Dann geben Sie die gewünschte *Schrittgröße (Step Size)* an, beispielsweise 1 Grad.
- ✚ Anhand der Knöpfe und können Sie den Antrieb nun schrittweise vorwärts oder rückwärts bewegen.
- ✚ Mit *Anzahl Schritte (Number of Steps)* können Sie angeben, dass bei jedem Mausklick auf oder mehrere Schritte ausgeführt werden.
- ✚ Mittels dieser Funktion kann nun die in der Aufgabenstellung gewünschte visuelle Kontrolle des Mechanismus durchgeführt werden.
- ✚ Brechen Sie die Artikulationsfunktion mit SCHLIESSEN (CLOSE) ab.
- ✚ Speichern Sie die Datei.
- ✚ Verlassen Sie die Motion-Simulation, indem Sie im Motion Navigator auf dem Masterknoten *Is_Jenkgetriebe* die Funktion *Als Arbeit festlegen (Make Work)* ausführen und danach in die Anwendung *Konstruktion (Modeling)* schalten.

Damit ist die erste Lernaufgabe zur Bewegungssimulation fertiggestellt.