

**Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften**

# **DISSERTATION**

zur  
Erlangung der Würde eines

**Doktors der technischen Wissenschaften  
(Dr. techn.)**

**Prozessoptimierte Simulationstechnik für die  
Fahrwerksentwicklung von Nutzfahrzeugen**

Vorgelegt von: Dipl.-Ing. Jan Fleischhacker  
geboren am: 16. Dezember 1977 in München

1. Begutachter: Univ.-Prof. Dr. techn. Dipl.-Ing. Wolfgang Hirschberg  
2. Begutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing



Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand in der Vorentwicklung der MAN Nutzfahrzeuge AG in München und am Institut für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Graz zwischen Januar 2007 und Juni 2010.

An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-techn. Dipl.-Ing. Wolfgang Hirschberg, Leiter des Instituts für Fahrzeugtechnik an der TU Graz, der mich jederzeit mit seinem wissenschaftlichen und persönlichen Rat begleitet hat und durch seine Förderung sowie die gewährten Freiräume maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Für die Übernahme des Korreferates möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing, Leiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München, recht herzlich bedanken.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich meinen Vorgesetzten bei MAN, Herrn Dipl.-Ing. Eberhard Hipp, Herrn Dipl.-Ing. Gerald Lexen, Herrn Dr.-Ing. Rolf Döbereiner und insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Thomas Ille, die diese Dissertation in einem praxisnahen Umfeld erst ermöglicht haben und mich zu jeder Zeit fachlich wie auch persönlich unterstützt haben. Die vielen Einblicke, fachlichen Diskussionen und Anregungen haben sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen der Vorentwicklung, die mich herzlich aufgenommen haben und mir immer mit fachlichem Rat behilflich waren. Besonders danken möchte ich an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. Stefan Litter für die zahlreichen EDV-technischen Diskussionen und die Hilfe bei der Implementierung. Vielen Dank.

Ebenso gilt mein Dank allen Kollegen am Institut für Fahrzeugtechnik und den Fachabteilungen der MAN für die Unterstützung während dieser Arbeit. Ihre Ratschläge und Bereitschaft zu vertiefenden Diskussionen haben sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich jederzeit bei persönlichen wie auch beruflichen Entscheidungen unterstützt haben. Für Ihre Geduld, die moralische Unterstützung und die Korrekturlesung danke ich herzlich meiner Frau Claudia, die zu jeder Zeit Verständnis für meine Arbeit gezeigt hat. Vielen Dank.

München, im Juni 2010

Jan Fleischhacker

## **Kurzfassung**

Ziel dieser Dissertation ist die Weiterentwicklung der Fahrwerkssimulationsprozesse eines großen Nutzfahrzeugherstellers durch prozedurale, methodische und unternehmensübergreifende Maßnahmen. Aufgrund des heute üblichen Produktportfolios, das durch die Forderungen der Kunden und Gesetzgeber über variantenreiche Fahrzeugkonfigurationen mit bis zu fünf Achsen je Fahrzeug in unterschiedlichen Einbauvarianten gebildet wird, ist eine Optimierung der Entwicklungsmethoden und -prozesse erforderlich. Hierzu erfolgt, nach einem Überblick über die Gegebenheiten der Nutzfahrzeugbranche, eine Analyse bestehender Entwicklungsprozesse, Workflows und Methoden, auf deren Basis Verbesserungspotentiale herausgearbeitet werden. Darauf aufbauend wird ein Optimierungsansatz entwickelt, der neben den Methoden und Prozessen auch das Produkt "Nutzfahrzeug" sowie das menschliche Handeln berücksichtigt und die Grundlage für ein ganzheitliches Konzept zur virtuellen Entwicklung liefert. Abschließend erfolgt eine Betrachtung der praxisgerechten Umsetzung sowie der methodischen Grenzen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind direkt in die Entwicklung bei MAN Nutzfahrzeuge eingeflossen und zeigen, dass bei einer Anpassung der computergestützten Entwicklungsmethoden und -prozesse eine Verbesserung der Fahrwerkentwicklung erzielt werden kann.

## **Abstract**

The aim of this doctoral thesis is the further development of methods, procedures and workflows in a commercial vehicle's chassis and suspension simulation processes. Depending on today's common product portfolios, which are defined by customers and law demands and causing vehicle configurations up to five axles per vehicle in different assembly layouts, it is necessary to optimize development methods and processes. Therefore, after an overview of the commercial vehicle sector, an analysis of the existing development processes, workflows and methods is provided to identify advanced capabilities. Based on this breakdown, an improvement approach is developed that incorporates the "commercial vehicle" as a product besides methods and processes as well as the human footprint and is the foundation for an integrated virtual development concept. Finally the practical implementation and methodically limitations are reviewed. The results of this work flew into the development of MAN Nutzfahrzeuge and showed that an improvement of the chassis and suspension development can be achieved by adapting the computer-aided development.

## Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAPE	Computer Aided Process Engineering
CASE	Computer Aided Software Engineering
CAT	Computer Aided Testing
CEE	Cross Enterprise Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
CM	Configuration Management
CRM	Customer Relationship Management
DAE	Differential Algebraic Equation
DBMS	Database Management System
DCL	Data Control Language
DDL	Data Definition Language
DGL	Differentialgleichung(en)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLL	Dynamic Link Library
DML	Data Manipulation Language
DMU	Digital-Mock-Up
EDM	Engineering Data (Dokument) Management
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EPK	Ergebnisgesteuerte Prozesskette
ERP	Enterprise Resource Planning
FDV	Finite Differenzen Verfahren
FEM	Finite Elemente Methode
FVV	Finite Volumen Verfahren
GUI	Graphical User Interface

HIL	Hardware in the Loop
IPDM	Integriertes Produktdatenmodell
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
KSW	Kundensonderwünsche
LCA	(ENOVIA) Lifecycle Applications
LOD	Level of Detail (Detaillierungstiefe)
MAN	MAN Nutzfahrzeuge AG
MKS	Mehrkörpersimulation
NFZ	Nutzfahrzeug
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
OLAP	Online Analytical Processing (Datenbankanalyse)
PDM	Produktdatenmanagement
PE	Produktentwicklung
PEP	Produktentstehungsprozess
PKW	Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management
ROI	Return on Investment (Kapitalrendite)
SCM	Supply Chain Management
SDM	Simulationsdatenmanagement
SDMS	Simulationdatenmanagementsystem
SE	Simultaneous Engineering
SOP	Start of Production (Produktionsstart)
SQL	Structured Query Language (Datenbanksprache)
TDM	Team Data Management System
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VPT	Virtueller Prototyp

VR

Virtuelle Realität

WZ

Wankzentrum/Wankpol

XML

Extensible Markup Language

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzungen . . . . .	2
1.1.1	Forschungsfrage . . . . .	2
1.1.2	Einordnung der Arbeit . . . . .	3
1.1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
1.2	Nutzfahrzeugindustrie und Umfeld . . . . .	4
1.2.1	Nutzfahrzeugmarkt und Transportwirtschaft . . . . .	5
1.2.2	Produktlebenszyklus . . . . .	5
1.2.3	Nutzfahrzeugmarkt . . . . .	8
1.2.4	Transportgewerbe . . . . .	10
1.2.5	Fahrzeugkategorisierung und technische Aspekte . . . . .	13
1.3	Komplexität . . . . .	16
1.3.1	Komplexität im Nutzfahrzeug . . . . .	19
1.3.1.1	Produktkomplexität im Nutzfahrzeugfahrwerk . . . . .	20
1.3.1.2	Prozesskomplexität in der Nutzfahrzeugentwicklung . . . . .	21
1.3.2	Komplexitätsmanagement . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Stand der Technik - Fahrwerksentwicklung</b>	<b>26</b>
2.1	Produktentwicklungsprozess . . . . .	26
2.1.1	Prozesse und Workflows in der Fahrzeugentwicklung . . . . .	30
2.1.1.1	Workflowsysteme . . . . .	33
2.1.1.2	Grauzonen des Entwicklungsprozesses aus Sicht der CAE . . . . .	34
2.1.2	Umgang mit Informationen und Wissen im PEP . . . . .	36
2.1.2.1	Wissensmanagement . . . . .	39
2.1.2.2	Instrumente des Wissensmanagements . . . . .	42
2.2	Entwicklungsmethode Versuch . . . . .	44
2.3	Entwicklungsmethode CAx . . . . .	45
2.3.1	Finite Elemente Methode - FEM . . . . .	49
2.3.2	Mehrkörpersimulation - MKS . . . . .	51
2.3.3	Computational Fluid Dynamics - CFD . . . . .	52
2.3.4	Sonstige Simulationsmethoden . . . . .	52
2.3.5	Gekoppelte Simulationen . . . . .	53
2.4	Trends in der automobilen Entwicklung . . . . .	54

2.4.1	Kooperation im Entwicklungsprozess . . . . .	55
2.4.2	Parallelisierung von Entwicklungsprozessen . . . . .	55
2.4.3	Vorverlagerung der Entwicklung . . . . .	57
2.4.4	Zusammenfassung . . . . .	58
2.5	Daten- und Informationstechnik . . . . .	59
2.5.1	Grundlagen . . . . .	59
2.5.1.1	Datenbankmodell . . . . .	59
2.5.1.2	Datenmanipulation . . . . .	61
2.5.2	PDM und PLM . . . . .	62
2.5.2.1	Funktionen von PDM-Systemen . . . . .	64
2.5.2.2	Notwendigkeit des Datenmanagements . . . . .	70
2.5.2.3	Herausforderungen des Datenmanagements . . . . .	70
2.5.2.4	Implementierung von PDM/PLM-Systemen . . . . .	72
2.5.3	Sicht auf die Produktdaten . . . . .	74
2.5.4	Simulationsdatenmanagement . . . . .	77
2.5.4.1	Notwendigkeit für Simulationsdatenmanagement . . . . .	77
2.5.4.2	Wechselwirkungen CAD-CAE-Daten . . . . .	78
2.5.4.3	Spezifikation SimPDM . . . . .	79
2.5.4.4	Workflows für MKS . . . . .	80
2.5.4.5	Fazit . . . . .	81
2.6	Technische Lösungen in der NFZ-Entwicklung . . . . .	82
2.6.1	Achseinbauten . . . . .	82
2.6.2	Lenkungseinbauten . . . . .	85
2.6.3	Baukastenlogik . . . . .	89
<b>3</b>	<b>Potentiale im Nutzfahrzeug-PEP</b>	<b>92</b>
3.1	Analyse des Entwicklungsprozess . . . . .	92
3.1.1	Grundlagen der Prozessanalyse . . . . .	92
3.1.1.1	Häufigkeit . . . . .	93
3.1.1.2	Dimension . . . . .	93
3.1.1.3	Auslösung . . . . .	94
3.1.2	Prozessmodellierung . . . . .	94
3.1.3	Beispielprozesse der Nutzfahrzeugentwicklung . . . . .	97
3.1.3.1	Entwicklungsprozess des Achseinbaus . . . . .	104
3.1.3.2	Lenkungsentwicklungsprozess . . . . .	111
3.1.4	Periodizität im Nutzfahrzeug-Entwicklungsprozess . . . . .	118
3.1.5	Fazit . . . . .	118
3.2	Toleranzpotentiale . . . . .	119
3.2.1	Toleranzbandberechnung Kippverhalten . . . . .	119
3.2.2	Fazit . . . . .	122
3.3	Schnittstellenpotentiale . . . . .	123

3.3.1	Potentiale zwischen CAD und CAE . . . . .	123
3.3.2	Potentiale innerhalb der CAE . . . . .	124
3.4	Wissensmanagement . . . . .	125
3.4.1	Wissen sammeln . . . . .	126
3.4.2	Wissen verbreiten . . . . .	127
3.5	Potentiale durch Komplexitätsmanagement . . . . .	128
<b>4</b>	<b>Optimierungsansätze in der Fahrwerksentwicklung</b>	<b>130</b>
4.1	Workflow- und Methodenoptimierung . . . . .	131
4.1.1	Simulationsworkflow . . . . .	132
4.1.2	Entwicklungsworkflow . . . . .	133
4.1.3	Identifikation von Schlüsselprozessen . . . . .	137
4.1.3.1	Achseinbauentwicklungsprozess . . . . .	138
4.1.3.2	Lenkungsentwicklungsprozess . . . . .	138
4.2	Menschliches Handeln optimieren . . . . .	139
4.3	Komplexitätshandling . . . . .	140
4.3.1	Produktkomplexität optimieren . . . . .	140
4.3.2	Prozesskomplexität optimieren . . . . .	141
4.4	Voraussetzungen für die Optimierungsansätze . . . . .	142
4.4.1	Darstellung der aktuellen CAE-Situation . . . . .	142
4.4.2	Datenversorgung . . . . .	145
4.4.2.1	Methode zur Datenbereitstellung . . . . .	145
4.4.2.2	Prozess zur Datenbereitstellung . . . . .	148
4.4.3	Bewertungsmethodik . . . . .	149
4.5	Risiken der Optimierung . . . . .	150
4.5.1	Risiken der Datenpflege . . . . .	151
4.5.2	Grenzen der Workflow-Automatisierung . . . . .	151
4.5.3	Risiko der Kreativitätsbehinderung . . . . .	152
4.5.4	Risiko von Simulationen durch „Non-Expert Users“ . . . . .	152
<b>5</b>	<b>Ableitung eines Konzepts für optimierte Entwicklungsprozesse</b>	<b>154</b>
5.1	Konzept zur Datenversorgung . . . . .	154
5.1.1	Virtuelle Abbildung des Fahrzeugs . . . . .	155
5.1.2	Stücklistenkopplung . . . . .	156
5.1.3	Datendefinitionstabellen . . . . .	157
5.2	Konzept zur Bereitstellung von CAE-Werkzeugen . . . . .	158
5.2.1	Bereitstellung über Code Export . . . . .	159
5.2.2	Verfügbarkeit im Unternehmen . . . . .	160
5.3	Datenverbundkonzept . . . . .	161
5.3.1	Kopplung der CAE an die Produktdaten . . . . .	162
5.3.2	Steuerung der CAE über Datenbanken . . . . .	163

5.3.3	Kopplung der CAE an die Bewertungskriterien . . . . .	164
5.3.4	Ergebnisverwaltung . . . . .	166
<b>6</b>	<b>Umsetzung des Konzepts</b>	<b>167</b>
6.1	Simulationsplattform . . . . .	168
6.2	Simulationsdaten-Managementsystem - SDMS . . . . .	171
6.2.1	Architektur . . . . .	171
6.2.2	Basisfunktionen . . . . .	172
6.2.3	Berechnungslogik . . . . .	174
6.2.4	Mapping von Daten . . . . .	175
6.2.5	PDM-Schnittstelle . . . . .	177
6.2.6	Userverwaltung . . . . .	177
6.2.7	Fazit . . . . .	178
6.3	Anwendungsfälle für die CAE-Tools . . . . .	178
6.3.1	Lenkung . . . . .	179
6.3.2	Achseinbau . . . . .	183
6.4	Zukünftige Anwendungsfälle . . . . .	188
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>189</b>
7.1	Nutzen der Methode . . . . .	189
7.2	Empfehlungen für die weitere Entwicklung . . . . .	193
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>202</b>

# 1 Einleitung

Der Entwicklungsprozess technischer Produkte ist in den letzten Jahren immer wieder in den Fokus der Forschung gerückt worden, da globalisierte Märkte einen permanenten Druck auf die Produkteigenschaften und in Folge auch auf die beteiligten Unternehmen ausüben, die sich heute üblicherweise aus OEM, Zulieferern und Dienstleistern zusammensetzen. Neben den zeitlichen und finanziellen Aspekten müssen überdies hohe qualitative Anforderungen erfüllt werden. In der Fahrzeugindustrie sind hier drei wesentliche Trends beobachtbar, die primär einen immer schnelleren Entwicklungsprozess bei gesteigerter Qualität gefordert haben, um Marktvorteile durch „First to Market“ Strategien vor allem in den diversifizierten Marktsegmenten zu erzeugen. Dieser zweite Trend zur Besetzung aller Marktsegmente durch Nischenfahrzeuge impliziert unter der Voraussetzung gleichbleibender Entwicklungsmannschaften eine Kapazitätssteigerung der Produktentwicklung (PE), da mit weniger Einheiten Entwicklungskosten amortisiert werden müssen. Der dritte Trend, der in den letzten Jahren beobachtet werden konnte, steht im Widerspruch zu den Qualitäts- und Diversifikationstrends und basiert primär auf dem Kostenfaktor. Hier können zunehmend Billigfahrzeuge aus Fernost beobachtet werden, die in den qualitativ hochwertigen europäischen Markt drängen.

Aus diesen Gründen haben sich im letzten Jahrzehnt Entwicklungsmethoden wie Front Loading, Simultaneous Engineering (SE) und Cross Enterprise Development durchgesetzt, um diese Entwicklungsaufgaben besser und schneller zu bearbeiten. Notwendige Voraussetzung für fast alle Entwicklungsmethoden ist eine, in möglichst großen Anteilen durchgeführte, „Virtuelle Produktentwicklung“ durch computergestützte Methoden (CAx), da diese den zeitaufwändigen, teuren Aufbau realer Prototypen verringern und maßgeblich am Entwicklungserfolg beteiligt sind. Bei einer differenzierteren Betrachtung der Fahrzeugindustrie, die in Folge in PKW- und Nutzfahrzeugindustrie (NFZ) gegliedert sei, wird schnell klar, dass an einigen Stellen ähnliche Voraussetzungen durch Wettbewerber und die Internationalisierung der Märkte herrschen, in vielen Details aber auch gravierende Unterschiede ersichtlich werden. So ist der Kostendruck im NFZ-Bereich und folglich der finanzielle Spielraum für die Entwicklung sehr viel ungünstiger als im PKW-Sektor, dessen Produkte nicht nur zur Erfüllung einer Transportaufgabe erworben werden und Käufer bereit sind für den emotionalen Anteil des Produktes Geld auszugeben. Der Nutzfahrzeugmarkt ist bis auf wenige Ausnahmen geprägt von Business-to-Business-Geschäften, die auf betriebswirtschaftlicher Ebene eher mit anderen Investitionsgüterindustrien als mit der PKW-Industrie vergleichbar sind. Konsequenz daraus ist, dass der

Kundennutzen und dadurch auch die Preisbildung immer direkt von Faktoren wie Effizienz und Zuverlässigkeit abhängig sind, was für die Entwicklungsprozesse eine möglichst zielführende und effektive Abhandlung notwendiger Auslegungsaufgaben unter gegebenen Randbedingungen bedeutet. Der Kundennutzen spiegelt sich im Fahrwerksbereich deshalb primär durch verschleißoptimierte Auslegungen und sicheres Fahrverhalten wider, zu dessen Realisierung idealerweise eine virtuelle Produktentwicklung genutzt wird. Diese, verschiedenste CAE-Methoden einschließende, virtuelle Entwicklung kann aber aufgrund der sehr großen Varianz der Nutzfahrzeugfahrwerke nicht über konventionelle, in der PKW-Industrie übliche, Berechnungs- und Simulationsmethoden abgebildet werden, so dass hier neue methodische Ansätze notwendig sind. Haupttreiber dieser Varianz ist die funktionelle Erfüllung der Transportaufgabe, die geprägt ist durch unterschiedliche Massen, Schwerpunktlagen, Volumen und Aggregatzustände der Ladung und die eine große Anzahl an Fahrwerksvarianten erforderlich macht. Neben unterschiedlichsten Federungssystemen, Radstandsvarianten, Einbauarten und Lenkungsvarianten spielt vor allem die Stabilisierung der Ladung, respektive des Fahrzeugs eine zentrale Rolle zur sicheren Beherrschung der Transportaufgabe. Überdies erfordert die Transporteffizienz eine möglichst verschleißfreie Führung und Anlenkung der Räder, so dass eine Analyse genannter Kriterien in möglichst vollständiger Kombinatorik notwendig erscheint.

## 1.1 Zielsetzungen

### 1.1.1 Forschungsfrage

Für die Gestaltung dieser Arbeit stellt sich eine zentrale Forschungsfrage:

*„Kann der Nutzfahrzeug-Fahrwerksentwicklungsprozess eines großen OEM mit neuen ganzheitlichen methodischen Ansätzen bezüglich der zeitlichen, qualitativen und finanziellen Randbedingungen optimiert im Sinne von verbessert werden?“*

Diese Frage lässt sich wie folgt erweitern:

1. Welche Werkzeuge stehen im Entwicklungsprozess zur Verfügung und wie kann man deren Einsatzzeitpunkt und -ort optimieren?
2. Welche Prozessschritte der Fahrwerksentwicklung können bezüglich der Entwicklungsdauer und -qualität optimiert werden?
3. Wie können Werkzeuge und Prozesse optimal verknüpft werden?

Zur Beantwortung der Fragestellungen soll eine Ursachenanalyse der Nutzfahrzeugbranche im Allgemeinen und eine unternehmensspezifische Analyse bei der MAN Nutzfahrzeuge AG (MAN) erfolgen, aus denen Ansätze und in Folge Optimierungskonzepte abgeleitet werden.

### **1.1.2 Einordnung der Arbeit**

Vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur virtuellen Entwicklung von Nutzfahrzeugfahrwerken und richtet sich an all jene, die sich Gedanken über die Verbesserung von Entwicklungsprozessen machen und mit ähnlicher Produktstruktur und hoher Varianz Serienentwicklungen durchführen müssen. Kapitel 5 leitet aus den bestehenden Randbedingungen des Marktes und der firmenspezifischen Situation bei MAN ein ganzheitliches Konzept für den, aus der momentanen Sicht optimalen, Produktentwicklungsprozess ab. Kapitel 6 beschreibt die technische Implementierung des Konzeptes und beschreibt den informationstechnischen Aspekt.

### **1.1.3 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Hauptteile gegliedert. Teil eins setzt sich aus einer Analyse des Stands der Technik und einer Umfeldanalyse zusammen und basiert primär auf einer Literaturrecherche. Hier wird zum einen die aktuelle Situation der Nutzfahrzeugindustrie sowie des Umfelds dargestellt und zum anderen eine ganzheitliche Betrachtung von Produktenstehungsprozessen, CAx-Methoden sowie der zugrundeliegenden informationstechnischen Randbedingungen durchgeführt. Teil zwei der Arbeit beinhaltet eine deskriptive Studie der Nutzfahrzeugentwicklung, die sowohl das Mittel der literatur- als auch der interviewbasierten Recherche nutzt, um die aktuelle Situation im Unternehmen darzustellen. Auf diese Weise konnte ein bis dato nicht dokumentiertes, aber angewandtes Prozessmodell abgeleitet werden, auf dessen Basis im dritten Teil der Arbeit Optimierungsansätze abgeleitet werden konnten. Aus den Voraussetzungen für die Potentialnutzung wurde schließlich ein Konzept zur prozessoptimierten Fahrwerksentwicklung im vierten, präskriptiven Teil abgeleitet, das im letzten validierenden Teil der Arbeit über eine informationstechnische Umsetzung verifiziert werden konnte. Eine Betrachtung von ausgewählten Use-Cases findet sich abschließend im Anhang der Arbeit. Nachfolgende Abbildung erläutert die Gliederung der Arbeit grafisch.



Abb. 1.1: Aufbau der Arbeit

## 1.2 Nutzfahrzeugindustrie und Umfeld

Die Voraussetzung für die Optimierung von Entwicklungsprozessen in der Fahrwerksentwicklung von Nutzfahrzeugen ist neben dem Prozessverständnis die Kenntnis über technische Randbedingungen der Branche und des Marktumfeldes. Notwendig ist ein ganzheitlicher Überblick, der die Entstehung der technischen Lösungen erklärt. Hierfür ist eine Betrachtung sowohl des Fahrzeugs als auch des Marktes über den Fahrwerksbereich hinaus notwendig, da nur so Abhängigkeiten erkannt werden, die z.B. die regionalen Unterschiede und Einsatzzwecke aufzeigen, die später für die Auslegung und Bewertung

von konstruktiven Varianten notwendig sind.

### 1.2.1 Nutzfahrzeugmarkt und Transportwirtschaft

Nutzfahrzeuge im Gegensatz zu PKW werden vom Käufer, der in den meisten Fällen nicht der Fahrer ist, als wirtschaftliches Investitionsgut gesehen. Aus Sicht eines Fahrzeugherstellers handelt es sich daher in fast allen Fällen um Business-to-Business Geschäfte. Das Fahrzeug dient dem Käufer primär zur Steigerung seiner eigenen Wirtschaftsleistung, respektive seiner Transportdienstleistung [Rah07]. Aus diesem Grund existieren in der Nutzfahrzeugentwicklung enge Randbedingungen bezüglich der konstruktiven und funktionalen Gestaltungsfreiräume, die zusätzlich noch durch den Gesetzgeber determiniert werden. Innovationen beschränken sich zumeist auf eine Optimierung der Wirtschaftsleistung des Nutzers sowie auf die Fahrzeugzuverlässigkeit und Sicherheit. Effiziente Fahrzeuge werden über möglichst geringe Betriebskosten erzielt, die einerseits die primären Kosten wie z.B. Kraftstoff oder Maut einschließen, aber auch einen nicht unerheblichen Anteil an Sekundärkosten wie Verschleiß und Wartung beinhalten. Die Verfügbarkeit des Nutzfahrzeugs als dritte große Kostensäule ist neben den Anschaffungskosten ausschlaggebend für die erzielbare Wirtschaftsleistung. Schließlich muss für die Primärkosten des Fahrzeugs nicht nur der Fahrzeugpreis an sich, sondern auch der Preis für den Aufbau Berücksichtigung finden. Dieser wiederum richtet sich nach dem Aufbauhersteller sowie dessen Interaktion mit dem Fahrzeug-OEM. Konkret sind spezielle Aufbauten mit bestimmten Fahrzeugherstellereombinationen kostengünstiger, da eine bessere Datenbereitstellung die Aufbauherstellerprozesse vereinfacht.

Eine Effizienzsteigerung muss demzufolge nicht nur auf System- oder Komponentenebene des Fahrzeugs erfolgen, sondern sehr früh im Entwicklungsprozess beginnen, um die Kostensäule „Anschaffung“ zu minimieren. Speziell im Bereich von Herstellern mit ähnlichen Kostenstrukturen bei ähnlichen Fahrzeugklassen ist so ein Wettbewerbsvorteil erzielbar. Unberücksichtigt sollte auch nicht die oben erwähnte Bereitstellung von technischen Fahrzeugdaten und Berechnungen bleiben, da auf diese Weise über den Aufbauhersteller Kostenvorteile erzielt werden können.

So lassen sich für die unterschiedlichen Prozesse der Produktentwicklung verschiedenste Teilbereiche ableiten, in denen systematische Eingriffe Optimierungspotentiale eröffnen, die entweder zur Steigerung der eigenen Gewinnmargen genutzt werden können, oder aber als Kundenvorteil weitergegeben werden können und so Wettbewerbsvorteile ermöglichen.

### 1.2.2 Produktlebenszyklus

Ausschlaggebend für konstruktive Gestaltungsfreiräume sind neben den gesetzlichen Randbedingungen die nutzungsbedingten Anforderungen an ein Produkt. So muss über

die Lebensdauer hinweg jederzeit ein sicheres Betriebsverhalten mit einer hohen Verfügbarkeit gewährleistet werden können, da Nutzungsausfälle im gewerblichen Güter- und Personenverkehr z.B. aufgrund nicht unerheblicher Konventionalstrafen bei „Just in Time“- oder „Just in Sequence“-Transporten gewinnmindernd wirken. Neben den Randbedingungen des Marktes wird eine Entwicklung durch den Produktlebenszyklus vor große Anforderungen gestellt, da im Extremfall, oder wie in der Luftfahrtindustrie üblich, der gesamte Lebensdauerbereich in Realität nachempfunden werden muss. Dabei kann eine Funktional- sowie eine Lebensdauerabsicherung virtuell über Simulation, Prüfstände oder Versuche erfolgen, die jeweils in unterschiedlicher Aussagekraft und mit zeitlichem wie finanziellem Aufwand verbunden sind [Hai06]. Bei bestehenden Lastkollektiven kann, wie in der Fahrzeugentwicklung üblich, eine Raffung des Lebenszyklus erfolgen, indem die Versuche vor allem in den schädigenden Bereichen stark überzeichnet werden und virtuell oder auf Prüfständen nachempfunden werden [Mai07]. Speziell in der Nutzfahrzeugentwicklung ist diese Methode aus aktueller Sicht notwendig, da abgesicherte Lebensdaueruntersuchungen nicht virtuell erfolgen und die Laufleistungen zu hoch sind, um unter realen Bedingungen geprüft zu werden. So ist nach [EH06] der Lebensdauerzyklus eines LKW nur etwa ein Drittel länger als der eines PKW, die Laufleistung beträgt im Durchschnitt aber das 12-fache. Konkret sind dies beim PKW etwa 200.000 km, beim LKW etwa 2,4 Mio. km (siehe nachfolgende Abbildung).

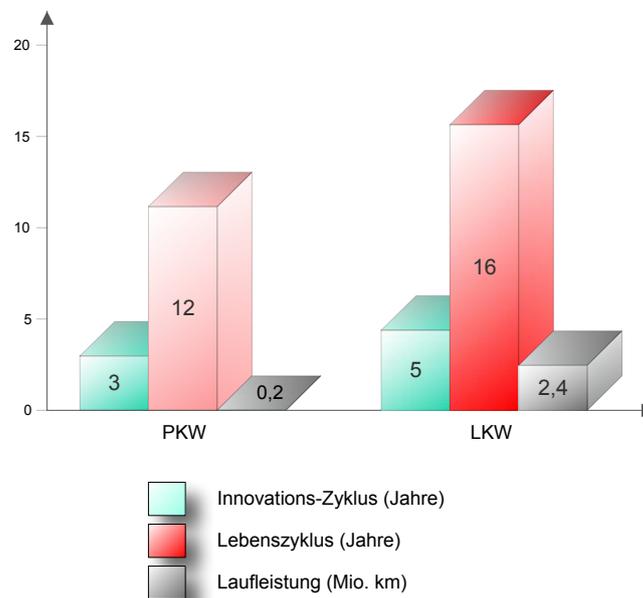


Abb. 1.2: Vergleich von Innovationszyklus, Lebensdauer und Laufleistung bei PKW und LKW nach [EH06]

Gekoppelt an den Lebenszyklus erfordern nach [Mey07] auch die Innovationszyklen eine Beschleunigung, um bei gleichbleibender Qualität einen zeitlichen Vorteil zu erzielen. So wurden im PKW-Sektor die Innovationszyklen in den letzten Jahren signifikant verringert, im Nutzfahrzeug existierten nach [WW05] Produktlebenszyklen von 20 Jahren, die in der letzten Dekade auf etwa 8-10 Jahre verringert wurden. Gründe hierfür sind die wirtschaftliche Amortisierung der Entwicklungskosten, da die Stückzahlen der Nutzfahrzeughersteller sowie die Gewinnmargen pro Modellreihe deutlich geringer sind als die der PKW-OEM. Der Zyklus im Nutzfahrzeug beschränkte sich in der letzten Dekade meist auf Facelifts oder geringere technische Änderungen im Baugruppenbereich; Fahrerhäuser, Fahrwerks-, Motor- und Getriebekonzepte haben sich lediglich in Details<sup>1</sup> verändert. Eine Ausnahme bilden hier Innovationstreiber wie die Euro6 Abgasnorm, die neben der Optimierung der Verbrennungsprozesse die Abgasnachbehandlung und das Thermomanagement betreffen.

<sup>1</sup>Vgl. hierzu MAN TGA und TGX oder Mercedes-Benz Actros MP2 und MP3, die seit 2000 bzw. 1996 auf dem selben Grundfahrzeug basieren.

### 1.2.3 Nutzfahrzeugmarkt

Der Nutzfahrzeugmarkt ist segmentiert in einige große Nutzfahrzeughersteller mit einem vollständigen Produktportfolio, das vom leichten LKW bis zum Sonderfahrzeug reicht und Hersteller, die auf bestimmte Fahrzeugtypen fokussiert sind [Got04]. Nachfolgende Abbildung stellt die größten europäischen Nutzfahrzeughersteller und deren Marktanteile dar:

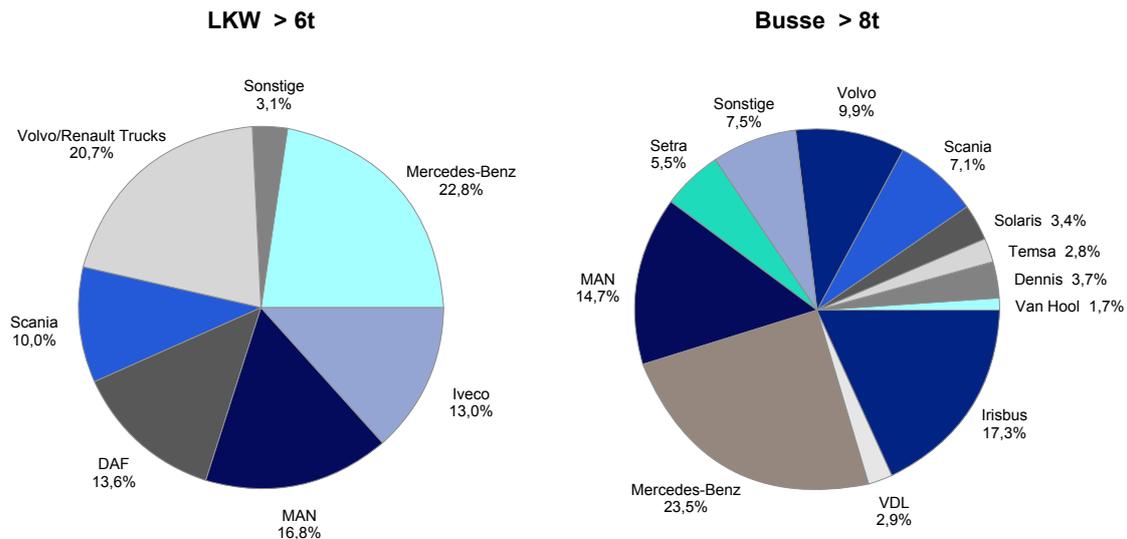


Abb. 1.3: Marktanteile europäischer Nutzfahrzeughersteller 2009 nach [AG10]

Die Bestrebungen der letzten Jahre waren bei den großen Nutzfahrzeugherstellern bestimmt von einer Internationalisierung auf den Weltmärkten, weiteren Kostenreduktionen sowie Organisations- und Prozessoptimierungen. Durch Geschäftsfeldausdehnungen in südamerikanische oder asiatische Märkte erhöht sich die Varianz der Produkte, da auf die marktspezifischen Restriktionen eingegangen werden muss, die nicht nur durch die Käufer, sondern auch über den regionalen Gesetzgeber durch Fahrzeugabmessungen, Sicherheitseinrichtungen sowie Abgasgesetze vorgeschrieben werden. Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen ergeben sich in den asiatischen *Emerging Markets* oder den südamerikanischen Märkten besondere Anforderungen an die Fahrzeuge. Nicht zuletzt wegen der infrastrukturellen Besonderheiten sind dort besonders robuste, günstig und gut wartbare Produkte gefordert, die ein geringes Maß an elektronischer und mechatronischer Ausstattung implizieren<sup>2</sup>. Die nachfolgende Abbildung stellt eine Auswahl der Zulassungsrichtlinien dar.

<sup>2</sup>MAN interne Untersuchung „Randbedingungen außereuropäische Märkte“

Land	Maximale Achslast			Zuggesamtgewicht				Geschwindigkeitsbeschränkung
	Einzelachse gelenkt	Einzelachse un gelenkt	Doppelachse	LKW 2-Achser	LKW 4 Achsen	Sattelzug 5 Achsen	Gelenkbus (1 Gelenk)	Autobahn
Dänemark	10,0 t	10,0 t	16,0 t	18,0 t	32,0 t	44,0 t		80 km/h
Deutschland	10,0 t	10,0 t	19,0 t	18,0 t	32,0 t	40,0 t	28,0 t	80 km/h
(angetrieben)	11,5 t	11,5 t						
Frankreich	13,0 t	13,0 t	21,0 t	19,0 t	32,0 t	44,0 t	32,0 t	90 km/h
Österreich	10,0 t	10,0 t	19,0 t	18,0 t	32,0 t	42,0 t		80 km/h
Griechenland	7,0 t	10,5 t	20,0 t	19,0 t	33,0 t	40,0 t	26,0 t	70 km/h
Brasilien				29,0 t	29,0 t	53,0 t		80 km/h
Indien	6,0 t	6,0 t	19,0 t	16,2 t	31,0 t	40,2 t		90 km/h
Kanada	7,3 t	9,1 t	17,0 t	16,4 t	24,3 t	46,5 t		110 km/h
Singapur	12,0 t	12,0 t		19,0 t	34,0 t	46,0 t		60 km/h

Abb. 1.4: Regionale Zulassungskriterien

Erweitert man den Horizont auf internationale Märkte wie USA, Südamerika und Asien wird schnell klar, dass teilweise weder die Kriterien noch die Bewertungsverfahren Gültigkeit besitzen. In Japan werden Fahrzeuge beispielsweise primär nach dem Gesamtgewicht homologiert, das abhängig vom Abstand der vorderen und hinteren Achsen ist. Die Zuggesamtlänge spielt in den USA im Vergleich zu Europa eine deutlich untergeordnetere Rolle, da hier primär die Aufliegerlänge begrenzt ist (auch von Bundesstaaten abhängig).

Durch die Geschäftsausweitung auf internationale Märkte nimmt nicht nur die Varianz der Produkte zu, sondern auch in gleichem Maße der Verwaltungs- und Prozessaufwand. So müssen beispielsweise regionalbedingt Auslegungsaufgaben der Fahrzeugvarianten bearbeitet werden, die sonst in diesem Maße nicht erforderlich gewesen wären [Kre06]. Hilfreiche Strategien sind hierbei ein etabliertes Baukastensystem, mit dem Fahrzeuge an die internationalen Vorgaben angepasst werden können. Nicht zuletzt aus der Internationalisierung ergeben sich für den Entwicklungsprozess eine Vielzahl von Variantenkonstruktionen, die idealerweise virtuell ausgelegt werden. Die erarbeitete Vorgehensweise hierzu wird in Kapitel 3.5 erörtert.

Der Nutzfahrzeugmarkt, im speziellen für schwere LKW, ist, wie im Jahr 2009 zu beobachten war, stark konjunkturabhängig und folgt im Gegensatz zum PKW diesen Zyklen strenger. Nach [Rah07] sind die Schwankungen im Nutzfahrzeugsektor in der Vergangenheit bis zu 20 mal stärker gewesen als im PKW-Sektor. Der europäische Nutzfahrzeugmarkt kann nach [Got05] und statistischen Erhebungen des BGL als gesättigt angesehen werden (vgl. Anhang: Güteraufkommen im Bundesgebiet) und unterliegt primär den konjunkturellen Zyklen. Weitere Wachstumspotentiale sind in asiatischen, lateinamerikanischen und osteuropäischen Ländern zu sehen [Kre06], da in diesen Regionen,

durch das relativ niedrige pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukt, zukünftig ein erhöhter Bedarf an Transportleistungen zu erwarten ist. Anders verhält sich der Markt der Stadtbusse, der neuesten Zahlen zufolge relativ unabhängig von konjunkturellen Schwankungen ist, da Kommunen und Verkehrsbetriebe unabhängig der Zyklen wirtschaften. So konnte selbst im konjunkturell schwierigen vierten Quartal 2008 kein nennenswerter Absatzeinbruch der Stadtbusse bei MAN beobachtet werden [NA09].

### 1.2.4 Transportgewerbe

Zum vollständigen Bild des Nutzfahrzeugs soll an dieser Stelle eine allgemeine Betrachtung der Transportbranche erfolgen, um einen Überblick zu geben und Potentiale darzustellen. Trotz des weltweiten konjunkturellen Rückganges im Jahr 2008 stieg die durch deutsche Unternehmen auf Straße, Schiene und durch Binnenschifffahrt transportierte Gütermenge (binnen- und grenzüberschreitender Verkehr) um 1,5% auf 3,7 Mrd. Tonnen an. Die erbrachte Beförderungsleistung betrug insgesamt 481,2 Mrd. tkm. Im Straßengüterverkehr wurde hierbei eine Gesamtgütermenge von 3,05 Mrd. Tonnen mit einer Beförderungsleistung von 301,4 Mrd. tkm erzielt [BAG09]. Im Jahr 2008 wurden in Deutschland insgesamt 27,7 Mrd. km mautpflichtige Straße befahren, was einem Kostenfaktor von insgesamt 3,466 Mrd. Euro entspricht.

Die Transportkosten für den straßengebundenen Güterverkehr schlüsseln sich nach [BGL09] für Fernverkehrsfahrzeuge folgendermaßen auf (Datenerhebung Juni 2008 - Juni 2009):

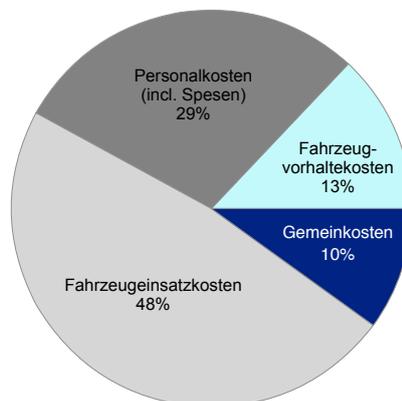


Abb. 1.5: Transportkostenanteile nach [BGL09]

In den Fahrzeugvorhaltekosten sowie in den Fahrzeugeinsatzkosten sind bereits der Kaufpreis bzw. die Leasingrate des Fahrzeugs, die kilometerabhängige Abschreibung sowie Versicherungskosten und KFZ-Steuer berücksichtigt. Die Fahrzeugeinsatzkosten, in Summe etwa 48% der Gesamtkosten, enthalten unter anderem folgende großteils entwicklungsrelevante Positionen:

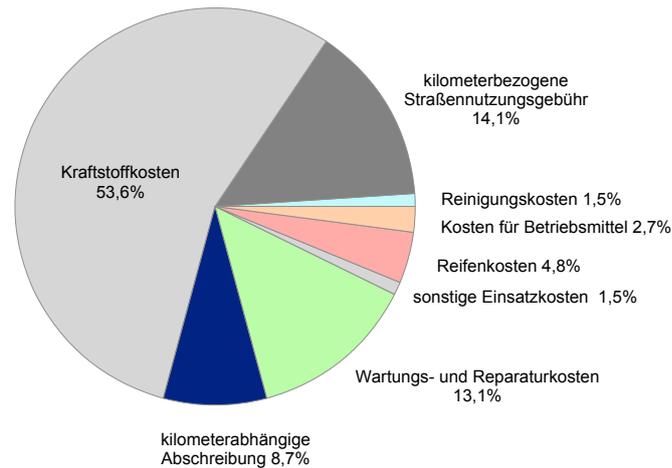


Abb. 1.6: Anteile der entwicklungsrelevanten Fahrzeugeinsatzkosten nach [BGL09]

Weitere Transportkostenaufschlüsselungen nach den Fahrzeugkategorien Verteilerbereich und Nahbereich lassen sich online nach [BGL09] berechnen. Da die Kosten für Wartung, Verschleiß und Kraftstoffverbrauch direkt von der Entwicklung beeinflussbar sind, werden sie im Folgenden detaillierter betrachtet. Kosten für die km-bezogene Straßennutzung sind unter anderem durch die Entwicklung beeinflussbar, da die Gebühren nach Abgasnormen erhoben werden. Der Anhang beinhaltet eine Übersicht über die streckenbezogene LKW-Maut sowie die Auswirkungen auf die Betriebskosten auf LKW mit unterschiedlichen Abgasnormen. Wartungs- und Reparaturkosten sind ebenso konstruktiv beeinflussbar wie die Kosten für Betriebsmittel, die z.B. Schmierstoffe oder Harnstoffzusätze einschließen und somit konzeptbedingt anfallen können. Kraftstoffkosten, die primär von der Verbrennungskraftmaschine (VKM) und der Antriebsstrangkombination abhängig sind, aber auch in Anteilen durch das Gesamtfahrzeug beeinflusst werden, lassen sich für einen Fernverkehrszug wie folgt aufschlüsseln:

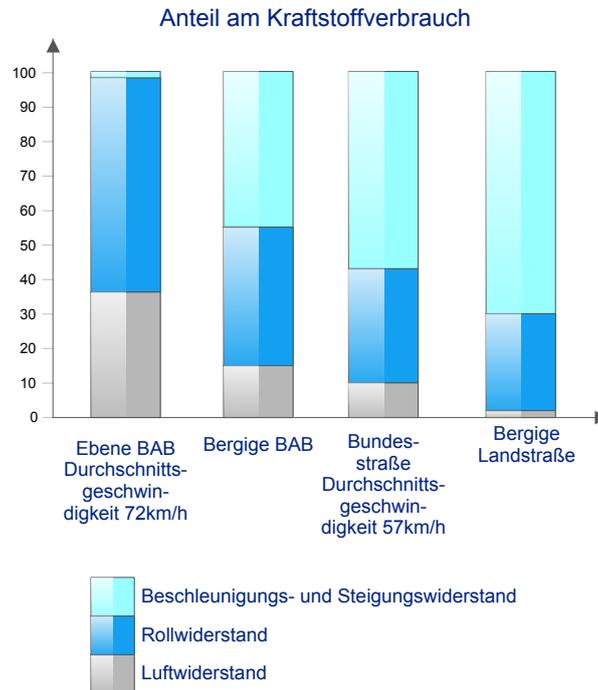


Abb. 1.7: Energiebedarf eines 40t Sattelzugs unter verschiedenen Einsatzbedingungen nach [HBA<sup>+</sup>08]

Auffällig ist der niedrige Anteil an Beschleunigungswiderständen, der sich durch die langen Fahrzeitintervalle im Fernverkehr begründet und bei anderen Einsatzarten im Regional- und Verteilerverkehr einen höheren Anteil ausmacht. Der Strömungswiderstand des Fahrzeugs, der linear von der Stirnfläche abhängig ist, ist nur in sehr geringem Maße beeinflussbar, da er primär vom geforderten bzw. gesetzlich restrigierten Ladungsvolumen abhängig ist. Auch der Luftwiderstandsbeiwert lässt sich nach momentaner gesetzlicher Lage nur geringfügig beeinflussen, da es Beschränkungen der Zuggesamtlänge gibt, die immer zugunsten des Ladungsvolumen interpretiert werden. Der Rollwiderstand lässt sich einerseits durch die Reifenmischung und den Reifenaufbau, auf der anderen Seite aber auch durch eine optimierte Fahrwerks- und Lenkungskinetik beeinflussen und kann so direkt vom OEM über die Konstruktion oder die Wahl des zuliefernden Reifenherstellers optimiert werden. Ausschlaggebend bei der konstruktiven Gestaltung der Fahrwerks- und Lenkungskinetik ist der resultierende Reifenverschleiß sowie der daraus resultierende Verbrauch und die Kosten. Abschließend muss in die Kraftstoffkostenbetrachtung noch die Kombination aus Verbrennungsmotor und Antriebsstrang einfließen, da hier abhängig vom Fahrzeugeinsatzzweck ein sehr großes Einsparpotential erzielt werden kann.

### 1.2.5 Fahrzeugkategorisierung und technische Aspekte

Nutzfahrzeuge im Gegensatz zum PKW dienen primär der Erfüllung einer Transportaufgabe, die Güter oder Personen beinhalten kann. Fahrzeuge zum Personentransport werden genauso wie Fahrzeuge für den Gütertransport für die spezifischen Transportaufgaben konfiguriert. Die detaillierte Kategorisierung dieser Fahrzeuge erfolgt nach DIN 70010 und kann dem Anhang entnommen werden. Eine Kategorisierung des MAN-Portfolio erfolgt im Folgenden für Busse und LKW:

- Stadtbusse,
- Überlandbusse,
- Reisebusse,
- Busfahrgestelle,
- Sonderfahrzeuge Bus,
- Leichte LKW,
- Mittelschwere LKW,
- Schwere LKW und
- Sonderfahrzeuge LKW.

Entsprechend der gewählten Kategorie des Nutzfahrzeugs erfolgt eine weitere Einteilung speziell der schweren LKW nach Anzahl und Konfiguration der Achsen. Nachfolgend werden nur schwere LKW betrachtet, da sie die komplexeste Gruppe innerhalb der Nutzfahrzeuge darstellen und in der Regel nur minder komplexe Derivate in den restlichen Fahrzeugkategorien existieren.

Abhängig von der Transportaufgabe sind Lasten mit bestimmtem Volumen, Aggregatzustand und bestimmter Masse über unterschiedlich lange sowie differenzierte Streckenabschnitte zu transportieren. Dies erfordert in der Regel völlig verschiedene Fahrzeugkonzepte, die einerseits die Erfüllung der Tragfähigkeit und den sicheren Transport bei gegebener Schwerpunktlage der Ladung betreffen, auf der anderen Seite aber auch Fahreigenschaften wie z.B. die Wendigkeit berücksichtigen. Nachfolgend sind die möglichen Einsatzarten nach [AV08] dargestellt:

- Ladung
  - Masse
  - Schwerpunkt
  - Volumen
  - Aggregatzustand

- Empfindlichkeit
- Wertigkeit
- Einsatzort
  - Innenstädte
  - Überland
  - Langstrecke
  - Verteilerverkehr
  - Baustellen (leichtes Gelände)
  - Gelände (mittelschweres und schweres Gelände)
  - Be- und Entladungsvorgang

Allein der Einsatzort eines Fahrzeugs hat bereits Auswirkungen auf das Rahmenkonzept und die Achsführungs- und Federungskomponenten und variiert weiter mit zunehmender Transportaufgabenspezifizierung. Der heutige Standard-LKW besitzt unverändert einen Leiterraahmen mit offenem Profil der Rahmenlängsträger sowie verschraubten und vernieteten Querverstrebungen und wird vom OEM fahrfertig mit Fahrerkabine und Aggregaten ausgeliefert. Ebenso üblich ist die bei Sattelzugmaschinen durch dem OEM montierte Sattelplatte, die die Aufnahme von Sattelaufiegern ermöglicht. Alle anderen Aufbauten, die üblicherweise am Rahmen befestigt sind, werden durch sogenannte Aufbauhersteller bereitgestellt, die für gewöhnlich nicht direkt mit dem OEM in Verbindung stehen. Einzige Ausnahme hierbei bildet die Gruppe der Kipperfahrzeuge, die bereits als fertige Fahrzeuge beim OEM erworben werden können. Jedenfalls besteht beim LKW im Gegensatz zum Bus<sup>3</sup> und PKW eine Funktionstrennung in Chassis (Tragwerk) und Aufbau.

Nachfolgend sind die Neuzulassungen und Marktanteile für LKW von 6,1t - 60t Zuggesamtgewicht nach entsprechenden Aufbauten kategorisiert dargestellt:

---

<sup>3</sup>Ausnahme: Chassisbusse, die einen Leiterraahmen besitzen

Aufbauart	MAN 2002	Deutschland 2002
Plattform/Offener Kasten	1774 25,2 %	7049 13,7 %
Geschlossener Kasten	1344 17,0 %	7919 15,4 %
Isolieraufbau	554 23,8 %	2329 4,5 %
Möbeltransporter	7 8,0 %	88 0,2 %
Wechselbehälter/Container	1773 32,5 %	5460 10,6 %
Tankfahrzeug (Gefahrgut)	119 31,3 %	380 0,7%
Tankfahrzeug (Andere)	65 33,2 %	196 0,4 %
Silofahrzeug	53 37,3 %	142 0,3 %
Viehtransporter	73 34,1 %	214 0,4 %
Kfz.-Transporter	148 18,7 %	791 1,5 %
Glastransporter	7 25,0 %	28 0,1 %
Betonmischer,- pumpen	138 22,4 %	617 1,2 %
Kipper	1371 33,1 %	4148 8,1 %
Feuerwehrfahrzeuge	314 35,4 %	888 1,7 %
Kommunalfahrzeuge	317 32,3 %	981 1,9 %
Sattelfahrzeuge	4140 23,0 %	17995 34,9 %
Sonstige	419 18,2 %	2296 4,5 %
<b>SUMME</b>	<b>12616</b> <b>24,5 %</b>	<b>51521</b> <b>100,0%</b>

Abb. 1.8: Neuzulassungen und Marktanteile in Deutschland 2002 nach [AV08]

### 1.3 Komplexität

Nach [Mil81] steigt die Komplexität eines Systems mit der Anzahl der Variablen, der Anzahl der Verknüpfungen zwischen diesen Variablen sowie der Funktionalität der Verknüpfungen. Dieser systemtheoretische Ansatz lässt sich auch auf die Komplexität von Produkten, respektive Fahrzeugen, anwenden, so wie es von [Jan04] definiert wurde: „Die Komplexität variiert über die Anzahl der einbezogenen Einheiten, die Anzahl der Aktionen und Beziehungen zwischen diesen Einheiten sowie über die Variabilität der Aktionen und Beziehungen.“ Bei der ganzheitlichen Betrachtung aller Komplexitätseinflüsse können nach [Sch05b] folgende Komplexitätstreiber identifiziert werden:

- Unternehmensgröße
- Diversifikation im Geschäftsbereich
- Anzahl interner Organisationseinheiten und externer Schnittstellen
- Schnittstellendichte
- Sortimentsbreite und Erzeugniskomplexität
- Dynamik, Diskontinuität, Änderungswilligkeit und -notwendigkeit
- Unsicherheit, Ambiguität<sup>4</sup>, Intransparenz

Die hohe Bandbreite und gegenseitige Abhängigkeit der Einflussfaktoren erschwert eine Quantifizierung erheblich, so dass sich Komplexitätstreiber nach [Rei93] in „Dynamik“ und „Masse“ (dynamischer und statischer Anteil) zusammenfassen lassen. Der statische Anteil, respektive die Masse an Varianten, lässt sich an einem Beispiel aus der Automobilindustrie veranschaulichen, wo z.B. im Jahr 2000 für einen deutschen Mittelklasse PKW in etwa  $10^{27}$  technische Varianten möglich waren. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Zunahme der Varianz der letzten 20 Jahre am Beispiel eines Mittelklasse-PKW:

	1983	1993	2000
Karosserievariante(n)	1	3	5
Motorvariante(n)	4	7	7
Ausstattungs Pakete	1	4	80
Produktionsstandorte	1	1	4

Tab. 1.1: Varianz eines Mittelklasse-PKW nach [BDW<sup>+</sup>04]

Die Dynamik als Komplexitätstreiber kann interpretiert werden als die Veränderlichkeit, respektive einem Wachstums- und Schrumpfungsmuster von Produkten, aber auch als

<sup>4</sup>im Sinne von Unbestimmtheit

Veränderlichkeit im Produktprogramm. Zur Dynamik wird auch die Vieldeutigkeit gezählt, die die Unschärfe von Systemen beschreibt, in denen es z.B. keine klaren Zuordnungen zwischen Kostenträger und Ressource gibt und die oftmals durch Defizite im Wissen über das System entstehen. Die Folgen der Komplexität haben eine unmittelbare Wirkung im Unternehmen, die charakterisiert ist durch Kosten, die durch die gesteigerte Entwicklungsleistung auftreten, den Verlust von Skaleneffekten oder allgemeine Reibungsverluste. Eine indirekte, mittelbare Wirkung der Komplexität beeinflusst unter anderem die „Schlagkraft am Markt“, da die Reaktionsgeschwindigkeit sinkt, Produktkannibalismus entsteht und die Vertriebssysteme ineffektiver werden [Sch05b]. Eine genauere Betrachtung der durch Komplexität in Form von Varianz entstehenden Kosten lässt erkennen, dass Kosten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg Berücksichtigung finden müssen. In Anlehnung an [Wil06] sind in nachfolgender Tabelle die Einflussfaktoren auf Kosten über den Abschnitten des Produktlebenszyklus bei steigender Varianz dargestellt.

	Forschung und Entwicklung	Produktion	Vertrieb
Entstehungszyklus Produktentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusätzliche Zeichnungen</li> <li>- Zusätzliche Simulationen</li> <li>- Zusätzliche Versuche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusätzliche Teile</li> <li>- Zusätzliche Lieferanten</li> <li>- Schulungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mitarbeiterschulungen</li> <li>- Dokumentation</li> </ul>
Marktzyklus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marktspezifische Anpassungen der Varianten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Skaleneffekte verschwinden</li> <li>- Lieferantenzahl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestände</li> <li>- Fehlerwahrscheinlichkeit</li> <li>- Datenbereitstellung Aufbauer</li> </ul>
Entsorgungszyklus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Datenbereinigung</li> <li>- Datensicherung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufwändigere Auslaufplanung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufwändigere Auslaufplanung</li> </ul>

Abb. 1.9: Kosten über dem Produktlebenszyklus nach [Wil06]

Im Rahmen dieser Dissertation wird ein Fokus auf den Entstehungs- und Marktzyklus in der Entwicklung gelegt, zur Erörterung aller anderen Einflussfaktoren sei an dieser Stelle auf die gängige Literatur verwiesen.

Nach [Wil00] lässt sich der Begriff der Komplexität innerhalb eines Unternehmens auf zwei Formen der Variantenkomplexität zurückführen. Die Produktkomplexität, die primär über Vertriebsstrukturen Kundenanforderungen in ein Unternehmen einsteuert und die nach außen sichtbaren Unterscheidungskriterien von Produkten widerspiegeln, steht in Relation zu der Prozesskomplexität, die eher die dadurch entstandenen innerbetrieblichen Abläufe betrifft. Zwei weitere Formen der Komplexität, die kausal der Produktkomplexität vorangehen, sind nach [AJ98] die Kundenkomplexität und die Zielkomplexität. Nachfol-

gende Abbildung zeigt die Schichten der Komplexität. In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt eine Beschränkung der Betrachtung auf die Produkt- und Prozesskomplexität.

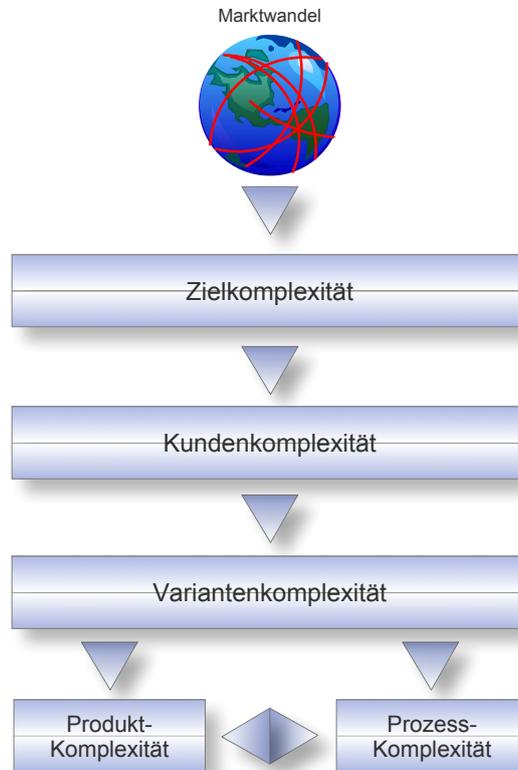


Abb. 1.10: Schichten der Komplexität nach [AJ98]

Die durch die Unternehmensziele (Zielkomplexität) erzeugte Kundenkomplexität, die sich z.B. aus Anforderungen zur Diversifikation von Transportaufgaben ergeben kann, generiert folglich einen Anstieg der Variantenzahl, um den Erfordernissen gerecht zu werden. Diese Erweiterung eines Produktportfolios und der damit einhergehenden Variantenzahl vergrößert die Variantenkomplexität und wirkt somit direkt als zentraler Komplexitätstreiber. Der direkte Einfluss auf die Produktkomplexität, der sich in einer vermehrten Anzahl an Endprodukten messen lässt, impliziert nach [Wil00] auch eine Vergrößerung auf Basis- und Komponentengruppen.

Indirekt wirkt sich eine Steigerung der Produktkomplexität auch auf die Prozesskomplexität aus, da sich mit wachsender Variantenzahl die Komplexität der betrieblichen Strukturen und Abläufe vergrößert. Nach Unternehmensanalysen von [SBM<sup>+</sup>06] steigen

bei einer Verdopplung der Variantenanzahl die Prozesskosten, die z.B. Änderungsmanagement, Logistik, integrierte Auftragsabwicklung etc. beinhalten, um 20-30%.

### 1.3.1 Komplexität im Nutzfahrzeug

Betrachtet man den Begriff der Komplexität aus Sicht eines Nutzfahrzeugherstellers, so ist aus unternehmerischer Sicht die Komplexität aller Produkte soweit sinnvoll, wie ein betriebswirtschaftlicher Nutzen erzeugt werden kann. Der Vertrieb von Nutzfahrzeugen, speziell von schweren LKW, erforderte in der Vergangenheit immer wieder eine Ausdehnung der Produktkomplexität, da die Fahrzeuge für immer spezifischere Transportaufgaben in immer größerer Variantenzahl gefordert wurden [HBA<sup>+</sup>08]. In den letzten 20 Jahren haben sich neben der maximalen Nutzlast der Nutzfahrzeuge auch Besonderheiten durch die Transportaufgaben ergeben. So fand z.B. der Trend nach einer Vergrößerung des maximal verfügbaren Transportvolumen statt, das durch gesonderte Fahrgestelle und Niederquerschnittreifen ermöglicht wurde. Ein Anstieg der verwendeten Achsen sowie eine Variantenzunahme der Antriebe konnte nach [HBA<sup>+</sup>08] ebenfalls beobachtet werden, da unter Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen die zu transportierende Ladung an Gewicht zugenommen hat. Nach [WW05] variiert der Teileumfang bei Nutzfahrzeugen über 6t zwischen 20.000 und 60.000 Teilen<sup>5</sup>, was einen signifikant höheren Komplexitätsumfang gegenüber dem PKW bedeutet, der etwa 8.000 bis 20.000 Teile enthält. Die resultierenden differenzierten Spezifikationen im Nutzfahrzeug sind:

- Kundenspezifität des Produktes
- Variantenanzahl
- Komplexität des Produktes
- Produktlebenszyklus
- Veränderungsraten

Für einen Nutzfahrzeughersteller ist es deshalb notwendig sowohl die Komplexität der Produkte als auch die der Prozesse zu beherrschen, um trotz hoher Varianz den Kosten- und Zeitfaktor so gering wie möglich zu halten. Der primäre Komplexitätstreiber im Nutzfahrzeug und hier im Speziellen im schweren LKW sind die Varianten im Chassisbereich. Varianten der Fahrerhauskombinatorik, Innenausstattung oder der elektronischen Systeme bestehen parallel zum PKW und sind mit gängiger Methodik beherrschbar. Variationen im Chassisbereich gliedern sich wie in Kapitel 2.6 primär in die unterschiedlichen Achseinbauvarianten.

Durch die großen Einwirkungen der Varianten im Chassis auf die Gesamtkomplexität der Konstruktion entsteht das Bedürfnis nach Methoden zur Beherrschung. Die Methoden

---

<sup>5</sup>Der Teileumfang eines MAN TGX/TGS 8x4 beträt über 65.000 Teile

beziehen sich einerseits auf das Komplexitätsmanagement im Sinne der Komplexitätsvermeidung und Reduzierung, auf der anderen Seite auf die Beherrschung durch neue Methoden. Neben der reinen Variantenanzahl muss bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Komplexität auch die Auswirkungen, respektive der Einfluss einer Variante auf die Produktkomplexität, einbezogen werden. So hat eine Variante der Innenausstattungsfarbe beispielsweise einen deutlich geringeren Einfluss auf die Systemkomplexität als eine Getriebevariante. Ein Komplexitätskriterium könnte beispielsweise aus dem Produkt der Variantenanzahl und der Variantenauswirkung gebildet werden.

### 1.3.1.1 Produktkomplexität im Nutzfahrzeugfahrwerk

Unter Produktkomplexität versteht man die Anzahl der Bauteile und Baugruppen sowie deren relationale Abhängigkeit untereinander. So ist nicht nur die reine Menge der Bauteile ausschlaggebend, sondern auch ihre Auswirkung auf andere Bauteile, Baugruppen oder das gesamte System, respektive das Fahrzeug. Im Nutzfahrzeug, speziell im schweren LKW, lassen sich Varianten des Chassis wie nach Kapitel 2.6 gliedern. Gesondert zu betrachten sind die Varianten der Achseinbaukombinatorik, die sich bei jedem Nutzfahrzeughersteller in ähnlicher Struktur finden. Aus den gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie der Gesamtmasse eines LKW folgt die Anzahl der Achsen, da hier die beschränkende Größe immer die Achslast ist. Anhand der gewählten Achslasten sowie der Anforderungen an Wendigkeit und Einsatzspektrern kann eine weitere Differenzierung nach gelenkten und angetriebenen Achsen sowie des Federungstypes erfolgen. Nach Wahl der funktionalen Aspekte der Lenkung, des Antriebs und der Federung einzelner Achsen kann über die technische Lösung entsprechend dem zukünftigen Einsatzgebiet entschieden werden. Hier ist beispielsweise eine Differenzierung des physikalischen Wirkprinzips entsprechend [Lin09] möglich, bei dem z.B. ein Antrieb mechanisch oder aber hydraulisch erfolgen kann. Das MAN-Produktportfolio sieht für schwere Nutzfahrzeuge bis zu fünf Achsen vor, von denen maximal drei gelenkt sein können und nicht mehr als vier über einen Antrieb verfügen. Ähnliche Produktstrukturen sind bei anderen großen europäischen Nutzfahrzeugherstellern zu finden<sup>6789</sup>. Abhängig von Einsatzgebiet und Aufbau können neben der Positionierung der Achsen (Radstände) unterschiedlichste Federungssysteme gewählt werden. Die Radstände folgen primär aus gesetzlichen Randbedingungen sowie den Anforderungen, die durch den Aufbau oder die Ladung vorgegeben werden. Kurze Radstände mit gelenkten Vor- oder Nachlaufachsen finden primär bei Entsorgungsfahrzeugen Verwendung. Fahrzeuge mit hohen Achslastunterschieden oder dem Bedarf einer Fahrniveaueinpassung<sup>10</sup> werden mit Luftfederungen ausgestattet, da diese entsprechend

<sup>6</sup><http://www.mercedes-benz.de>

<sup>7</sup><http://www.scania.de>

<sup>8</sup><http://www.volvotrucks.com>

<sup>9</sup><http://www.iveco.com>

<sup>10</sup>Mit Fahrniveau ist nach [AV08] der Abstand zwischen Rahmenunterkante und Radmitte gemeint

ihrer Geometrie, dem Luftvolumen und Druck eine Federkraft bereitstellen und sich im Niveau anpassen lassen. Für jedes Fahrzeug muss eine Anpassung der Aufbaustabilisierung gegen Wanken sowie eine Aufbaudämpfung erfolgen. Diese Parameter werden entsprechend dem Ladungsschwerpunkt, primär dem Höhenschwerpunkt, angepasst.

### 1.3.1.2 Prozesskomplexität in der Nutzfahrzeugentwicklung

Die Prozesskomplexität des Nutzfahrzeugs lässt sich in einen Entwicklungs- und Produktionsprozess einteilen. Beide stehen in enger Verknüpfung zueinander und bauen kausal aufeinander auf. Der Entwicklungsprozess wiederum steht in engem Zusammenhang zu der oben beschriebenen Produktkomplexität. So reicht nach [Lin09] nicht nur eine reine Beherrschung der Produktkomplexität, sondern auch eine prozessdurchgängige Beherrschung nachfolgender Abläufe. Nach [WW05] zieht die höhere Konstruktionskomplexität im Nutzfahrzeug mit ihrer erheblich höheren Entwicklungsleistung, zu der zusätzlich noch kundenspezifische Wünsche hinzukommen, eine größere Herausforderung für die Produktionsprozesse nach sich. Durch die höhere Entwicklungsleistung und die folglich höhere Arbeitsteiligkeit folgt nach [Fre05] eine zusätzliche Steigerung der Komplexität. [Tri02] erwähnt hier die zwei entscheidenden Einflussfaktoren auf die Komplexität von Entwicklungsprozessen:

#### 1. Organisationskomplexität

- Grad der Arbeitsteilung in der Produktentwicklung
- Anzahl der organisatorischen Grenzen in der Aufbauorganisation
- Anzahl der involvierten Mitarbeiter
- Parallelität der Entwicklung
- Anzahl der Entwicklungspartner
- Verteilung der Örtlichkeiten
- Kompatibilität der Entwicklungsmethoden und -systeme
- Richtlinien, Standardisierungen, Normen

#### 2. Kommunikationskomplexität

- Menge der Informationen (Varietät)
- Anzahl der Beziehungen innerhalb der Informationen untereinander (Konnektivität)
- Häufigkeit des Informationsaustausches
- Anzahl der Kommunikationspartner

- Kompatibilität der Kommunikationssysteme

MAN-interne Untersuchungen der letzten Jahre hatten zum Ergebnis, dass die Variantenlogik im Chassisentwicklungsprozess nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand, wie in der PKW-Industrie üblich, in einem hierarchischen Produktbaum abbildbar ist, sondern eine eigenständige neue Methode erforderlich macht. Eine der komplexesten und variantenreichsten Baugruppen im Nutzfahrzeug sind die Achseinbauvarianten, die, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, an die besonderen transportaufgabenspezifischen Kundenanforderungen adaptiert werden und in genügend großer Varianz im Produktportfolio vorhanden sein müssen. Diese zahlenmäßig große Varianz wird in ihrer Komplexität durch die Anzahl der angekoppelten Systeme, respektive der Verknüpfungen, weiter gesteigert, so dass eine sichere Beherrschung vom ersten Entwicklungsschritt bis zur Produktion sichergestellt sein muss. Weitere Besonderheiten im Vergleich zum PKW sind die kundenspezifischen Modifikationen (Kundensonderwünsche-KSW) sowie eine detaillierte Bereitstellung von Konstruktions- und Berechnungsdaten nach dem Produktionsprozess, um den nachgelagerten Aufbauprozess durchgängiger zu gestalten. Speziell für die zahlreichen Aufbauhersteller muss eine zeit- und kostenintensive Aufbereitung von Konstruktions- und Simulationsdaten erfolgen, da dies zu einer deutlichen Beschleunigung der Entwicklungs- und Produktionsprozesse führt und sich in einem Kundennutzen widerspiegelt. So ergeben sich herstellereigenspezifische Aufbaupreise, da unter anderem eine optimale Datenversorgung durch den OEM einen Kostenvorteil beim Aufbauhersteller bedeutet.

Betrachtet man die Komplexität der Entwicklungs- und Produktionsprozesse, so muss differenziert werden zwischen PKW- und Nutzfahrzeugentwicklung, da sowohl Produkte, als auch Produktionsprozesse nicht vergleichbar sind. Nicht vergleichbar ist auch die Fertigungstiefe, da in der PKW-Industrie im letzten Jahrzehnt ein Wandel hin zu Systemlieferanten erfolgt ist, der im Nutzfahrzeug in diesem Ausmaß nicht nachempfunden wurde. Aus der erhöhten Konstruktionskomplexität folgt direkt eine erhöhte Prozesskomplexität, da ein zusätzlicher Verwaltungsaufwand durch komplexere Stücklistensysteme und Prozesssteuerungen entsteht. Zudem entstehen im Nutzfahrzeug, begründet durch eine Differenzierung im Produktlebenszyklus, vermehrt Versuchskosten, die aber aufgrund andersartiger Kostenstrukturen mit einer geringeren Anzahl an Prototypen erzielt werden. Der Fertigungsprozess als Teil der Prozesskomplexität soll im Rahmen dieser Dissertation nicht behandelt werden. Die Komplexität übersteigt aber die PKW-Fertigung deutlich, da der geringste Teileumfang des LKW in etwa dem höchsten Teileumfang in der PKW-Fertigung entspricht und in der LKW-Fertigung ein höheres Maß an Diskontinuität der durchzuführenden Operationen vorherrscht. [WW05]

Speziell im Omnibusbereich kommt zusätzlich zu dieser Variantenvielfalt noch eine Individualisierung dieser Varianten durch den Kunden hinzu, da ab gewissen Stückzahlen (wie sie z.B. bei Verkehrsbetrieben oder großen Speditionen vorkommen) KSW gewährt

werden. Nach [LRZ06] zeigen die Einbauraten von variantenreichen Bauteilen oder Baugruppen in Automobilen eine typische Pareto-Verteilung, bei der 5% bis 15% der Varianten sehr häufig verbaut werden, die verbleibenden 80% der Einbauvarianten zum Teil unter 1% Einbaurate aufweisen, was sich ebenfalls sehr gut mit den Verkaufszahlen bei MAN deckt [NA09]. Aus diesen Gründen gibt es nach [LRZ06] Ansätze für rein kundenspezifische oder hybride Produktstrukturen, die im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter ausgeführt werden sollen.

### 1.3.2 Komplexitätsmanagement

Zentraler Aspekt der automobilen Entwicklung ist die Beherrschung der Produkt- und Prozesskomplexität, sowie eine kontinuierliche Anpassung der Produkte und Prozesse an die Randbedingungen des Marktes und der Kunden. Das Bestreben des Komplexitätsmanagements muss es sein, eine aufkommende oder bestehende Überkomplexität durch geeignetes Komplexitätsmanagement auf ein wirtschaftlich sinnvolles Mindestmaß zu reduzieren, damit die verbleibende Komplexität bewältigt werden kann [Sch05b]. Ziel ist hierbei nicht die reine Minimierung der Komplexität, sondern ein Optimum, das sich aus notwendiger, durch den Markt vorgegebener Komplexität und mit den gegebenen Randbedingungen beherrschbarer Komplexität ergibt. [HNB<sup>+</sup>99] spricht hierbei von einem systemhierarchischen Denken in Verbindung mit dem Blackbox-Prinzip zum geordneten Umgang mit der Komplexität. Unterschieden werden muss zwischen interner und externer Komplexität, die einerseits die unternehmensinternen Abläufe betrifft und auf der anderen Seite die Forderungen des Marktes abbildet. Nach [Wil06] kann beim Komplexitäts- und Variantenmanagement nach folgenden Strategien vorgegangen werden:

- Komplexitätsreduzierung,
- Komplexitätsbeherrschung,
- Komplexitätsvermeidung.

Primäres Ziel des Komplexitätsmanagements ist eine Vermeidung von Komplexität, so dass im zweiten Schritt eine einfachere Beherrschung gelingen kann. Oftmals lässt sich aber an bestehenden Produktportfolios oder durch die Vorgaben des Marktes eine Vermeidungsstrategie nur schwer realisieren, so dass hier eher eine Reduzierung der Komplexität sinnvoll erscheint [Wil06]. Im Automobil, speziell im Nutzfahrzeug, bedeutet eine Komplexitätsreduzierung oder auch Vermeidung in den meisten Fällen eine Reduzierung oder Bündelung von Varianten. Die vom Markt geforderte Komplexität lässt sich hier nicht vermeiden, lediglich eine Marktsegmentierung einzelner Hersteller auf z.B. LowBudget-Fahrzeuge lässt sich beobachten. Hersteller mit einem vollständigen marktüblichen Produktportfolio<sup>11</sup> verfügen über sehr ähnliche, komplexe Produktvarianten.

---

<sup>11</sup>Üblich sind hier bei europäischen LKW-OEM maximal 4-Achs-Fahrzeuge mit bis zu 3 gelenkten Achsen

Nach [Jan04] werden im Komplexitätsmanagement die abfolgenden Schritte in drei Ebenen unterteilt. Basis des Komplexitätsmanagements ist eine vollständige, transparente Abbildung der Komplexität (**Abbildungsebene**) der Produkt- und Prozessstrukturen in einem Unternehmen. Anschließend an die Abbildung erfolgt eine Bewertung der Komplexität (**Bewertungsebene**), in der nach zuvor bestimmten Kriterien Varianten auf Kostendeckung etc. untersucht werden. Im letzten Schritt erfolgt eine Entscheidung (**Entscheidungsebene**), in der unternehmensstrategische Ziele vorgegeben werden. [Wil06] betrachtet das Komplexitätsmanagement noch feiner granularisiert, indem er ganzheitlich Produkt und Prozess analysiert und von den Strategien Reduzierung, Beherrschung und Vermeidung auf Bausteine des Variantenmanagements schließt. So gliedern sich die Bausteine auch in eine Analyse-, Bewertungs- und Entscheidungsphase, die in Abbildung 1.11 dargestellt sind.



Abb. 1.11: Bausteine des Variantenmanagements nach [Wil06]

Durch die große Anzahl an Varianten sowie deren Komplexität im Fahrwerksbereich von Nutzfahrzeugen werden in Kapitel 5 Methoden zu Bewertung und Analyse vorgestellt, die zum erfolgreichen Variantenmanagement beitragen, indem sie die Darstellung erleichtern. Ein Fokus wird hierbei auf die Analyse, Bewertung sowie die Auswirkung von Varianz gelegt. Ebenso kann der Prozess der „Make or Buy“ Entscheidung unterstützt werden. Zur Gestaltung von Produktprogrammen, die hier ausschließlich betrachtet werden sollen, stehen nach [Wil06] vier Strategien zur Verfügung, die sich wie nachfolgend gliedern lassen:

- **Gleichteile:** Gleiche Bauteile in unterschiedlichen Produkten wobei Kostendegressionseffekte i.d.R. sogar Mehrkosten bei einer Funktionsübererfüllung kompensieren.
- **Baukastensystem:** Additives Zusammensetzen von Endprodukten aus Bausteinen und folglich Varianten durch Kombinatorik

- **Module/Systeme:** Analog zu den Bausteinen, jedoch mit eigenständigen Funktionen der Module
- **Plattformen:** Gemeinsamer „Kern“ von verschiedenen Produkten, die aus Modulen die Varianten bilden

Eine Umsetzung dieser Strategien impliziert die exakte Untersuchung von z.B. Modulen oder Gleichteilen in allen Varianten oder im Umkehrschluss die Analyse aller Varianten auf optionale Gleichteile. Da speziell im Funktionsbereich, im Gegensatz zu geometrischen Betrachtungen etwa mittels Digital-Mock-Up-Visualisierung (DMU), Variantenuntersuchungen sehr aufwändig sind, bieten sich hier virtuelle Methoden an, die mit vertretbarem Aufwand Aussagen erzeugen können. Naheliegend ist auch, dass bei sehr hoher Varianz die klassischen CAE-Methoden mit ihrer ausschließlichen Nutzung von Berechnungsspezialisten an ihre Grenzen stoßen [FIH09]. Zur Beherrschung dieser sehr hohen Varianz speziell im Fahrwerksbereich von Nutzfahrzeugen sei an dieser Stelle an die erarbeiteten Methoden in Kapitel 5 verwiesen, die Voraussetzung für eine automatisierte Variantenuntersuchung am Gesamtfahrzeug ist.

## 2 Stand der Technik - Fahrwerksentwicklung

### 2.1 Produktentwicklungsprozess

Wie im vorangehenden Abschnitt erläutert existieren zahlreiche Einflussfaktoren auf komplexe Produkte und folglich auch auf deren Entwicklung. So fließen unter anderem Kundenanforderungen, Entwicklungspartner und Zulieferer mit speziellen Eigenschaften und Know How, politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen und nicht zuletzt unternehmensinterne Bedingungen in einen Entwicklungsprozess ein. Diese und viele weitere Einflussfaktoren, die Konsequenzen auf die Entwicklung von Produkten haben, setzen einen hochkomplexen interdisziplinären Prozess voraus. Unter einem Produktentwicklungsprozess versteht man nach [Wei06] den Ablauf mehrerer Phasen zur Umsetzung einer Produktidee in spezifizierte Produktdokumentation. Er kann prozess-, task- oder parameterorientiert beschrieben werden, wobei eine Beschreibung anhand des Prozesses üblich ist und in der Literatur in vier Phasen gegliedert wird. Eine weitere Unterteilung nach VDI 2221 [VDI93] ist ebenfalls auf das vierstufige Modell rückführbar. Es werden folgende Phasen durchlaufen:

- Planen und Klären der Aufgabe
- Konzipieren
- Entwerfen
- Ausarbeiten

Neben der präskriptiven, ablauforientierten Betrachtung des PEP existieren Betrachtungsweisen, die einen Fokus auf die schrittweise Konkretisierung der Produkteigenschaften bezogen auf ihren Zweck verfolgen. Das Produkt wird hierbei anhand der Funktionserfüllung während der Nutzung analysiert. Hierbei ergeben sich Teilfunktionen, die zur Erfüllung der zuvor identifizierten Funktion erfüllt sein müssen und wiederum auf physikalischen Wirkprinzipien basieren. Diese als Pyramidenmodell bezeichnete Sicht auf die Entwicklung findet im Wesentlichen in den ersten beiden Stufen nach VDI 2221 [VDI93] (Planen und Klären der Aufgabe und Konzipieren) statt [Wei06].

Jedem Entwicklungsprozess ist gemein, dass die Festlegung vieler Produktmerkmale zu einem Zeitpunkt erfolgt, an dem die Auswirkungen noch nicht absehbar sein können und

somit bei der/den für die Entwicklung verantwortlichen Person/-en ein hohes Maß an Erfahrung und Wissen vorausgesetzt wird, um eine erfolgreiche Entwicklung darzustellen [Lin09]. Aus diesen Gründen sind in der Vergangenheit verschiedenste Strategien und Methoden zur Bewältigung komplexer Entwicklungsprozesse entstanden. Alle haben gemein, dass sie eine Beschleunigung von Entwicklungsprozessen, eine Steigerung der Flexibilität und eine Verbesserung der Qualität bei gleichzeitiger Senkung der Kosten anstreben. Nachfolgende Auswahl an Methoden und Hilfsmitteln stehen zur Verfügung:

- Münchener Vorgehensmodell [Lin09]
- Integrierte Produktentwicklung
- Projektmanagement
- Engineering Data Management
- Simultaneous Engineering/Concurrent Engineering
- Fraktale Unternehmen
- Total Quality Management
- Lean Development, Lean Thinking

Alle Methoden verfolgen ein systemorientiertes Denken, eine Zielorientierung sowie Vorgehens- und Verhaltensweisen zur Erfüllung von Entwicklungsaufgaben. Sie werden in der Praxis primär als „Motor der Veränderung“ genutzt, wobei die Ziele der Methoden sowie deren stetige Weiterentwicklung wichtiger sind als ihre konkrete und exakte Umsetzung [Lin09].

Die Modellvorstellung von [Gia98] gliedert sich in die Ebenen strategische Planung, operative Planung und die Ergebnisebene. Über die vertikale Anordnung erfolgt eine Gliederung in Detaillierungsstufen, die von der groben Projektplanung zur Feinplanung der Abläufe reicht und in der letzten Ebene Ergebnisse darstellt. Zwischen den Ebenen gibt es eine gegenseitige Rückkopplung, so dass von der ursprünglichen Top-Down-Planung der Entwicklung ein Bottom-Up-Einfluss entsteht.

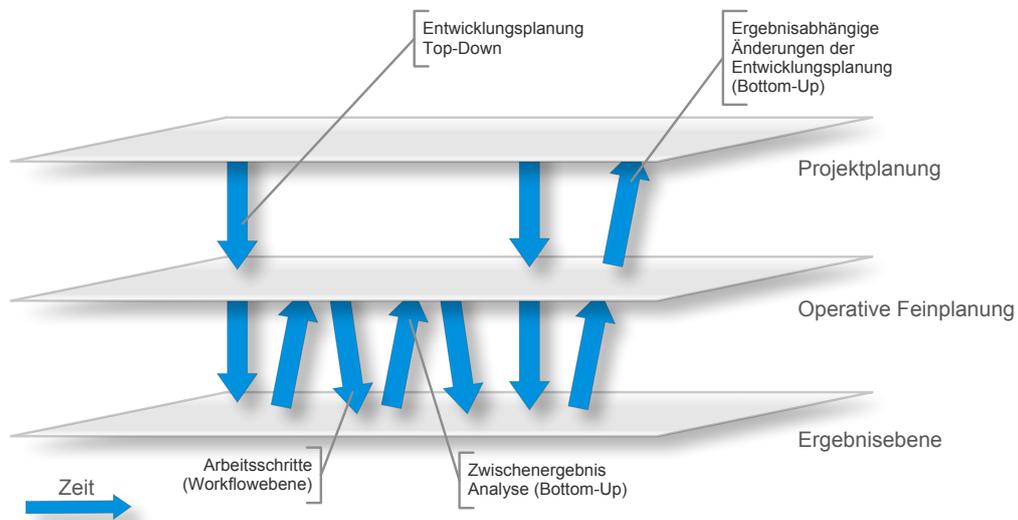


Abb. 2.1: Drei-Ebenen-Modell nach [Gia98]

Die Phasen eines Entwicklungsprozesses werden iterativ durchlaufen, bis ein gewünschtes Ergebnis vorliegt. Hierbei werden, abhängig der gestellten Aufgabe, verschiedenste Werkzeuge und Methoden angewandt, um zum Ziel zu gelangen. Im einfachsten Fall kann hier für unkomplexe, unkritische Bauteile eine Handzeichnung sowie eine analytische Berechnung genügen, bei zunehmendem Komplexitätsgrad sowie sicherheitsrelevanten Bauteilen und Baugruppen besteht allerdings Bedarf an aussagekräftigeren, belastbareren Methoden, die in der letzten Konsequenz z.B. einen digitalen oder realen Prototypen erforderlich machen können. Aus diesem Grund wird im Laufe eines komplexen Produktentwicklungsprozesses in der Fahrzeugentwicklung ein Methodenmix eingesetzt, der aus Fahrzeugversuchen, Prüfstandsläufen, rechnergestützten Simulationen und kombinierten Methoden (z.B. Hardware in the Loop - HIL) besteht [Deu06]. Der Vorgehensplan nach VDI 2221 [VDI93] zur Entwicklung technischer Produkte wurde durch [Wöl98] innerhalb der Arbeitsschritte um die eingesetzten Berechnungsmethoden ergänzt. Sie reichen abhängig vom gewählten Prozessschritt von Überschlagsrechnungen über Auslegungs- und Nachrechnungen bis hin zu Optimierungsrechnungen und sind nachfolgend über dem Vorgehensplan dargestellt:

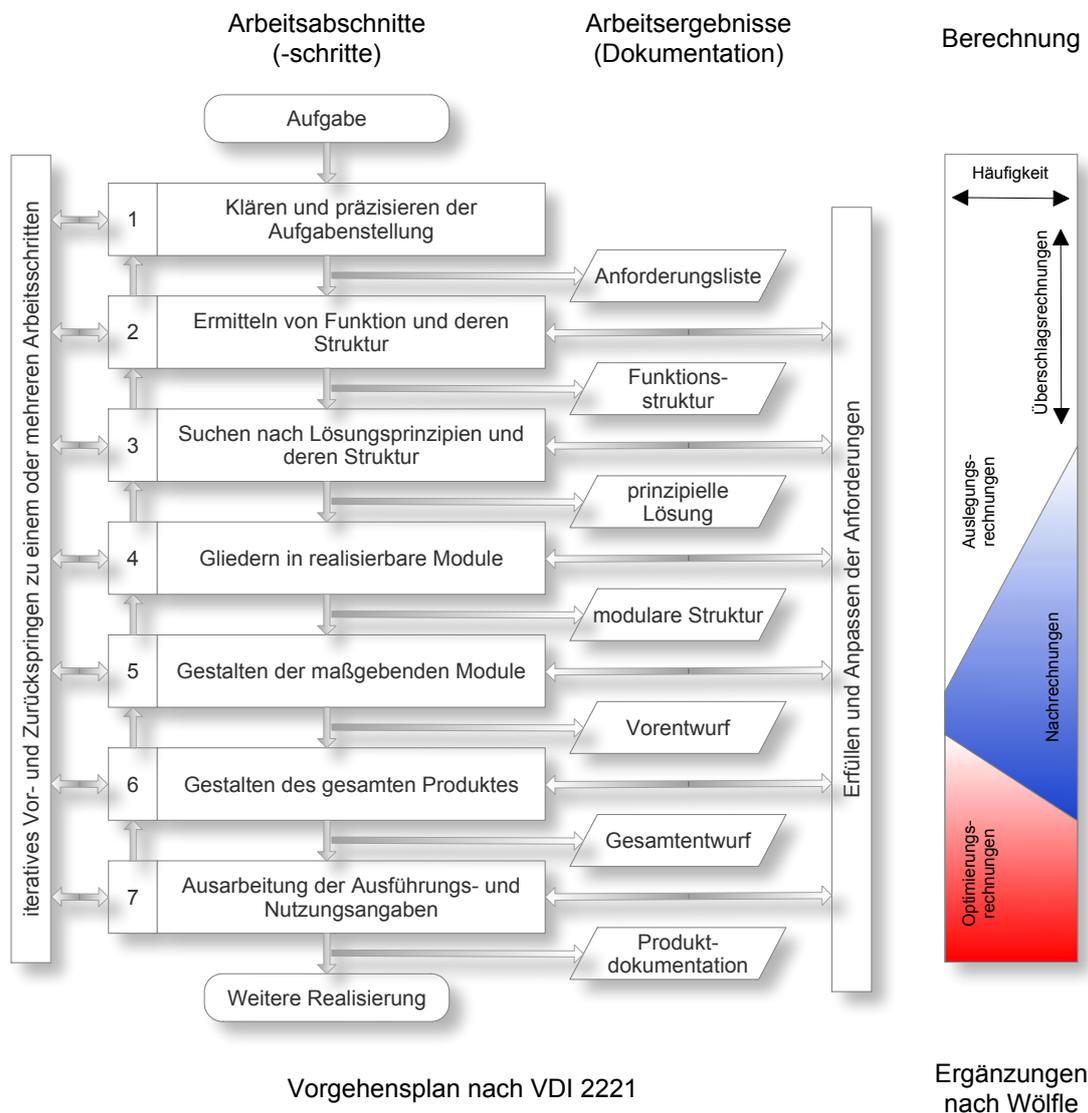


Abb. 2.2: Vorgehensplan nach VDI-Richtlinie 2221, ergänzt durch [Wöl98]

Eine zentrale Fragestellung bei jeder der eingesetzten Methoden richtet sich nach der Aussagegüte, den Kosten und der Beherrschbarkeit. So kann ein Versuch oder eine hoch aufgelöste Simulation in einem sehr groben Parameterraum trotz exakter Ergebnisse in frühen Konzeptphasen keine Aussagegüte besitzen, da die Basis für die Vorhersagbarkeit falsch oder fehlerhaft war. Umgekehrt hat eine analytische Handrechnung zur struk-

turdynamischen Untersuchung eines Gesamtfahrzeugs wenig oder gar keine Aussagekraft. Nachfolgendes Kapitel beschreibt die in der Praxis zum Einsatz gebrachten Methoden und Verfahren und zeigt insbesondere Komplikationen an den Schnittstellen und im Prozess.

### 2.1.1 Prozesse und Workflows in der Fahrzeugentwicklung

Unter dem Entwicklungsprozess versteht man nach [EH06] einen Ablauf von Entwicklungsschritten, um ein bestimmtes Entwicklungsziel zu erreichen. Dieses Ziel wird über einen Entwicklungs-Workflow präzisiert, der aus einer festgelegten Abfolge von bestimmten rechnergestützten Entwicklungswerkzeugen besteht. Der Entwicklungsprozess beschreibt dabei *was* getan werden muss, der Workflow beschreibt *wie* etwas getan werden muss. Innerhalb des Entwicklungsprozesses mit seinen granularisierten Workflowschritten, die z.B. die Interaktionen zwischen Konstruktions-, Simulations- und Versuchsprozess festlegen, sollte ein Austausch zwischen den CAx-Werkzeugen (Enabler) bewerkstelligt sein wie sie in Kapitel 2.3 beschrieben sind. Auf diese Art und Weise kann bei einem funktionierenden Konzept eine Verkürzung der Entwicklung bei Steigerung der Qualität und Reduktion der Kosten durch Einsparung von Prototypen erreicht werden [EH06]. Zur erfolgreichen Integration der CAx-Werkzeuge existieren verschiedenste Optionen zum Austausch von Informationen zwischen den Enablern, die von neutralen Datenformaten über relationale Referenzen und Datenschnittstellen reichen. Hierbei muss zu jeder Zeit die Integrität, Konsistenz und Kompatibilität der Daten sichergestellt sein, damit z.B. Daten nach erfolgreicher strukturdynamischer Optimierung nicht ohne Bauraumuntersuchung in CAD-Bauteile übernommen werden können. Problematisch hierbei ist, dass trotz diverser konzeptioneller Ansätze und Methoden (vgl. hierzu Kapitel 2.5.2) zur Verbesserung der oben genannten Kriterien eine Umsetzung innerhalb eines Unternehmens mit existierenden Strukturen und Abläufen schwer realisierbar ist, da sie einerseits bestehende Systeme zur Aufrechterhaltung von z.B. Produktions- und Entwicklungsabläufen nicht gefährden dürfen, auf der anderen Seite strategische Entscheidungen erfordern, die mit sehr hohen Kosten und Risiken behaftet sind [FIH09].

Der Produktentstehungsprozess (PEP) wird in Phasen gegliedert, die über Meilensteine untereinander abgegrenzt werden. Innerhalb der Meilensteine werden Check Points definiert, die die Prozessschritte weiter unterteilen und wie die Meilensteine auch terminliche Verbindlichkeiten darstellen. Meilensteine müssen in fast allen Fällen abgeschlossen sein, bevor nachfolgende Arbeitsschritte freigegeben werden können. Eine grobe Gliederung des automobilen Entwicklungsprozesses, der durch weltweite Analyse von großen Fahrzeugherstellern erfolgt ist, kann nach [Gen94] in Abbildung 2.3 erfolgen. Hierbei sind auch die Unterschiede zum Produktentwicklungsprozess der MAN (darunter dargestellt) sichtbar. Der Produktentwicklungszyklus eines OEM unterliegt permanenten Veränderungen, die sich durch die kontinuierliche Neuausrichtung eines Unternehmens auf die Markt-

und Umfeldsituation ergeben, und ist immer nur eine Momentaufnahme der aktuellen Situation. Aktuell erfolgt bei MAN als Vorbereitung auf die Entwicklung der nächsten Fahrzeuggeneration eine Neuausrichtung des Produktentstehungsprozesses in die Teile dieser Arbeit eingeflossen sind, welche die Simulationsprozesse und Workflows betreffen.

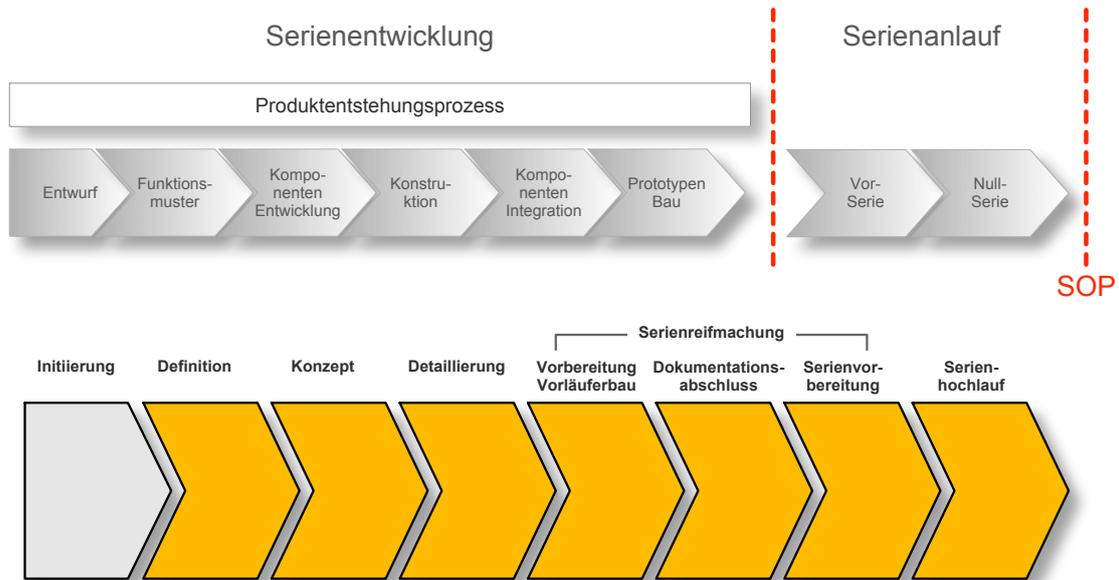


Abb. 2.3: Phasen der Produktentwicklung nach Standardisierung durch [Gen94] (oben) und MAN Nutzfahrzeuge AG (unten)

Ausgehend von einem Lastenheft, das die in Prosa formulierten Anforderungen des Marktes festlegt, wird die Fahrzeugentwicklung Top-Down in Systeme und Subsysteme kaskadiert, um bis auf Komponentenebene Vorgaben für die Konstruktion und Auslegung zu erzeugen. Sind diese abgehandelt, erfolgt eine iterative Bottom-Up Validierung der Komponenten und Systeme bis zum Gesamtfahrzeug. Abbildung 2.4 erläutert die Kaskadierung eines Fahrzeugs am Beispiel der Fahrwerksebenen. Eine ähnliche Strukturierung (Zielwertkaskadierung) wurde in einer relationalen Datenbankabbildung des Fahrzeugs zur Verwaltung von simulationsrelevanten Daten verfolgt (vgl. Kapitel 5.1).

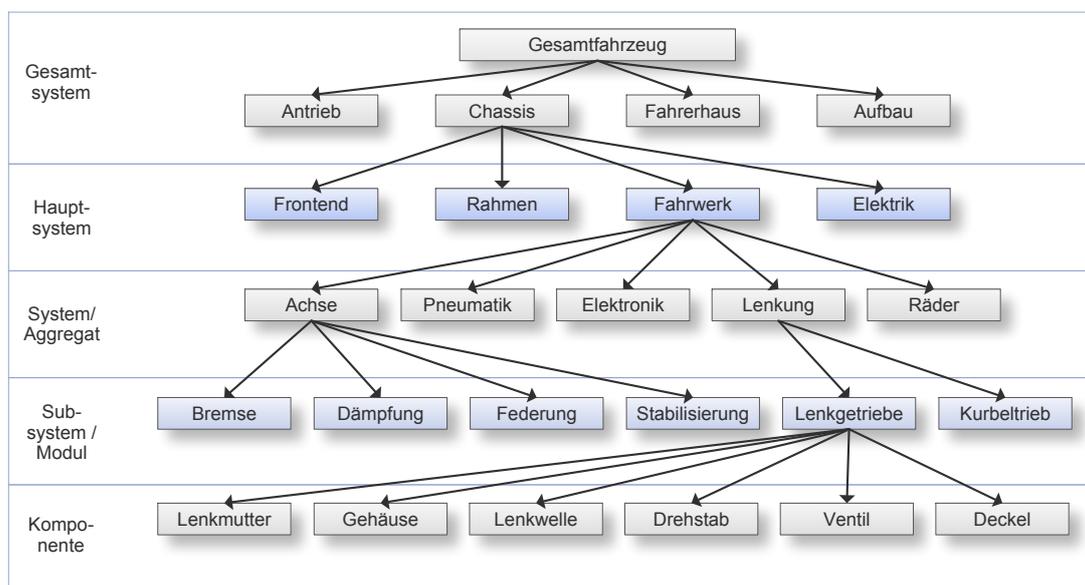


Abb. 2.4: Hierarchische Gliederung der Fahrwerksfunktionen in Anlehnung an [Hei07]

Bezogen auf die Entwicklung des Chassis und im Speziellen des Fahrwerks muss im Nutzfahrzeug nach erfolgter Konzeptphase, die eine Machbarkeits- und Risikoanalyse beinhaltet und normalerweise technisch eher konservativ verläuft, eine erweiterte Zieldefinition der Systeme, Subsysteme und Komponenten erfolgen. Hierbei werden z.B. für das System Achse die technischen Eigenschaften verbindlich definiert und diese Achskonzepte auf ihre funktionale Packageverträglichkeit über alle Baureihen hinweg untersucht. An dieser Stelle ergeben sich gravierende Unterschiede zur PKW-Entwicklung, da dort im Regelfall Fahrwerkskonzepte (Beispiel: System Vorderachse) nur in einem Gesamtfahrzeugkonzept entwickelt und integriert werden. Im Nutzfahrzeug und im Speziellen im schweren LKW müssen auf Systemebene der Achse und des Achseinbaus Packageuntersuchungen auf Funktionsebene erfolgen [FIH09]. Die Analyse der Konzepte innerhalb der Varianten verfolgt ein Workflow, der mittels eines Methodenmix aus CAE-Werkzeugen und Versuchen eine Absicherung zum Ziel hat. Dieser hochvernetzte Produktentwicklungszyklus lässt sich nach [AL01] wie folgt charakterisieren:

*„Obwohl oder gerade weil bereits eine Vielzahl von ausgereiften fachbereichsspezifischen CAx-Werkzeugen zur Verfügung steht, ist die Komplexität der Entwicklungsabläufe nur noch schwer beherrschbar.“*

So lassen sich zwar „grobe“ Abläufe innerhalb des PEP definieren und Meilensteine mit festen zeitlichen und funktionalen Zielen zur Absicherung einfügen. Wie diese Haltemarken allerdings erreicht werden, lässt sich oftmals nicht planen, geschweige denn

allgemeingültig vorschreiben. Diese Umsetzung der PEP Schritte in Workflow-Schritte ist im Regelfall produkt-, unternehmens- und personenspezifisch und lässt sich qualitativ wie quantitativ schwer beschreiben. Auch sehr enge Vorgaben zur Modellierungsstrategie oder Simulationsmodelltopologie lassen sich im Sinne einer Prozessorientierung, respektive Automatisierung und Standardisierung, schwer umsetzen, da sie einerseits die Kreativität einschränken können, auf der anderen Seite aufgrund der zeitlichen Rahmenbedingungen oftmals nicht oder schwer realisierbar sind.

### 2.1.1.1 Workflowsysteme

Im Gegensatz zum Prozess beschreibt der Workflow, wie eine Aufgabe erledigt werden muss, d.h. mit welchen Hilfsmitteln unter Einhaltung welcher Randbedingungen oder von welchen Abteilungen und Personen. Er kann nach [Nyf06] den Informationstechnologien zugeordnet werden. Hierbei wird unterschieden zwischen Basistechnologien, die die Technologien beschreiben, und Technikbündeln, unter denen sich auch das Workflowmanagement einordnen lässt. Ziel des Workflowmanagements ist es eine Automatisierung von Prozessen zu erzielen, die über eine Kombination aus menschlichen und meist softwarebasierten Abläufen definiert sind. Kern eines Workflows ist die Definition von Prozessen, in welchen Aufgaben und Regeln definiert sind und die mit entsprechend feiner Auflösung dokumentiert sein müssen. Nach [Sch01] sollten folgende Kriterien eines Prozesses zur Implementierung eines Workflows erfüllt sein:

- **Strukturiertheit:** Je besser ein Prozess strukturierbar ist, umso besser lässt sich ein Workflow erzeugen
- **Ausführungshäufigkeit:** Nur regelmäßig ausgeführte Prozesse rechtfertigen einen Workflow-Modellierungsaufwand
- **Veränderlichkeit:** Sich ständig ändernde Prozesse sind ungeeignet
- **Arbeitsteiligkeit:** Einzelne Arbeitsschritte müssen sich zuordnen lassen
- **Komplexität:** Zu hohe Komplexität schränkt im Allgemeinen die Strukturiertheit ein

Eine Abgrenzung zwischen Prozessen und Workflows kann nach [Gad01] gemäß Tabelle 2.1 erfolgen. Hierbei wird unter Prozess der Geschäftsprozess verstanden, der der fachlichen Ebene zugeordnet wird. Unterhalb des Geschäftsprozesses läuft der Produktentwicklungsprozess ab, der eine enge Kopplung an den Workflow besitzt. Die Abgrenzung zum Workflow, der der operativen Ebene zugeordnet wird, erfolgt über die Durchführbarkeit eines Prozessschrittes durch einen einzelnen Mitarbeiter. Erfolgt eine weitere Granularisierung auf Ebenen der Arbeitsschritte, entsteht hier der Übergang in die Workflowebene.

	<b>Geschäftsprozess/PEP</b>	<b>Workflow</b>
Ziel	Analyse und Gestaltung von Arbeitsabläufen im Sinne strategischer Ziele	Spezifikation der technischen Ausführungen von Arbeitsabläufen
Gestaltungsebene	Konzeptionelle Ebene mit Verbindung zur Geschäftsstrategie	Operative Ebene mit Verbindung zu unterstützenden Technologien
Detaillierungsebene	Von einem Mitarbeiter an einem Arbeitsplatz ausführbare Arbeitsschritte	Konkretisierung von Arbeitsschritten hinsichtlich Arbeitsverfahren sowie technologischer und personeller Ressourcen

Tab. 2.1: Geschäftsprozess und Workflow nach [Gad01]

Starre Workflowsysteme bieten normalerweise nicht die Möglichkeit Innovationsprozesse abzubilden, da sie der geforderten Flexibilität nicht gerecht werden [Nyf06]. Sehr wohl lassen sie sich aber auf kleine Entwicklungsschritte, die zyklisch auftreten und oben genannten Kriterien genügen, bei entsprechender Flexibilisierung erfolgreich anwenden. Da nach Studien von EM Engineering<sup>1</sup> im Schnitt 51% der Arbeitszeit in Berechnungsabteilungen aufgewandt wird, um valide, vollständige Ausgangsdaten für Simulationsmodelle zu erhalten, lässt sich der große Nutzen für den gesamten Entwicklungsprozess prognostizieren, wenn bereits in frühen PEP-Phasen durch Workflowmanagement die notwendigen Voraussetzungen für den späteren CAE-Einsatz getroffen werden.

### 2.1.1.2 Grauzonen des Entwicklungsprozesses aus Sicht der CAE

Betrachtet man einen Entwicklungsprozess bereits von der sehr frühen Konzeptphase an, so erscheint es naheliegend, dass zu Beginn eines Entwicklungsprojektes ein sehr unscharfer Parameterraum existiert, der noch viele Freiräume besitzen kann. Aus diesem Grund werden für konzeptionelle Untersuchungen, beginnend von der Skizze über Handrechnungen aber auch erste computergestützte Analysen genutzt, die alle gemein haben, dass sie personen- und kennnispezifisch eingesetzt werden. Dieser unsichere Datenraum schafft dem Ingenieur den nötigen Freiraum zur kreativen Entwicklung innovativer Produkte und ermöglicht eine kontinuierliche Weiterentwicklung. Untersuchungen der

<sup>1</sup>em engineering - Krastel <http://www.em.ag>

industriellen Praxis<sup>2</sup> [FI09] der letzten Jahre ergaben, dass die Art dieser eingesetzten Entwicklungswerkzeuge sehr stark von den Vorlieben und der Vorbildung der Mitarbeiter abhängig ist. Ähnliche Beobachtungen wurden auch von [Amp02] gemacht. Oftmals wurden Berechnungsprogramme in Tabellenkalkulationsprogrammen wie MS-Excel [Mic10] genutzt, die auch gleichzeitig Produktdaten enthielten und deren Einsatz weit über die "Fähigkeiten" der Software hinaus ausgereizt wurden. Es wurden aber auch diverse frei programmierte Tools in unterschiedlichsten Programmier- und Skriptsprachen verzeichnet, die meist nur einem sehr eingeschränkten Personenkreis verständlich und/oder zugänglich waren. Bei allen analysierten Hilfsmitteln konnte beobachtet werden dass, wie von [Pan08] beschrieben, eine lokale Dokumentation der Ergebnisse in Excel erfolgte und die Datenbeschaffung zumeist auf dem nicht nachvollziehbarem „kurzen Dienstweg“ stattfindet. Durch diese redundante unvalide Datenhaltung am Ingenieursarbeitsplatz konnte beobachtet werden, dass trotz ähnlicher Berechnungsmethodik Ergebnisdifferenzen durch die Datenbasen aufgetreten sind. So konnten beispielsweise im Lauf der Analyse sechs offiziell genutzte Reifendatenbanken identifiziert werden, die trotz sehr ähnlichem Informationsgehalt bei einer Vielzahl der Datensätze Unterschiede aufwiesen. Auf diese Weise konnte zwar am einzelnen Entwicklerarbeitsplatz ein Zusammenhang zwischen Eingangsdaten und Ergebnissen hergestellt werden, eine globale Nachvollziehbarkeit, Reproduzierbarkeit sowie ein Vergleich konnte aber nicht realisiert werden. Neben der Problematik der Datenbeschaffung, die auch in Kapitel 3.3 beschrieben ist, stellen alle im Unternehmen existierenden Tools einen immensen Wissenspool dar, da sie teilweise sehr weit ausgearbeitet sind und spezifische Fragestellungen standardisiert beantworten (vgl. auch [NR08]). So konnte festgestellt werden, dass einige teilweise schon sehr lange im Einsatz befindlichen „Helferlein“ gewisse Fragestellungen im Rahmen der Toleranzgrenzen auch in den späteren Phasen des PEP mit genügend großer Genauigkeit bereitstellen konnten und folglich noch immer zum Preprocessing von Simulationsmodellen genutzt werden.

Gelänge es, dieses in CAE-Werkzeugen gebündelte Wissen, das meist von nur einem Mitarbeiter stammt, unternehmensweit bereitzustellen und mit einem CAE-Databackbone<sup>3</sup> sowie einem Workflow zu verknüpfen, könnte eine akzeptierte, gelebte Methode an weiteren Stellen zur Verbesserung der Entwicklung genutzt werden. Auf diese Art und Weise kann über die Entwicklungsabteilungen hinweg ein Wissenstransfer stattfinden, der neben einer gesteigerten Akzeptanz der Simulation selbst nach dem Ausscheiden von Mitarbeitern eine weitere Nutzung ermöglicht. Kritisch betrachtet werden muss allerdings die Einschränkung der Kreativität im Entwicklungsprozess, da zu jeder Zeit immer noch genügend Freiräume vorhanden sein müssen, um Innovationen zu erzeugen [Pae04]. All diesen Werkzeugen gemein ist, dass selbst nach unternehmensweiter Bereitstellung und Integration nach Abschluss einer Auslegung/Berechnung sowohl die Eingabedaten

---

<sup>2</sup>Analyse der Fahrwerksentwicklungsabteilungen der MAN Nutzfahrzeuge AG (2007-2009)

<sup>3</sup>Mit einem Databackbone ist hier die Summe aller Engineering Daten gemeint (vgl. PDM Kapitel 2.5.2)

als auch die Ergebnisse im weiteren Entwicklungsprozess nicht mehr oder nur mit hohem manuellem Pflegeaufwand prozesssicher weiterbenutzt werden können. Als Beispiel kann hier eine einfache analytische Betrachtung von Blattfedern herangezogen werden, bei der der Momentanpol der Einspannstelle bezogen auf Paralleleinfedern untersucht wird (vgl. Anhang). Die ursprünglich nicht standardisierte Parametrierung sowie die verwendeten Koordinatensysteme und physikalischen Einheiten machen hier eine weitere Nutzung im CAE-Prozess, konkret im MKS-Prozess, schwer möglich, da vorab diverse effizienzmindernde Transformationen ablaufen müssten.

### 2.1.2 Umgang mit Informationen und Wissen im PEP

Die Begriffe Information und Wissen werden in unserem Sprachgebrauch oftmals synonym gebraucht, obwohl sie sich in wesentlichen Faktoren voneinander unterscheiden. Da in Kapitel 3 die Begriffe wieder aufgegriffen werden, sollen an dieser Stelle Grenzkriterien und Unterschiede zwischen diesen Begrifflichkeiten dargestellt werden.

Die Speicherung, Weitergabe und der Austausch von Informationen und Wissen sind zentraler Bestandteil eines Produktentwicklungsprozesses, so dass eine sichere Beherrschung die zukünftige Sicherung des unternehmerischen Erfolges gewährleistet. Nach [Kla03] entsteht Wissen in der Modellvorstellung durch den sukzessiven Übergang aus Zeichen. Ein Zeichensatz wird in Kombination mit einer definiten Syntax, die in einem Kontext steht zu einer Information, deren Vernetzung schließlich zu Wissen führt. Die Grenzen zwischen Daten, Informationen und Wissen können dabei fließend verlaufen. Nach [PRR06] stützt sich Wissen zwar auf Daten und Informationen, kann aber nur entstehen, wenn es mit Individuen in Verbindung steht. So kann das Wissen eines Unternehmens aus dem Wissen der Mitarbeiter, formalisierten Prozessen und Problemlösezyklen etc. bestehen. Abbildung 2.5 veranschaulicht die begriffliche Definition des Wissens.

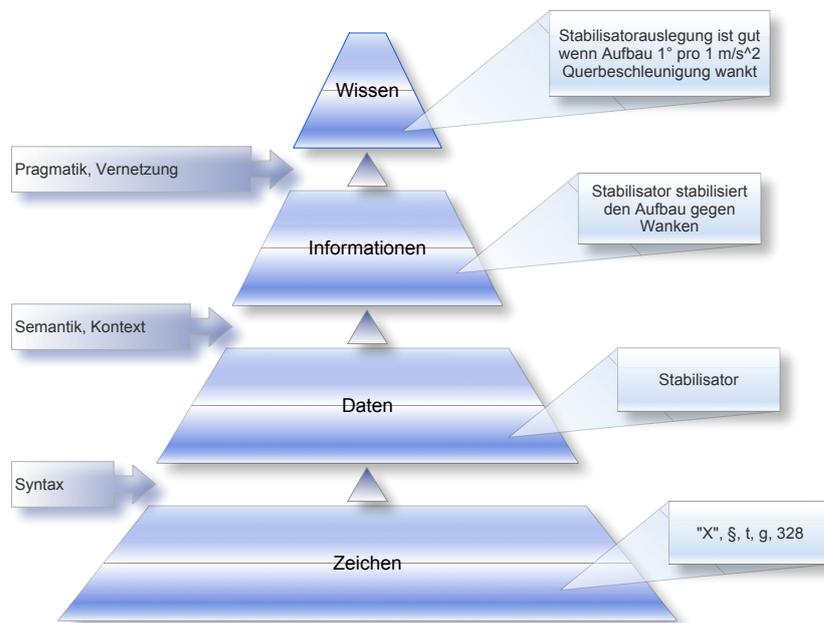


Abb. 2.5: Hierarchien der Information nach [Bod06]

Aus diesem Grund gestaltet sich der Umgang mit Wissen weitaus schwieriger als der Umgang mit Informationen, da alle Wissensträger im Verbund betrachtet werden müssen. Explizites Wissen kann in Form von technischen Daten, Formeln, Berichten oder den Köpfen von Individuen vorliegen und ist im Regelfall artikulierbar. Implizites Wissen ist schwer artikulierbar und im Normalfall an einen Wissensträger gebunden [Wei06]. Die Nutzung von implizitem Wissen erfolgt durch eine Explizierung, man spricht dann von der Überführung von tacitem Expertenwissen. Für Informationen und ihren fließenden Übergang in Wissen gibt es in der Literatur weitere zahlreiche Unterscheidungskriterien, die sich wie in Abbildung 2.6 darstellen. Nach [Lin09, PRR06] liegt die Grenze zwischen Information und Wissen bei den Verknüpfungen, da Wissen immer auf verknüpften Informationen basiert. Wissen hat im Gegensatz zur reinen Information eine hohe Dynamik, da es vor allem in der Technik über der Zeit stark veränderlich ist. Wissen kann seine Bedeutung verlieren und als veraltet gelten oder in zeitloses Basiswissen übergehen. [Wei06] spricht hierbei von der „Halbwertszeit des Wissens“, d.h. die Zeit des Verfalls der Wichtigkeit von Wissen auf die Hälfte des Ausgangszustandes.

Dimensionen des Wissens

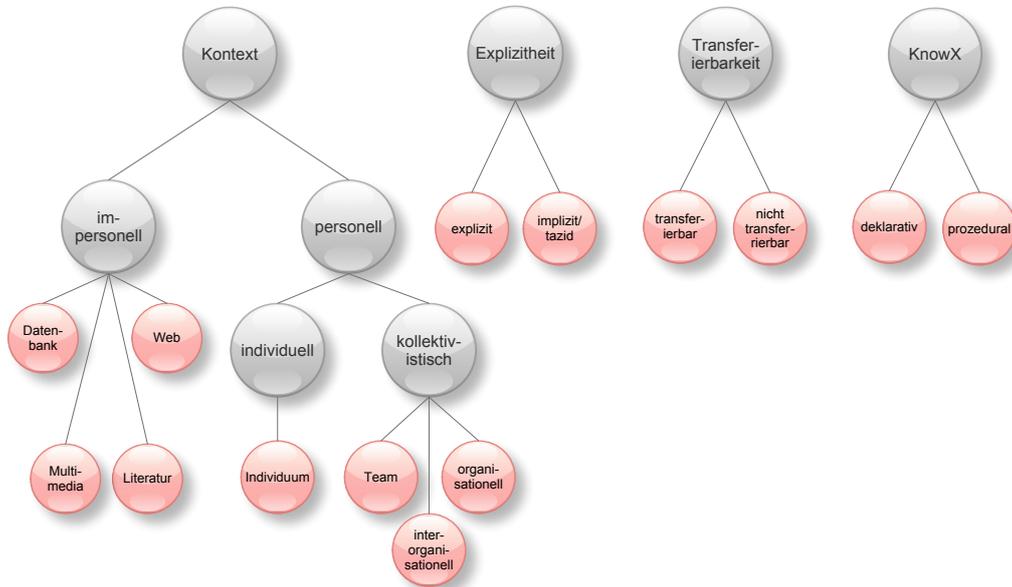


Abb. 2.6: Dimensionen des Wissens nach [Wei06]

Um Wissen innerhalb eines Unternehmens verfügbar zu machen und dadurch letztendlich die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, ist ein Management von Informationen und Wissen heute unabdingbar. Die Gründe hierfür sind vor allem in der hohen Dynamik der Märkte sowie den damit verbundenen hochkomplexen, wissensintensiven Geschäfts- und Produktentwicklungsprozessen zu finden. [Kla03] fasst hier fünf wesentliche Treiber des Wissensmanagements zusammen:

- Wissensverlust (Verlust von Wissensträgern durch Downsizing, Outsourcing etc.)
- Wissensexplosion (Verdopplung des global verfügbaren Wissens innerhalb von 5-10 Jahren)
- Wissensdiversifikation (Wissenswachstum durch immer mehr wissenschaftliche Spezialgebiete mit eigenen Terminologien, Methoden und Abläufen; Beispiel: Mechatronik)
- Wissenserosion (Veralterung des Wissens; Halbwertszeit; Beispiel: EDV)
- Wissensnutzung (Effiziente Mechanismen zur Identifikation und Bewertung von Wissen)

Die Notwendigkeit Wissen zu verwalten, zu verbreiten und nutzbar zu machen stellt in einem Produkt wie einem Nutzfahrzeug eine wichtige Säule dar, um auch zukünftig erfolgreich am Markt agieren zu können. Die Untersuchungen der letzten Jahre innerhalb MAN haben ergeben, dass Wissen in Form von Berichten und Präsentationen zwar verwaltet, jedoch nur mit erhöhtem Aufwand wiedergefunden werden konnte. So mussten immer wieder Kommunikationsdefizite zwischen Versuchs-, Berechnungs- und Konstruktionsabteilungen festgestellt werden, da zwar eine intensive Kommunikation stattfand, diese zumeist aber auf dem nicht reproduzierbaren „kleinen Dienstweg“ erfolgte. Ziel muss es folglich sein, diesen Wissensverlust, der vor allem projektunbeteiligte oder neue Mitarbeiter betrifft, zu beherrschen und Methoden bereitzustellen, die einen schnellen, sicheren Umgang mit Wissen erlauben.

Ein weiterer nicht unerheblicher Aspekt der Sammlung von Wissen ist der zeitliche Aufwand des einzelnen Mitarbeiters, dem der subjektiv meist unscharfe Nutzen gegenüber steht. Beobachtet wurde eine signifikant höhere Bereitschaft Wissen zu teilen, wenn der Zweck und das Ziel bekannt waren und kein Gefühl des „Anzapfens“ von Individualwissen im Sinne von Expertenwissen entstand.

### 2.1.2.1 Wissensmanagement

Wissensmanagement beinhaltet neben den technischen Aspekten der Datenverwaltung, respektive der Informationsverwaltung, viele interdisziplinäre Teile, die unter anderem aus der Informationstechnik, Informationswissenschaft, Arbeitswissenschaft und Betriebswissenschaft bestehen. Die Informations- und Datenbanktechnik zur Bereitstellung von Wissen soll an dieser Stelle nicht näher erörtert werden, da dies noch in Kapitel 2.5, im Rahmen des Produktdatenmanagements geschieht. Nach [PRR06, Bod06] lässt sich das Wissensmanagement in sechs Kernprozesse gliedern, die wie folgt ablaufen:

- Wissensidentifikation
- Wissenserwerb
- Wissensentwicklung
- Wissens(ver)teilung
- Wissensnutzung
- Wissensbewahrung

Im Rahmen der Dissertation sollen nur ausgewählte Phasen des Wissensmanagements aufgegriffen werden, da sie bei der Optimierung von Fahrwerksentwicklungsprozessen tangiert werden bzw. ein Nebenprodukt des Prozesses sind. An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass ursprünglich kein Wissensmanagement im herkömmlichen Sinne erzielt werden sollte, sondern erst im Rahmen der Prozessgestaltung klar wurde, dass die in

Kapitel 5 beschriebene Methodik und die in Kapitel 6.1 erläuterte Umsetzung eine Komponente des praxismgerechten Wissensmanagements darstellt. So wird bei einer parametrischen CAE-Methode bei wachsender Datenbasis mehr Wissen vom Vorgänger auf den ausführenden Berechnungsingenieur<sup>4</sup> oder Konstrukteur übertragen.

Ein Mangel an transparenten, konsistenten Informations- und Wissensbeständen, wie sie in vielen Unternehmen zu finden sind, macht eine Identifikation von Wissen notwendig. Ziel ist es hierbei, internes und externes Wissen sowie deren Wissensträger zu identifizieren und nach Relevanz zu sortieren. Dieses als Wissensmonitoring bezeichnete Verfahren hat unter Einhaltung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses zur Aufgabe, systematisch Wissen zu sammeln und zuzuordnen. Die dabei entstehenden Barrieren sind unter anderem die Verantwortungsbereiche, Machtkalküle, Fluktuationen und die Preisgabe von Wissen. Das „Verfügbar machen“ von Wissen, respektive die Verteilung, muss organisatorisch und informationstechnisch erfolgen und neben der passenden Infrastruktur auch ins Bewusstsein der Mitarbeiter gelangen. Barrieren hierbei sind unter anderem Zeitmangel, Bedienbarkeit von Informationssystemen, mangelndes Bewusstsein und Machtkalküle. Ein weiterer zentraler Aspekt des Wissensmanagements ist die Nutzung des identifizierten Wissens, also die Integration in den organisationsinternen Handlungs- und Entscheidungsprozess [Kla03]. Ausschlaggebend hierbei ist, auf Geschäftsprozessebene und in den Führungsebenen ein Bewusstsein zu schaffen, dass Wissensmanagement auch einen nicht unerheblichen Zeit- und Kostenfaktor impliziert. Der letzte Schritt für ein erfolgreiches Management von Wissen ist die Bewahrung der erworbenen und erarbeiteten Inhalte sowie die kontinuierliche Verteilung im Unternehmen, um einem organisationalem Vergessen vorzubeugen. Abbildung 2.7 verdeutlicht die Mechanismen des Vergessens, die zu einem Verlust an Wissen im Unternehmen führen können. Dem Verlust entgegenzuwirken muss folglich im Rahmen eines erfolgreichen Wissensmanagements Priorität zugeschrieben werden.

---

<sup>4</sup>Ingenieur und Konstrukteur wird im Weiteren geschlechtsneutral aufgefasst

Modus \ Form		individuell	kollektiv	elektronisch
		<b>Gedächtnisinhalt wird gelöscht</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kündigung</li> <li>- Krankheit</li> <li>- Tod</li> <li>- Amnesie</li> <li>- Frühpensionierung</li> </ul>
<b>Zugriff nicht möglich</b>	<b>befristet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Überlastung</li> <li>- Versetzung</li> <li>- Beförderung</li> <li>- Krankheit</li> <li>- Urlaub</li> <li>- Mangel an Training</li> <li>- Dienst nach Vorschrift</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tabuisierung</li> <li>- kollektive Sabotage</li> <li>- Teamkonkurrenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- revers. Datenverlust</li> <li>- temp. Überlastung</li> <li>- Schnittstellenfehler</li> <li>- Mappingfehler</li> </ul>
	<b>auf Dauer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Überlastung</li> <li>- Verdrängung</li> <li>- Interesse</li> <li>- Bewusstheit</li> <li>- innere Kündigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verkauf v. Bereichen</li> <li>- Abwanderungen</li> <li>- cover-up</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inkompatibilitäten</li> <li>- Überlastung</li> <li>- falsche Kodifizierung</li> </ul>

Abb. 2.7: Formen des organisatorischen Vergessens nach [PRR06]

Auf operativer Ebene wurde sowohl in der Literatur ([Kla03]) als auch bei MAN ein bestimmtes Maß an Verweigerung bei der Nutzung fremden Wissens sowie Skepsis bezüglich der Validität von elektronisch gespeichertem Wissen beobachtet. Positive Erfahrungen bezüglich der Akzeptanz haben sich insbesondere dann ergeben, wenn neben der Preisgabe von Wissen eine Partizipationserkenntnis stattgefunden hat. So waren Wissensträger in den meisten Fällen kooperativer, wenn ihnen das Ziel des Wissenstransfers transparent vorgestellt wurde und sie erkennen konnten wie dieses Wissen genutzt wird. Diese auch von [SW08] beobachtete Problematik bei der Preisgabe von Wissen über Abteilungs- und Bereichsgrenzen hinaus lässt sich eindrucksvoll an einem anonymen Zitat eines Abteilungsleiters der automobilen Zulieferindustrie aus [PRR06] erläutern. Diese Aussage lässt sich aber auch bis zum einzelnen Individuum nachvollziehen, da diese Teilungsbarrieren von Mitarbeitern nachvollziehbar als ihre individuelle unternehmensinterne Machtbasis angesehen werden:

*„An die freiwillige Abgabe von Wissen ist bei uns nicht zu denken. Besonders seit die Direktion die letzte Reengineering-Aktion durchgedrückt hat hütet jeder eifersüchtig sein*

*Terrain. Hier läuft alles unter dem Motto: ‚Sich nur nicht überflüssig machen. Wer weiß, wer beim nächsten Mal dran glauben muss‘.*

### 2.1.2.2 Instrumente des Wissensmanagements

Um Wissen zu managen, respektive es abzulegen und wieder zu finden, wird es heute in elektronischer Form in Datenbanken gespeichert. Dabei muss das gespeicherte Wissen dem Nutzer hinsichtlich der Art, des Umfangs und der Präsentation extrahiert werden und seinen Anforderungen so gut wie möglich entsprechen. Unterschieden wird hierbei nach einer gezielten Suche nach Daten (Searching) oder dem von Neugier getriebenen „Stöbern“ (Browsing). In beiden Fällen muss dem Wunsch des Anwenders nach Ergebnissen (Retrieval) über eine Abfrage (Query), die von der Anwendersprache in die Sprache des Systems transferiert werden muss (Beispiel: Prosa in SQL), Folge geleistet werden. Systeme zur Extraktion von Daten sollten den Anwender bestmöglich unterstützen und sowohl die Möglichkeit des Browsens, als auch der gezielten Suche bieten [Wei06]. Die Technologien der Wissensmanagementinstrumente gliedern sich dabei entsprechend der Aufgabenebenen. Beginnend bei der Speicherung von Informationen in Datei- oder Datenbanksystemen erfolgt eine Verknüpfung über die Beschreibungsebene. Die Verteilung von Wissen erfolgt schließlich über die Zugriffsebene, die z.B. Datenbankabfragen in SQL oder OLAP, wie sie in Kapitel 2.5 erläutert sind, nutzen, um dem Anwender die Resultate entsprechend seinen Anforderungen zu präsentieren. Gesondert sei hier noch die Wissensverteilung nach dem Push-Pull-Prinzip erwähnt, da sich nach [Bod06] herausgestellt hat, dass beim Push-Prinzip Mitarbeiter über eine „Informationsflut“ nach dem Gießkannenprinzip klagen, so dass das Pull-Prinzip in der Wissensdistribution die attraktivere Alternative darstellt. Einen Überblick über die unterschiedlichen Technologien innerhalb der Ebenen gibt Abbildung 2.8.

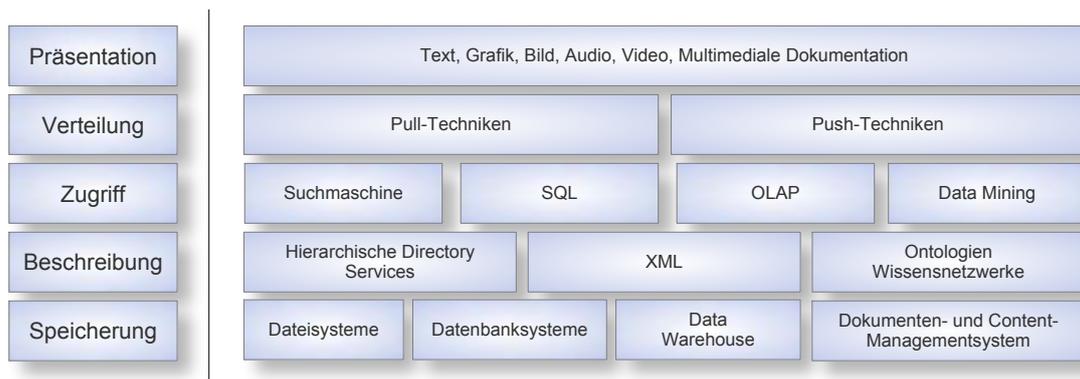


Abb. 2.8: Technologien des Wissensmanagements nach [Bod06]

[Bod06] unterscheidet in den Systemen des Wissensmanagements fünf verschiedene Methoden der Umsetzung, die von Datensammlungen bis zu hochkomplexen neuronalen Netzwerken reichen. In der Praxis, die meist eine webbasierte Umsetzung von Wissensbibliotheken beinhaltet, sind am häufigsten sogenannte Expertensysteme zu finden. Gründe hierfür sind mit hoher Wahrscheinlichkeit der noch größere Integrations- und Pflegeaufwand von automatisierten Wissensmanagementsystemen. Tabelle 2.2 enthält eine Auswahl über die aktuell umgesetzten wissenschaftlichen Methoden und Instrumente, die veröffentlicht wurden und zumeist frei nutzbar sind.

Name	Herausgeber	Beschreibung
Bibling [RUB10]	Ruhruniversität Bochum	elektronische Bibliothek für Ingenieure
CiDAD [Gaa10]	Technische Universität München (Lehrstuhl für Produktentwicklung)	Webportal zum Erwerb von Methodenwissen
Digitale Bibliothek [Mei10]	ETH Zürich (Zentrum für Produktentwicklung)	Digitale Bibliothek und online Datenbank für Ingenieure
GINA [GIN10]	Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Konstruktionstechnik	Ganzheitlicher effizienter Innovationsprozess
KOMSOLOV [KOM10]	Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Konstruktionstechnik	Teilautomatisiertes Wissensmanagement
GENIAL [GEN10]	Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Konstruktionstechnik	Informations- und Kommunikationsnetz der Ingenieurwissenschaften
The Semaril [Wer10]	Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik	Semantisches Netz zum Wissensmanagement

Tab. 2.2: Projekte zum Management von Wissen

Allen Instrumenten und Methoden ist gemein, dass sie auf Datenbanken basieren und in vielen Fällen webbasiert sind, um Daten weltweit zur Verfügung zu stellen. Erwähnenswert ist an dieser Stelle auch, dass diese Form des Wissensmanagements aufgrund der Komplexität der Systeme einen nicht unerheblichen Zeit- und Kostenfaktor innerhalb

eines Unternehmens darstellt.

## 2.2 Entwicklungsmethode Versuch

Speziell in der Fahrwerksentwicklung ist ein starker Methodenmix aus Versuch und Simulation vertreten, da aufgrund der hohen Lauflleistungen im Nutzfahrzeug verlässliche Lebensdaueruntersuchungen nach wie vor reale Prototypen erfordern. Das Feld der Versuche umfasst unterschiedlichste Arten von Prüfungen mit differenzierten Aussagegüten, die nur in Kombination reale Bedingungen im Feld nachstellen. Entsprechend ihrer Komplexität und Aussagegüte können nach [Hei07, Deu06] folgende Versuche unterschieden werden:

- Komponentenversuche
- Subsystemprüfungen
- Systemversuche
- Missbrauchsversuche am Fahrzeug
- Fahrzeug-Raffdauerläufe
- Fahrzeug-Straßendauerlauftests

Entsprechend ihrer Reihenfolge ist die Aussagegüte beschränkt auf die Systemgrenze des Versuchs. So kann z.B. bei Komponententests keine Aussage für das übergeordnete Subsystem oder System getroffen werden und immer nur eine Bewertung unter bekannten Randbedingungen getroffen werden. Aufgrund des hohen zeitlichen und finanziellen Aufwandes der durch reale Prototypen entsteht besteht daher die Bestrebung Versuche immer mehr durch virtuelle Methoden zu substituieren. Unter der Prämisse von genäherten Einsatzbedingungen, die über Lastkollektive, Lastfrequenzen, Angriffspunkte etc. abgebildet werden, erfolgt heute eine idealerweise realitätsnahe Untersuchung. Nach [BS01] können Versuche unter anderem nach folgenden Prüfarten durchgeführt werden:

- Sichtprüfungen
- Bauraumuntersuchungen
- Funktionsprüfungen
- Verschleißprüfungen
- Missbrauchsprüfungen
- Betriebsfestigkeitsprüfungen
- Korrosionsprüfungen

Heute existiert eine Vielzahl von Versuchen nicht nur zur reinen Absicherung von Funktion oder Lebensdauer sondern auch zur Validierung und Verifikation von Simulationsmodellen oder -verfahren, so dass spezielle Effekte mit hochaufgelösten Modellen reproduzierbar sind und auf Sensitivität untersucht werden können. Klarer Vorteil von Versuchen ist die Berücksichtigung aller Einflussgrößen sowie eine hochaufgelöste auch subjektive Bewertung, die so mit Simulation nicht möglich ist [EH06]. Andererseits sind Versuche mit großem Aufwand verbunden und nur mit verhältnismäßig geringer Reproduzierbarkeit durchführbar. Im Rahmen dieser Dissertation wurde der Versuch primär als Mittel der Validierung von Simulationsmodellen genutzt, so dass hier nicht näher auf die Versuchsmethoden eingegangen wird. Die Nutzung des Fahrversuchs zur funktionalen Überprüfung und Abstimmung von Fahrwerkskomponenten ist heute neben allen virtuellen Entwicklungsmethoden nach wie vor State of the Art [Hei07], kann aber im Nutzfahrzeug, im Gegensatz zum PKW, nicht für jede Variante durchgeführt werden. Hier erfolgt nach einer Untersuchung bei MAN meist nur eine Analyse der als kritisch erachteten Varianten, um die geforderten Zeit- und Kostenziele einhalten zu können. Einer virtuellen Vorauslegung kommt deshalb an dieser Stelle besondere Bedeutung zu.

## 2.3 Entwicklungsmethode CAx

Durch die immer weiter zunehmende Komplexität von Fahrzeugen mit einer großen Menge an Bauteilen und Baugruppen, die über eine große Anzahl von funktionalen Verknüpfungen verfügen, ist heute bei den durch den Markt und die Wettbewerber vorgegebenen Randbedingungen eine Entwicklung ohne CAx-Methodik undenkbar. Unter dem Überbegriff CAx versteht man alle rechnergestützten Methoden zur Entwicklung von Produkten. Es wird hierbei unterschieden zwischen dem Entwurfsprozess CAD (Design), dem Berechnungs- und Simulationsprozess CAE (Engineering), sowie der Versuchsdurchführung CAT (Testing) und dem Herstellungsprozess CAM (Manufacturing) [Mey07]. Da im Rahmen dieser Dissertation ein Fokus auf die Interaktion zwischen Entwurfsprozess und Berechnungsprozess gesetzt wird, sei an dieser Stelle an die weiterführende Literatur zum Thema Herstellung verwiesen.

Unter dem Begriff der „Simulation“ versteht man nach der VDI-Richtlinie 3633 [VFF96] folgendes:

*„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“*

Eine Bestrebung der Simulation mit CAE-Methoden ist es folglich, ein Fahrzeug möglichst frühzeitig und umfassend, noch vor Erstellung eines realen Prototypen, zu optimieren. Ziel ist es, über eine im CAD-System erzeugte Geometrie funktionale Aussagen durch die

CAE treffen zu können, deren Funktion abzusichern und Fehler zu erkennen [Mey07]. In den Phasen der Entwicklung entstehen im Regelfall Schleifen zwischen der Konzeptphase, dem Konstruktionsprozess, einem Berechnungsabschnitt sowie einem optionalen Versuch. Jede dieser Phasen wird durch spezifische CAx-Tools (Enabler) unterstützt, die den Entwicklungsingenieur<sup>5</sup> in seinen Tätigkeiten unterstützen. Man spricht hierbei von einem „Entwicklungs-Workflow“, der innerhalb der Entwicklungsphasen abläuft und die Abfolge von Entwicklungsschritten mit bestimmten Entwicklungswerkzeugen (Tools) beschreibt [EH06]. Dabei muss klar unterschieden werden zwischen dem Prozess der beschreibt, *was* in der Entwicklung getan werden muss, und dem Workflow der definiert, *wie* es getan werden muss.

Heute hat sich nach [Mey07] im Sprachgebrauch für CAE-Methoden eine Beschränkung auf die Berechnungs- und Simulationstätigkeit durchgesetzt, wobei eine klare Unterscheidung zum Entwurfsprozess vollzogen (CAD-Design) wird. Innerhalb der CAE-Methoden wird nach den unterschiedlichen Disziplinen oder Fakultäten unterschieden, die einerseits auf der angewandten Berechnungsmethodik basieren, auf der anderen Seite das Ziel der Berechnung beschreiben. Nach [EH06] wird auch nach den Prinzipien eines Berechnungsmodells unterschieden, bei dem eine Differenzierung nach physikalischen Modellen, phänomenologischen (empirischen) Modellen und semi-physikalischen Modellen erfolgt. Hierbei ist wichtig, dass im Sinne der Modellbildung und des Simulationsziels eine geeignete Modellierung gewählt wird, um reale Vorgänge mit hinreichender Genauigkeit bei genügend großer Performanz (z.B. für Echtzeitsimulationen) abzubilden. Nachfolgende Darstellung veranschaulicht die verschiedenen Arten der Modellbildung und erläutert die jeweiligen Vorteile.

Modellart	Modellierung	Beschreibung	Vorteil(e)
Black-Box-Modelle	phänomenologisch (empirisch)	Näherungen/Mapping von beobachteten Eigenschaften ohne die Anwendung physikalischer Gesetze	Schnelle, effiziente Berechnungsmöglichkeit
White-Box-Modelle	deterministisch physikalisch	physikalische Gesetze. Axiome liefern mathematische Beschreibung	physikalische Sichtweise Systemverständnis Parameter mit physikalischer Bedeutung
Grey-Box-Modelle	empirisch und physikalisch	Kombination aus physikalischen und empirischen Modellen	Effiziente Anteile jeder Modellarten vereinen

Abb. 2.9: Vor- und Nachteile von Modellierungsstrategien nach [EH06] und [Sch05a]

<sup>5</sup>Ingenieur wird im Weiteren geschlechtsneutral aufgefasst

Nach [Eig07] lassen sich die einzelnen CAE-Methoden weiter untergliedern nach der verwendeten rechnergestützten Lösung der technischen Probleme, die vor und während des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses angewandt werden. Hier ist heute nachfolgende Gliederung üblich:

Bezeichnung	Abkürzung
Auslegungs- und Kontroll-Berechnungen für Komponenten	./.
Mehrkörpersimulation	MKS
Finite Elemente Methode	FEM
Strömungssimulation (Fluiddynamik) oder thermische Simulation	CFD
Prozesssimulation	CAPE
Softwareentwicklung	CASE

Tab. 2.3: Teilmethoden des Computer Aided Engineering

Zur Berechnung oder Simulation einer Problemstellung muss im CAE-Prozess eine Modellbildung erfolgen, die zum Ziel hat, bestimmte Aufgabenstellungen in ein mathematisch-physikalisches Modell zu überführen. Die Modellbildung muss so erfolgen, dass sie gerade komplex genug ist, um die zu untersuchenden Effekte aufzuzeigen. Ausschlaggebend ist hier der freie Parameterraum, der vor allem zu Beginn eines Entwicklungsprozesses noch sehr groß ist und sehr große, detaillierte Modelle überflüssig machen würde, da eine Parameterversorgung nicht möglich wäre und mit zu vielen abgeschätzten Werten operiert werden müsste. Aus diesem Grund werden in jeder Phase einer Entwicklung üblicherweise unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt, die physikalische Vorgänge mehr oder weniger genau beschreiben. Speziell in der Chassis- und Fahrwerksentwicklung, in der im Nutzfahrzeug primär funktionale Fragestellungen sowie Betriebsfestigkeitsanalysen erfolgen, reichen die Modelle von sehr einfachen analytischen Berechnungen bis zu komplexen numerischen, nichtlinearen Verfahren. Nach [Eig07] lassen sich die Berechnungsmethoden in drei Hauptgruppen klassifizieren. Hierbei wird unterschieden nach dem Einsatzzeitpunkt der Methode, dem Zeitaufwand für die Nutzung, die Aussagegüte und dem Anwenderkreis. Nachfolgende Abbildung stellt die drei Klassen von Berechnungstypen dar:

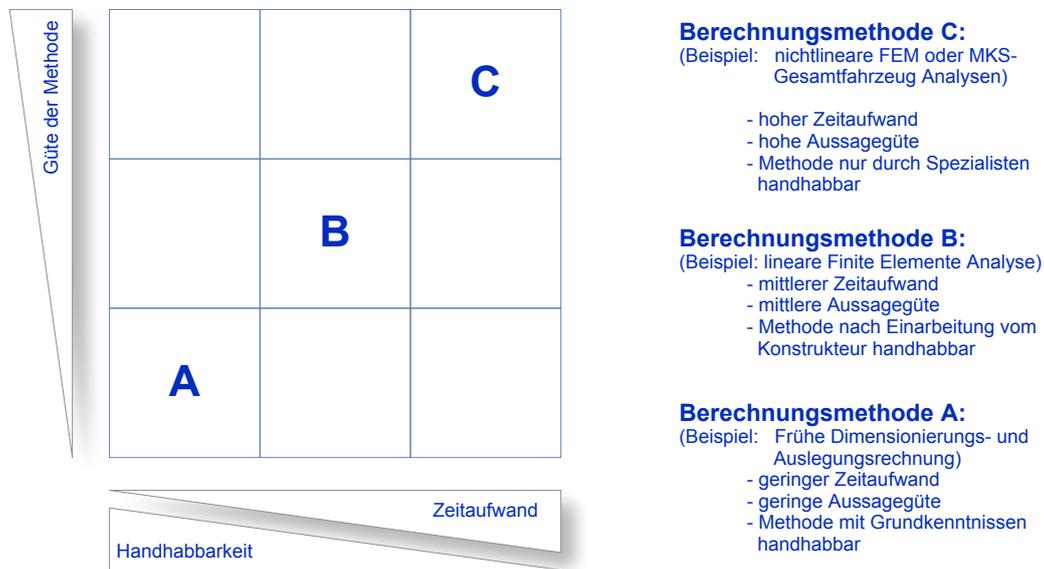


Abb. 2.10: Klassifizierung von Berechnungsmethoden nach [Eig07]

Der Einsatz von Berechnungsmethoden mit unterschiedlicher Detaillierung (Level of Detail - LOD) in den verschiedenen Phasen eines Entwicklungsprozesses von unterschiedlichsten Anwenderkreisen macht einen Ergebnisvergleich sowie die Überprüfung der Korrelation von Parametrierungen im Rahmen eines vertretbaren Zeitfensters schwierig, wenn nicht sogar unmöglich.

Abhängig vom jeweiligen Unternehmen werden CAE-Methoden mit unterschiedlicher Aussagegüte zum Einsatz gebracht. Nach [BS01] kann die Güte und Vorhersagegenauigkeit in drei Stufen gegliedert werden, die mit a, b und c gekennzeichnet sind und folgende Qualifizierung darstellen:

- a- „im Einsatz, prognosesicher“
- b- „im Einsatz, zur Unterstützung der Entwicklung“
- c- „beschränkter Einsatz wegen unvollständiger Methode“

Für spezifische Funktionsaussagen am Fahrzeug gibt es nach gängiger Literatur [Mey07] heute eine komponenten- und fahrzeugbezogene Aussagegüte, die in Auszügen und Anlehnung an die hier behandelten fahrwerksspezifischen Fragestellungen in nachfolgender Tabelle dargestellt sind. Kapitel 4.4.1 zeigt eine Analyse der heutigen CAE-Situation bei MAN.

Komponente	Disziplin	Aussagegüte nach Literatur	Aussagegüte MAN
<b>Fahrwerk</b>	Kinematik	a	a
	Elastokinematik (z.B. Blattfederverhalten)	a	b
	Festigkeit/ Spannungen	b	b
	Simulation aktiver Fahrwerke	a	b
<b>Gesamtfahrzeug</b>	Fahrdynamik	b	b
	Fahrleistungen/ Verbrauch	a	a
	Schwingungen	a	a
	Schwingungen Schall	b	b
	Lebensdauer	c	c

Tab. 2.4: Prognosegüte im Bereich Fahrwerk und Gesamtfahrzeug

Die in der Literatur übliche Klassifizierung der CAE-Methoden nach ihrer Komplexität, ihrem Einsatz im Entwicklungsprozess sowie ihrer Aussagegüten erlauben lediglich eine differenzierte Betrachtung ohne jegliche Aussage über gekoppelte Fragestellungen. So ist es normalerweise nicht möglich zu bestimmen, mit welchem Aufwand und Aussagegrad eine Methode von einem bestimmten Personenkreis zu einem gewissen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden kann. Überdies werden bei den meisten Aussagen über die Simulationsgüte immer nur die „State of the Art“ Methoden angeführt, nicht jedoch Methoden, die seit Jahren etabliert sind, aber nicht zu dieser Klasse gezählt werden können. Aus diesem Grund wird in Kapitel 4.4.1 eine Neuklassifizierung der CAE-Werkzeuge empfohlen, um eine geeignetere Bewertung im Sinne der Prozessoptimierung zu erreichen.

### 2.3.1 Finite Elemente Methode - FEM

Unter der Finiten Elemente Methode versteht man ein numerisches Verfahren, bei dem ein Kontinuum mit endlich großen (finiten) Elementen genähert wird und durch eine

Näherungslösung von partiellen Differentialgleichungen (DGL) mit Randbedingungen in gewöhnliche DGL oder algebraische Gleichungen überführt werden. Eine Verbindung der als Diskretisierung bezeichneten Elemente untereinander erfolgt über „Knoten“ [EH06, Hei07]. Ziel der Finiten Elemente Methode ist es beispielsweise eine Aussage über die physikalisch mechanischen Eigenschaften eines Bauteils oder einer Baugruppe zu erhalten. Die Methode, ein Kontinuum in endlich kleine Elemente zu diskretisieren, kann für verschiedenste Disziplinen eingesetzt werden und lässt sich nach [Eig07] unter anderem in die Disziplin der Methode sowie in das Verfahren der Analyse [Hei07] gliedern. Es können unter anderem folgende physikalische Problemstellungen durch Näherungslösungen approximiert werden:

- Verformungs- und Spannungsberechnung in der Statik, Dynamik, Plastomechanik
- Akustikanalysen
- Wärmeleitung, Temperaturverteilung
- Elektrostatik, Magnetostatik, Piezoelektrik

Die Methodik der numerischen Näherung einer Lösung erfolgt immer dann, wenn ein analytisches Lösungsverfahren aufgrund der Bauteilkomplexität für das Gesamtsystem an ihre Grenze stößt oder wenn sie durch diskontinuierliche Systeme, wie sie in der Praxis häufig auftreten, schlichtweg nicht möglich ist. Eine Näherungslösung über ein Netz finiter Elemente wird folglich so gewählt, dass für jedes einzelne Element ein analytischer Ansatz lösbar ist. Die Art des analytischen Ansatzes und die daraus folgenden Differentialgleichungen sind dann vom Anwendungsfall abhängig. In der FEM bei Steifigkeitsberechnung erfolgt dies z.B. nach dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen und der virtuellen Arbeit [Ste07]. Da im Rahmen der Dissertation ein Fokus auf die mechanischen Komponenten im Fahrwerk gesetzt wird, soll eine Beschränkung der FEM erfolgen, bei der das Themengebiet der Thermosimulation ausgeschlossen wird.

Statische FEM-Simulationen lassen sich abhängig der Analyseart in lineare, d.h. im linear-elastischen Bereich gültige, und nichtlineare Verfahren einteilen, die auch Untersuchungen von großen Verformungen oder elastisch-plastischem Werkstoffverhalten ermöglichen. Bei den linearen Verfahren können lediglich Aussagen im linearen Spannungs-Dehnungsbereich getroffen werden, die beispielsweise Spannungen aufzeigen oder qualitativ Bauteilbereiche mit hohen lokalen Spannungsüberhöhungen sowie Steifigkeitsanalysen bewerten. Die Analyseart lässt sich nach [Hei07] weiter gliedern in implizite Verfahren zur Steifigkeits-, Festigkeits- und Lebensdaueranalyse sowie explizite<sup>6</sup> Verfahren zur Crash-Simulation, die hier nicht weiter behandelt werden. Allen FEM-Verfahren gemein ist, dass sie sehr nahe an der zuvor erzeugten Geometrie von Bauteilen und Baugruppen liegen und Geometriedaten meist direkt aus CAD-Systemen übernommen werden können, was dieser

---

<sup>6</sup>Hinweis: Es wird an jeder Stelle der FE-Struktur und zu jedem Zeitpunkt das dynamische Gleichgewicht gebildet.

Art der Analyse im Rahmen einer Betrachtung des Konstruktions-Simulationsprozesses prinzipbedingt einen Vorteil gegenüber anderen Verfahren verschafft. Aus diesem Grund sei die Finite-Elemente-Methode an dieser Stelle aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt, wird aber in den nachfolgenden Betrachtungen eine untergeordnete Rolle einnehmen.

### 2.3.2 Mehrkörpersimulation - MKS

Im Rahmen einer Fahrzeugentwicklung müssen Baugruppen, die kinematische und elastokinematische Bewegung zulassen, funktional und auf Kräftebene analysiert werden. Hierzu können, für sehr einfache Systeme, analytische Berechnungen der räumlichen Relativkinematik erfolgen oder aber bei komplexen Konfigurationen mit einer Vielzahl von gekoppelten Elementen, wie sie in Fahrzeugen häufig auftreten, über eine Mehrkörpersimulation analysiert werden. Diese kann im einfachsten Fall direkt im CAD-System auf rein kinematischer Ebene erfolgen oder aber mit spezialisierten MKS-Softwarepaketen. Mehrkörpersysteme werden simulativ im Regelfall von Kräftelementen und massebehafteten, steifen (rigid) oder elastischen (elastic) Körpern modelliert, deren Steifigkeit sich z.B. über FEM ableiten lässt [Hei06]. Körper werden über kinematische Gelenke, Kraftgesetze und Kontakte gekoppelt und stehen somit über ihre Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung im Zusammenhang mit den Kräften und Momenten [Mey07]. Mathematisch werden die MKS-Elemente in der Regel über differential-algebraische Gleichungen (DAE) beschrieben und haben zum Ziel, folgende Größen bereit zu stellen [Hei06]:

- Lage-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren (translatorisch und rotatorisch) von Körpern und Gelenken
- Schnittkräfte und Schnittmomente (z.B. als FEM-Input)
- Trajektorien

Der Aufbau von LKW-Modellen erfordert ähnlich wie im PKW über die Modellierung der Achs- und Lenkungs kinematik, zusätzlich ist die Modellierung des Fahrerhauses sowie der Aufbauten und teilweise der Ladung erforderlich. Die Mehrkörperdynamik in der Fahrzeugentwicklung beinhaltet unter anderem folgende spezielle Modellierungselemente [Deu06]:

- Luftfedersysteme (Regelsysteme und Überströmverhalten)
- Blattfederelemente
- Elastomer- und Hydrolager
- Stoßdämpfer (luft- und ölgedämpft)
- Reifen und Fahrbahnen

In allen MKS-Methoden ähnlich ist eine Entkopplung von Geometrien, die im Regelfall der reinen Visualisierung dienen, und Starrkörpereigenschaften, die zumeist über einen Massepunkt und die Trägheitseigenschaften beschrieben werden [Mey07]. Im Gegensatz zur FEM existieren in der MKS einige Elemente, die nicht oder nur in ihren geometrischen Abmessungen aus einem CAD-System übernommen werden können. Diese sind zumeist Kraftelemente, Aktuatoren sowie Regler und Kennlinien. Aus diesem Grund nehmen die Mehrkörpersimulationen ähnlich wie z.B. auch längsdynamische Simulationen oder Kühlkreislaufsimulationen eine gesonderte Stellung im CAE-Prozess ein.

### 2.3.3 Computational Fluid Dynamics - CFD

Die Simulation von Strömungsvorgängen, respektive die physikalischen Vorgänge in der Fluidodynamik, werden mithilfe von numerischen Verfahren gelöst, da analytische Ansätze nur für einfache Geometrien und eindimensionale Strömungen möglich sind. Die Geometrien stellen in der CFD, im Gegensatz zur FEM von mechanischen Körpern, lediglich die Berandung des umgebenden, zu untersuchenden Strömungsfeldes dar. Zur Lösung wird neben dem Finite Elemente Verfahren das Finite Differenzen Verfahren (FDV) sowie das Finite Volumen Verfahren (FVV) genutzt. Beim FDV werden die partiellen Differentialgleichungen durch Differenzenquotienten ersetzt, beim FVV wird ähnlich den Finiten Elementen über ein Volumen- oder Flächenelement integriert [OL03]. Im Fahrwerksbereich findet man CFD-Untersuchungen meist bei Untersuchungen des Anströmverhaltens von Fahrwerksbauteilen sowie der Analyse von Abbremsvorgängen, bei denen die Bremskühlung betrachtet wird [Deu06]. Hierbei findet man oft eine Kombination aus mehreren Simulationsdisziplinen (vgl. Kapitel 2.3.5). Die Modellierungsgrundlage für CFD-Simulationen bildet, ähnlich der mechanischen FEM-Untersuchungen, zumeist ein 3D-CAD-Modell, so dass auch hier ähnliche Randbedingungen existieren, wie sie in Kapitel 2.3.1 beschrieben sind. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Betrachtung der CFD nur aus Gründen der Vollständigkeit und soll hier nicht weiter vertieft werden.

### 2.3.4 Sonstige Simulationsmethoden

Da bei vielen Herstellern über die letzten Jahrzehnte diverse Berechnungswerkzeuge in Eigenentwicklung entstanden sind, die nicht zu den oben genannten Methoden gehören und da diese teilweise in FORTRAN [Deu06], Matlab [Mat10] oder C programmierten Anwendungen im Einsatz sind, wird hier anhand einiger Beispiele die Bedeutung in der Entwicklung erläutert. Aufgrund der hohen Unternehmensspezifizierung dieser Anwendungen und der eingeschränkten Literatur hierzu wird die Situation bei der MAN erläutert. Unterschieden werden soll nach [FIH09] in Simulationsanwendungen, die auf analytischen Berechnungen und teilweise auf Tabellenkalkulationsprogrammen basieren und in numerische Methoden, die unter Zuhilfenahme von konventionellen Integratoren,

wie sie z.B. in Engineeringsoftwarelösungen implementiert sind, entwickelt wurden. Der Übergang kann hierbei aber auch fließend sein, da Mehrkörpersysteme auch in unternehmensspezifischen „In-House-Anwendungen“ Verwendung finden. Neben der Umsetzung in klassischen Programmiersprachen lässt sich oft der Einsatz von Tabellenkalkulationsprogrammen beobachten, da diese allgemein verfügbar und relativ einfach zu bedienen sind. Herausforderung aller erläuterten Simulationsmethoden ist neben der Nutzungskomplexität die Kombination der CAE-Methoden untereinander sowie die Integration in Unternehmensprozesse [ZFW07]. Es konnte beobachtet werden, dass selbstentwickelte CAE-Software in der Regel schlecht dokumentiert und in Folge kaum wartbar ist und bedingt durch die Autorenbindung langfristig verloren sein kann.

Erwähnt werden sollen an dieser Stelle auch Simulationsverfahren, die analytische und numerische Verfahren kombinieren und wie im Falle der Modellierungssprache Modelica nichtproprietäre, objektorientierte und gleichungsbasierte Verfahren zur Simulation von mechanischen, elektrischen, hydraulischen und thermischen Fragestellungen nutzen. Die Modelle werden hierbei in differenziellen, algebraischen und diskreten Gleichungen beschrieben und von Softwareherstellern in Modellbibliotheken<sup>7</sup> angeboten [Mod09, Ott09]. Eingesetzt werden diese Simulationsmethoden z.B. für die Längsdynamiksimulation oder als physikalische Grundlage für Reglerentwürfe in Matlab Simulink, das selbst auch die gleichungsbasierte Modellierung ermöglicht. Diese von den Herstellerseite oft als „multi-engineering“ Tools bezeichneten CAE-Werkzeuge finden auch sehr häufig bei echtzeitfähigen Anwendungsfällen wie Hardware in the Loop (HIL) Simulationen Verwendung [TOB07].

### 2.3.5 Gekoppelte Simulationen

Neben der oben erwähnten Simulationsmethoden existiert für spezielle Aufgabenstellungen, die sich nicht mit einer einzelnen Simulationsdisziplin beantworten lassen, die sogenannte Co-Simulation, die zwei oder mehr unterschiedliche Simulationsarten verbindet. Hierbei erfolgt eine Modellierung in den dafür vorgesehenen, disziplinabhängigen CAE-Werkzeugen, die dann zu einem Gesamtsystem gekoppelt werden. Die Kopplung kann zum einen auf Modellebene (One-Solver-Solution) oder auf Integratorebene (Multi-Solver-Solution) erfolgen [Gün01]. Eine Steuerung kann über ein beteiligtes Tool (Master) erfolgen oder über einen übergeordneten „Timer“, der alle beteiligten Simulationsmethoden steuert. Weiter kann zwischen der Verfügbarkeit der Werkzeuge und Modelle in eine programm-basierte Kopplung (Tool-based-Coupling) oder eine modellbasierte Kopplung (Model-based-Coupling) gegliedert werden. Das letzte Unterscheidungskriterium erfolgt bezüglich der Hardware in Ein-Prozessor- (One-Processor-Solution) und Mehr-Prozessor-Hardwarelösungen (Multi-Processor-Solution) [LDHS01]. Nachfolgende

---

<sup>7</sup>Dymola, CATIA Systems, LMS, MapleSim, MathModelica, SimulationX

Darstellung verdeutlicht die Kopplungsoptionen mit ihren entsprechenden Vor- und Nachteilen:

	Beschreibung	Vorteil	Nachteil	
Berechnungsart	Kopplung auf Modellebene	Zusammenfassung der Teilsysteme auf Basis der mathematischen Beschreibung	geringer Realisierungsaufwand	Ein Integrationsalgorithmus muss mit unterschiedlicher innerer Dynamik arbeiten
	Kopplung auf Integratorebene	Auswertung der Teilsysteme mit eigenem Integrationsalgorithmus; Datenaustausch zu festgelegten Zeitschritten	Unterschiedliche, teilsystemoptimierte Nutzung von Integratoren	Numerische Instabilitäten durch zeitlich diskrete Kopplung
Werkzeugverfügbarkeit	Programmbasierte Kopplung	Direkte Kopplung der CAE-Werkzeuge	Volle Funktionalität aller Programme bleibt erhalten	Nicht immer einsetzbar, da Verfügbarkeit auf CAE-Werkzeuge nicht immer gegeben Meist nicht echtzeitfähig
	Modellbasierte Kopplung	Export von Modellgleichungen in ein transferierbares Format, Import in weiteres CAE-Werkzeug	Echtzeitfähigkeit	Keine CAE-Werkzeug-Funktionalitäten mehr möglich nach dem Export der Modelle
Hardwarevoraussetzungen	Ein Prozessor Hardware	Alle Teilmodelle werden über einen Prozessor berechnet	Synchrone Simulationen	Sequentielle Berechnung der Modelle => Echtzeitfähigkeit eingeschränkt
	Mehr Prozessor Hardware	Berechnung der Teilmodelle in verschiedenen Prozessoren (optional)	Echtzeitfähigkeit Parallelisierung	Sehr viel Kommunikation notwendig => Zeit für Kommunikation überschreitet schnell die Integrationszeit

Abb. 2.11: Kopplungsoptionen der Co-Simulation

## 2.4 Trends in der automobilen Entwicklung

Aufgrund der erwähnten immer weiter steigenden Komplexität der Produkte, dem Druck des Marktes bezüglich der Entwicklungszeit sowie der damit verbundenen Komplexitätssteigerung der Prozesse wurden im Lauf der Zeit Methoden zur Beherrschung dieser Herausforderungen entwickelt und befinden sich in Mischformen derzeit bei nahezu allen Herstellern, Zulieferern und Dienstleistern der PKW- und Nutzfahrzeugindustrie im

Einsatz. Neben dem zeitlichen Aspekt der Produktentwicklung (Time to Market) trägt heute eine gesteigerte Produktqualität wesentlich zur Wettbewerbsfähigkeit bei. Eine Auswahl der Ansätze zur Realisierung der Entwicklungsziele ist nachfolgend erläutert und zielt insbesondere auf die Optimierungspotentiale im Entwicklungsprozess ab, die in Kapitel 3.1 erarbeitet werden.

### 2.4.1 Kooperation im Entwicklungsprozess

Methoden zur Vorverlagerung und Parallelisierung von Entwicklungsaufgaben können nur durch adaptierte Methoden zur Kooperation gelingen. Neben der prozeduralen Anpassung, die eine Abstimmung der Entwicklungsschritte aufeinander zum Ziel hat, wird im „Collaborative Engineering“ die Zusammenarbeit zur Ausführung einer Aufgabe im Produktlebenszyklus beschrieben. Neben den Prozessen sind dies Anwendungen und Funktionen von Anwendern sowie deren Kollaboration untereinander. Nachfolgende Aufgabenbereiche werden hier zusammengefasst:

- Integriertes Projektmanagement
- Computer Supported Cooperative Work (CSCW)
- Kommunikation und Datenaustausch
- Dokumentation
- Datenschutz
- Rollen- und Berechtigungsverteilung innerhalb der Kollaboration

Für Kollaboration ist die Kommunikation, auf deren Basis Koordination und schlussendlich Kooperation entstehen kann, zwingende Voraussetzung und kommt insbesondere bei der Vernetzung von internen und externen Entwicklungspartnern zum Tragen. Grundlage hierfür sind allerdings unternehmensübergreifende kompatible IT-Werkzeuge, die unter anderem PLM, Projekt-Management, CAx oder Dateiaustausch realisieren [SBM<sup>+</sup>06].

### 2.4.2 Parallelisierung von Entwicklungsprozessen

Der Grundgedanke einer parallelen Bearbeitung von Entwicklungsaufgaben wird mit den Methoden des Simultaneous Engineering und dem Concurrent Engineering aufgegriffen und zur Entwicklungszeitreduktion genutzt. Hierbei erfolgt eine teilweise Parallelisierung von traditionell sequentiell abgearbeiteten Entwicklungsschritten, um Produkte schneller, kostengünstiger und in verbesserter Qualität zu entwickeln. [Ehr07] unterscheidet SE nach der expliziten Parallelisierung der Produkt- und Produktionsentwicklung, wohingegen im Concurrent Engineering ein Fokus auf eine optimale Produkterzeugung durch

interdisziplinäre Zusammenarbeit gelegt wird. Im deutschsprachigen Raum wird beides meist unter dem Sammelbegriff SE zusammengefasst.

SE beinhaltet neben der Parallelisierung von Arbeitsabläufen unter anderem Methoden des Projektmanagements, zur Teamarbeit, Kooperation mit Systemlieferanten, des Target Costing und der Simulation. Ziel aller Methoden ist eine Unterstützung der Produktentwicklung durch Projektteams, die nach Abschluss einer Entwicklung wieder aufgelöst werden und parallel existieren. Zu den Risiken des SE zählen der Misserfolg in der Entwicklung durch „nicht optimale Produkte“, da der Erfolg zum einen stark von den Projektleitern abhängig ist und zum anderen die Fehleranfälligkeit bei zunehmender Parallelisierung steigt [Ehr07]. Aus diesem Grund müssen nach [BW97] die folgenden Leitsätze für ein erfolgreiches SE erfüllt werden:

- Parallelisierung im Produktentstehungsprozess
- Standardisierung im Produktentstehungsprozess
- Integration im Produktentstehungsprozess

Eine Parallelisierung kann ohne erfolgreiche Standardisierung, die sich auf technische, prozedurale und aufbauorganisatorische Aspekte bezieht, nicht erfolgreich umgesetzt werden, da nur so unnötige Aufgaben vermieden werden und eine Entlastung von immer wiederkehrenden Routineaufgaben erfolgt. Diese Unterstützung bei periodischen Standardaufgaben erlaubt folglich mehr Zeit für innovative und kreative Prozesse sowie der Bewältigung bei unvorhersehbaren Ereignissen und Einflüssen [FI07]. An dieser Stelle sei an die Methode der Standardisierung von Routineaufgaben in Kapitel 4.1.2 verwiesen. Durch die Arbeitsteiligkeit im PEP entstehen diverse Schnittstellenverluste, die oftmals auf unabgestimmte Zeitpläne, unterschiedliche Interpretation von Aufgaben und auf mangelnde Kenntnis über die Erfordernisse der anderen Seite der Schnittstelle entstehen. Eine Integration aller beteiligten Elemente in den Entwicklungsprozess sowie die Weitsicht auf die Gesamtziele sind hier Voraussetzung für ein erfolgreiches SE [BW97].

Eine Weiterentwicklung des SE stellt das „Cross Enterprise Engineering<sup>8</sup> (CEE)“ dar und meint damit eine dezentrale Entwicklung unter Einbindung von externen Entwicklungspartnern, die sowohl eine örtliche, unternehmerische oder systemspezifische Verteilung darstellen können. Die Kommunikation findet dabei zunehmend über das Internet statt und impliziert standardisierte Austauschformate, wie sie in Kapitel 2.5.2.1 erläutert sind [ES09]. Nachfolgende Abbildung erläutert die im Lauf der Zeit entstandenen zunehmend vernetzteren Entwicklungsmethoden sowie die daraus theoretisch entstehenden zeitlichen Vorteile bis zum Produktionsstart (SOP):

---

<sup>8</sup>CEE wird auch als X-Engineering bezeichnet

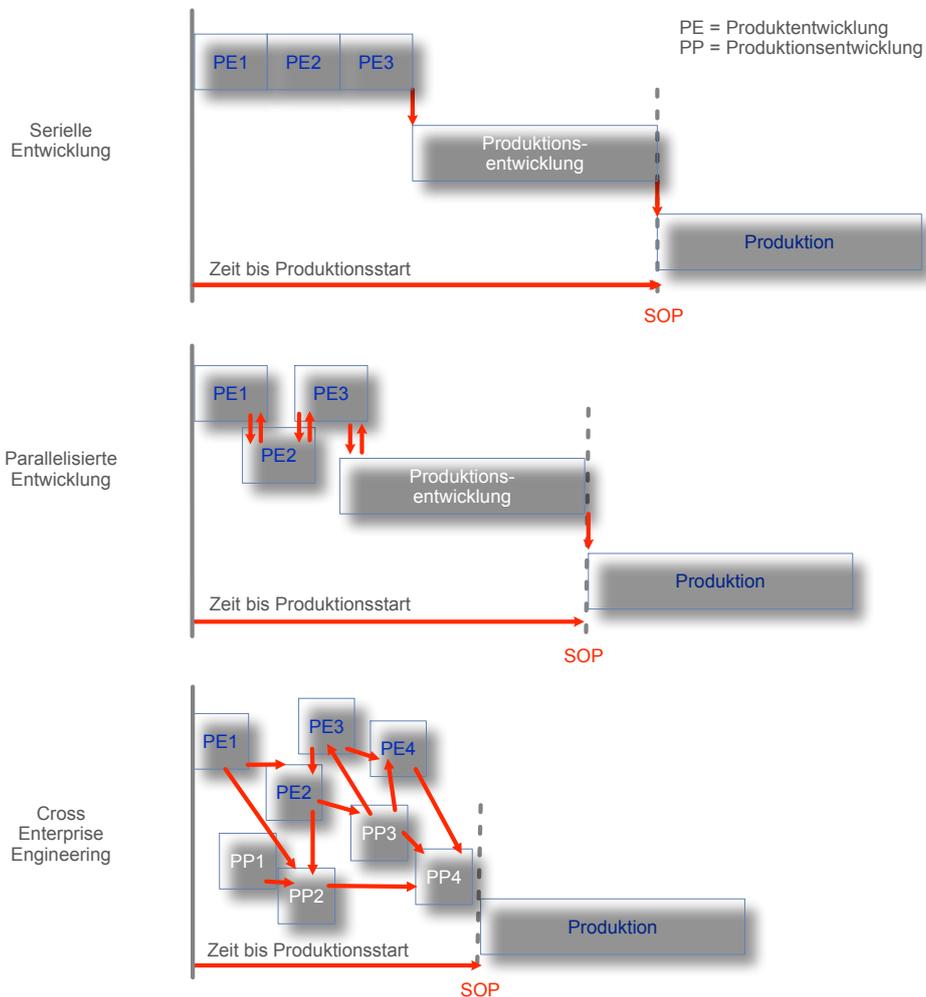


Abb. 2.12: Produktentstehungsmethoden nach [ES09]

### 2.4.3 Vorverlagerung der Entwicklung

Die Vorverlagerung der Entwicklung, die als „Front Loading“ bezeichnet wird, hat zum Ziel, zu Beginn eines PEP in der Konzeptphase mit erhöhtem Ressourceneinsatz zu entwickeln, um einen schnelleren Erkenntnisgewinn zu produzieren und einen verbesserten Wissenstransfer zu ermöglichen. Das Vorgehen hierbei beruht primär auf modernen CAD- und CAE-Methoden, die den Aufbau virtueller Prototypen ermöglichen und

eine teilweise virtuelle Absicherung von Produkteigenschaften vor dem ersten realen Prototypen erlauben. Nach [TF00] können hierbei zwei methodische Ansätze verfolgt werden:

1. Verringerung der Anzahl der zu lösenden Entwicklungsaufgaben durch den Einsatz von verbesserten Informations-/Wissensmanagementsystemen, die eine projektübergreifende Kommunikation erlauben.
2. Nutzung von schnellen virtuellen Prototypen mit verringerter Detaillierung zur frühzeitigen Identifikation von Entwicklungsproblemen im ersten Schritt. Übergang zu komplexen, aussagekräftigeren, aber auch langsameren virtuellen Prototypen für die übrigen Entwicklungsaufgaben.

Die Kombination von unterschiedlichen Modellierungstiefen (Level of Detail - LOD) erzeugt hierbei einen zeitlichen Vorteil im Entwicklungsprozess unter der Voraussetzung, dass die Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Modellierungsebenen beherrscht werden können. Zur Steigerung der Entwicklungsleistung kommen im Front Loading auch Methoden aus dem SE zum Einsatz. Auch hier wird anstatt der sequentiellen Abarbeitung eine Parallelisierung angestrebt, um einen zeitlichen Vorteil zu erzielen [SBM<sup>+</sup>06]. Zur Nutzung verschiedener Detaillierungslevels sowie dem Umgang mit der Kompatibilität der Schnittstellen sei an dieser Stelle auf die Kapitel 5.2.1 und 5.3.1 verwiesen.

#### **2.4.4 Zusammenfassung**

Alle vorgestellten Entwicklungstrends finden sich heute in der industriellen Praxis mehr oder weniger stark ausgeprägt. Traditionelle Maschinenbauunternehmen, zu denen die Sparte der Nutzfahrzeug-OEM teilweise gezählt werden kann, sind hier im Vergleich zu PKW-OEM weniger stark vernetzt, respektive ist das CEE nicht ganz so stark vertreten. Entscheidend bei Einsatz aller Methoden ist nach [Pan08] die Kommunikation, also der Informationsaustausch der unterschiedlichen Entwicklerteams sowie die Kooperation und Koordination aller Beteiligten. Der Virtuelle Prototyp VPT ist zentraler Bestandteil aller Bemühungen Zeit- und Kostenaufwand zu reduzieren und wird heute neben dem digitalen Geometriemodell (Digital Mock Up - DMU) auch für funktionale und logische Fragestellungen genutzt. Erst durch Nutzung dieser Technologie lässt sich der frühzeitige Einsatz (Front Loading) realisieren und sehr schnell eine Vielzahl von Produkteigenschaften ohne den Bau realer Prototypen festlegen.

## 2.5 Daten- und Informationstechnik

### 2.5.1 Grundlagen

Die Daten- und Informationstechnik, die thematisch der Informatik zugeordnet wird, basiert auf der maschinellen Informationsverarbeitung und erfolgt heute ausschließlich rechnergestützt [GS08]. Sie wird im Rahmen dieser Dissertation aus Gründen des Überblicks erläutert, da die verwendeten Systeme zur Datenbereitstellung im Produktentwicklungsprozess auf Datenbanktechnik beruhen. Die heute übliche zentrale Datenspeicherung erfordert eine Organisation der Daten, um eine Wiederverwendbarkeit zu gewährleisten. Aus diesem Grund erfolgt die Speicherung nicht mehr nur datei- und ordnerbasiert sondern in Datenbanksystemen, die sich aus einer Datenbasis und einem Datenbankverwaltungssystem (DBMS) zusammensetzen und nach [KE06] folgende Unzulänglichkeiten anderer Informationsverarbeitungssysteme beheben:

- Redundanz und Inkonsistenz
- Beschränkte Zugriffsmöglichkeiten
- Koordinierter Mehrbenutzerbetrieb
- Datenverlust und Integritätsverletzung

Das Abbild der realen Welt in Datenbankmodellen kann auf mehrere Arten erfolgen, wobei seit geraumer Zeit die relationale Modellierung marktbeherrschend ist [GS08] und im Rahmen der Arbeit ausschließlich behandelt werden soll. Erwähnt werden sollen an dieser Stelle die prärelationalen Netzwerk- und hierarchischen Modelle, semantische Ansätze und die heute teilweise verbreiteten objektorientierten Datenbankmodelle, die unter anderem von [KE06] und [Vos00] erläutert sind.

#### 2.5.1.1 Datenbankmodell

Wegen seiner Relevanz für die Umsetzung des erarbeiteten Konzepts soll an dieser Stelle das relationale Datenbankmodell genauer beleuchtet werden. Wie der Name sagt, beruht das relationale Datenbankmodell auf Abhängigkeiten (Relationen) zwischen beliebigen Daten und lässt sich am Beispiel einer Datentabelle erläutern, die relational mit einer weiteren Tabelle verknüpft ist. Die Datendarstellung in einer Tabelle, die die übersichtlichste und anschaulichste Form der Visualisierung von Daten darstellt, erlaubt ein Lesen und Verstehen ohne Interpretationshilfen [Mei07]. Die Darstellung einer Fahrzeugbaugruppe über ein relationales Modell erfolgt über eine Tabelle *BAUGRUPPE*, die in den verschiedenen Spalten Merkmale und Attribute wie z.B. die *BEZEICHNUNG*, eine *SACHNUMMER* und das *GEWICHT* etc. enthält. Üblich ist die Verwendung eines eindeutigen Schlüssels (Primärschlüssel) *BAUGRUPPE\_ID*, der eine weitere Spalte der

Tabelle darstellt und die zeilenweise angeordneten Datensätze eindeutig identifiziert. Die Baugruppe besteht aus zwei verschiedenen Bauteilen, die wiederum in zwei getrennten Tabellen enthalten sind und über zwei weitere Schlüssel (Fremdschlüssel) in der Tabelle *BAUGRUPPE* relational verknüpft sind. Die Bauteiltabellen können wiederum weitere relationale Verknüpfungen enthalten, bis die Elemente nicht weiter zerlegbar (atomar) sind. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Relationen in der Tabelle:

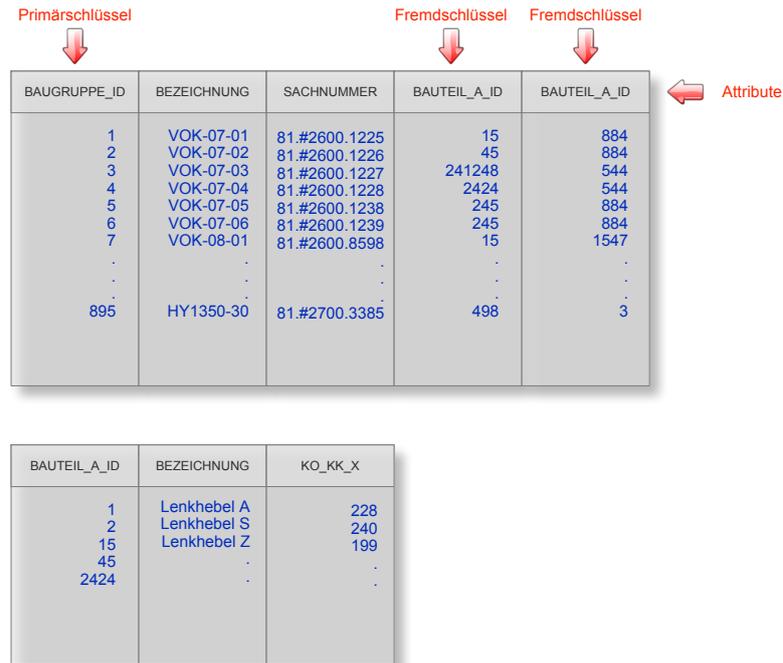


Abb. 2.13: Relationale Abhängigkeiten über Tabellen

Über die relationale Verknüpfung mittels Datenbankschlüssel können 1:1, 1:n und n:m-Beziehungen zwischen zwei Tabellen realisiert werden. Bei der 1:1-Relation wird genau ein Bauteil einer Baugruppe zugeordnet, bei einer 1:n/n:1-Beziehung können Bauteile in mehreren Baugruppen verwandt werden (üblich) und bei der n:m Beziehung mehrere Bauteile mehrfach in verschiedenen Baugruppen. Für die Abbildung einer n:m-Beziehung werden der Primärschlüssel der Baugruppe und der Primärschlüssel der Bauteile über eine Koppeltabelle verknüpft, so dass mehrere Baugruppen mehrere Bauteile enthalten können. Eine 1:n Darstellung von Bauteilen in Baugruppen ist nachfolgend in einem Entity-Relation-Diagramm (ER-Diagramm) dargestellt und erläutert die Nomenklatur:

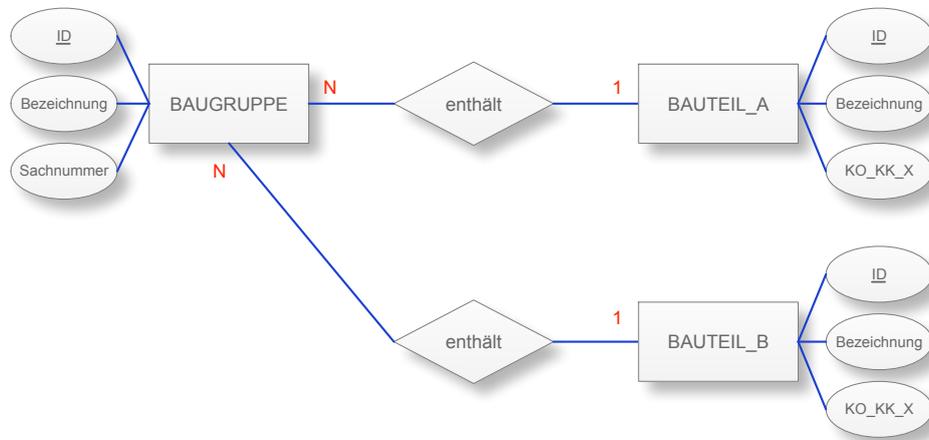


Abb. 2.14: ER-Diagramm am Beispiel Baugruppe-Bauteile

Das gezeigte Datenbankmodell beschreibt eine Baugruppe, die immer genau ein Bauteil-A und ein Bauteil-B enthält, die aber mehrfach in verschiedenen Baugruppen Verwendung finden können. Ein Beispiel aus dem Fahrzeug wäre ein Rad, das immer aus einer Felge und einem Reifen besteht, wobei Reifen und Felgen in unterschiedlichen Kombinationen auftreten können. Die Baugruppe kann ihrerseits wieder mit ihrem Primärschlüssel in einer weiteren Baugruppe vorhanden sein.

### 2.5.1.2 Datenmanipulation

Die Überführung eines Datenbankmodells in eine Datenbank sowie die spätere Manipulation von Daten erfolgt über die heute weit verbreitete und von nahezu allen DBMS-Herstellern genutzte Datenbanksprache SQL (Structured Query Language). Zentraler Aspekt neben der Erstellung von Datensätzen ist die Abfrage von Datensätzen, die deklarativ ist, respektive nur von Interesse ist, welche Daten abgerufen werden sollen und nicht, wie die Auswertung erfolgt [KE06].

Sie gliedert sich nach [ISO04] in nachfolgende Befehlkategorien:

- Datenmanipulation - **DML** (Abfrage, Ändern, Einfügen, Löschen)
- Definition des Datenbankschemas - **DDL**
- Rechteverwaltung und Transaktionskontrolle - **DCL**

Die Befehlsätze der Datenbanksprache SQL sind weitestgehend normiert und werden heute von allen großen DBMS interpretiert. Im Rahmen dieser Arbeit soll nicht weiter auf

den Kontext der Sprache eingegangen werden, es sei hier auf die zitierten Standardwerke verwiesen [Mei07, KE06, Sau02, Vos00].

## 2.5.2 PDM und PLM

Das Produktdatenmanagement (PDM) sowie das Product Lifecycle Management (PLM), die beide zum Ziel haben, Daten und Informationen, die im Laufe eines Produktzyklus entstehen, zu verwalten und managen, sind heute egal in welcher Ausprägung zentraler Bestandteil von Unternehmen mit technischen, innovativen Produkten. Ziel des PLM ist, die Produktdaten sowie die Produktionsdaten über alle Zyklen des Produktbestandes aus informationstechnischer Sicht in digitaler Form gemeinsam zu managen und zu visualisieren [SI08]. Es ist aus dem reinen Management von Produktdaten im Entwicklungsprozess Ende der 90er Jahre hervorgegangen und basiert auf der Nutzung von modernen CAD-, CAM- und CAE-Systemen. Im Idealfall entsteht ein durchgängiger Prozess, der das PLM als Backbone nutzt und unter der Voraussetzung erfolgreich sein kann, dass die technischen und organisatorischen Randbedingungen erfüllt sind und ein integriertes Produktdatenmodell (IPDM) vorliegt [ES09]. Beginnend bei reinen Zeichnungsarchiven, die nach und nach um CAD-Daten, Freigabevorgänge, Änderungswesen, Versionsverwaltung und Konfigurationsmanagement erweitert wurden, zielen PDM-Systeme heute mehr und mehr auf die Integration von Simulations- und Berechnungsdaten ab. Diese zunehmende Integration aller an der Entwicklung beteiligten Disziplinen in eine kommerzielle Softwarelösung kann im Einzelfall eine Lösung sein, ist jedoch bei übergeordneter Betrachtung nicht flexibel genug, so dass eine modulare, offene Prozesskette vorteilhaft erscheint. PLM-Ansätze im Gegensatz zu reinen PDM-Systemen integrieren neben den Produkt- und Prozessdaten auch Daten zum Anforderungs-, Funktions-, Wartungs-, Service- und Ersatzteilmanagement. Diese seien hier erwähnt, werden jedoch im Rahmen dieser Dissertation nicht näher erläutert, da im Folgenden nur der PDM-Teil innerhalb des Lifecycle Managements betrachtet wird.

Oftmals wird unter PLM lediglich ein softwaretechnisch erweitertes PDM-System gesehen, das unter diesem Namen von Softwareanbietern vertrieben wird. Anwender der Fertigungsindustrie sehen den Begriff PLM eher als eine Integration von Unternehmens-IT [SW08]. Aus diesem Grund können die Begrifflichkeiten nach den „Liebensteiner Thesen“ (Mai 2004) wie folgt definiert werden:

1. Produkt-Lifecycle-Management (PLM) ist ein Konzept, kein System und keine (in sich abgeschlossene) Lösung.
2. Zur Umsetzung/Realisierung eines PLM-Konzeptes werden Lösungskomponenten benötigt. Dazu zählen CAD, CAE, CAM, VR, PDM und andere Applikationen für den Produktentstehungsprozess.

3. Auch Schnittstellen zu anderen Anwendungsbereichen wie Enterprise Resource Planning (ERP), Supply Chain Management (SCM) oder Customer Relationship Management (CRM) sind Komponenten eines PLM-Konzeptes.
4. PLM-Anbieter offerieren Komponenten und/oder Dienstleistungen zur Umsetzung von PLM-Konzepten.

PLM ist folglich nicht an eine bestimmte Software oder gar einen Hersteller gebunden, vielmehr kann es als Methode betrachtet werden, die PDM als einen Kernprozess beinhaltet. [SW08] beschreibt den Unterschied zwischen PDM und PLM treffend:

*„PDM ist eine zentrale Komponente von PLM, aber produktiv einsetzbar ist PDM auch ohne eine sehr weitreichende Integration der Prozesse, die den Begriff PLM rechtfertigen könnte.“*

[ES09] beschreibt PDM als „das Management des Produkt- und Prozessmodells mit der Zielsetzung, eindeutige und reproduzierbare Produktkonfigurationen zu erzeugen.“ Im Rahmen der weiteren Ausführungen werden, wie heute üblich, die Begriffe PDM und PLM synonym genutzt, wobei hier bei Nutzung des Begriffs PLM immer der PDM-Anteil innerhalb des Lifecyclemanagements gemeint ist (vgl. hierzu Abbildung 2.15). Obligatorisch ist hierbei der weithin reichende Einfluss des PDM in alle nachfolgenden Phasen des PEP, der selbst im Recycling noch vorhanden ist, jedoch in Abbildung 2.15 nicht explizit dargestellt wurde.

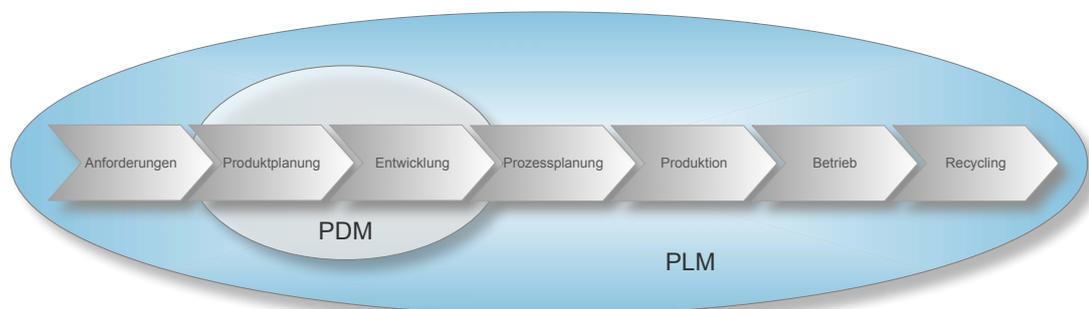


Abb. 2.15: PDM-Anteil innerhalb des PLM in Anlehnung an [ES09]

Nachfolgend werden die Funktion, Herausforderungen und Implementierungshürden des PLM erörtert und ein Überblick über gängige PDM/PLM-Systeme sowie deren Architektur gegeben. Das Simulationsdatenmanagement als Teil des Produktdatenmanagements wird nachfolgend gesondert herausgegriffen und explizit in Kapitel 2.5.4 erläutert, da es Gegenstand dieser Dissertation ist.

### 2.5.2.1 Funktionen von PDM-Systemen

Produktdatenmanagement schließt entgegen dem Namen neben der Verwaltung von produktbezogenen Daten viele weitere Elemente und Funktionen ein, die im Laufe der Jahre den Begrifflichkeiten des PDM zugeordnet wurden. Ursprünglich wurde PDM synonym mit dem Begriff EDM (Engineering Document/Data Management) verwandt und beschrieb die informationstechnische Verwaltung von Dokumenten, 2D-Zeichnungen und 3D-Modellen sowie deren Beziehung zueinander. Damals wie heute basieren diese Verwaltungssysteme auf relationalen Datenbanken und verknüpfen Dokumente, Artikel (Bauteile/Baugruppen) und Projekte. Basierend auf diesen Funktionen wurden weitere Eigenschaften, wie das Management von Prozessen, respektive die Integration von Geschäftsprozessen, in die Dokumente, Artikel und Projekte integriert. Somit wird das existierende Produktmodell dynamisiert und in seiner zeitlichen Veränderbarkeit abgebildet. Dies gestattet einerseits ein Arbeitsmanagement, das eine Verfolgung der Änderungen sowie die Versionierung einschließt, auf der anderen Seite aber auch ein Workflow Management, das die Abläufe und Informationsflüsse beschreibt. All diese Maßnahmen des Protokolls und der Nachverfolgung sind Voraussetzung für Qualitätsstandards sowie das Konfigurationsmanagement<sup>9</sup> (CM), das den gesamten Lebenszyklus eines Produktes transparent überwacht und sicherstellt, dass seine funktionalen und physikalischen Ziele eingehalten werden. Diese für die Produkthaftung relevanten Informationen der Nachvollziehbarkeit von Entwicklungsständen spiegelt sich typischerweise in einem Änderungsindex oder einer Seriennummer wider. Teilweise enthalten heutige PDM-Systeme neben den Standardfunktionen der Stamm- und Stücklistenverwaltung Konfigurations-, Projektmanagement-, Publishing-, Archivierungs- und Backup-Funktionen [ES09].

Die PDM- und PLM-Funktionalitäten umspannen folglich die gesamte Konzern-IT und rahmen alle zur Produktentwicklung notwendigen Elemente sowie deren nachgelagerte Systeme ein. Abbildung 2.16 verdeutlicht die nach [Eig09] in großen Unternehmen häufig eingesetzte 4-Ebenen-Architektur, die in der untersten Ebene bei den Entwicklungswerkzeugen (Autorenwerkzeugen) beginnt. Hierzu zählen alle CAD- und CAE-Tools (vgl. Kapitel 2.3) sowie die heute standardmäßig genutzten Office-Programme. Das Datenmanagement dieser Autorenssysteme erfolgt über sogenannte Team Data Management Systeme (TDM), die im Regelfall entwicklungswerkzeugspezifische Anforderungen erfüllen und oftmals vom Hersteller mit den Autorensystemen eng verknüpft sind. Hierin erfolgt die Datenhaltung über native, zumeist proprietäre Daten, d.h. Daten im Format des Autorensystems. Basierend auf diesen Daten erfolgt die Verknüpfung über den PLM-Backbone, in dem unter anderem Stücklisten, Freigabeprozesse, Änderungsmanagement und auch Visualisierungen erfolgen. Aufbauend auf diesen, normalerweise in neutralen Datenformaten gehaltenen, PLM-Elementen erfolgt der Übergang in fertigungsspezifische Daten im Enterprise Resource Planning System (ERP). Als zweite Architekturoption existiert

---

<sup>9</sup>Configuration Management, Definition in ISO 10007

tiert nach [SBM<sup>+</sup>06] die direkte Kopplung von CAD-System und PLM-System, die dann zum Einsatz kommt, wenn das PLM-System direkt vom CAD-Hersteller zur Verfügung gestellt worden ist. Zwischen den Ebenen befinden sich klar definierte Schnittstellen, die entweder online, d.h. zu jeder Zeit angekoppelt und laufend aktualisiert, oder offline, d.h. z.B. einmalig jede Nacht aktualisiert, ausgestaltet sein können. Allen Systemen gemein ist, dass aus Gründen der Handhabbarkeit ein zweistufiges Datenverwaltungs-konzept genutzt wird. Über die erwähnten Datenbanken werden im Regelfall die Metadaten und Relationen verwaltet, die dann auf die zweite Schicht, die Dateiebene, zugreifen. Man spricht hier von dem Makromodell als neutralem Metadatenmodell, da es sehr grobe Informationen enthält und dem Mikromodell, in dem z.B. native CAD- oder CAE-Modelle enthalten sind [GEK01].

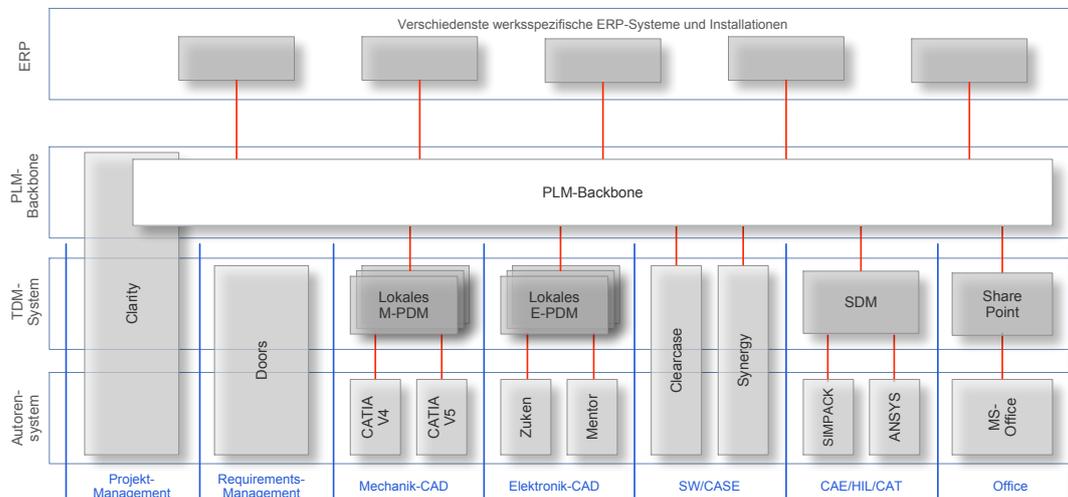


Abb. 2.16: Architektur des PDM/PLM nach [ES09]

Unter neutralen Datenformaten versteht man die informationstechnisch entkoppelte Dateiverwaltung von Produktdaten vom Autorensystem. Im einfachsten Fall kann dies ein Textdokument sein, das aus dem nativen Microsoft Word Format (.doc) in das neutrale PDF-Format (.pdf) gewandelt wird. Im Datenaustausch existieren heute neben den reinen Geometrie- und Zeichnungsaustauschformaten wie IGES<sup>10</sup> oder VDA-FS<sup>11</sup> weitere Standards, die die PDM-Funktionalitäten integrieren und von [Pan08] nachfolgend eingeordnet werden:

<sup>10</sup>Initial Graphics Exchange Specification

<sup>11</sup>VDA-Flächenschnittsystem

- **Offener Standard:** Entwickelt in industriellen Gemeinschaftsprojekten (z.B. STEP<sup>12</sup>, ProStep, UML etc.)
- **Industrieller Standard:** Entwicklung oftmals aus industriellen Gemeinschaftsprojekten heraus; Führung erfolgt durch z.B. Softwarehersteller (z.B. PLMXML von Siemens PLM)
- **De facto Standard:** Kommerzielle Software die eine weite Verbreitung erfahren hat (z.B. CATIA V5 Datenformat)

Die Möglichkeit, PDM-Strukturen innerhalb des Austauschformates zu platzieren, führte schließlich zur Entwicklung von Formaten wie STEP (ISO 10303), die hier eine Vorreiterrolle übernahmen. Formate wie IGES, VDA-FS und STEP lassen, im Gegensatz zu Austauschformaten wie VRML<sup>13</sup>, STL<sup>14</sup> und JT<sup>15</sup>, eine weitere Bearbeitung der CAD-Modelle zu, so dass sie nicht auf reine Visualisierungsfunktionen wie DMU beschränkt sind [ES09]. Aus Gründen der Übersicht soll im Folgenden ein kurzer Überblick über die heute verfügbaren Formate gegeben werden. Da zur reinen 3D-Darstellung heute fast ausschließlich JT genutzt wird, werden an dieser Stelle VRML<sup>16</sup> und STL<sup>17</sup> als ältere Datenformate nicht näher erläutert.

**IGES** IGES ist ein Datenformat zur Beschreibung von 2D- und 3D-Daten, deren Ziel die Darstellung von Konstruktionsdetails aus geometrischen Elementen wie Linien, Oberflächen, Volumenkörpern sowie nicht geometrischen Elementen wie Text und Bemaßungen ist. IGES-Daten werden in Regelfall im ASCII-Format<sup>18</sup> abgespeichert, das sich mit Standard-Texteditoren lesen lässt [USP97]<sup>19</sup>.

**JT** Jupiter Tassilation, auch als Jupiter Mosaik bezeichnet, wird als reines 3D-Darstellungsformat genutzt und kann von diversen 3D-CAD Programmen exportiert werden. Besonders gut geeignet ist es für DMU-Untersuchungen, da es in mehreren Auflösungen tesselierte Dreiecksflächen darstellen kann aber auch Informationen zum Assembly, der Produktstruktur sowie Meta-Daten beinhalten kann. Aus diesem Grund findet es neben der Bauraumuntersuchung als Zeichnungsersatz und bei der Archivierung Verwendung [JT110]. Zur Ansicht von JT-Dateien kann ein frei verfügbarer „Viewer“ genutzt werden<sup>20</sup>.

---

<sup>12</sup>Standard for the Exchange of Product model data

<sup>13</sup>Virtual Reality Modeling Language

<sup>14</sup>Surface Tessellation Language

<sup>15</sup>Jupiter Tassilation

<sup>16</sup>Spezifikation siehe <http://www.web3d.org/x3d/specifications/#vrml97>

<sup>17</sup>Spezifikation siehe <http://www.ennex.com/~fabbers/StL.asp>

<sup>18</sup>American Standard Code for Information Exchange

<sup>19</sup>Siehe auch <http://www.uspro.org>

<sup>20</sup>Siehe <http://www.jt2go.com>

**PLMXML** Dieses von Siemens PLM Systems übernommene Format, das zum proprietären Industriestandard geworden ist, nutzt XML<sup>21</sup> als Basis für die Beschreibung von Produkten. Seine offene Architektur<sup>22</sup> basiert auf dem W3C<sup>23</sup> XML-Schema und beschreibt Produktdaten explizit oder über Referenzen [Sie10]. Primär werden Produkt-, Prozess-, CAD- und Visualisierungsdaten in die XML-Struktur integriert, die sich vom Anwender nach eigenen Bedürfnissen erweitern lassen. Im Gegensatz zum STEP-Format fehlt dem PLMXML-Format ein informationelles Modell, so dass es unflexibler für zukünftige Technologien und Anwendungen wird [Pan08]. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Schema der PLMXML-Datenstruktur:

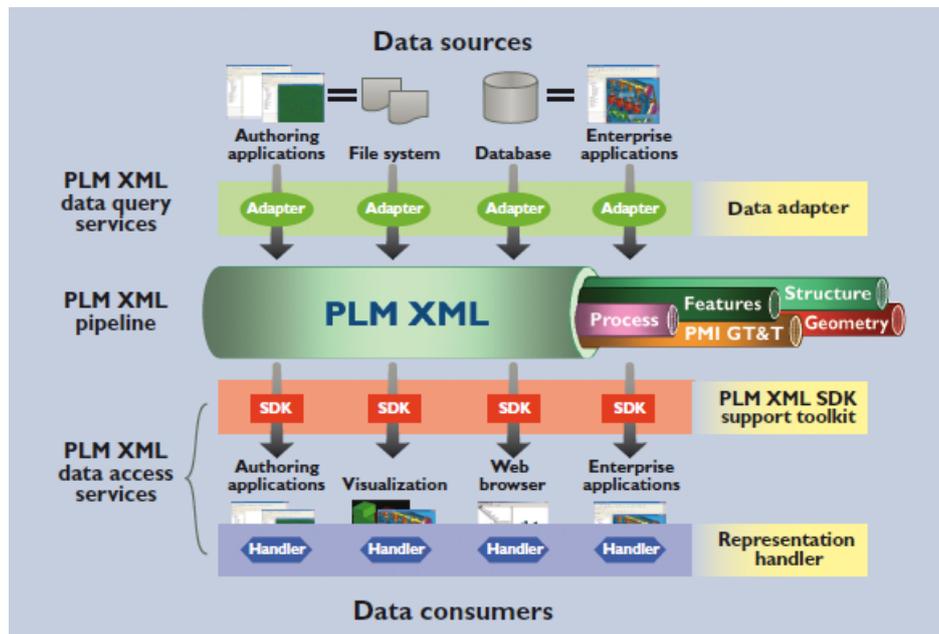


Abb. 2.17: PLMXML Struktur aus [Sie07]

**STEP** Das Format STEP, das in der ISO 10303 definiert ist, wurde entwickelt, um Informationen zu integrieren, die über den reinen Geometriedatenaustausch hinaus gehen. Hierbei sollten alle Produktdaten, so wie sie im Produktlebenszyklus erzeugt werden, abgebildet und CAD systemneutral übertragen werden können. Hierzu zählen Daten, die unter anderem in Konstruktion, Berechnung, Fertigung, Montage, Betrieb, Wartung etc. auftreten und die in Partialmodellen hinterlegt werden, die ihrerseits wieder untereinander in Relation stehen. STEP Dateien sind üblicherweise im ASCII-Format

<sup>21</sup>Extensible Markup Language („Erweiterbare Auszeichnungssprache“)

<sup>22</sup>Schemata frei über <http://www.plmxml.org> verfügbar

<sup>23</sup>Siehe <http://www.w3.org>

gehalten, wobei innerhalb der Datei das Datenformat, die Umsetzung und die Schemata hinterlegt sind. Neben der eigentlichen Beschreibung der Produktdatenmodelle sind in den STEP-Richtlinien auch die Beschreibungsmethoden, Implementierungsmethoden sowie Methoden von Konformitätstests hinterlegt. Somit kann STEP als Baukasten zur anwendungsspezifischen Produktdatenmodellierung interpretiert werden. Jedes Dokument ist unterteilt in sogenannte Reihen, in deren oberster Stufe das Anwendungsprotokoll steht, welches das Datenmodell, das Grundlage für die Implementierung ist, spezifiziert. Der Standard, der sich für automobiler Prozesse etabliert hat, ist in der AP214 (Core Data for Automotive Mechanical Design and Processes) hinterlegt. Im Rahmen dieser Ausführungen soll nicht näher auf die weiteren Spezifikationen des STEP-Formates eingegangen werden, es sei an dieser Stelle auf den Prostep<sup>24</sup> Verein und weiterführende Literatur verwiesen. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Architektur des STEP-Formates:

---

<sup>24</sup>Siehe <http://www.prostep.org>

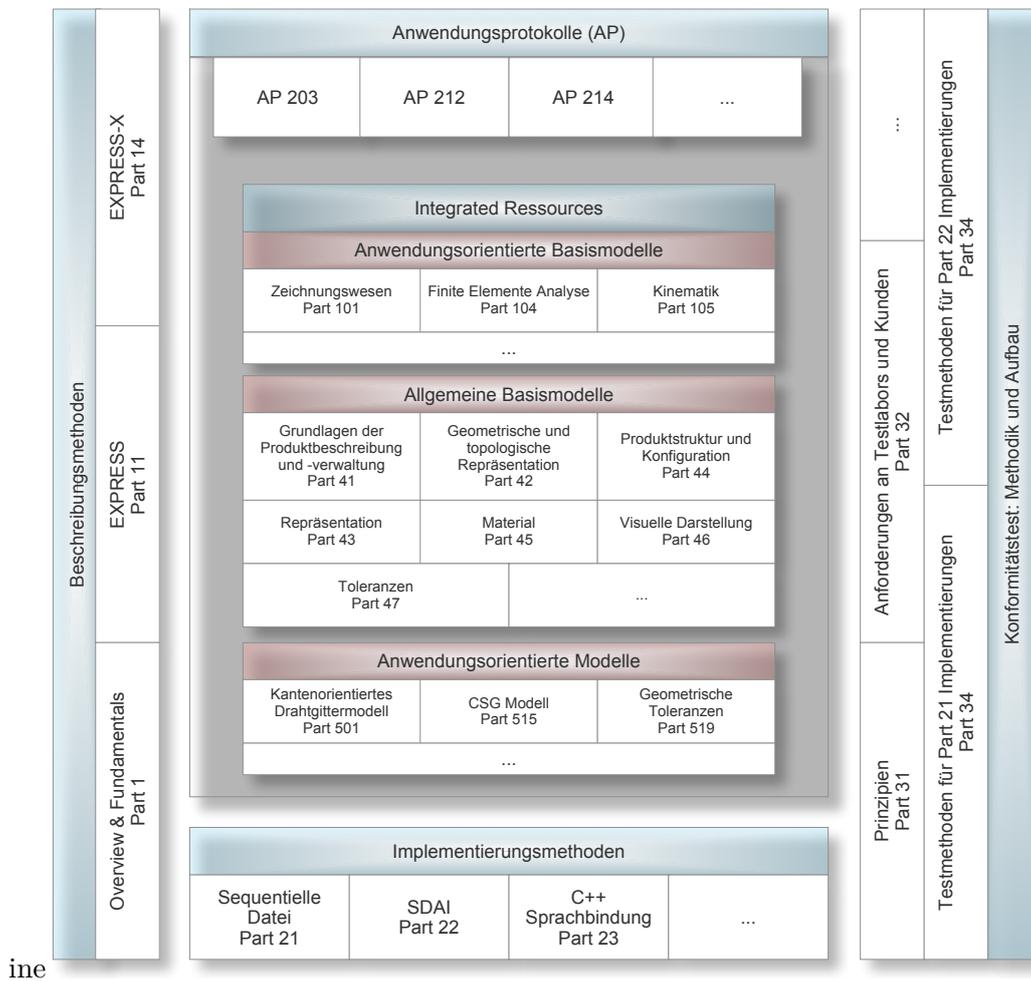


Abb. 2.18: Architektur des STEP-Formates nach [PRO10]

**VDA-FS** Ziel dieses Formates ist die Darstellung von in der Automobilindustrie häufig genutzten komplexen Oberflächen, die primär im Karosseriebau oder bei Gussteilen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu IGES, das Konstruktionsdetails durch Geometrie beschreibt, wird hier eine approximative, mathematische Methode zur Oberflächendarstellung genutzt und kann neben Freiformflächen Punkte, Punktmengen sowie Vektoren beinhalten [Cam10]. VDA-FS Dateien sind wie das IGES-Format ASCII basiert und in der DIN 66301 [DIN88] definiert.

### 2.5.2.2 Notwendigkeit des Datenmanagements

Immer komplexere Produkte mit steigender Varianz sowie der kontinuierlich anwachsende Qualitätsanspruch erfordern Maßnahmen zum sicheren, schnellen und leistungsfähigen Umgang mit Produktdaten. Die durch die Globalisierung beschleunigten Märkte, die neben der Produktvielfalt und dem Kostendruck auch eine Zunahme des zeitlichen Faktors in der Entwicklung verursachen, zwingen Unternehmen, Datenmanagement mit Nachdruck zu verfolgen [Eig09].

Nach einer Studie von DELOITTE<sup>25</sup> im Jahr 2005 sind aktuell aber nur 8% aller Unternehmen mit einem voll einsatzfähigem PDM/PLM System ausgestattet, bei 51% findet sich eine teilweise und bei 41% überhaupt keine Implementierung. Aufgrund der Komplexität des PLM ergeben sich viele Faktoren, die Implementierungshürden erzeugen und den niedrigen Umsetzungsgrad erklären, der immer wieder beobachtet werden kann. Neben den technischen und organisatorischen Hürden müssen hier insbesondere das Management und der Faktor Mensch in ihrer Relevanz gleichwertig angesehen werden. Diese sind aber beide ingenieurtechnisch in z.B. Nutzwertanalysen schwer erfassbar und folglich im Einführungsprozess oft unberücksichtigt oder mit zu niedriger Priorität gewichtet [ES09]. Diese Herausforderungen bei der Einführung von PDM/PLM-Systemen können nur durch ganzheitliche Betrachtungsweisen, wie sie beispielsweise der *Change-Management-Ansatz* bietet, gelöst werden, der Menschen bei Veränderungsprozessen zur Verfügung steht, organisatorische, technische und psychologische Komponenten vereint und deren Akzeptanz als entscheidenden Erfolgsfaktor bei der Implementierung vorsieht.

### 2.5.2.3 Herausforderungen des Datenmanagements

Das Lifecycle Management von Produkten gestaltet sich deshalb so kompliziert, da es interdisziplinär, über einen durchgängigen Lebenszyklus hinweg, an diversen Wertschöpfungsstellen gültig sein muss und zu jeder Zeit allen Anforderungen, unter der Randbedingung der Beherrschbarkeit des Systems, gerecht werden muss. Überdies lebt es von der Akzeptanz der Anwender, die hier den Unsicherheitsfaktor „Mensch“ involvieren [Eig09]. Aus diesem multidimensionalen Problem ergeben sich neben diversen Sichtweisen unterschiedlichste Anforderungen an das Management von Daten. Benötigt beispielsweise ein Konstruktionsprozess im einfachsten Fall nur Geometrie- und Werkstoffdaten, so sind für einen Simulationsprozess der Fahrwerksdynamik zusätzlich physikalische Kenngrößen wie Steifigkeiten und Dämpfungen notwendig, die Geometrie spielt hier bis auf diskrete Punkte eine untergeordnete Rolle<sup>26</sup>. Ein weiteres Beispiel hierzu ist die Kombinatorik, die sich in Stücklisten widerspiegelt, da es für Produkte, die aus mehreren Einzelteilen

---

<sup>25</sup>Siehe <http://www.deloitte.com>

<sup>26</sup>Hinweis: Für elastokinematische Simulationen mit einem FEM-Preprocessingschritt müssen Geometrieinformationen vorhanden sein.

bestehen, mindestens zwei Stücklisten gibt; eine Konstruktionsstückliste, die während des Konstruktionsprozesses entsteht und eine Fertigungsstückliste, die die Kaufteile ausschließt. So lassen sich für alle Bauteile und Produkte sogenannte Sichtweisen definieren, die sich in erster Instanz, bzw. zu Beginn jedes Entwicklungsprozesses, auf eine reine Funktionssicht reduzieren lassen, im späteren Verlauf dann auf die Fertigbarkeit oder den Einkaufsprozess. Neben der Abbildung aller Sichtweisen muss ein PDM-System in der Lage sein, Konstruktionsstände zu versionieren und Benutzer mit unterschiedlichsten Rechten und Pflichten auszustatten. Schlussendlich müssen die Herausforderungen der Datenformate gelöst werden, die durch die unterschiedlichsten CAD- und CAE-Werkzeuge entstehen und deren Substitution durch neutrale Datenformate auch nur teilweise sinnvoll erscheint [SW08].

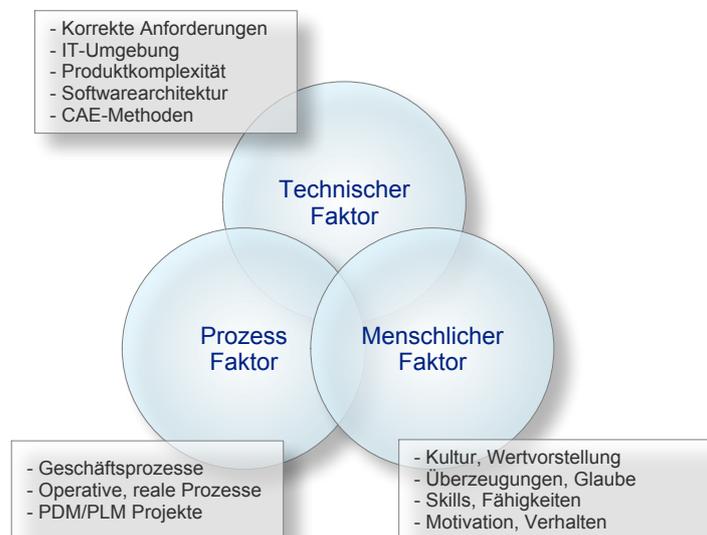


Abb. 2.19: Disziplinen des Datenmanagements in Anlehnung an [Eig09]

Ein zentraler Punkt des PDM ist neben dem Handling von unzähligen Dateiformaten die Integration der CAE-Elemente in die vom CAD getriebene Entwicklung. Nach [SW08] gibt es in sehr vielen Unternehmen (MAN eingeschlossen) kein schlüssiges Konzept, wie die gesamte Berechnungsarbeit gespeichert wird. Hier ist die individuelle Verantwortlichkeit der Mitarbeiter zur reproduzierbaren Ablage von Dokumenten nach wie vor sehr stark ausgeprägt. Nach Studien [AGP93] benötigen Berechnungsingenieure 50 Prozent ihrer Arbeitszeit zur Datenbeschaffung, wobei sich nach [SW08] und [FIH09] bis heute keine gravierenden Änderungen ergeben haben. Neben dem zeitlichen Aspekt wirkt sich

diese mangelnde Einbindung in die Arbeitsabläufe gravierend auf die Reproduzierbarkeit von Entwicklungsentscheidungen aus, da viele Zwischenstände und Varianten von Berechnungsmodellen nicht mehr zugeordnet werden können. Problematisch sind nach [Kra04] hier auch größere Verzögerungen im Prozess und die dadurch entstehende Asynchronität:

*„Im Gegensatz dazu liefert die virtuelle Produktabsicherung durch Simulation und Berechnung erst zeitversetzt ihre Ergebnisse. Oftmals stimmen dadurch der aktuelle Entwicklungsstand des Produktes und die ermittelten Berechnungsergebnisse nicht mehr überein.“*

#### 2.5.2.4 Implementierung von PDM/PLM-Systemen

PLM Systeme, die sehr tiefgreifende, vernetzende informationstechnische Elemente innerhalb eines Unternehmens darstellen und die meist historisch gewachsene Softwarebausteine ablösen sollen, stehen neben dem unternehmerischen Risiko vor diversen Hürden, die eine Einführung verzögern oder unmöglich machen können. Bei der Einführung und dem späteren Einsatz von PDM-Systemen können sich nach [AR01] folgende Situationen einzeln oder in Kombination einstellen:

1. **Entscheidungssackgasse:** Eine Entscheidungssackgasse entsteht, wenn sich eine bottom-up Diskussion über Spezifikationen und Systemauswahl bildet, die immer wieder neu entfacht wird und zu keinem Ziel führt.
2. **Implementierungssackgasse:** Entsteht, wenn durch gigantische IT-Projekte eine Einführung verzögert wird oder implementierte Systeme aufgrund der hohen Komplexität nicht mehr zur Verfügung gestellt werden
3. **Anwendungssackgasse:** Entsteht, wenn die Optionen des IT-Systems nicht<sup>27</sup> oder nur wenig genutzt werden und somit ein hochkomplexes PLM-System nur als Datenablage „missbraucht“ wird.

Diese Implementierungshürden stellen ein großes unternehmerisches Risiko dar, da zum einen die Ziele, die mit einem PDM-System erfüllt werden sollten, nicht erreicht werden und zum anderen ein erheblicher finanzieller Aufwand entstanden ist. Auch bei erfolgreichem Start eines PDM-Projektes sollte zu jeder Zeit über den Status der Implementierung reflektiert werden, da eine 100% Umsetzung nicht möglich ist. Der Zielbereich der Implementierung liegt im Optimum aus Aufwand und Nutzen und bewegt sich im Idealfall bei etwa 20% Aufwand und 80% Nutzen [Eig09]. Obligatorisch ist hierbei, dass im Einführungsprozess ein erhöhter Aufwand mit augenscheinlich geringem Nutzwert zu erwarten ist, da PDM auf langfristige Erfolge (ROI > 2,5 Jahre) für den gesamten Produktlebenszyklus über die gesamte Produktpalette hinweg abzielt (vgl. Abbildung 2.20).

---

<sup>27</sup>Anmerkung: Möglich ist hier auch eine Verweigerungshaltung der Anwender (“aufgezwungenes System”)

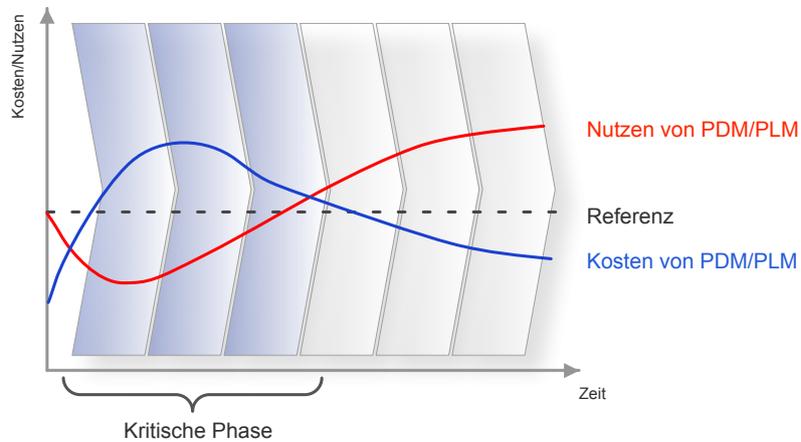


Abb. 2.20: Einführungsphase von PDM/PLM in Anlehnung an [Eig09]

Typisch für die Kostenstruktur einer PLM-Einführung ist der große Faktor der unternehmensspezifischen Anpassungen (Customizing), der oftmals über 70% der Gesamtkosten betragen kann und der sich wiederum zu einem sehr großen Anteil aus den funktionalen Anforderungen an das PLM-System zusammensetzt. Aus diesem Grund muss bei der PLM-Einführung eine Balance zwischen den Spannungsfeldern gefunden werden, die einen guten Kompromiss darstellt:



Abb. 2.21: Spannungsfeld des PLM (aus mehreren Quellen zusammengefasst)

Kern jedes PDM-Systems und folglich auch das Element mit dem größten Nutzen ist das Management des PEP, der von den Produkthanforderungen bis zum Versuch reicht. Hier lässt sich der größte Nutzen durch Entwicklungshistorie, Versionierung, Änderungsverfolgung und Workflows erzielen, indem durchgängig jedes Autorensystem der CAx-Welt integriert wird [SW08]. Bei der Einführung von PDM/PLM-Systemen sollte hierauf folglich ein Fokus gesetzt werden, da dort der größte Nutzwert zu erwarten ist. Im Einführungsprozess von PLM-Systemen stehen allerdings nicht nur im technischen Sinn bewertbare Größen im Raum, sondern vielmehr auch der Einfluss des Managements, der Aktionäre (z.B. Holding), von Beratungsfirmen und nicht zuletzt von den Projektteams und Entscheidern, die für eine Implementierung verantwortlich sind und Empfehlungen abgeben. Aus diesen Gründen kann es mitunter vorkommen, dass nicht immer die technisch ideale Lösung präferiert wird.

### **2.5.3 Sicht auf die Produktdaten**

Zentrale Bedeutung bei der Sicht auf Produktdaten hat neben den spezifischen Parametern, die jede Sichtweise aufweist, die Strukturierung von Produkten. CAD-Daten entsprechen in ihrer Produktstruktur normalerweise dem geometrischen Bauteil, deren Knotenpunkte den Einzelteilen entsprechen. Die Trennung in der Struktur erfolgt hier eher fertigungsorientiert zwischen den Bauteilen (Parts) und den Baugruppen (Assemblies) [Fab07]. Ähnlich erfolgt die Gliederung in den CAD-nahen CAE-Disziplinen, wie FEM und CFD, die hier die strukturellen Vorgaben zumeist übernehmen. Im Gegensatz dazu variiert die Sichtweise der MKS, da hier nach abstrakten Modellierungselementen gegliedert wird, die simulationsspezifisch sind. Die Knoten der Produktstruktur werden zusätzlich durch die Teilelemente sowie die Topologie des Simulationswerkzeugs vorgegeben und werden anhand einer angetriebenen, luftgefederten LKW-Hinterachse nachfolgend verdeutlicht:

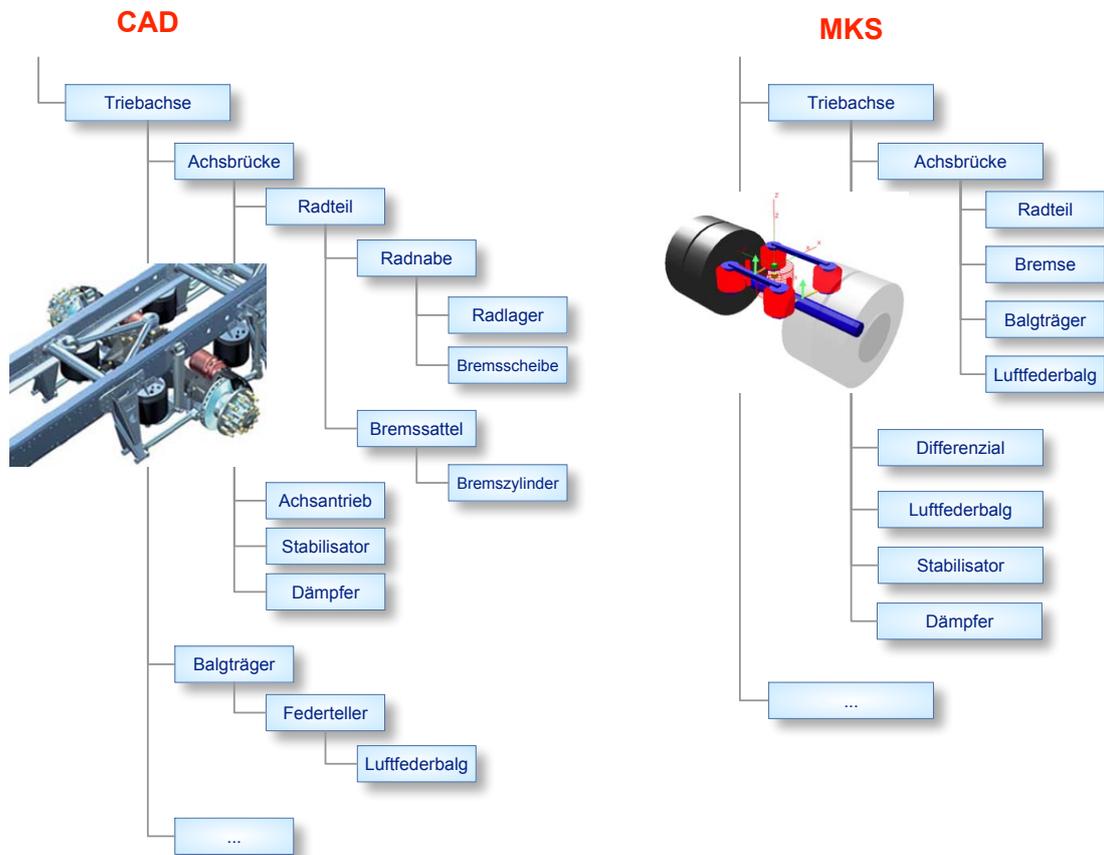


Abb. 2.22: Knotenpunktvergleich CAD - CAE am Beispiel einer LKW-Hinterachse

[GEK01] gliedert Produktsichten in Strukturen, die durch teilweise überlappende Sichtweisen ausgeprägt sind. Dieses semantische Produktstrukturmodell lässt sich innerhalb der Strukturen, die auch als Partialmodelle bezeichnet werden, in Modellelemente zerlegen, die ihrerseits wieder disziplinabhängig sind und untereinander in Beziehung stehen. Eine Gliederung der Partialmodelle erfolgt in:

- Teilestruktur,
- Montagestruktur,
- Funktionshierarchie,
- Konfigurationsstruktur.

In der Teilestruktur, die auch am ehesten der CAD-Struktur entspricht, werden Bauteile, Baugruppen, Normteile, Halbzeuge und Rohteile abgebildet, die dann zusammen

die Produktstruktur nach DIN 199 bilden. Aus Sicht des CAD müssen aber auch immer die Montagestruktur, welche Montageprozess und Montagestufen enthält, sowie die Funktionshierarchie berücksichtigt werden. Die Bedeutung der Funktionshierarchie ist insbesondere in der MKS-Sicht erkennbar, da hier primär eine funktionale Sichtweise sowie eine Gliederung in Teilfunktionen vollzogen wird. Das Partialmodell der Konfigurationsstruktur beschreibt die Varianten, die für Produkte möglich sind, und bildet neben der CAD-Sicht einen großen Teil der Vertriebs Sichtweise. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Systematik des Produktstrukturmodells in der Fertigungssicht, CAD-Sicht und Vertriebs Sicht:

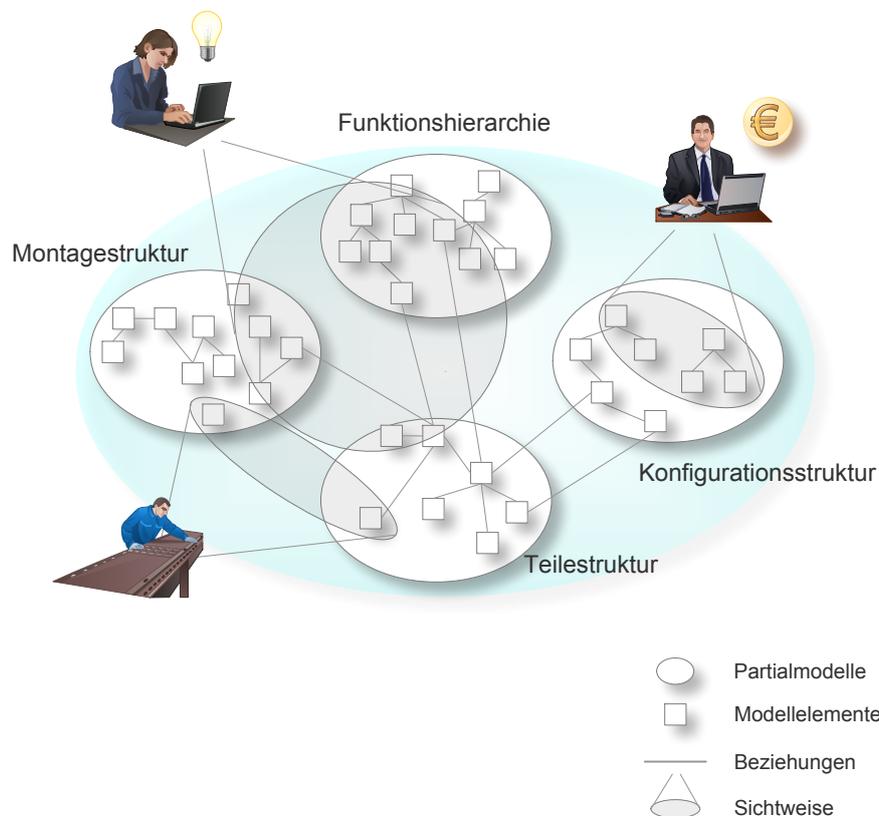


Abb. 2.23: Bereichsspezifische Sichten auf die Partialmodelle des semantischen Produktstrukturmodells nach [GEK01]

Im Nutzfahrzeugsektor ergibt sich aufgrund der OEM-Aufbauhersteller-Beziehungen die Notwendigkeit der Bereitstellung von Konstruktionsdaten nach Abschluss der Fertigung, so dass hier eine weitere arbeitsintensive Sichtweise auf Produktdaten hinzukommt, da

CAD-Daten reduziert und bereitgestellt werden müssen. Zum einen müssen den Aufbauherstellern seitens des OEM Aufbaurichtlinien vorgegeben werden die z.B. das Kipp- oder Lenkverhalten des Fahrzeugs betreffen, zum anderen werden heute im Fahrgestell und Rahmenbereich technische Zeichnungen und CAD-Geometrien über das Web zur Verfügung gestellt, um die Aufbaukonstruktion zu vereinfachen. Dies spiegelt sich letztendlich in einem Kundennutzen wider, da so das Fahrzeug kostengünstiger produziert werden kann. Aus diesem Grund finden sich bei großen Nutzfahrzeug-OEM-Webseiten sogenannte Aufbauherstellerportale<sup>28 29 30</sup>, die nach Registrierung Chassis- und Aufbaudaten zur Verfügung stellen und einen nicht unerheblichen Aufwand auf OEM-Seite implizieren.

## 2.5.4 Simulationsdatenmanagement

Das Simulationsdatenmanagement als Teil des PDM existiert, wie im vorherigen Kapitel erläutert, auf der Ebene des Team Data Managements und ist im Regelfall an die nativen CAE-Daten gebunden. Prozedural sollte es aus Sicht des PLM eine Ebene weiter oben gesteuert werden und wird als Teil des Engineering Data Management (EDM) angesehen, da hier beispielsweise auch Versuchsdaten miteinbezogen werden können. In der Realität finden sich heute allerdings relativ wenige Unternehmen, in denen eine derartige vollständige Umsetzung genutzt wird. Vielmehr beschränkt sich das Management von Simulationsdaten vor allem im MKS-Bereich auf eine filebasierte Ablage sowie eine Sortierung und Archivierung in Tabellenkalkulationsprogrammen und wird erst im Lauf der letzten Jahre auf Managementsysteme umgestellt [NR08, PTL08, BGK08]. Simulationsdatenmanagement kann heute nicht in einer gemeinsamen Datenbasis mit CAD vereinbart werden, da das PDM-System für CAE-Anwendungen nicht die spezifischen Anforderungen erfüllen kann [Gra07]. Der Begriff SDM wird im Rahmen dieser Dissertation als die Gesamtheit der zur Simulation notwendigen Daten und Modelle aufgefasst und beinhaltet Aspekte des EDM.

### 2.5.4.1 Notwendigkeit für Simulationsdatenmanagement

Sowohl in den CAD-nahen Simulationsdisziplinen wie FEM und CFD als auch in der entfernteren Mehrkörpersimulation oder der Thermosimulation ist es erforderlich, eine Trennung der Simulationsdaten von den CAD-Daten zu vollziehen. Zum einen existieren zu Beginn eines Entwicklungsprozesses oft nur sehr unvollständige CAD-Daten, so dass sehr viele Annahmen und Idealisierungen getroffen werden müssen, zum anderen ist es oftmals erforderlich, innerhalb der Simulationsläufe Parametervariationen abzuarbeiten oder geometrische Änderungen durch Optimierungsvorgänge zu erzeugen. Neben diesen

---

<sup>28</sup>MAN Nutzfahrzeuge AG: [www.manted.de](http://www.manted.de)

<sup>29</sup>Mercedes Benz: <https://bb-infoportal.mercedes-benz.com/portal/>

<sup>30</sup>Scania: <http://www.scania.de/trucks/bodybuilding-information/>

bauteilbezogenen Daten werden innerhalb des Simulationsdatenmanagements Load Cases, Solver-Einstellungen und weitere simulationsspezifische Daten hinterlegt [MDS08, AM09]. Simulationsdaten beinhalten eine große "Breite" in der Datenstruktur, da sie, entsprechend der Simulationsdisziplin, spezifische Eingabedaten in einem unterschiedlichen Parameterraum benötigen und gleichzeitig auch spezifische Ausgabedaten erzeugen. Aus diesem Grund passen Produktstrukturen, wie sie in PDM-Systemen genutzt werden, oftmals nicht zu den Datenstrukturen und Beziehungen in der Simulationswelt [PP08]. Ein Beispiel hierfür ist z.B. die Sichtweise auf den Wasserkühler einer Verbrennungskraftmaschine (VKM), der vom CAD-Konstrukteur als geometrischer Körper mit zwei oder mehr Anschlüssen gesehen wird. Der Simulationsexperte, der den Kühlkreislauf der VKM in Kombination mit Kühler und Nebenaggregaten simulativ abbilden will, sieht den Kühler geometrisch nur über die Fläche, die Anzahl der Kühlrohre, den Strömungswiderstand sowie den Wärmeleitkoeffizienten. Zusätzlich benötigt er aber noch Daten zum Kühlmedium und Volumenstrom, die konstruktiv so in überhaupt keiner Relation zum Kühler stehen und im Normalfall in der CAD-Produktdatenstruktur keine Einordnung finden.

Neben diesen simulationsspezifischen Randbedingungen werden Berechnungsmodelle zusätzlich disziplinabhängig, interaktiv von internen und externen Berechnungsspezialisten, erzeugt, was die Datenhaltung im Gegensatz zum CAD-System komplexer gestaltet. Aus diesem Grund ist auf dem Markt bei vielen CAD-Herstellern der Trend zur Integration von Simulationsdatenmanagementsystemen (SDMS) in ihre PDM-Systeme erkennbar, was nach [BGK08] in Einzelfällen sinnvoll sein kann, jedoch bei globaler Betrachtung nicht den Anforderungen nach offenen, modularen Berechnungsprozessketten genügt. Ziel eines Simulationsdatenmanagements ist es folglich, die Beschaffung und Aufbereitung von Produktdaten prozesssicher zu ermöglichen oder zu automatisieren, den Modellaufbau und die Archivierung zu managen und schließlich die Lastfälle und Simulationsergebnisse prozesssicher zu verwalten. Nach Ablauf sämtlicher Simulationsläufe sollte das SDMS zum Synchronisierungszeitpunkt die Möglichkeit bieten, Daten in PDM-Systeme zurück zu speichern. Ziel dabei ist aber immer, das für die Auslegungsaufgabe optimale CAE-Werkzeug einzusetzen und dabei keine Rücksicht auf das SDMS zu nehmen, was oftmals eine schwierige Nutzung oder aufwändige Adaption von am Markt erhältlichen Lösungen erfordert. Aus diesem Grund gestaltet sich nach [Gra07] das Datenmanagement hier besonders herausfordernd, da nicht, wie in der CAD-Welt üblich, innerhalb eines Unternehmens mit einem CAE-Werkzeug gearbeitet wird und zusätzlich die Rückmeldung der CAE- in die CAD-Landschaft ungenügend ist.

#### **2.5.4.2 Wechselwirkungen CAD-CAE-Daten**

In heutigen CAE-Landschaften existieren die unterschiedlichsten Tools, die die verschiedensten Anforderungen an Simulations- und Produktdaten stellen und im Regelfall auf

interne und externe Dienstleister verteilt sind. Produktentwicklungsprozesse leben von Iterationsschritten zwischen CAD und CAE, die sich gegenseitig beeinflussen und einen regen Datenaustausch implizieren. Problematisch hierbei ist nach [Gra07] die unterschiedlich ausgeprägte Granularität der Daten, die zu einem hohem Anpassungsaufwand seitens der Anwender führt. Obligatorisch ist hier auch, dass sich Datencluster und Datensinken nie vermeiden lassen, da eine Auflösung der Datenspezifität unpraktikabel wäre. Aus diesem Grund sind Konnektoren wie beispielsweise ProStep OpenPDM für die verschiedenen Schnittstellen notwendig, die auf der einen Seite die CAE-Daten und auf der anderen Seite die CAD-Daten mappen<sup>31</sup>. [AM09] beschreibt hier die Interaktion zwischen CAE und CAD über die Synchronisation zwischen PDM und SDM, die in die eine Richtung Produktdaten und die Anforderung einer Simulation beinhalten, in die andere Richtung Ergebnisse als Feedback liefert. Das SDM-System wiederum ist über Konnektoren an die CAE-Werkzeuge gekoppelt und steuert Preprocessing, Solving und Postprocessing. Ein Vorschlag zur Kommunikation zwischen den Schichten bietet das Projekt „SimPDM“ des Prostep iViP Vereins, das in der VDA-Richtlinie 4967 hinterlegt ist (vgl. hierzu Kapitel 2.5.4.3).

#### 2.5.4.3 Spezifikation SimPDM

Der SimPDM-Standard des Prostep iViP Vereins ist einerseits der Versuch einer Standardisierung der Integration von CAE-Applikationen und SDM-Systemen sowie der Kommunikation von SDM- mit PDM-Systemen zu erreichen, auf der anderen Seite Berechnungsdaten mit all ihren Parametern hochaufgelöst im SDM-System zu managen [AM09]. SimPDM ist in zwei Dimensionen unterteilt, die sich in das Datenmodell und den CAE-Prozess gliedern. Das Datenmodell ist modularisiert, was eine disziplinunabhängige, detaillierungsneutrale Datenverwaltung ermöglicht und eigene Definitionen erlaubt. Dieses Referenzdatenmodell ist in neun Pakete gegliedert, die untereinander in Beziehung stehen. Nachfolgend sind die einzelnen Pakete des Referenzmodells mit ihren Charakteristika aufgeführt. Zentrale Bedeutung kommt dem Base-Modul zu, da es alle Konstrukte der im CAE-Prozess anfallenden Dokumente definiert und verknüpft. Neben diesem zentralen Paket bildet das PROP-Modul alle CAE-spezifischen Eigenschaften ab, die über das CAD-Paket mit Konstruktionsdatenreferenzen erweitert werden können. Eine weitere Referenz auf andere Datenbasen erlaubt das SYNC-Paket, das automatisierte Updates erlaubt. Alle weiteren Pakete dienen z.B. der CAE spezifischen Topologie oder den CAE-Einstellungen und Lastfällen [Sim08, VDA08] und sind nachfolgend kurz erläutert:

- **BASE** (Basisinformationen): Modellstruktur, Analysedefinition, Ergebnisse, Versionierung

---

<sup>31</sup>Mapping bezeichnet die Zuordnung von Parametern über Disziplinen hinweg.

- **PROP** (Eigenschaften): Allgemeine Eigenschaften, Parameter, Kennlinien, Funktionen, Elemente, Material, Eigenschaftssätze, Versionierung
- **CAD** (CAD-PDM-Daten): Referenz auf CAD-PDM Dateien, BOM<sup>32</sup>, Verbindungslisten, CAD-Daten
- **SYNC** (Parametersynchronisation): Mapping, Referenz auf Parameter
- **POST** (Postprocessing): Detaillierung der Ergebnisse, Verweis auf Modell und Eigenschaften
- **SETT** (Einstellungen): Solvereinstellungen, Settings
- **LOAD** (Lastfälle): Randbedingungen, Startbedingungen, Lastfälle
- **CONF** (Konfiguration): Abstrakte Produktstrukturen, Konfigurationen
- **TOPO** (Topologie): Domäneübergreifend (MKS, FEM, CFD), generisch, erweiterbar, beschrieben nach Eigenschaften

Die SimPDM-Standardschnittstelle besteht aus einem XML-Dokument, über das der Austausch zwischen CAE-System und PDM-System stattfindet und das bidirektional genutzt wird. Das Referenzmodell wurde mithilfe von Referenzimplementierungen in FEM, MKS und CFD untersucht und in der VDA-Empfehlung 4967 festgelegt. Nach [Kra07] konnte gezeigt werden „[...] dass das SimPDM Referenzmodell in der Lage ist, die Informationen aus allen drei Anwendungsfällen abzubilden und im PDM-System zu speichern. Somit kann mit einer Implementierung des SimPDM Referenzdatenmodells eine maßgebliche Effizienzsteigerung im Simulations- und Berechnungsprozess erzielt werden.“ Herausfordernd bei der Integration in einem Unternehmen ist hierbei allerdings, dass eine Implementierung in bestehende Systeme erfolgen muss.

#### 2.5.4.4 Workflows für MKS

Für den Referenzprozess der MKS-Untersuchungen wird eine, wie in Kapitel 2.5.2.1 erläuterte, mehrschichtige PDM/PLM-Struktur vorausgesetzt, die sich in ein Macro Level, das die Metadaten enthält, und ein Micro Level, das die Anwendungsdaten enthält, gliedert. Eine Beziehung der einzelnen Anwendungsdaten erfolgt über das Meta-Daten-Modell, das konkret im STEP-Format gehalten wird. Der Prozess der Simulation gliedert sich in iterative Schleifen, die Simulationsanforderungen, Modellerstellung und Postprocessing durchlaufen und innerhalb des Entwicklungsprozesses angeordnet sind. Entwicklungsschritte innerhalb der CAE-Welt werden reproduzierbar und versioniert im SDM-System gespeichert und eingefrorene Stände mit CAD-Daten synchronisiert, respektive verknüpft. Voraussetzung für eine relationale Verknüpfung ist eine Multigranularität die es erlaubt, Simulationsmodelle mit Konstruktionsdaten zu verknüpfen.

---

<sup>32</sup>Bill of materials (Stücklisten)

So können zu Beginn eines PEP mehrere CAD-Bauteile nur einer MKS-Struktur oder umgekehrt zugeordnet werden, da zur fahrdynamischen Analyse beispielsweise keine Dichtringe oder einzelne funktionsunabhängige Schraubverbindungen benötigt werden. Abhängig vom Simulationsziel können sich so innerhalb der Produktentstehung viele im Fluss befindliche verschiedene Relationen zwischen CAD und CAE ergeben, die bei Verwendung eines gemeinsamen Datenmanagement-Systems Berücksichtigung finden müssen (vgl. hierzu Kapitel 2.5.3: Sicht auf die Produktdaten). In den Empfehlungen des Prostep iViP erfolgt eine Definition von Workflows zur Synchronisation der PDM und SDM-Daten in 5 Stufen, die insgesamt in 12 Schritte unterteilt sind und unter anderem die Identifikation der notwendigen Elemente, Transformationsmatrizen, zusammengefasste Trägheitsmomente, Massen und Evaluierungen umfasst. Zusätzlich werden hier weitere Workflows empfohlen, die unter anderem Administration, Analysen, Dokumente, Lastfälle, Assemblies und Topologie-Management beinhaltet. Für weitere ausführliche Informationen sei an dieser Stelle an die Empfehlungen der VDA-4967 verwiesen [Sim08, VDA08].

Der Ablauf des formulierten Referenzprozesses, der so auch von [Pan08] genutzt wird, gliedert sich in sechs Phasen, die von dem Vorliegen eines Simulationsauftrages bis zum Abschluss der Simulation reichen und in nachfolgender Abbildung erläutert sind:

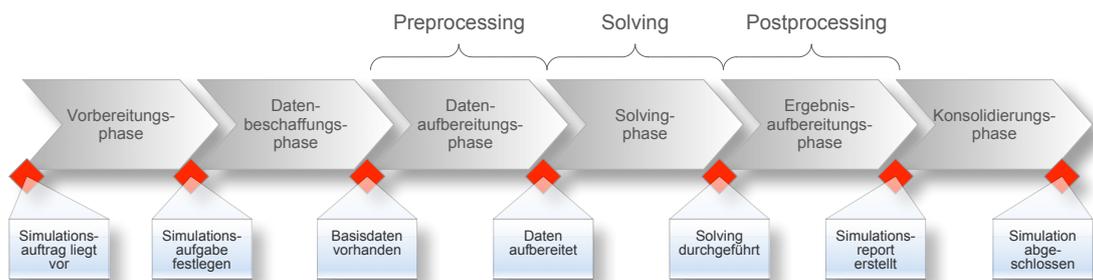


Abb. 2.24: Referenzprozess nach [Sim08, VDA08]

Die Phasen des Prozesses werden durch Meilensteine abgegrenzt und schreiben in dieser Ausführung lediglich vor, was für Tätigkeiten vorgesehen sind, nicht aber wie oder von wem sie zu erfüllen sind, da diese sehr unternehmens- oder projektspezifisch sind. In den weiteren Ausführungen ab Kapitel 3.1 wird die Prozessmodellierung feiner granularisiert und auf Workflowebene untersucht.

#### 2.5.4.5 Fazit

Das Simulationsdatenmanagement ist heute aufgrund der Häufigkeit und Anzahl der virtuellen Entwicklungsschritte Grundvoraussetzung für prozesssichere, effektive Simula-

tionsprozesse und Workflows. Die Ausprägung des Datenmanagements liegt aber in der industriellen Praxis häufig signifikant unter den theoretischen Ansätzen, da bestehende, gewachsene Strukturen ad hoc schwierig ablösbar sind. Simulationsdaten werden heute in vielen CAE-Bereichen filebasiert und mithilfe von Tabellenwerken verwaltet (vgl. auch [BGK08]) und entsprechen in keiner Weise den Integrationsstandards, die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellt wurden (vgl. hierzu Kapitel 2.5.4.3). Auch stellt sich an dieser Stelle für eine Integration von Simulationsdaten nach den Richtlinien von [Sim08] die Aufwand-Nutzen-Frage, da abhängig von der gewählten Methodik an manchen Stellen evtl. gar kein Bedarf hierfür entsteht oder die Umsetzung zu aufwändig wäre. Essentiell ist allerdings eine Berücksichtigung neutraler Datenformate wie der vorgeschlagene STEP-Standard bei Implementierung von Simulationsdatenmanagement-Systemen, um zukünftig im Bedarfsfall eine Kopplung zu ermöglichen.

## 2.6 Technische Lösungen in der NFZ-Entwicklung

Zum besseren Verständnis der Variantenproblematik sowie der üblichen Baukastenstrukturen im Nutzfahrzeug soll an dieser Stelle ein Überblick über deren Stand der Technik gegeben werden. Nutzfahrzeugspezifische Besonderheiten insbesondere in den verschiedenen Achseinbausituationen werden ebenso wie die unterschiedlichen Lenkungskonzepte kurz anhand mehrerer Beispiele von MAN-Fahrzeugen erläutert. Insbesondere wird hier auf die Baukasten- und Variantenlogik bei MAN eingegangen, da diese Gegenstand der Betrachtungen in dieser Arbeit ist.

### 2.6.1 Achseinbauten

Bei schweren Nutzfahrzeugen bewähren sich im Vergleich zum PKW oder leichten Nutzfahrzeugen weiterhin Starrachsen, die angetrieben oder antriebslos, gelenkt oder ungelenkt ausgeführt sein können. Einzige Ausnahme bildet hier die Gruppe der Fernreisebusse, die aus Komfort- und Packagegründen mit einzelradgeführten Vorderachsen ausgerüstet werden. Die Federung dieser Achsen gegenüber dem Chassis erfolgt über unterschiedliche, optionale Federungssysteme, die entweder als Stahlfederung (Blattfederung und Schraubenfederung) oder als Luftfederung ausgeführt ist. Stand der Technik an Vorderachsen ist die Blattfeder, da sie kostengünstig ist, Packagevorteile in Kombination mit dem Leiterraum bildet, für unterschiedlichste Achslasten über die Blattanzahl auslegbar ist und im Gegensatz zu allen anderen Ausführungen radführende Aufgaben übernimmt. Eine Luftfederung kommt an Vorderachsen dort zum Einsatz, wo unterschiedliche Fahrniveaus, meist zum Be- und Entladen von Wechselbrücken, realisiert werden müssen oder die Komforteinschränkungen der Blattfeder nicht akzeptabel sind.

Angetriebene Hinterachsen werden, Baustellen- und Militärfahrzeuge ausgenommen, im Regelfall über Luftfederbälge gefedert, da sich so die großen Achslastunterschiede, die zwischen beladenem und unbeladenem Fahrzeug auftreten, besser realisieren lassen und Auf-/Absattelvorgänge einfacher gestaltet werden können. Triebachsen an Baustellenfahrzeugen, die zumeist als Doppelachsen ausgeführt sind, werden über mehrstufige Blattfedern gefedert und verfügen über einen Pendelausgleich. Nicht angetriebene Laufachsen<sup>33</sup>, die als Vor- oder Nachlaufachse genutzt werden, sind in aller Regel luftgedefert, da nur so eine Liftfunktion sowie eine adaptierbare Lastverteilung zwischen Triebachse und Laufachse umsetzbar ist. Die Luftfedersysteme zwischen diesen Achspaarungen sind entweder direkt oder über Druckdifferenzventile gekoppelt. Gesondert erwähnt werden müssen die schraubengefederten Achsen, da sie nur bei hochgeländegängigen Militärfahrzeugen zum Einsatz kommen, die über ein geschlossenes, torsionssteifes Rahmenprofil verfügen und im Gegensatz zu blattgedeferten Achsen an Lenkern geführt werden. Die Stabilisierung aller Achsvarianten erfolgt optional über Stahlstabilisatoren, die über Koppelstangen am Chassis befestigt sind und die statischen Wankbewegungen reduzieren. Einzige Ausnahme bilden hier die luftgedeferte Vorderachse, die in der schweren Reihe TGX/TGS als Torsionskurbelachse konzipiert wurde und eigenstabilisiert ist, sowie die X-Lenker Triebachse, deren oberer Dreieckslenker als Kreuzlenker ausgebildet ist und für eine stabilisierende Wirkung sorgt. Andere Konzepte basieren in aller Regel auf modifizierten Verbundlenkerachsen<sup>34</sup>, wie sie in der Modellreihe Actros (Mercedes-Benz) an der Triebachse zu finden sind. Eine Schwingungsdämpfung erfolgt bei allen Ausführungen über ölhydraulische Dämpfer, wie sie auch im PKW Verwendung finden. Nachfolgende Abbildungen verdeutlichen die konstruktiven Unterschiede der Achstypen:

---

<sup>33</sup>In der Literatur ist auch der Begriff Hilfsachse gebräuchlich

<sup>34</sup>Bezeichnung bei Mercedes-Benz: Stabilenker

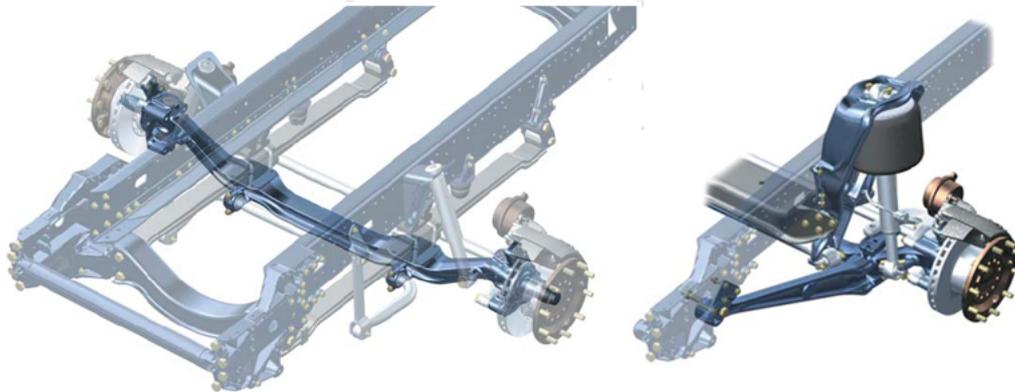


Abb. 2.25: Blattgedernte (links) und luftgedernte (rechts) starre Vorderachse MAN TGX/TGS aus [AV08]

In obiger Abbildung ersichtlich sind die sehr guten Packageverhältnisse der Vorderachse (links), bei der die Blattfeder sowohl Führungs- als auch Federungsaufgaben übernimmt und exakt unter dem Rahmenlängsträger sitzt, so dass hier auch die Kraftflüsse optimal sind. Eine Stabilisierung erfolgt über einen Torsionsstabilisator, der über Koppelstangen am Rahmen und elastische Rückenlager an der Achse befestigt ist. Zu erkennen sind auch die elastischen S-Schlag Dämpfer, die unter dem Rahmen angebracht sind und eine zu weite Verdrehung der Blattfeder im Notbremsungsfall begrenzen. Die luftgedernte Version der Vorderachse ist über ein Feder-Dämpfer-Bein gefedert und über Schräglenker und einen Panhardstab geführt. Ersichtlich ist die weitaus komplexere konstruktive Ausführung, die über Federdome und eine Quertraverse realisiert ist. Eine Wankstabilisierung ist hier nicht notwendig, da sich der Achskörper selbst durch Torsion stabilisiert.

Die angetriebenen Starrachsen in nachfolgender Abbildung sind über Längslenker und einen oben angeordneten Dreiecks- bzw. X-Lenker geführt. Die Federung erfolgt im schweren Segment über vier Luftfederbälge, die kraftflussgerecht bezüglich des Rahmenprofils unter dem Rahmenlängsträger angeordnet sind. In linker Abbildung ist auch der bei Dreieckslenkern notwendige Stabilisator hinter der Achse ersichtlich, der wie an der Vorderachse über Pendelstützen am Rahmen und elastische Rückenlager am Achskörper befestigt ist. Die Lenkerführung der Nachlaufachse ist kinematisch der Triebachse sehr ähnlich, verfügt aber über einen zusätzlichen mittig angeordneten Liftbalg, der ein Anheben der Achse ermöglicht.

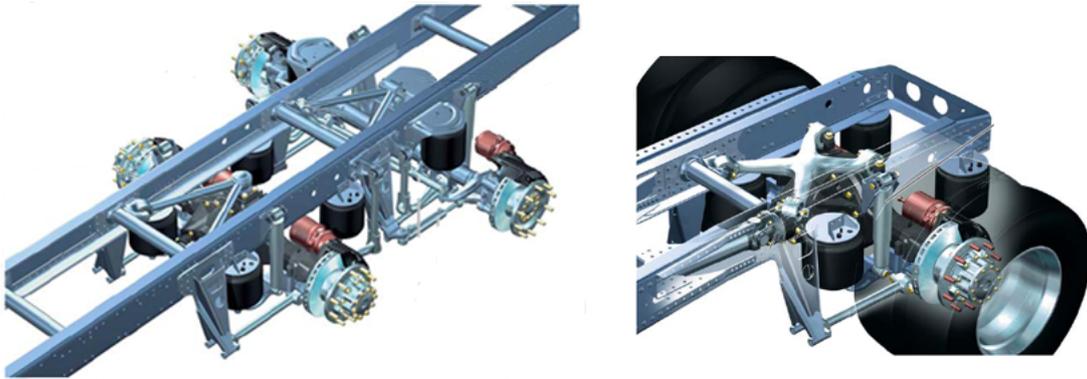


Abb. 2.26: Luftgefederte Triebachse mit liftbarer Nachlaufachse (links) und luftgefederte X-Lenker Triebachse (rechts) MAN TGX aus [AV08]

Prinzipiell gilt bis auf wenige Ausnahmen (geländegängige Fahrzeuge) bei aktuellen MAN-Fahrzeugen der schweren Reihe, dass blattgefederte Einzelachsen nur über Blattfedern geführt werden, luftgefederte Vorderachsen über Schräglenker sowie ein Feder-Dämpferbein und Triebachsen über Längslenker und einen obenliegenden Dreieckslenker oder X-Lenker. Die Ausnahme bilden hier die blattgefederten Doppelachsaggregate, die an Längslenker und oberen Dreieckslenkern geführt sind und bei denen die Blattfeder lediglich als Stützblattfeder fungiert.

Ähnlich bei allen Achseinbauten ist, dass sie in unterschiedlichsten Varianten verbaut sein können. Auf Basis von zwei oder mehr Achskörpern erfolgen Einbauten mit unterschiedlichen Federn, Stabilisatoren, Federunterlagen (zur Einstellung des Fahrniveaus und Nachlaufs), Dämpfern und Fahrwerkslenkern. Die Achskörpervarianz beschränkt sich bei den Hinterachsen auf Hypoidachsen und Außenplanetenachsen, bei den Vorderachsen auf Antriebsachsen und nichtangetriebene Achsen mit unterschiedlichen Kröpfungen der Achsfaust. Die Baukastenlogik der Achsen ist in Kapitel 2.6.3 erläutert.

## 2.6.2 Lenkungseinbauten

Aufgrund des Starrachsenkonzepts kann im Nutzfahrzeug auf aufwändige Mehrteilungen des Lenktrapezes verzichtet und ein- oder zweiteilige Lenktrapeze genutzt werden. Einteilige Lenktrapeze sind sowohl im leichten als auch schweren Nutzfahrzeug vertreten, zweiteilige Lenktrapeze in den hochgeländegängigen Fahrzeugen mit Schraubenfederung, die extreme Verschränkungswinkel ermöglichen. Die Räder der LKW-Achse(n) werden

heute ausnahmslos mit Kugelumlauflenkungen über einen Kurbeltrieb gelenkt, der im Bedarfsfall über Schlepphebel verlängert werden kann und mithilfe eines hydraulischen Unterstützungszylinders eine optionale zweite Vorderachse betätigt. Fernreisebusse mit doppelquerlenkergeführten Einzelradaufhängungen werden über dreigeteilte Lenktrapeze gelenkt. Eine Anlenkung des Zwischenhebels erfolgt über einen Kurbeltrieb oder über ein als Zwischenhebel ausgeführtes Lenkgetriebe (der Lenkstockhebel bildet den Zwischenhebel). Laufachsen können in mehreren Varianten ausgeführt sein:

- unliftbar, liftbar
- ungelenkt, gelenkt
- passiv gelenkt (Adhäsion), aktiv gelenkt (meist hydraulisch)

Vorlaufachsen können hydrostatisch über einen Nehmerzylinder an der Vorderachse und einen Geberzylinder an der Laufachse gesteuert werden, bei Nachlaufachsen erfolgt die Anlenkung in MAN-Fahrzeugen heute ausschließlich elektrohydraulisch. Im Reisebus üblich sind adhäsionsgelenkte Nachlaufachsen, die zur Rückwärtsfahrt und bei höheren Geschwindigkeiten zentriert werden müssen.

Der in Kapitel 2.6.1 beschriebene Achseinbau beeinflusst den Lenkungseinbau maßgeblich, da in Abhängigkeit der Federungsart und den daraus resultierenden Momentanpolen der Achse beim Einfedern, Verschränken und Bremsen der Lenkungseinbau adaptiert werden muss. Kritisch sind hier Vorderachseinbauten mittels Blattfederung, die bis auf wenige Sonderfälle nicht kinematisch geführt werden, da dort der resultierende Momentanpol der Achse von der Blattfederanzahl, der Blattfederausgestaltung und der Einbausituation abhängt. Neben diesem Momentanpol für das Paralleleinfedern bildet die nichtkinematisch geführte Achse Pole für das verschränkte Einfedern sowie das Bremsen, das vor allem bei Einblattfedern zu einem S-Schlag führt, der bei falsch gewählter Lenkhebelposition zu ungewollten Relativbewegungen des Lenkgestänges führt. Nachfolgende Abbildung zeigt eine FE-Analyse<sup>35</sup> einer Einblattfeder unter Einwirkung eines Bremsmomentes. Zu erkennen ist die Verdrehung des Achskörpers sowie der S-Schlag der Blattfeder und die damit verbundene Verschiebung der Kinematikpunkte des Kurbeltriebes.

---

<sup>35</sup>Untersucht wurde hier ebenfalls die durch die Achsdurchbiegung verursachte Rückkopplung auf das Lenktrapez.

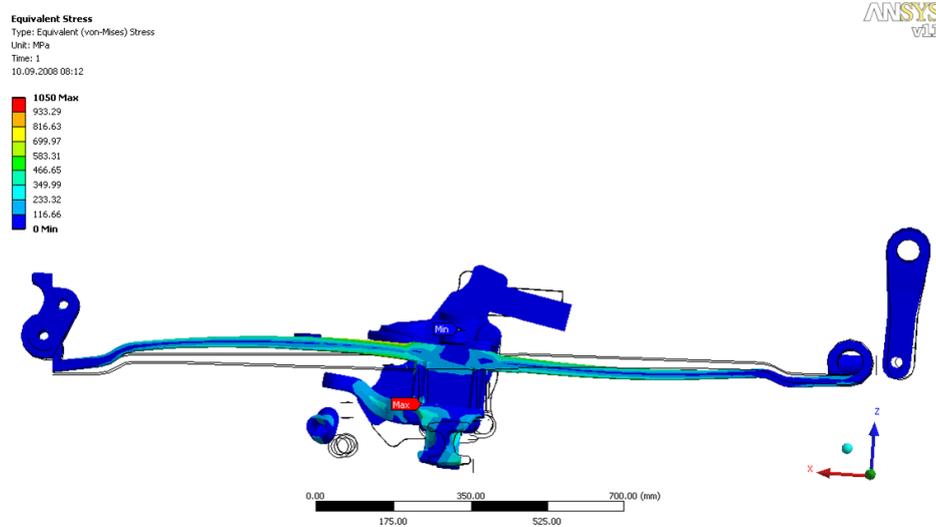


Abb. 2.27: FE-Analyse MAN TGX 4x2 Einblattfeder unter Einwirken eines hohen Bremsmomentes; Fahrtrichtung nach rechts (Quelle: MAN Nutzfahrzeuge AG)

Eine weitere Besonderheit im Vergleich zum PKW sind die unterschiedlichen Lenkgetriebe, die sich sowohl in ihren Übersetzungen aufgrund der verschiedenen Achslasten unterscheiden als auch in ihrer Lenkhalswelle, die aufgrund der Fahrerhausvarianten in verschiedenen Längen ausgeführt sein kann. Dies zieht auch bei der weiteren Lenkungsgestaltung Varianten der kardanischen Lenksäule nach sich, die abhängig der Lenkgetriebehalswelle und der damit verbundenen Drehunförmigkeit mit einfachen Kreuzgelenken oder Doppelkreuzgelenken ausgestaltet sind. Nachfolgende Abbildungen verdeutlichen die Einbausituation für ein blattgederertes Vierachsfahrzeug mit zwei gelenkten Vorderachsen und einem Unterstützungszylinder am Schleppebel, dessen Druck über das Lenkgetriebe bereitgestellt wird.

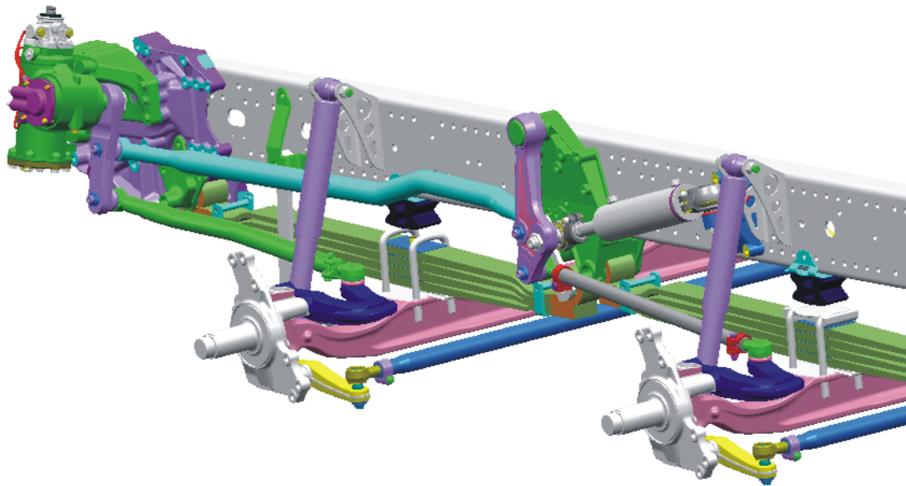


Abb. 2.28: Lenkungseinbau MAN TGS 8x4 Fahrzeug mit 4-Blatt Vorderachsen (Quelle: MAN Nutzfahrzeuge AG)

Gelenkte Vor- und Nachlaufachsen, die immer luftgefedert und folglich lenkergeführt sind, werden ausschließlich über achs- oder rahmenfeste Hydraulikzylinder gelenkt. Die gesamte Lenkanlage der Laufachsen ist im Falle der achsfesten Zylinderanordnung unabhängig von der Achsbewegung relativ zum Chassis, weshalb sich der Lenkungseinbau weit unkomplizierter gestaltet. Bezogen auf das Gesamtfahrzeug erfordert aber auch der Laufachseineinbau eine Adaption des Lenkverhaltens bezüglich der Vorderachse(n), um die vorgegebenen Verschleißkriterien einzuhalten, die im Nutzfahrzeug üblicherweise eine Lenkungsauslegung nach Ackermann impliziert. Serienmäßig verfügbar sind heute bis zu drei gelenkte Achsen, wobei maximal zwei gelenkte Vorderachsen möglich sind. Vor- und Nachlaufachsen werden in MAN Fahrzeugen ausschließlich hydraulisch gelenkt und werden nur einzeln verbaut. Die hydraulische Anlenkung erfolgt entweder über eine hydrostatische Steuerung durch den Lenkgetriebedruck oder eine elektrohydraulische Regelung, wie sie im Regelfall für Nachlaufachsen genutzt wird. Neben den aktiv gelenkten Laufachsen werden speziell im Reisebus adhäsionsgelenkte Nachlaufachsen eingesetzt, die lediglich eine aktive Mittenzentrierung besitzen und sonst bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit frei mitlenken können. Gelenkte wie un gelenkte Laufachsen werden, eine achsfeste Zylinderanordnung vorausgesetzt, meist liftbar ausgeführt, da sie so bei leerem Fahrzeug angehoben werden können und für die Dauer der Leerfahrt verschleißfrei sind. Abbildung 2.29 erläutert die konstruktive Ausführung von Vorlauf- und Nachlaufachsen. Im linken Beispiel dargestellt ist eine nicht liftbare Vorlaufachse

mit rahmenfester Anlenkung des linken Achsschenkels über einen am Längslenkerbock (rot) gelagerten Hydraulikzylinder (gelb) und im rechten eine liftbare elektrohydraulisch gelenkte Nachlaufachse mit Anlenkung des linken Achsschenkels über einen achsmittig gelagerten Hydraulikzylinder.

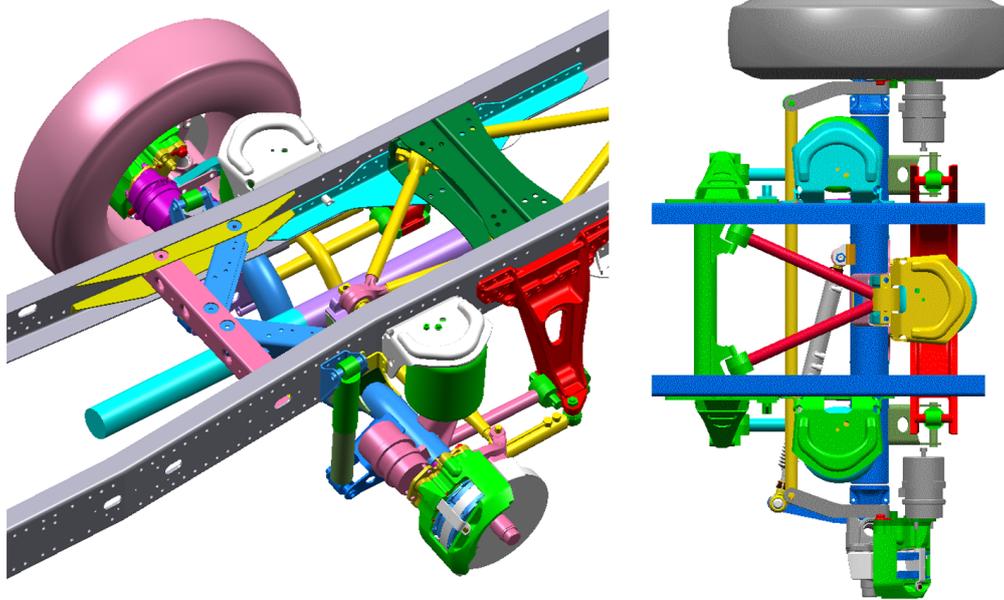


Abb. 2.29: Laufachsenkonstruktion einer nicht liftbaren Vorlaufachse (links) und einer liftbaren Nachlaufachse (rechts) (Quelle: MAN Nutzfahrzeuge AG)

### 2.6.3 Baukastenlogik

Das MAN Produktportfolio, das sich aus leichten, mittelschweren, schweren LKW sowie geländegängigen Fahrzeugen und Bussen zusammengesetzt, ist im Fahrwerksbereich in Baugruppen gegliedert, die untereinander kombiniert werden können. Hauptelement im Fahrwerk ist die Baugruppe Achse, die neben dem Achskörper selbst auch sämtliche Antriebs- und Lenkungselemente beinhaltet. Sie lässt sich in folgende Hauptgruppen gliedern:

- Vorderachsen unterschiedlicher Achslasten
  - Vorderachsen nicht angetrieben, gekröpft (VOK)

- Vorderachsen nicht angetrieben (VO)
- Vorderachsen angetrieben mit Außenplaneten (VP)
- Vorderachsen hydrostatisch<sup>36</sup> angetrieben, gekröpft (VHK)
- Vorderachsen angetrieben mit Durchtrieb (VPD)
- Nachlaufachsen unterschiedlicher Achslasten
  - Nachlaufachse un gelenkt, liftbar (NO)
  - Nachlaufachse gelenkt, liftbar (NOL)
  - Nachlaufachse gelenkt, nicht liftbar (NOL)
  - Nachlaufachse un gelenkt, doppelbereift (NOK)
- Vorlaufachsen unterschiedlicher Achslasten
  - Vorlaufachse un gelenkt, liftbar (LO)
  - Vorlaufachse gelenkt, nicht liftbar (LOL)
  - Vorlaufachse gelenkt, liftbar (LOL)
- Triebachsen unterschiedlicher Achslasten
  - Triebachse Hypoid Achsantrieb (HY)
  - Triebachse Außenplaneten Achsantrieb (HP)
  - Triebachse Hypoid Achsantrieb mit Durchtrieb (HYD)
  - Triebachse Außenplaneten Achsantrieb mit Durchtrieb (HPD)

Die Hauptgruppen des Baukastens lassen sich entsprechend den geforderten Varianten weiter unterteilen, so dass z.B. unterschiedliche Lenkhebel oder Rechts-Linkslenker-Varianten realisiert werden können. Ein Beispiel hierfür ist eine 8-Tonnen Vorderachse in der Linkslenker Ausführung bezeichnet mit VOK-08-04 und der Rechtslenkerausführung mit VOK-08-05.

Basierend auf der Baugruppe Achse erfolgt der Achseinbau in unterschiedlichen Varianten, entsprechend der Achslast und dem Einsatzzweck sowie der erwarteten Ladung mit Variation nachfolgender Parameter:

- Federungsart,
- Federkennlinie und Vorspannung / Druck / Volumen,

---

<sup>36</sup>hydrostatischer Antrieb durch MAN HydroDrive®

- Federeinbauhöhe,
- Stabilisierung,
- Dämpfung.

So kann aus dem bestehenden Baukastensystem eine Achseinbauvariante kombiniert werden, die die Anforderungen des Kunden erfüllt und primär über Variation der Verbindungselemente Chassis-Achse in seinen Eigenschaften festgelegt wird. Bei Allradfahrzeugen mit viel Federweg und großer Bodenfreiheit erfolgt der Blattfedereinbau beispielsweise mit deutlich größeren Federkeilen als für normalhohe Baureihen, so dass eine Achse sowie eine Blattfeder bei entsprechender Achslast mehrmals Verwendung findet. Für die unterschiedlichen Stabilisierungen, abhängig von Ladungsart, Masse und Schwerpunktlage, können bestehende Stabilisatoren an Hinterachsaggregaten auch bis zu zwei mal verbaut werden, um so sehr hohe Ladungsschwerpunkte darstellen zu können. Erwähnt werden soll an dieser Stelle auch, dass diese Variation der Achseinbauten mit verschiedenen Radständen und Federungsarten Analysen oder gegebenenfalls Anpassungen der Lenkanlage erfordern. Zur Erzielung möglichst vieler Gleichteile wird allerdings bei bestimmten Radstandsvarianten ein begrenzter Lenkfehler in Kauf genommen.

Die Lenkanlage selbst ist in den achskörpergebundenen Baukasten sowie den Lenkgetriebe- und Kurbeltriebbaukasten gegliedert. Für die der Baugruppe Achse zugeordneten Lenkhebel gibt es mehrere Varianten, die gerade oder sichelförmig sein können und verschiedene kinematische Punkte darstellen, die abhängig von Federungsart und Einbaulage der Achse gewählt werden. Variantenreichste Baugruppe ist die Lenkgetriebe-Lenkstockhebel-Lenkgestängekombination, die unterschiedliche Lenkgetriebeübersetzungen und Kennlinien sowie verschieden lange Lenkstockhebel umfasst. Auf diese Weise können über die Baukastenelemente unterschiedlichste Achslasten und Einbausituationen realisiert werden, die zum einen den notwendigen Radeinschlag ermöglichen und zweitens im Falle eines Ausfalls der Lenkunterstützung die Homologationskriterien erfüllen. Aktuell existieren für die schwere Reihe im MAN-Produktportfolio etwa 1800 verschiedene Lenkungseinbauvarianten.

## 3 Potentiale im Nutzfahrzeug-PEP

Um Optimierungen im Sinne von Verbesserungen des Entwicklungsprozesses herbeizuführen, ist eine objektive Analyse der Ist-Situation notwendig. Diese Analyse soll Potentiale, Verzögerungs- sowie Schwachstellen innerhalb des Fahrwerksentwicklungsprozesses aufdecken und deren Gründe analysieren. Die Analyse zielt primär auf branchen- und unternehmensspezifische Potentiale ab und ist eng an das Nutzfahrzeug und seine konstruktiven Besonderheiten angelehnt. Ein besonderer Fokus wird dabei auf eine Analyse der gelebten Praxis innerhalb der unternehmensspezifischen Prozesse (Best Practice) gelegt, da im Lauf des Projektes festgestellt wurde, dass dem Faktor „Mensch“ eine sehr große Bedeutung zugemessen werden muss. Im letzten Schritt wird die Potentialanalyse über den Fahrwerksbereich hinaus ausgedehnt, da festgestellt wurde, dass die entwickelte Methodik bei geringfügigen Adaptionen weiteren Funktionsgruppen genügt. Nachfolgend soll kurz auf die Besonderheiten und Unterscheidungskriterien von Prozessen eingegangen werden, um die Analysephase besser strukturieren zu können.

### 3.1 Analyse des Entwicklungsprozess

#### 3.1.1 Grundlagen der Prozessanalyse

Um bestehende Prozesse zu analysieren, sollten im ersten Schritt Unterscheidungskriterien und Systemgrenzen von Prozessen definiert werden. Nach [FD08] können Prozesse nach folgenden Kriterien unterschieden werden:

- Objekte
  - Material
  - Informationen
- Häufigkeit
  - wiederholend
  - einmalig
- Dimension

- Unternehmen
- Abteilung
- Person
- Auslösung
  - turnusmäßig
  - zufällig

Diese Unterscheidungskriterien helfen bei der Klassifizierung von Prozessen, so dass im zweiten Schritt eine einfachere Analyse erfolgen kann, da sich der Nutzen, respektive das Potential, besser bewerten lässt. Als Objekt wird im Entwicklungsprozess immer ein immaterieller Informationsaustausch vorausgesetzt, so dass dies kein Unterscheidungskriterium darstellt. Alle anderen Eigenschaften von Prozessen, die oftmals auch Workflows im Sinne der Nutzung von Tools darstellen, werden nachfolgend erläutert. Die Begriffe Prozess und Workflow werden im folgenden mit Einschränkung auf die folgende Betrachtung synonym verwendet.

#### **3.1.1.1 Häufigkeit**

Das Kriterium der Häufigkeit ist maßgeblich am Optimierungspotential innerhalb eines Prozesses beteiligt. Je häufiger ein Prozess genutzt wird, umso größer ist der zu erwartende Nutzen nach einer Optimierung, da so bei jedem Einsatz des Prozesses ein Nutzen stattfindet. Im Fahrzeugentwicklungsprozess bedeutet dies allgemein, dass häufig auftretende, ähnliche Fragestellungen herausgegriffen und analysiert werden sollten, um hier durch die Verwendungshäufigkeit einen Nutzen zu erzielen. Konkret sind dies in der Fahrwerksentwicklung z.B. immer wiederkehrende, standardisierte Fahrmanöver, funktionale Auslegungsfragen bezüglich der Fahrwerkskinematik oder Variantenuntersuchungen von verschiedenen Motorisierungsvarianten. Im Nutzfahrzeugumfeld findet sich eine Vielzahl von ähnlichen Auslegungsaufgaben im Fahrwerks- und Chassisbereich, die zum einen Fragestellungen bezüglich der Lenkung, zum anderen die große Varianz der Achskombinatorik und Aufbauszenarien betreffen. Eine auf dieses Kriterium bezogene Analyse erfolgt in Kapitel 3.1.4.

#### **3.1.1.2 Dimension**

Die Betrachtung der Ausweitung eines Prozesses innerhalb eines Unternehmens oder über Unternehmensgrenzen hinweg muss als einzelnes Kriterium mit Vorsicht betrachtet werden. Zum einen ergeben sich zwar Skaleneffekte bezüglich der im Prozess involvierten Personen oder Abteilungen, auf der anderen Seite können aber Prozesse, die zwischen

einzelnen Personen ablaufen, andere Prozesse, die sehr große Kreise ziehen, bremsen oder gar blockieren. Ein Beispiel hierfür aus dem Nutzfahrzeugbereich sind die Eigenschaften der Blattfedervarianten und deren Beeinflussung der Lenkung. So entsteht hier, wie an vielen anderen Stellen, eine Abhängigkeit unterschiedlicher Prozesse voneinander, die bei isolierter Betrachtung von geringer Dimension sind, global aber drastische prozedurale Abhängigkeiten erzeugen. Aus diesen Gründen sollten auch Prozesse beleuchtet werden, die von Einzelpersonen abgebildet werden und deren Priorisierung aufgrund der beschriebenen Konsequenzen geringer ist.

### 3.1.1.3 Auslösung

Die Auslösung eines Prozesses kann zum einen zufällig erfolgen, d.h. durch ein unvorhersehbares Ereignis, zum anderen durch geplante turnusmäßige Abläufe. Die zufällige Auslösung eines Prozesses, die oftmals innerhalb der Entwicklung vorkommt und meist bei unvorhersehbaren Effekten auftritt, ist schwerer planbar als die zuvor bestimmten turnusmäßigen Abläufe. Hinzu kommt eine große Variation der Fragestellungen bei zufälliger Auslösung, die eine Darstellung des Prozesses hier schwierig gestalten kann. Im Nutzfahrzeugbereich stellen turnusmäßig ausgelöste Prozesse eine große Gruppe dar, da durch die große Varianz im Chassisbereich diverse CAE-Prozesse pro Variante ablaufen müssen, um das Produkt funktional abzusichern. Ein Beispiel hierfür sind die Prozesse, die zur Fahrgestellanalyse bezüglich Wendigkeit durchgeführt werden und bei jeder neuen Radstands-, Rad-Reifen- oder Überhangsvariante notwendig sind. Unvorhergesehene, zufällig ausgelöste Simulationsprozesse, die im Chassisbereich auftreten, betreffen beispielsweise Untersuchungen von Schwingungsphänomenen, die so nicht vorhersehbar waren und deren Ursachen durch Simulation geklärt wurden.

### 3.1.2 Prozessmodellierung

Erst eine Modellierung sowie die Darstellung eines momentanen „Ist-Zustandes“ erlaubt eine Prozessoptimierung im Sinne einer Verbesserung, die die zeitlichen, qualitativen und finanziellen Aufwendungen betrifft. Im Nachfolgenden soll ein kurzer Überblick über die Modellierungsverfahren gegeben werden, der an dieser Stelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat. Die Darstellung von Entwicklungsprozessen in der Fahrwerkentwicklung von Nutzfahrzeugen wird im Folgenden genutzt, um Potentiale aufzudecken und daraus neue Methoden abzuleiten.

In der Praxis existieren diverse Methoden zur Modellierung von Prozessen, die zum einen auf unterschiedlichste Notationen zurückgreifen, sich aber auch in ihrer Darstellungsart unterscheiden. Neben der scriptbasierten Darstellung, die hier nicht näher erläutert werden soll, existiert eine grafische Methode, die im Diagrammstil Prozesse abbildet und sich für

die Potentialanalyse eignet. Die heute vorherrschenden Diagrammsprachen gliedern sich in kontrollfluss-, datenfluss- und objektorientierte Methoden. Für eine Übersicht über die verschiedenen Diagrammsprachen zur Modellierung von Prozessen und Workflows sei an dieser Stelle an [Pan08] verwiesen.

Zur Darstellung von Arbeitsabläufen und Geschäftsprozessen bietet sich die im Prinzip auf Petri-Netzen basierte „Ergebnisgesteuerte Prozesskette“ (EPK) an, da diese aus Ereignissen zusammengesetzt ist, welche Tätigkeiten oder Funktionen anstoßen. Die Prozessketten werden über logische Verbindungen (Konnektoren) verknüpft und enden jeweils mit einem Ereignis. Eine Erweiterung dieser Notation kann durch organisatorische Einheiten, Informationsobjekte, Anwendungssysteme, etc. erfolgen [Gad01]. Durch die Methode der Prozessmodellierung lassen sich Prozessschritte identifizieren, die zeitlich besonders kritisch sind und die Potential zur Optimierung bieten. Sie wird im Folgenden zur Modellierung der Workflows genutzt. Nachfolgende Abbildung erläutert die üblichen Notationen zur Modellierung von Prozessen nach dem erweiterten EPK-Prinzip:

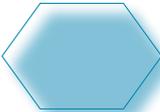
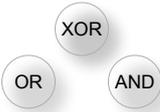
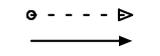
Symbolik	Bezeichnung	Beschreibung
	Ereignis	Eingetretener Zustand, von dem nachfolgende Prozesse abhängig sind
	Funktion	Veränderung eines Inputs zu einem Output
	Informations-objekt	Abbildung von realen Gegenständen
	Prozesswegweiser	Prozessverknüpfung zu einem weiteren Prozess
	Anwendungssystem	Anwendungsprogramm zur Prozessunterstützung
	Organisatorische Einheit	OE eines Unternehmens
	Operatoren „exklusives oder“ „oder“ „und“	Logische Operatoren zur Verknüpfung von Ereignissen und Funktionen
	Fluss	Flusssymbolik zur logischen Verknüpfung von Elementen

Abb. 3.1: Notationen des EPK nach [Gad01]

### 3.1.3 Beispielprozesse der Nutzfahrzeugentwicklung

Entwicklungsprozesse im Fahrwerksbereich unterliegen naturgemäß einer Vielzahl von Entwicklungsschleifen, die die unterschiedlichsten Disziplinen und Simulationsmethoden beinhalten. Neben dem geometrischen Konstruktionsprozess müssen diverse funktionale Fragestellungen auf Bauteil-, Baugruppen- und Gesamtfahrzeugebene beantwortet werden, deren Koordination und Abstimmung untereinander komplexe Prozesse nach sich ziehen. Im Nutzfahrzeug, das im Gegensatz zum PKW primär auf die Erfüllung der Transportaufgabe ausgelegt ist, werden Prozesse und deren Ziele mit unterschiedlicher Priorisierung gehandhabt. Bei schweren LKW wird hier beispielsweise ein größerer Fokus auf die Zuverlässigkeit und Verschleißigenschaften der Fahrwerkskinematik gelegt als auf die subjektiv empfundenen Fahreigenschaften des Gesamtfahrzeugs. Weitere Beispiele sind die Fahrwerksfederung und Schwingungsdämpfung, denen im Nutzfahrzeug primär die Eigenschaft als Aufbaufederung und Dämpfung zugeschrieben wird, im PKW aber immens zum Komfortempfinden beitragen. Im LKW haben sich heute neben der Fahrwerksfederung auch die Federung des Fahrerhauses und des Fahrersitzes durchgesetzt, so dass hier weiterer Abstimmungsaufwand betrieben werden muss. Diese Verschiebungen von Entwicklungsprioritäten gestalten sich besonders gravierend, wenn nicht mehr nur zwischen PKW und LKW unterschieden wird, sondern das Nutzfahrzeug weiter in europäische Fernverkehrsfahrzeuge und Fahrzeuge für den Weltmarkt unterteilt wird, da hier Komfortkriterien auf Kosten der Funktionalität und Robustheit noch stärker zurücktreten müssen. In diesen Fahrzeugklassen ist eine Blattfederung an gelenkten Achsen und Antriebsachsen üblich, so dass durch die große Varianz der Achslast ein Schwingungskomfort im unbeladenen Zustand schwer realisierbar ist. Durch die Kombinatorik von Achsen, Federungssystemen und Stabilisierungsoptionen ergeben sich aber im direkten Vergleich mit der PKW-Entwicklung Fragestellungen, die in großer Dimension und Häufigkeit auftreten.

Erweitert man die Sicht über den Fahrwerksbereich hinaus, so wäre ein weiteres Beispiel für hochkomplexe funktionale Auslegungsprozesse in der Fahrzeuglängsdynamik zu finden. Hier entstehen durch die große Varianz an Motoren, Wechselgetrieben und Achsantrieben in Kombination mit den Fahrzeugeinsatzzwecken Berechnungsprozesse, die zum einen Fahrleistungssimulationen, zum anderen detaillierte Verbrauchssimulationen beinhalten. Die Abbildung dieser bidirektionalen Prozesse, wie sie beispielsweise auch von [Amp02] beschrieben werden, erfolgt im nachfolgenden Kapitel exemplarisch anhand eines Prozessplans, der durch eine Mitarbeiterbefragung in Konstruktions- und Berechnungsabteilungen gewonnen wurde. Hierbei wurde im ersten Schritt der allgemeine Simulationsprozess und Workflow einer MKS-Analyse im Fahrwerksbereich analysiert und im darauffolgenden Schritt auf zwei Baugruppenprozesse, den Achs- und Lenkungs-einbau, erweitert. Diese enthalten wiederum Prozesswegweiser auf den zuvor erläuterten Simulationsworkflow.

Grundsätzlich ist der Ablauf jedes Entwicklungsschrittes bei funktionaler Überprüfung der Konstruktion mittels Mehrkörpersimulation ähnlich dem nachfolgenden Prozessmodell. Zentraler Aspekt der simulativen Untersuchung von Baugruppen oder Gesamtfahrzeugen mittels MKS-Simulation ist neben der Modellerstellung die Bedatung der Modelle, die sich in drei Teilbereiche gliedern lässt:

1. Die oftmals im Unternehmen oder bei Dienstleistern vorhandenen Simulationsmodelle, die im Regelfall allgemeingültig aufgebaut sind und aus Substrukturen kombiniert werden, müssen mit den im konstruktiven Entwurfsprozess erzeugten, **geometrischen Parametern** bedatet werden.
2. Zusätzlich fließen neben diesen geometrischen Daten weitere, **simulationsspezifische Parameter** in die Modellierung ein, die neben Steifigkeiten und Dämpfungen auch elektrische, pneumatische und hydraulische Parameter beinhalten können.
3. Die dritte Parameterklasse der MKS-Simulation beinhaltet die **Simulationsrandbedingungen**, die unter anderem das Fahrmanöver, die Straßenbeschaffenheit, die gefahrene Geschwindigkeit oder aber Prüfstandskräfte in das Modell integrieren.

Als besonders prozesskritisch sind die Schritte der Datenbereitstellung und Datenaufbereitung für die Simulation anzusehen, da alle drei Parameterklassen über ein logisches „UND“ verknüpft sind und folglich Verzögerungen einzelner Elemente Auswirkung auf alle anderen haben (vgl. Abbildung 3.3). Der Prozess der „Datenaufbereitung“, der hier nur als Prozesswegweiser (grün dargestellt) auf einen weiteren Prozess verweist, beinhaltet neben Koordinatentransformationen auch Prozesse zur Digitalisierung von herstellerspezifischen Kennlinien oder Tabellen sowie die Auswertung von Versuchsdaten, die oftmals nur in Papierform vorliegen. An dieser Stelle seien auch die im Datenbeschaffungsprozess genannten „persönlichen Kontakte“<sup>1</sup> erwähnt, die in der industriellen Praxis einen nicht unerheblichen Beitrag zum Prozess leisten, jedoch den Nachteil haben, dass sie nicht nachvollziehbar sind und nicht von jedermann genutzt werden können.

Zur seitenbasierten Darstellung der Prozessschritte erfolgt eine Auftrennung des Gesamtprozesses an den nummerierten Eingangs- und Ausgangsknoten  $X1$  bis  $X6$  als auch an sich wiederholenden Rücksprüngen  $1$ ,  $2$  und  $3$ , die wiederum als Eingänge fungieren.

---

<sup>1</sup>Gemeint ist hiermit der „kurze Dienstweg“

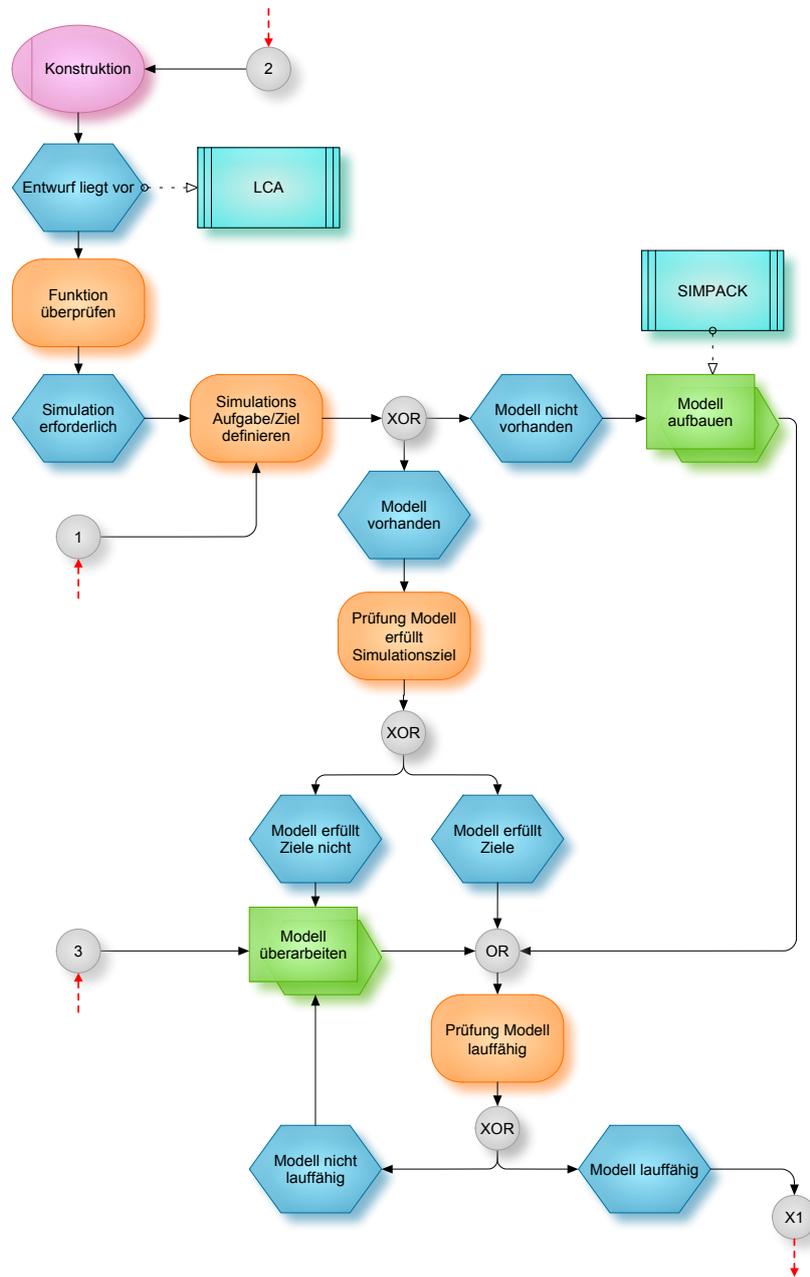


Abb. 3.2: Workflowschritte vom geometrischen Entwurf zur funktionalen Aussage (1)

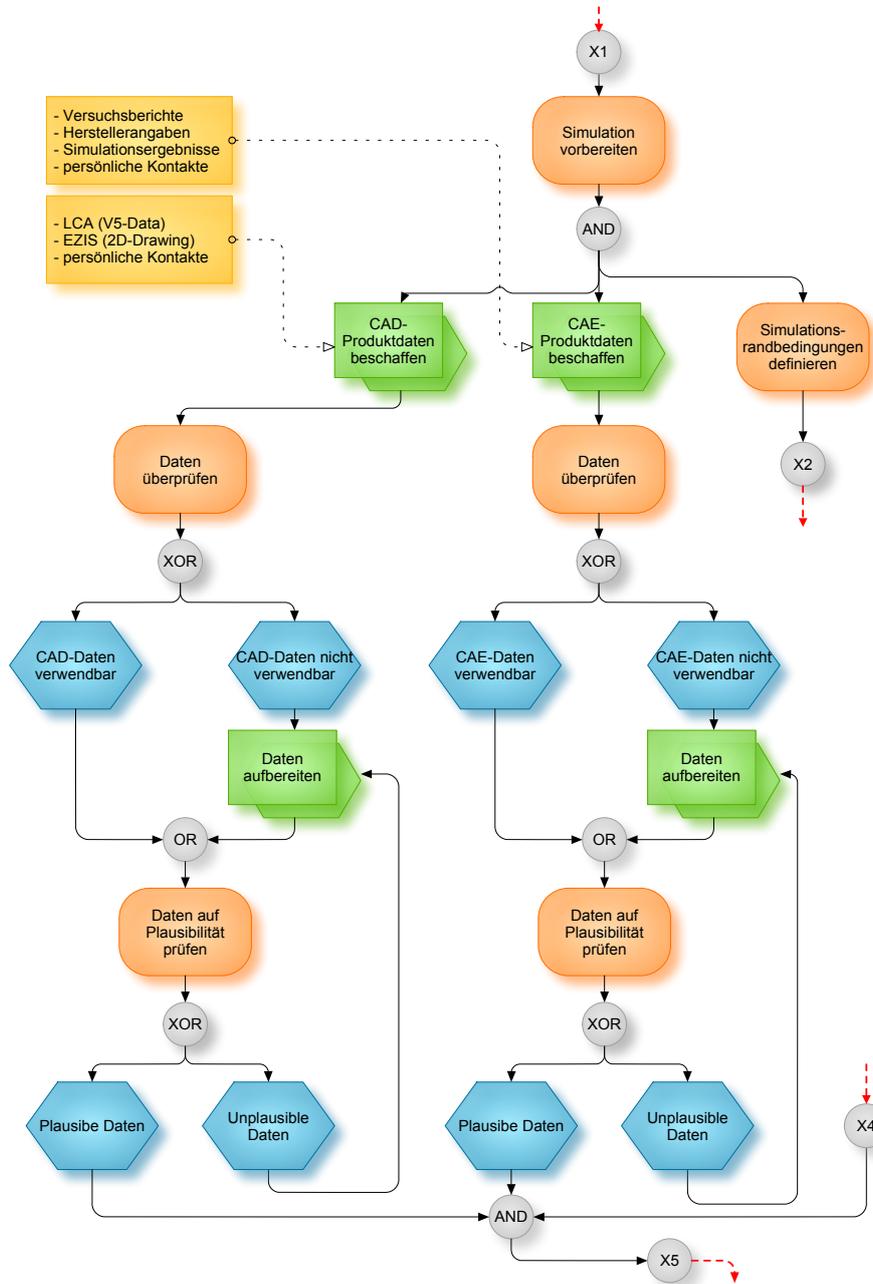


Abb. 3.3: Workflowschritte vom geometrischen Entwurf zur funktionalen Aussage (2)

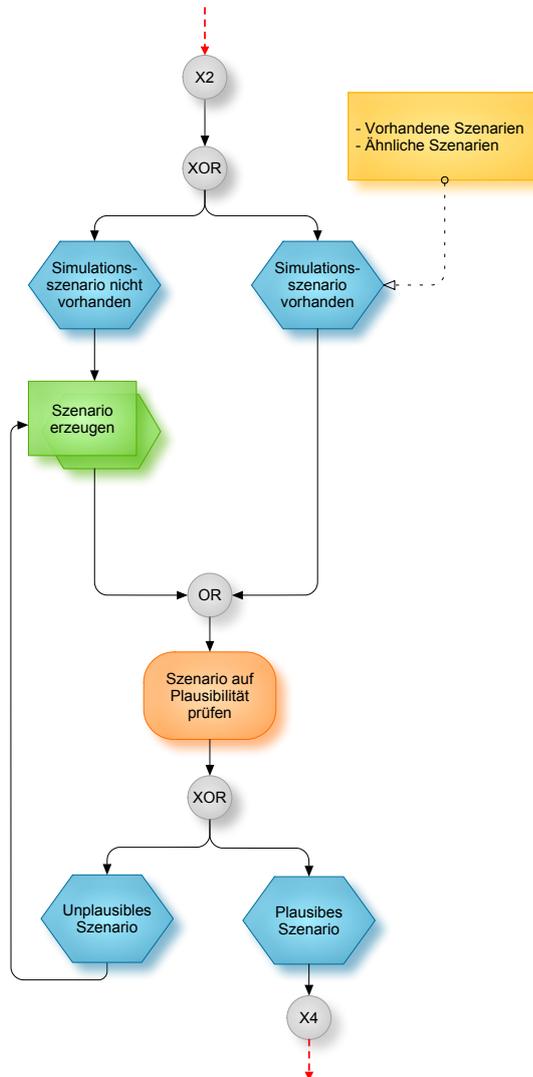


Abb. 3.4: Workflowschritte vom geometrischen Entwurf zur funktionalen Aussage (3)

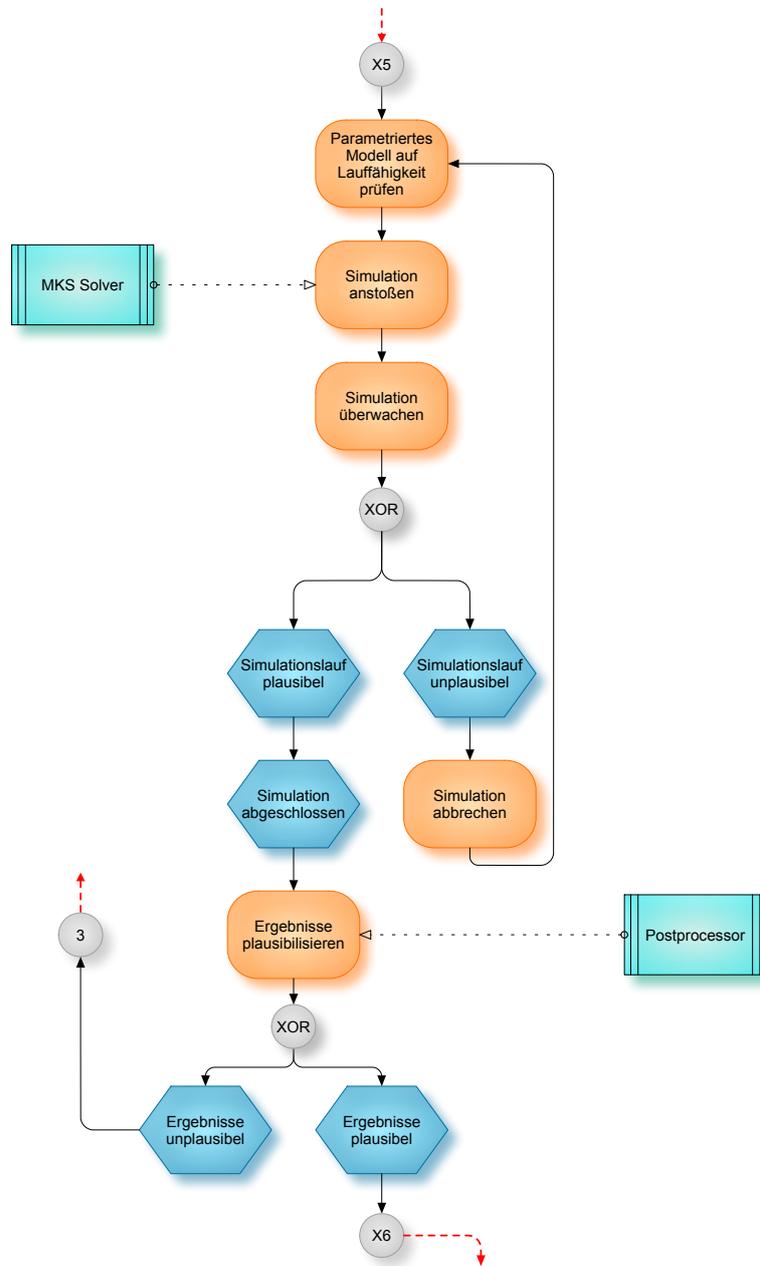


Abb. 3.5: Workflowschritte vom geometrischen Entwurf zur funktionalen Aussage (4)

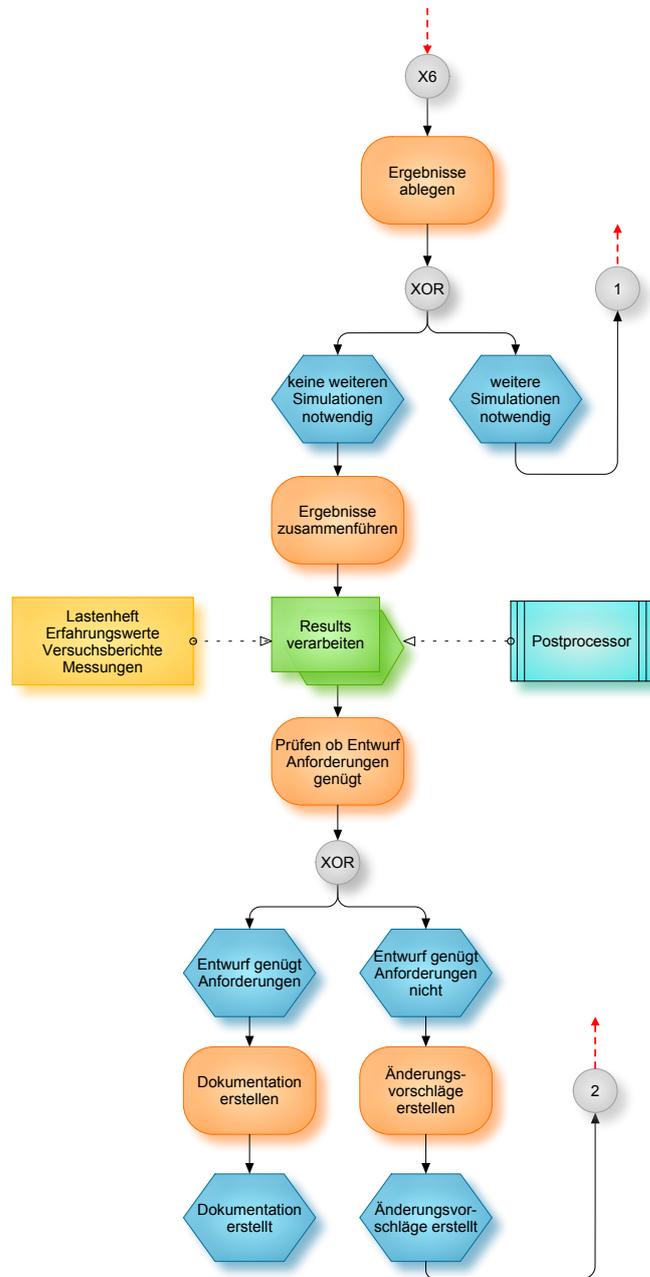


Abb. 3.6: Workflowschritte vom geometrischen Entwurf zur funktionalen Aussage (5)

### 3.1.3.1 Entwicklungsprozess des Achseinbaus

Nachfolgend wird beispielhaft der Entwicklungsprozess des Achseinbaus betrachtet, der für bestimmte Fahrzeugtypen häufig durchlaufen werden muss, da für die gezeigte Achse<sup>2</sup> fünf verschiedene Federpakete, drei verschiedene Dämpfungsvarianten und vier verschiedene Stabilisierungsvarianten vorliegen. Diese 60 Varianten eines möglichen Achseinbaus entstehen durch die verschiedensten kundenspezifischen Aufbauten, die neben unterschiedlichen Gesamtmassen verschieden hohe Schwerpunkte aufweisen.

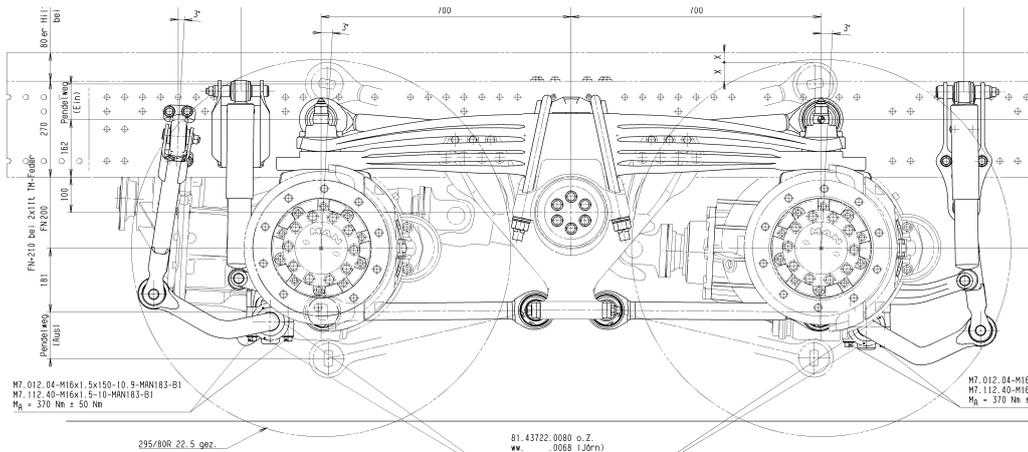


Abb. 3.7: Achseinbau Doppelachsaggregat MAN TGS Typ: 375

Im Folgenden ist der vereinfachte CAE-Prozess zur funktionalen Auslegung des Hinterachseinbaus dargestellt. Die Datenbereitstellung zur Analyse der Achskinematik beruht zum einen auf bereits vorhandenen Konstruktionsdaten, zum anderen auf simulationspezifischen Daten, die sowohl zur physikalischen Modellierung, als auch zur Definition der Simulationsaufgabe notwendig sind. Der Aufbau der MKS-Modelltopologie erfolgt in den meisten Fällen aus bereits vorhandenen Modellen oder Substrukturen, so dass neben einer evtl. notwendigen Modellanpassung eine Parametrierung erforderlich ist (vgl. hierzu Kapitel 3.3). Der Prozess zur Untersuchung aller Varianten gestaltet sich hier über die normalerweise üblichen Entwicklungsschleifen zwischen Konstruktions- und Simulationstätigkeiten schwierig, da aufgrund der Komplexität ein hoher koordinativer Aufwand entsteht, der sehr zeit- und kostenintensiv ist. Durch die große Ähnlichkeit der Entwicklungsaufgaben sowie die Häufigkeit, deren Auslösung relativ gut planbar ist, ergeben sich an dieser Stelle große Optimierungspotentiale. Ein Fokus muss hierbei auf die Prozessschritte mit sehr großen Rücksprüngen innerhalb des Gesamtprozesses

<sup>2</sup>Doppelachsaggregate werden gewöhnlich als ein Achsaggregat betrachtet

gelegt werden. So bietet die Optimierung der Dämpferauslegung, die im Regelfall zum Ende des Prozesses erfolgt, ein weitaus geringeres Potential als eine Optimierung des Stabilisator designs und dessen funktionaler Validierung. In den Fokus rücken all jene Prozessschritte, die weitere Prozessschleifen auslösen und in den Prozessmodellen als Prozesswegweiser (grün) dargestellt sind, da diese im Falle der Achskinematik weitreichende Untersuchungen nach sich ziehen, die unter anderem das Gesamtfahrzeug betreffen. Ein Beispiel hierzu wäre der zum Prozesswegweiser “Bestimmung der Einbauposition einer blattgederten, gelenkten Achse” gehörende Workflow, der eine Untersuchung der Lenkungs kinematik erfordert.

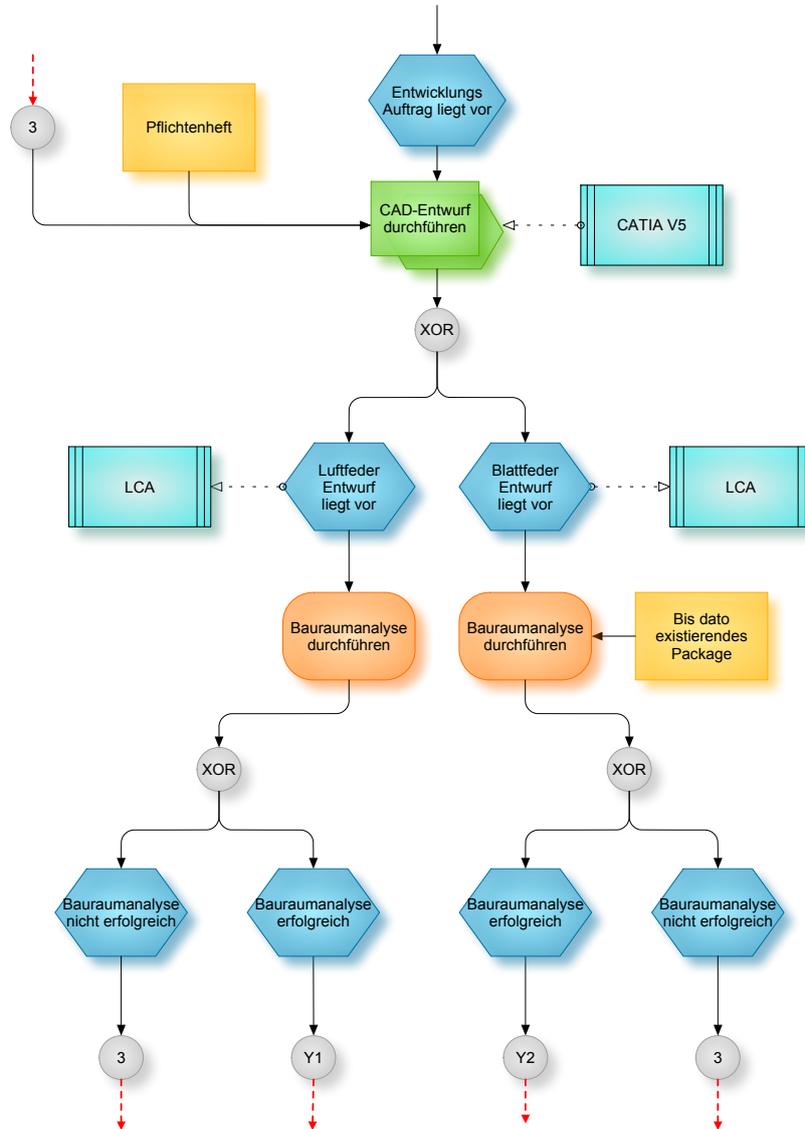


Abb. 3.8: Entwicklungsworkflow Achseinbau (1)

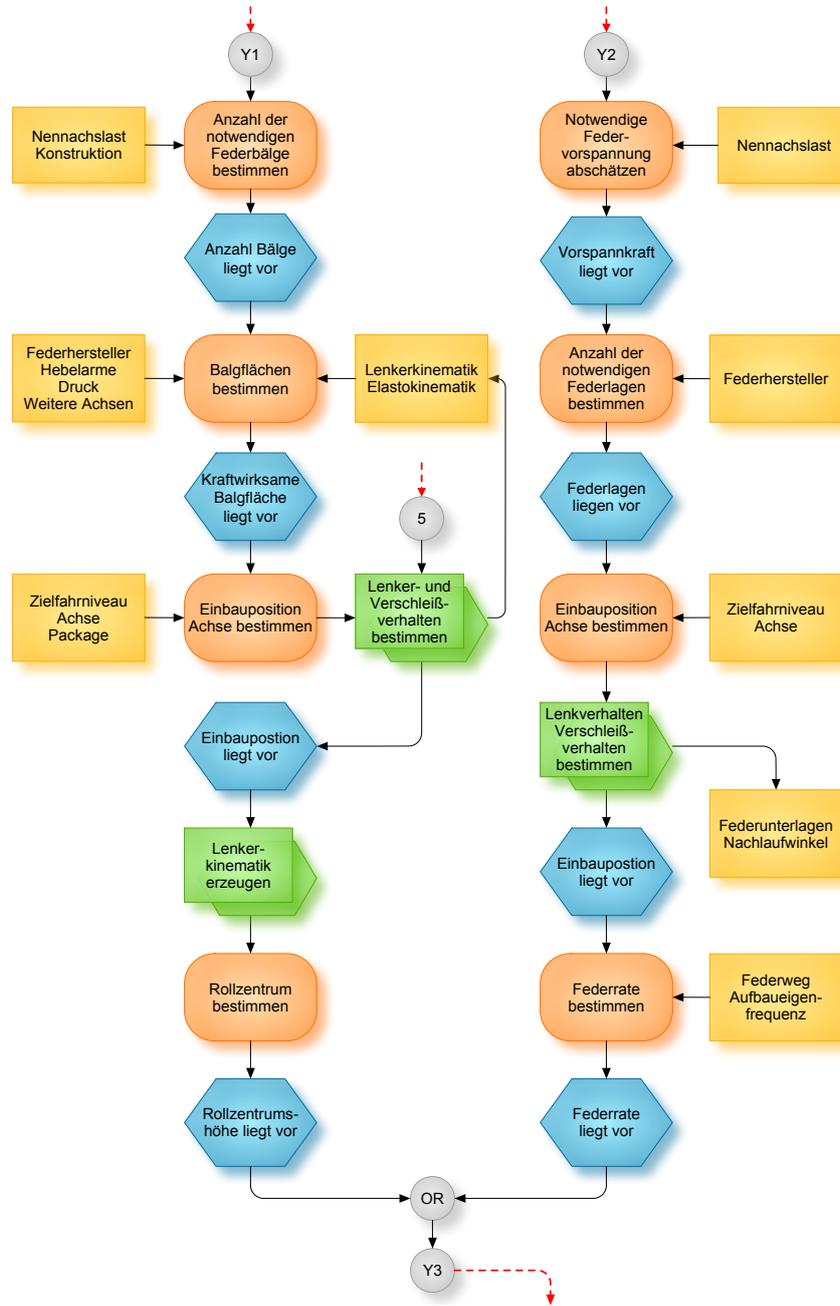


Abb. 3.9: Entwicklungsworkflow Achseinbau (2)

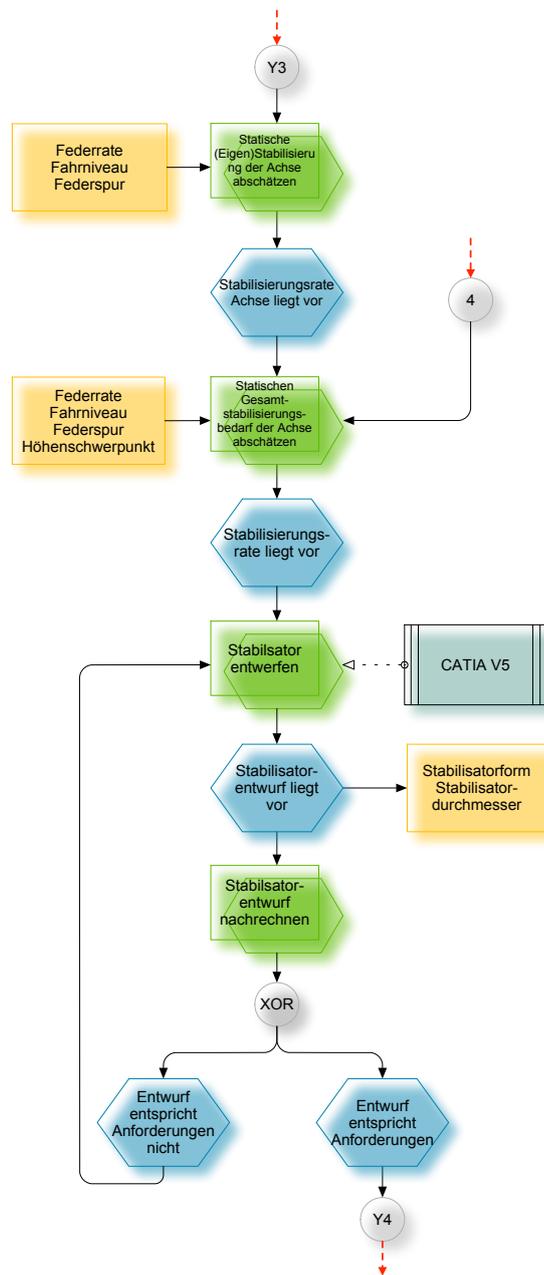


Abb. 3.10: Entwicklungsworkflow Achseinbau (3)

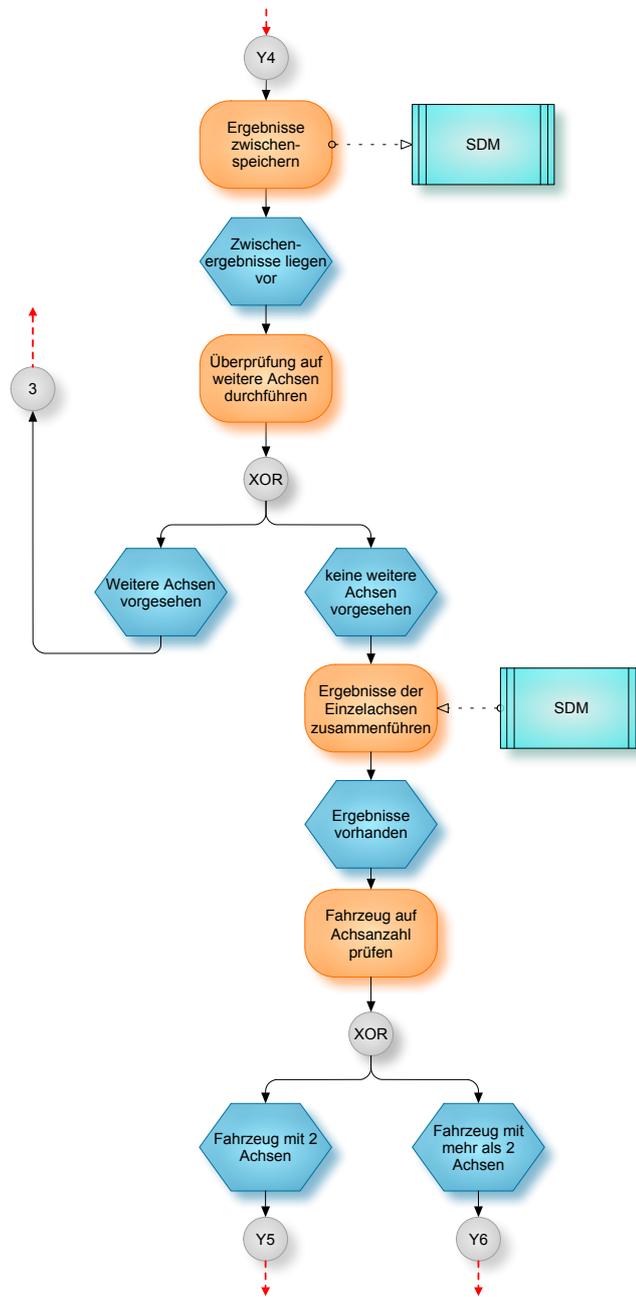


Abb. 3.11: Entwicklungsworkflow Achseinbau (4)

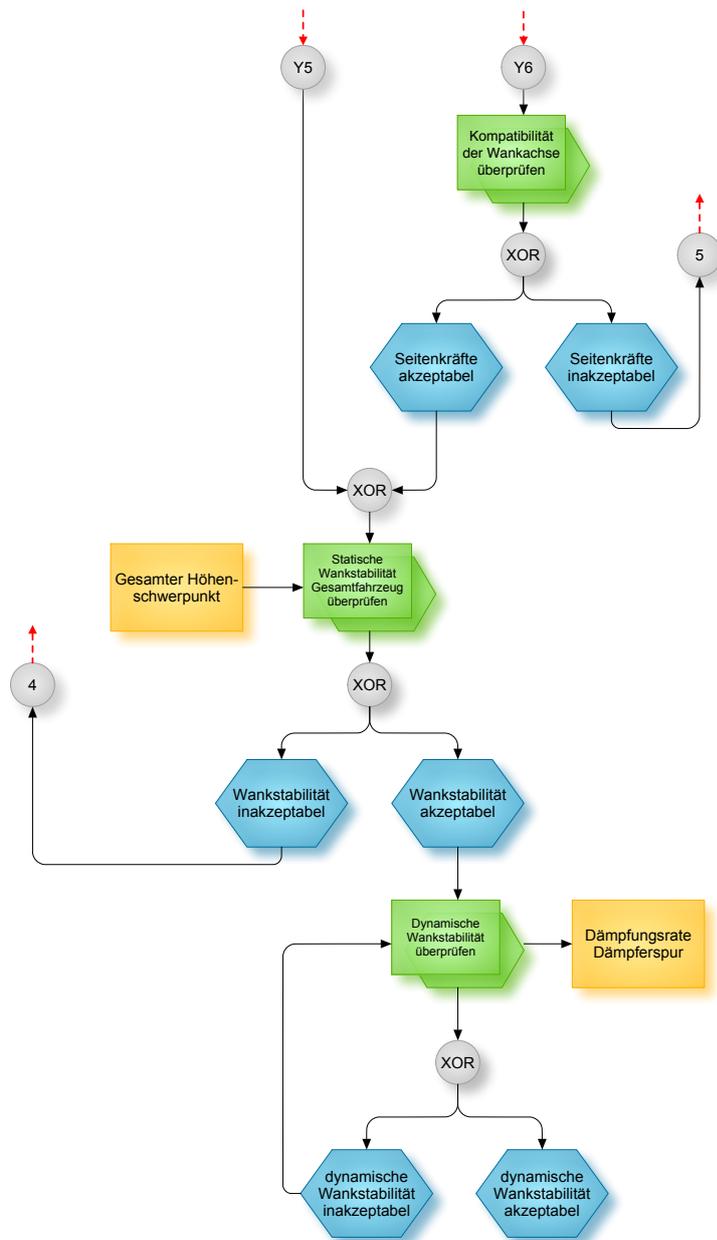


Abb. 3.12: Entwicklungswflow Achseinbau (5)

### 3.1.3.2 Lenkungsentwicklungsprozess

Neben dem Achseinbauprozess gestaltet sich der Lenkungseinbauprozess und dazugehörige Workflows im Nutzfahrzeug ebenfalls aufwändig, da neben den verschiedensten Einbausituationen, die durch die unterschiedlichen Vorderachskonzepte entstehen, die Radstandvarianten eine große Rolle spielen. So kommen neben zwei mechanisch gelenkten, hydraulisch unterstützen Vorderachsen noch gelenkte Vor- und Nachlaufachsen zum Einsatz, die wie im Falle der Vorlaufachsen rein hydraulisch über die primäre Lenkungshydraulik betätigt werden oder aber, wie bei Nachlaufachsen üblich, elektrohydraulisch gelenkt werden. Neben dem Lenkungseinbauprozess finden bereits im Konstruktionsprozess der Achsen deren mögliche Einbauposition beziehungsweise die Kombinatorik mit anderen Achsen Berücksichtigung, da das durch die Achskonstruktion vorgegebene Lenkrapaz in möglichst vielen Fahrzeugvarianten zum Einsatz kommen soll. Aus diesem Grund erfolgen hier Entwicklungsschleifen zwischen Konstruktion und Simulation, die Achskonstruktionen auf Lenkfehler im Gesamtfahrzeug analysieren und gegebenenfalls korrigieren. Im zweiten Schritt erfolgen daraufhin Entwicklungsschleifen zur Analyse der Lenkungseinbauten in Kombination mit der Achskinematik sowie den vorhandenen Antriebs- und Laufachsen. Die technische Umsetzung eines Kurbeltriebs für Vierachsfahrzeuge mit zwei mechanisch gelenkten Vorderachsen und hydraulischem Unterstützungszylinder kann nachfolgender Abbildung entnommen werden.

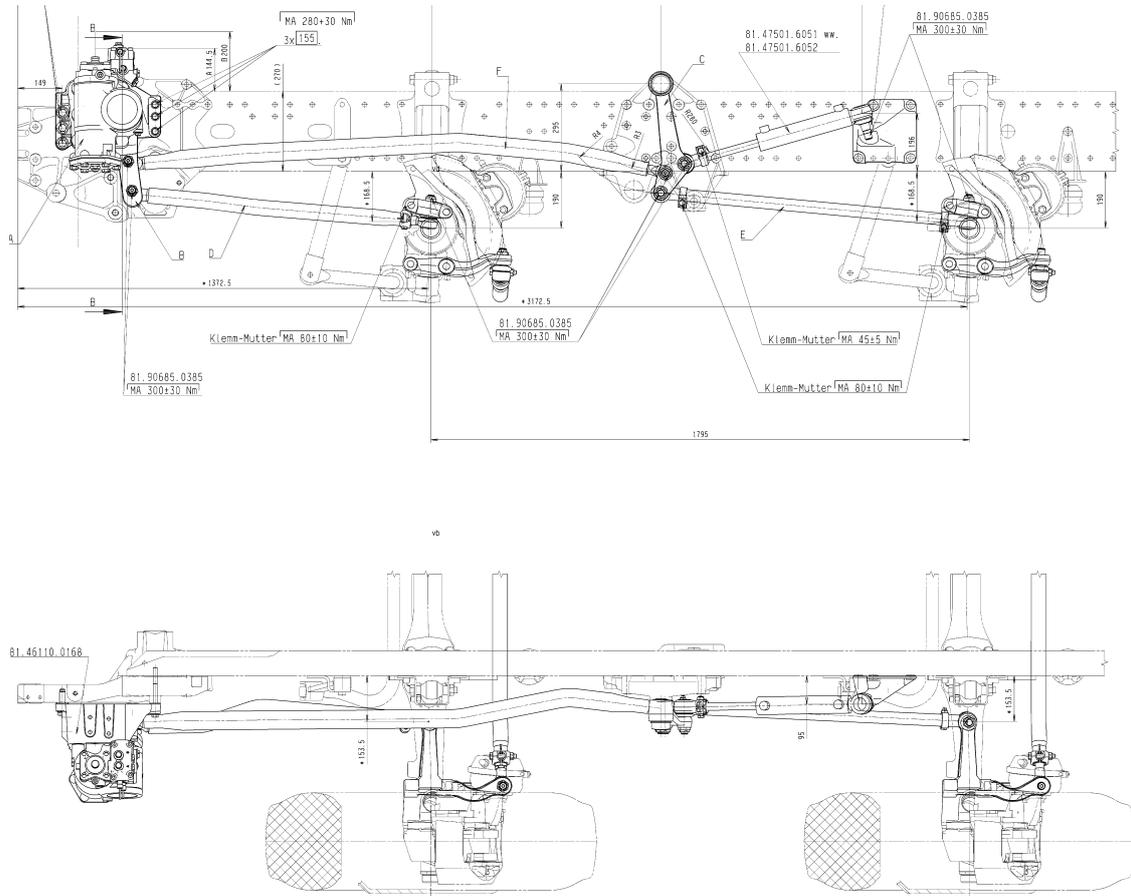


Abb. 3.13: Lenkungseinbau eines MAN TGX 8x4 Fahrzeugs

Nachfolgende Abbildungen verdeutlichen in Auszügen die Prozesse, die zur funktionalen Lenktrapez- und Lenkungsauslegung bei MAN durchlaufen werden. Dargestellt sind ebenfalls die Einflussfaktoren auf die entsprechenden Entwurfsprozessschritte (gelb). Obligatorisch ist die bei sicherheitsrelevanten Bauteilen übliche Betriebsfestigkeitsanalyse, die sowohl simulativ über FEM als auch in Prüfstandsversuchen und im Fahrversuch durchgeführt wird, hier aber nicht Teil der Betrachtung ist. Sehr wohl aber werden nach erfolgter funktionaler Analyse Input-Decks, die aus Simulationsergebnissen über MKS erzeugt werden, zur Betriebsfestigkeitsanalyse genutzt. Ein Beispiel hierfür wären die eingeleiteten Kräfte in Spur- und Lenkschubstangen bei langsamer Kreisfahrt, Lenken im Stand oder Lenken gegen ein Hindernis. Zentrale Auslegungsfragen ergeben sich zum einen bei der funktionalen Analyse des Lenktrapezes inklusive der Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug, zum anderen beim Entwurf des Kurbeltriebs, dessen zentrale Bedeutung

durch die vielen nachgelagerten parallelen Untersuchungen klar wird.

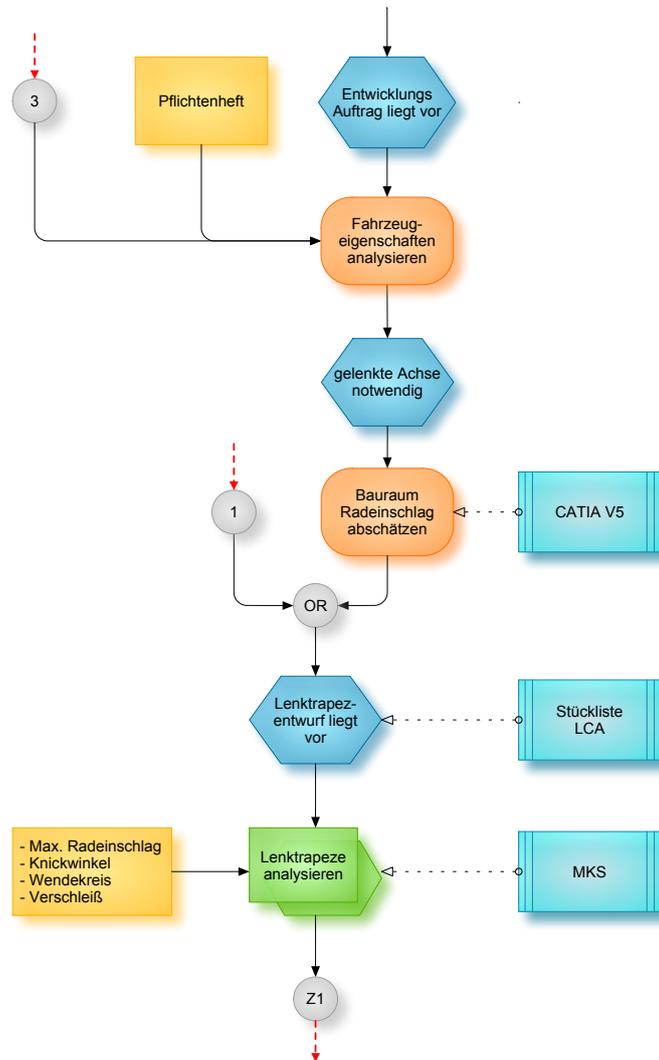


Abb. 3.14: Entwicklungsworkflow Lenkungsentwurf (1)

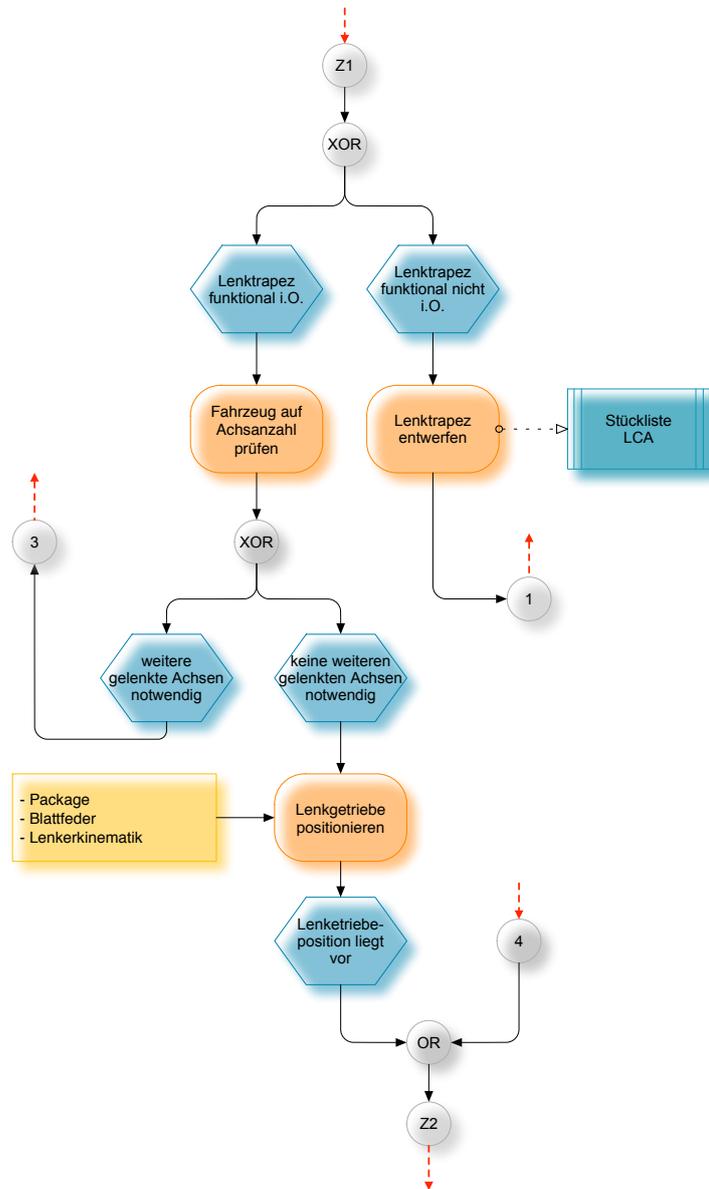


Abb. 3.15: Entwicklungsworkflow Lenkungsentwurf (2)

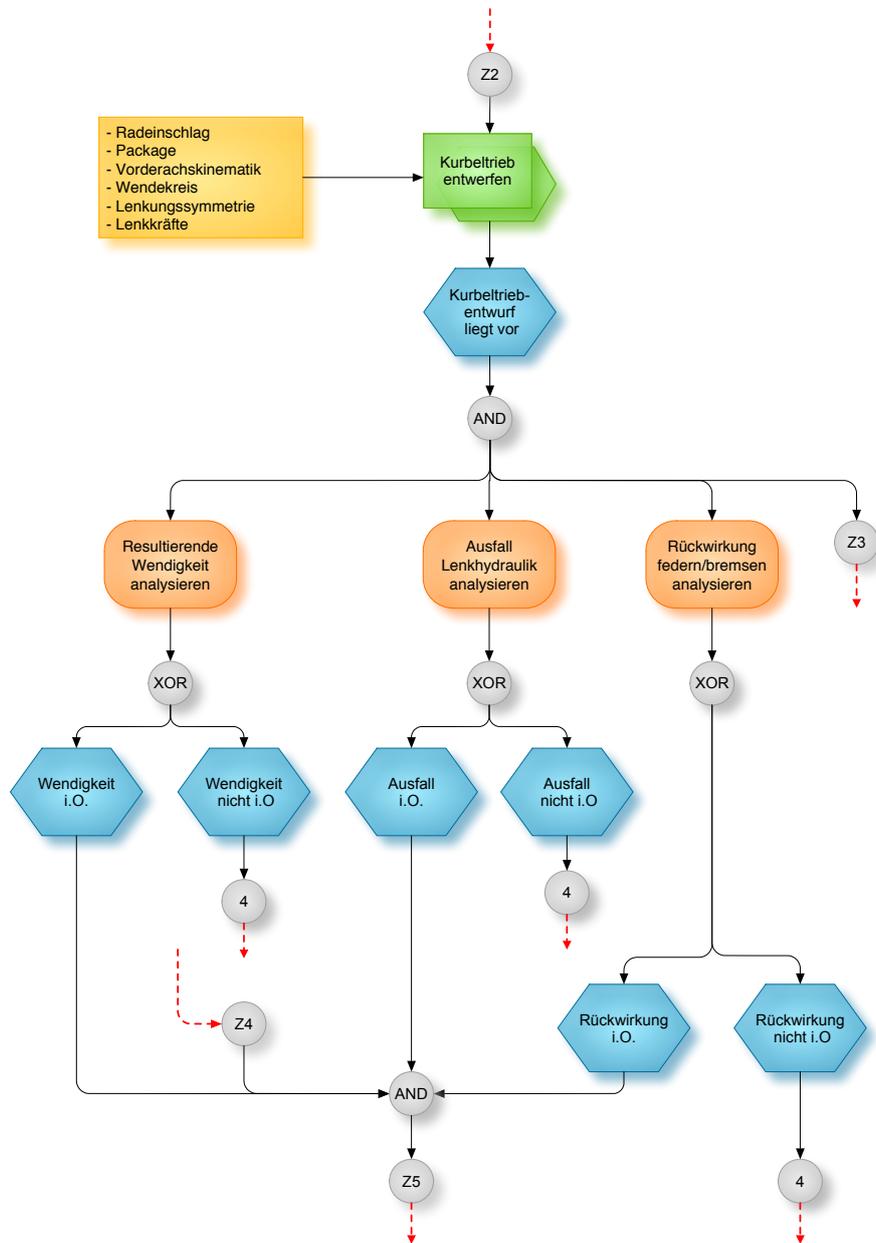


Abb. 3.16: Entwicklungsworkflow Lenkungsentwurf (3)

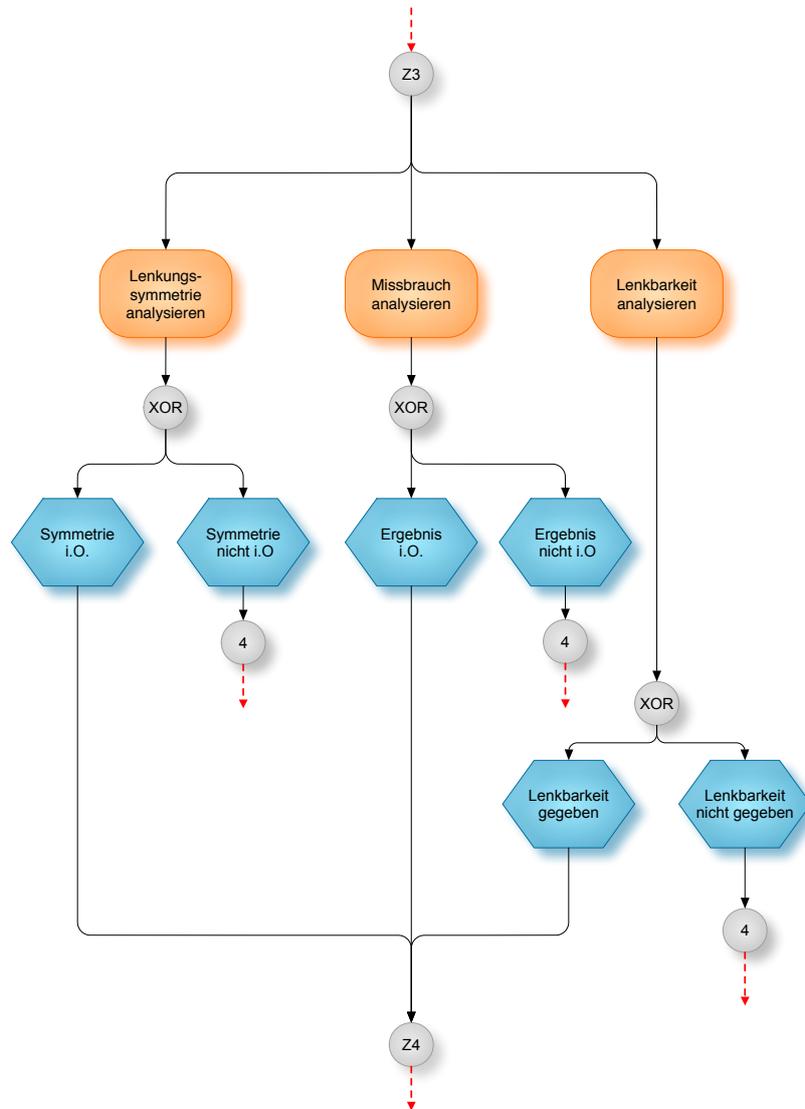


Abb. 3.17: Entwicklungsworkflow Lenkungsentwurf (4)

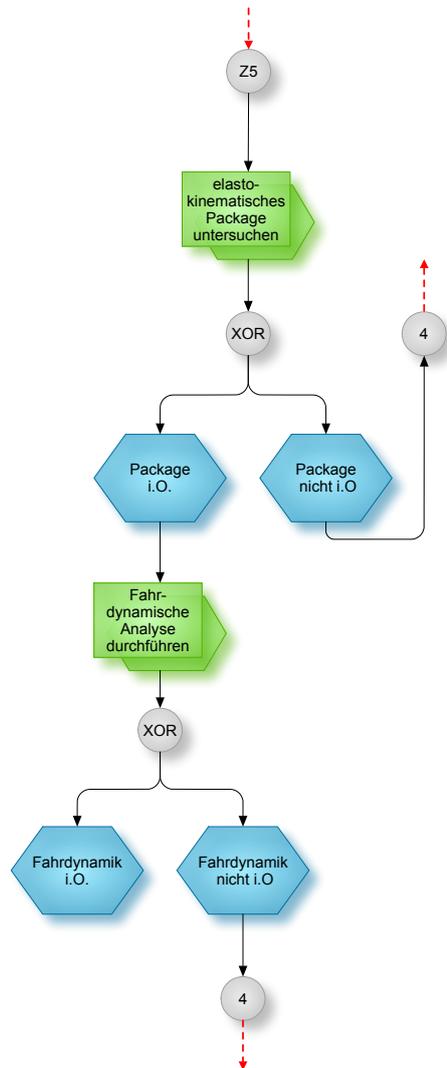


Abb. 3.18: Entwicklungsworkflow Lenkungsentwurf (5)

### 3.1.4 Periodizität im Nutzfahrzeug-Entwicklungsprozess

Durch die Randbedingungen des Marktes und die geforderten Varianten im Nutzfahrzeug ergeben sich diverse funktionale Auslegungsaufgaben im Entwicklungsprozess des Fahrwerkes. Alleine durch die verschiedenen Radstände sind pro Variante ein Wendekreisbild, pro Feder- und Stabilisatoreinbau eine Schwingungsdämpferabstimmung und eine Kippstabilitätsberechnung notwendig. Die in Abschnitt 3.1.3 erläuterten Abläufe zur funktionalen Fahrwerksauslegung werden im Laufe der Entwicklung pro Variante mindestens einmalig, meist mehrmals, durchlaufen, so dass an dieser Stelle Potentiale eines fest definierten Workflows genutzt werden können. Neben diesen im PEP auftretenden Fragestellungen sind im Nutzfahrzeug, anders als im PKW, kundenspezifische Änderungen möglich und auch üblich. Auf der einen Seite werden aufbauherstellerspezifische Untersuchungen angeboten, die z.B. Fragestellungen zu Beladungsgrenzkurven betreffen, auf der anderen Seite Berechnungen zur Wendigkeit des kundenspezifischen Fahrzeugs durchgeführt. Letztere entstehen besonders häufig im Chassisbus-Bereich, da hier vom OEM nur Fahrgestelle ohne Aufbau geliefert werden und die Fahrzeugabmaße erst beim Kunden festgelegt werden. Die Periodizität der Entwicklungsaufgaben und der augenscheinlich nachteilige hohe Aufwand zur Auslegung von Fahrwerkskomponenten eröffnet aber neben der Workflowoptimierung neue Optionen der Simulationstechnik, indem eine Entwicklung hochspezialisierter Berechnungswerkzeuge rentabel wird.

### 3.1.5 Fazit

Die Prozesse zur Entwicklung von Fahrwerkskomponenten gestalten sich sehr aufwendig und mit hoher Periodizität. Ähnlich einer PKW-Entwicklung entstehen eine Vielzahl von Entwicklungsschritten, die sich gegenseitig beeinflussen, da alle beteiligten Komponenten des Fahrwerks einer wechselseitigen Beeinflussung unterliegen. Anders als im PKW muss beim Nutzfahrzeug allerdings die Häufigkeit der Entwicklungsprozessschritte betrachtet werden, da hier eine Analyse nicht so zielgerichtet auf zwei Achsen mit beispielsweise drei Fahrwerksvarianten<sup>3</sup> pro Fahrzeugtyp erfolgen kann. Aus diesem Grund bietet die Optimierung von Fahrwerksentwicklungsprozessen große Potentiale, was die zeitlichen und finanziellen Aufwendungen betrifft, da hier die Varianz und Komplexität der Systeme sowie Abhängigkeiten besonders groß sind (vgl. hierzu Kapitel 1.3.1). Vor allem bei immer wiederkehrenden periodischen Abläufen bieten hier die Workflows Potential für eine Optimierung.

Besonderes Augenmerk muss hier auf Prozessschritte gelegt werden, die über ein logisches „UND“ vernüpft sind oder nach denen viele weitere parallele Nachfolgeprozesse erfolgen, da diese bei Verzögerung eines einzelnen Parallelprozesses den Gesamtprozess verzögern.

---

<sup>3</sup>Beispiel: BMW Modellreihe 5 <http://www.bmw.de>

Dies ist, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, im Datenbeschaffungs- und Aufbereitungsprozessschritt bei jeder MKS-Untersuchung der Fall, die z.B. im Entwicklungsprozess Achseinbau zur Analyse der Gesamtstabilisierung angestoßen werden muss.

## 3.2 Toleranzpotentiale

Während im PKW aufgrund der Sensibilität der verwendeten Einzelradaufhängungen auf Abweichungen Fahrwerkselemente mit Toleranzen von wenigen zehntel Millimetern gefordert und auch realisiert werden, erscheinen die Toleranzbänder im Nutzfahrzeug grob. Zusätzlich müssen aus Kostengründen Toleranzen erheblich gröber ausfallen (vgl. hierzu Kapitel 1.2) und aufgrund der Größe der Bauteile sowie den eingesetzten Fertigungsverfahren größere Abmaße gewählt werden. Ein Beispiel für ein Bauteil aus dem Fahrwerksbereich mit sehr großen Toleranzen sind Blattfedern, die durch Walzen hergestellt werden und im Regelfall bei Strecklage eine Längentoleranz des Führungsblattes von  $\pm 3\text{mm}$  besitzen, weitere Federblätter im Regelfall noch größere Toleranzen von  $\pm 10\text{mm}$ . Für die darstellbare linearisierte Federrate im Betriebspunkt bedeutet dies eine Toleranz von  $\pm 6\%$ . Aus der Toleranz der Federrate ergibt sich eine Bauhöhentoleranz von  $\pm 3\text{mm}$  in Strecklage, was im eingebauten Fahrzeug in Folge eine Fahrniveautoleranz ergibt. Eine weitere fahrwerksrelevante, funktionswirksame Toleranz ist die Torsionssteifigkeit von Stabilisatoren. Auch hier sind, aufgrund der Kosten, Bauteilabmaße und Fertigungsverfahren Toleranzen der Stabilisatorgeometrie von bis zu  $10\text{mm}$  notwendig, die zu einer Toleranz der Torsionssteifigkeit von  $\pm 6\%$  führen.

Für die funktionale Auslegung von Fahrwerkskomponenten bedeutet dies, dass ein gut aufgelöstes Berechnungsverfahren mit hoher Detaillierung und exakter Parametrierung trotzdem unexakte Ergebnisse liefern kann, da im realen System durch Toleranzen Eigenschaften verändert werden können. Die Schlussfolgerung aus diesem Mangel wäre eine Analyse des Systems in den ungünstigsten Varianten der Toleranzbereiche und einer Approximierung des Mittelwertes für weitere Simulationen. An dieser Stelle besteht auch die Option, unexaktere Berechnungs- und Simulationsverfahren zu nutzen, da die Ergebnisse aufgrund der Streuung der realen Bauteile noch immer genügend genau sind. Nachfolgend soll anhand eines Beispiels die Auswirkung der Toleranzbänder von Blattfedern und Stabilisatoren erläutert werden.

### 3.2.1 Toleranzbandberechnung Kippverhalten

Anhand eines praxisgerechten Beispiels der Kippstabilitätsberechnung soll im Folgenden die Auswirkung der Toleranz auf die funktionale Auslegung von Nutzfahrzeugfahrwerken erläutert werden. Das statische Kippverhalten des Nutzfahrzeugs ist, bedingt durch die hohen Aufbauschwerpunkte und Ladungsarten, ein wichtiges sicherheitsrelevantes

Auslegungskriterium, das über unternehmensinterne Richtlinien und den Gesetzgeber<sup>4</sup> geregelt ist. Aufgrund des hohen Wankpols (vgl. Abbildung 3.19, Wankzentrum-WZ) und dem folglich relativ kurzen Hebelarm zum Aufbauswerpunkt (im Gegensatz zum PKW) erfolgt eine im ersten Schritt rein statische Wankanalyse des Fahrzeugs. Anschauungsobjekt ist hier ein dreiachsiges Baustellenfahrzeug mit Blattfederung an Vorderachse und Doppelachse (MAN TGS-26S 6x4 BB).

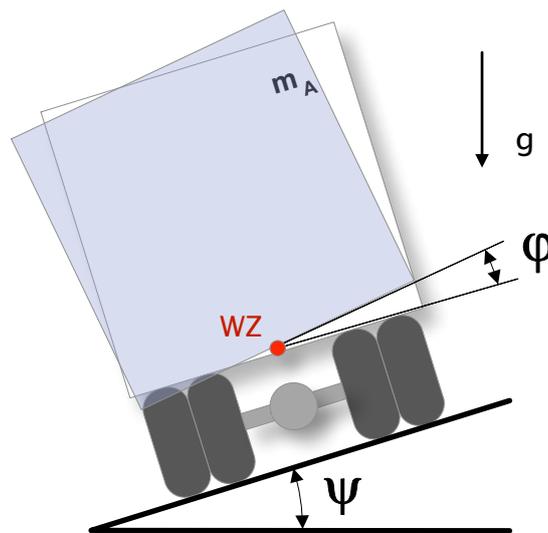


Abb. 3.19: LKW auf Kipptisch

Nachfolgende Tabelle enthält in Auszügen die simulationsrelevanten Parameter:

<sup>4</sup>Vgl. Hierzu ECE-R111 für Tanklastzüge

	Vorderachse	Doppelachse	Toleranz
Nennachslast	8t	26t	
Federsteifigkeit	$258 \frac{N}{mm}$	$2511 \frac{N}{mm}$	$\pm 6\% / \pm 7\%$
Stabilisatorsteifigkeit	$217 \frac{kNm}{rad}$	$664 \frac{kNm}{rad}$	$\pm 6\%$
Federspur	880mm	950mm	
Fahrniveau	267mm	200mm	
Höhe Wankzentrum (über Fahrbahn)	617mm	862mm	

Tab. 3.1: Fahrzeugparameter MAN TGS-26S BB

Basierend auf den Fahrzeugparametern erfolgt, wie im Nutzfahrzeugbereich üblich, eine Analyse des statischen Kippverhaltens auf einem virtuellen Prüfstand, dessen Modellierung anhand eines realen Kippprüfstandes verifiziert und über mehrere Fahrzeuge validiert wurde. Die Modellbildung erfolgt über ein Mehrkörpersimulationsmodell in SIMPACK, welches Bestandteil der in Kapitel 6.3 erläuterten und im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Software *SimuLAST* ist. Die Auswertung der Kipptischsimulation erfolgte bei einem Kipptischwinkel  $\psi$  von  $\psi = 30^\circ$ , bei dem alle Räder noch Kontakt zur Fahrbahn haben. Nachfolgende Tabellen stellen die Aufbauwankwinkel  $\varphi$  sowie die Kippwinkel für die unteren und oberen Toleranzen dar:

	Vorderachse	Doppelachse	Toleranzbereich
Achslast	7.6t	26.3t	
Federsteifigkeit	$243 \frac{N}{mm}$	$2335 \frac{N}{mm}$	$-6\% / -7\%$
Stabilisatorsteifigkeit	$204 \frac{kNm}{rad}$	$624 \frac{kNm}{rad}$	$-6\%$

#### Gesamtfahrzeugeigenschaften

Aufbauwankwinkel $\varphi$ bei Kipptischwinkel $\psi = 30^\circ$	4.0°
Kippen des Fahrzeugs bei Winkel $\psi$	34.7°

Tab. 3.2: Analyse der Fahrzeugvariante auf Kippstabilität (**untere Toleranzgrenze**)

	Vorderachse	Doppelachse	Toleranzbereich
Achslast	7.6t	26.3t	
Federsteifigkeit	$273 \frac{N}{mm}$	$2686 \frac{N}{mm}$	+6% / +7%
Stabilisatorsteifigkeit	$230 \frac{kNm}{rad}$	$703 \frac{kNm}{rad}$	+6%

### Gesamtfahrzeugeigenschaften

Aufbauwankwinkel $\varphi$ bei Kipptischwinkel $\psi = 30^\circ$	3.6°
Kippen des Fahrzeugs bei Winkel $\psi$	35.4°

Tab. 3.3: Analyse der Fahrzeugvariante auf Kippstabilität (**obere Toleranzgrenze**)

Erfolgt eine Untersuchung des Fahrzeugs an der oberen und unteren Toleranzgrenze wird deutlich, wie das Aufbauverhalten beeinflusst wird. Im Rahmen der zulässigen geometrischen Toleranz, die zu einer Steifigkeitsdifferenz von  $26 \frac{kNm}{rad}$  an der Vorderachse und  $79 \frac{kNm}{rad}$  an den Triebachsen führt, ergeben sich Aufbauwankwinkeldifferenzen von fast einem halben Grad bei einem Kipptischwinkel von  $\psi = 30^\circ$ . Das Fahrzeug an der unteren Toleranzgrenze kippt<sup>5</sup>  $0,7^\circ$  früher als das Fahrzeug an der oberen Toleranzgrenze. Im realen Fahrzeug treten diese extremen Toleranzen, bedingt durch die statistische Streuung, mit hoher Wahrscheinlichkeit nie in Kombination auf, so dass in der industriellen Praxis auf den Sollwert ausgelegt wird.

### 3.2.2 Fazit

Die Auswirkung der realen Bauteiltoleranzen auf die funktionale Auslegung des Fahrzeugs erschwert die Auslegungsaufgabe zwar, bietet aber auch die Option von idealisierten Berechnungen, da gröbere Berechnungsmodelle im Rahmen der Toleranzen genügend genaue Ergebnisse erzeugen. So ist es möglich mit einer idealisierten Berechnung unter quasistationären Bedingungen im Rahmen der Toleranzen Ergebnisse zu erzeugen, die nicht nur für Konzeptphasen nutzbar sind, sondern auch für die funktionale Absicherung des Fahrzeugs im späteren PEP. Zur Abbildung des realen Kippverhaltens unter stationären Bedingungen, das so von gewissen Kunden im Zivil- und Militärbereich gefordert wird, ist im obigen Beispiel keinerlei Modellierung des elastokinematischen Verhaltens von Chassisbauteilen notwendig, da im Rahmen der Bauteiltoleranzen die Kippwinkel mit einer höheren Toleranz angegeben werden müssen. Wohl aber müssen Nichtlinearitäten

<sup>5</sup>Als Kippen wird hier das Abheben des ersten Rades definiert

in den Federkennlinien Berücksichtigung finden, da diese einen signifikanten Einfluss auf das Fahrzeugverhalten haben (vgl. hierzu Anhang A).

### 3.3 Schnittstellenpotentiale

Der Zeitanteil, der im PEP für die Datenbereitstellung und Aufbereitung aufgewandt werden muss, steht heute in keiner Relation zum zeitlichen Aufwand der Prozesse Modellaufbau (Preprocessing), Simulation (Solverlauf) und Ergebnisverarbeitung (Postprocessing). Schätzungen<sup>6</sup> decken sich mit den Beobachtungen bei MAN, dass über 50% des Berechnungsaufwandes für die Datenbereitstellung genutzt wird (vgl. hierzu auch [MK06]). Dies resultiert zum einen in der Problematik, dass Konstruktionsdaten nicht ohne weiteres für CAE-Verfahren genutzt werden können, zum anderen in der Tatsache, dass im Laufe des PEP verschiedenste meist inkompatible Werkzeuge zum Einsatz kommen.

#### 3.3.1 Potentiale zwischen CAD und CAE

Die Sichtweise auf Produktdaten ist im hier betrachteten Fahrwerksbereich, in dem primär MKS zu Einsatz kommt, sehr differenziert im Vergleich zu FEM-Sichten, die sehr nahe am geometrischen Modell orientiert sind (vgl. Kapitel 2.5.3). Manuelle Datenaufbereitung wird hier folglich nie gänzlich wegfallen, lässt sich allerdings reduzieren, wenn bereits von Konstruktionsseite ein Datenpreprocessing stattfindet. Eine automatisierte Datenbereitstellung bietet dort Potential, wo unternehmensinterne Konstruktionsrichtlinien standardisieren, so dass eine Datentransformation in die CAE-Spezifika erfolgen kann. Ein Beispiel hierfür wäre das maschinelle Abgreifen von Kinematikpunkten der Fahrwerkslagerung und Lenkung aus dem PDM-System und eine Weiterverarbeitung in einem Simulationsdatenmanagement-System (SDMS). Die hierfür notwendigen Voraussetzungen sind Namenskonventionen und Konstruktionsrichtlinien von Kinematikpunkten sowie die Transformationsmatrizen von CAD- in MKS-Systeme. Manuell aufbereitet werden müssen nach wie vor simulationsspezifische Bauteileigenschaften, die teilweise von Herstellerseite bereitgestellt werden, oder aber über Prüfstandsversuche ermittelt werden. Häufigste Anwendung sind hier Dämpfungs-, Steifigkeits- und Reibungsparameter, die zumeist in den Zuständigkeitsbereich der Simulationsanwender fallen. Für die Nutzung dieser Potentiale ist ein konsistentes, handhabbares Simulationsdatenmanagementsystem notwendig, das Konstruktions-, Mess- und Simulationsdaten verknüpfen kann und den CAE-Prozess unterstützt.

In Entwicklungsabteilungen, in denen diverse CAE-Werkzeuge genutzt werden, existieren oft auch heute noch keine direkten Kopplungen zwischen der CAE- und der CAD-Welt.

---

<sup>6</sup>Untersuchung Anderl im Jahr 2002 [SW08]

Die Datenhaltung der CAE-Werkzeuge erfolgt nahezu ausschließlich auf Dateibasis ohne Zuhilfenahme einer kommerziellen Simulationsdatenmanagement-Lösung. Herausfordernd an der Einführung eines Managementsystems ist die Nutzung bestehender Strukturen der unternehmensspezifischen IT-Landschaft, die sich wie im behandelten Fall auch oftmals in einer strategischen Umgestaltungsphase befindet. So ist der modularisierte Aufbau des SDMS sowie die Schnittstellenkompatibilität zu gängigen Dateiaustauschformaten (vgl. Kapitel 2.5.2.1) vorzusehen, um mit bevorstehenden nachfolgenden unternehmensweiten Maßnahmen kompatibel zu bleiben.

### 3.3.2 Potentiale innerhalb der CAE

Die im Entwicklungsprozess genutzten Hilfsmittel, die von sehr einfachen Berechnungswerkzeugen bis zu hochkomplexen Simulationssystemen reichen können, entsprechen in ihrer Genauigkeit in der Regel den Anforderungen, die der Einsatzzweck zum Einsatzzeitpunkt erforderlich macht. In den sehr frühen Phasen einer Produktentwicklung, in denen der vorgegebene Parameterraum noch sehr vage ist, genügen meist einfache, schnell zu parametrierende Modelle, da eine höhere Modellauflösung aufgrund mangelnder Parameterversorgung sinnlos, zeitaufwändig oder riskant wäre. Diese in Konzeptphasen gewonnenen Erkenntnisse der Produkteigenschaften beruhen zu einem gewissen Anteil auf Annahmen über noch unbekannte Systeme, so dass die spätere Gültigkeit der erzielten Ergebnisse in Frage gestellt werden muss. Ein Beispiel aus der Nutzfahrzeugtechnik wäre ein in der Konzeptphase abgeschätzter Höhengschwerpunkt des Gesamtfahrzeugs mit Aufbau in einem Tabellenkalkulationsprogramm (vgl. Kapitel 2.1.1.2), dessen Wert im späteren Entwicklungsprozess weiter genutzt wird, obwohl vielleicht schon neuere Erkenntnisse vorliegen. Erkennbar ist hier die Problematik der Nachvollziehbarkeit von Daten, die in der kreativen Konzeptphase geschaffen wurden und später Berücksichtigung finden. Beobachtet wurde v.a. in der Konzeptphase der Fahrzeugentwicklung, dass mehr oder weniger komplexe Fragestellungen mittels Handrechnung oder Tabellenkalkulationsprogrammen beantwortet wurden, da besagter Parameterraum eine exaktere Betrachtung zu diesem Prozessschritt nicht rechtfertigt. Oftmals unterscheiden sich hier auch die gelebte Praxis von der theoretischen Betrachtungsweise der idealisierten Prozesse. Problematisch ist hier allerdings die Validität sowie eine Verifikation der verwandten Parameter, die zu späteren Prozessphasen entweder mühsam konvertiert oder aber neu abgeleitet werden müssen. Hierzu sei an die Aufbereitung von Konstruktions- und Funktionsparametern für die Simulationsprozesse in Abschnitt 3.1.3 verwiesen.

Einerseits ist der Zeitpunkt der Festlegung von Produkteigenschaften maßgeblich an der Beeinflussbarkeit der Kosten beteiligt, auf der anderen Seite kommen aber gerade in dieser Phase Werkzeuge zum Einsatz, deren Güte teilweise im Widerspruch zu den geforderten Aussagen steht und die nicht kompatibel zu den später genutzten Werkzeugen sind. Diese Kostenbeeinflussbarkeit in den frühen PEP-Phasen, die ein Treiber des Front Loading

und des Simultaneous Engineering (vgl. Kapitel 2.4) ist, nutzt im Idealfall komplexere CAE-Modelle, deren Datenversorgung zu diesem Zeitpunkt aber problematisch ist, so dass in der industriellen Praxis eine Nutzung von „Helferlein“<sup>7</sup> beobachtet wurde.

Optimal wäre eine prozessdurchgängige Gestaltung der frühen Entwicklungsphasen durch CAE-Werkzeuge, die sich für gewisse Standardfragestellungen einsetzen lassen und deren Parameter ohne zusätzliche Konvertierungsarbeit weitere Verwendung finden könnten. Notwendig hierfür wäre der methodische Übergang von der Parameterwelt der „Helferlein“ in die konventionelle CAE-Welt. Auf diese Weise können beim Übergang von Konzept- in Detaillierungsphase Schnittstellenverluste vermieden werden. Ein Ansatz wäre hier, den Detaillierungsgrad (LOD) der „Virtuellen Prototypen“ an den entsprechenden zeitlichen Aspekt der Entwicklungssituation anzupassen, oder, auf den Fahrwerksbereich bezogen, für einen nahtlosen Übergang der MKS-Fahrzeugmodelle untereinander sowie zu den vereinfachten Auslegungsberechnungen zu sorgen.

### 3.4 Wissensmanagement

Die im Nutzfahrzeug vorhandene Varianz von Fahrwerkselementen und Baugruppen sowie die gegenseitige Beeinflussung in jeder kombinatorischen Option stellt die Konstruktion vor komplexe Fragestellungen, die vor allem die Auswirkungen auf das Verhalten des Gesamtsystems betreffen. Der in Kapitel 2.6 erläuterte Aufbau von Nutzfahrzeugfahrwerken aus Achsbaugruppen, Achseinbauelementen und den Lenkungseinbauten erfordert die Absicherung jeder Variante, die erzeugt wird. Im Konstruktionsprozess muss beginnend bei einer Analyse der einzelnen Achsbaugruppe über alle Einbauvarianten hinweg und endend beim Gesamtfahrzeug jede Kombination untersucht werden. Problematisch hierbei ist, dass trotz abteilungsübergreifender Projektteams der Konstrukteur zwar seine funktionalen Ziele kennt, nicht aber alle Ziele, die das Gesamtfahrzeug betreffen. Ein Beispiel hierfür wäre die Auswirkung des Vorderfedereinbaus in Kombination mit der Lenkungskinetik, deren konstruktive Ausarbeitung normalerweise in zwei Fachabteilungen getrennt voneinander erfolgt, da heute häufig noch eine komponentenorientierte Unternehmensstruktur existiert. An dieser Stelle im Konstruktionsprozess ist ein Wissenstransfer über Abteilungen und Projektnachfolgen hinweg vorteilhaft, um gemeinsame Entwicklungsziele zu erfüllen, der sich unter anderem über eine funktionsorientierte Abteilungsstruktur realisieren lässt. Ein weiteres, weit komplexer handhabbares Beispiel ist der Wissenstransfer von Simulations- oder Fahrversuchsabteilung zurück in Konstruktionsabteilungen, bei dem z.B. fahrdynamische Zielgrößen bereitgestellt werden. Problematisch hierbei ist, dass der Konstrukteur zwar den Wert einer Zielgröße kennt, diesen aber aus Ermangelung eines z.B. Simulationsmodells nicht interpretieren kann. Das explizit

---

<sup>7</sup>Gemeint sind hier meist selbst entwickelte kleine Berechnungsprogramme, die z.B. auf MS-Excel basieren

vorhandene Wissen kann zwar an dieser Stelle kommuniziert werden, wird aber wertlos, da es nicht weiter genutzt werden kann. So ist die in Kapitel 2.4 erläuterte Methode des Projektmanagements und der abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit ein Mittel zur Rückmeldung von Informationen, beinhaltet in der industriellen Praxis aber auch Hürden, die zumeist aus menschlichem Verhalten resultieren. Die reine Bereitstellung von Wissen über Datenbanken oder Knowledge-Systeme, wie sie in Kapitel 2.1.2.2 erläutert sind, bieten zwar Potentiale, stellen aber keine Lösung für einen Mangel an Systemverständnis dar. Nachfolgende Abbildung erläutert den Wissensaufbau beim Anwender, der durch die im Pflichtenheft abgeleiteten interdisziplinären Zielgrößen (Auslegungskriterien) und die Kombination mit dem Wissen des CAE-Spezialisten entsteht, das in den parametrisierten Modellen und Simulationsmethoden enthalten ist.

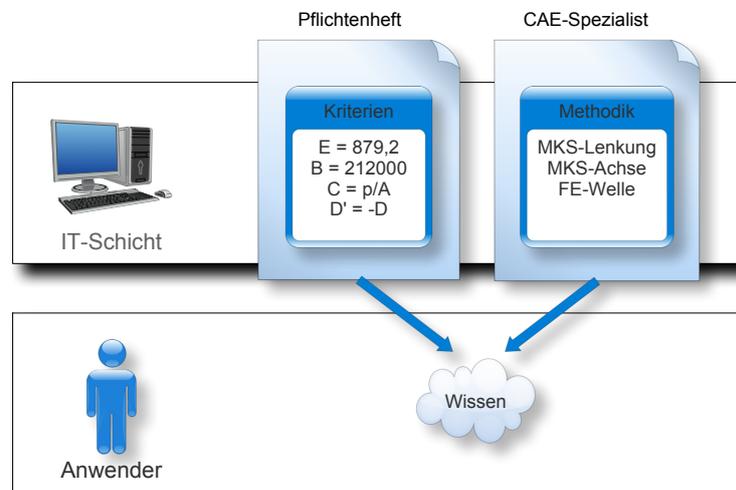


Abb. 3.20: Wissensmanagement durch Kombination von Kriterien und Methoden

### 3.4.1 Wissen sammeln

Der Prozess des Sammelns von Informationen und Wissen impliziert im technischen Bereich der Fahrwerksentwicklung auch immer ein gewisses Maß an Systemverständnis. So reicht die bloße Information über ein Auslegungskriterium allein nicht aus, da sie ohne die Methodik, die zum Erreichen oder der Interpretation des Kriteriums notwendig ist, für einen Anwender wertlos wird. Auslegungskriterien, die oft in den Zuständigkeitsbereich von Versuchs- und Simulationsabteilungen fallen, werden im Folgenden in subjektive und objektive Kriterien gegliedert. Letztere sind mit relativ geringem Aufwand erfassbar, da sie sich meist in Kennzahlen fassen lassen oder über Kennzahlen vom Gesetzgeber

vorgeschrieben werden. Beispiele hierfür sind die Wendigkeit oder die Kippstabilität eines Kraftfahrzeugs, die innerhalb fester numerischer Kenngrößen liegen müssen. Subjektive, schwer quantifizierbare Bewertungsgrößen, wie sie oft im Fahrversuch existieren, spiegeln die menschlichen Empfindungen wider und lassen sich nur über Umwege wie statistische Erhebungen oder große Versuchsreihen erfassen. An dieser Stelle sei an die Dissertationen [MT08, Pre08] verwiesen, die modellbasierte Ansätze zur Objektivierung von Subjektiveindrücken nutzen.

Durch erfahrene Testfahrer lassen sich über eine genügend große Anzahl von Versuchsfahrten Auslegungskriterien identifizieren. Ein Beispiel hierfür ist eine MAN-interne Erhebung<sup>8</sup> von Stabilisierungskriterien bezüglich des Komfortempfindens im Jahr 2006. Auf diese Art und Weise wird aus personellem impersonelles Wissen und folglich aus untransferierbarem transferierbares Wissen. Der Übergang von zumeist personell vorhandenem Wissen gestaltet sich in der Praxis allerdings schwierig, da hier sehr viel redaktionelle Recherche notwendig ist und eine ständige Pflege des Wissens erfolgen muss. Gelingt es allerdings, sukzessive Information über Auslegungskriterien zu erfassen und Methoden zur Nutzung bereitzustellen, könnte hier von echtem Wissenstransfer gesprochen werden.

Die Wissenssammlung und Aufbereitung stellt große Potentiale im bisherigen Entwicklungsprozess dar, da sich auf diese Art und Weise neben den eingesparten Entwicklungsschleifen ein sehr frühes Systemverständnis einstellen würde. In den ersten Schritten dieses Wissensmanagements ist es sinnvoll, für Anwender nur Kriterien nutzbar zu machen, die auch methodisch beherrscht werden können, da sich so die Informationsflut in Grenzen hält. Eine Sammlung aller übrigen verfügbaren Kriterien ermöglicht eine weitere Potentialanalyse für zukünftige Methodenentwicklungen.

### 3.4.2 Wissen verbreiten

Die Verteilung von gesammelten Informationen und Wissen sollte nicht über reine Datenbanksysteme erfolgen, da, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, das reine Ablegen der Information im Sinne von Anleitungen oder Richtlinien nicht zielführend ist. Auch der Aufbau mehrerer Datenbanken zur Sammlung von Versuchsberichten und Richtlinien sowie deren Veröffentlichung im Firmennetzwerk in den vergangenen Jahren konnte aus eigenen Beobachtungen als nicht zielführend erachtet werden. Dies scheint zum einen an dem großen Pflegeaufwand zu scheitern, der im Tagesgeschäft nicht zu realisieren ist, zum anderen an der Wiederverwendbarkeit der Informationen, die zumeist in Textform abgelegt sind. Die Verbreitung von Wissen impliziert neben der Bereitstellung von Informationen die Auslegungskriterien betreffenden Methoden zur Nutzung. Konkret kann dies eine virtuelle Methode sein, die der Anwender selbst nutzen kann oder aber

---

<sup>8</sup>MAN interne Analyse (nicht veröffentlicht)

der Hinweis auf die bisher eingesetzten Methoden und involvierten Personen. Eine Untersuchung bei MAN ergab, dass oftmals innerhalb von Entwicklungsprozessen, zu denen hier auch Fehlerbeseitigungsaktivitäten gezählt werden können, Entwicklern unklar war, welche Methoden von wem im Unternehmen genutzt werden, so dass hier schon die Kenntnis über die Entwicklungsoptionen zu einer Verbesserung beitragen würden. Dabei spielte es zumeist keine Rolle, ob es sich bei der genutzten Methode um Versuche oder Simulationen handelt, auffällig war allerdings, dass Simulationsmethoden oftmals einen geringeren Bekanntheitsgrad hatten. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Dissertation ein Fokus auf die virtuellen Methoden gelegt, da hier ein großes Potential gesehen wird.

Eine weitere Form der Verbreitung von Wissen, die über die Verbreitung von Kenngrößen hinaus geht, ist die Veröffentlichung von implizitem, personell gebundenem Mitarbeiterwissen, das sich unter anderem in personengebundenen Entwicklungswerkzeugen finden lässt. Bei vielen Entwicklungsingenieuren konnten diverse kleine Entwicklungswerkzeuge identifiziert werden, die oftmals auf Tabellenkalkulationsprogrammen basieren und für spezifische Fragestellungen Lösungen erzeugen. Diese Tools, die mit dem spezifischen Wissen einzelner Mitarbeiter entwickelt wurden und die neben Produktparametern auch durch Erfahrungswerte gewonnene Kenngrößen beinhalten, bieten großes Potential zur Optimierung eines Entwicklungsprozesses. Zur Nutzung dieser Potentiale muss lediglich eine standardisierte Verteilung im Unternehmen erfolgen, so dass dieses Wissen an weiteren Stellen genutzt werden kann. Obligatorisch ist hierbei, dass diese Entwicklungswerkzeuge überarbeitet werden und an einen Standard angepasst werden, um sie auf breiterer Basis zur Nutzung freizugeben. Überdies sollte bei der Überarbeitung eine Kopplung an valide, zentralisierte Datenbasen angestrebt werden, um standardisierte Ergebnisse zu erzeugen und die weitere Verwendbarkeit von Parametern und Ergebnissen zu gewährleisten.

### 3.5 Potentiale durch Komplexitätsmanagement

Durch die Anforderungen des Marktes ergeben sich, wie in Kapitel 1.3.1 erläutert, eine hohe Variantenanzahl und daraus folgende komplexe Entwicklungs- und Produktionsabläufe im Nutzfahrzeugbereich. Oberstes Ziel einer Produktentwicklung ist die Erfüllung der durch den Markt geforderten Funktionen eines Fahrzeugs durch technische Lösungen. Diese werden durch die Kombinatorik aus Baugruppen und Bauteilen erzielt, wie sie in Kapitel 2.6 erläutert sind. Wichtig hierbei ist die Komplexitätsbeherrschung der geforderten Varianten, respektive ein sicherer Umgang bei der Auslegung im PEP. Hierzu ist es erforderlich, die Varianz virtuell abbildbar zu gestalten, um so neben der Beherrschung der Komplexität auch eine Vermeidung oder Reduktion zu erzielen.

Idealerweise lassen sich mehrere Varianten über gleiche oder ähnliche Komponenten in anderer Kombination realisieren um so Bauteile und Baugruppen zu vermeiden oder Varianten einzusparen, die durch eine funktionale Sichtweise keine technische Relevanz

besitzen. Um diese Potentiale zu nutzen müsste eine Methode entwickelt werden, alle im aktuellen Produktportfolio existierenden Varianten auf funktionaler Ebene zu untersuchen, um sie in zukünftigen Produktentwicklungsprozessen, die zumeist auf Änderungskonstruktionen basieren, kondensieren zu können. Die Abbildung aller am Fahrwerk funktional beteiligten Bauteile erfordert zum einen die Datenbereitstellung, zum anderen Simulationsmethoden, die diese Fülle an Bauteil- und Baugruppenkombinationen beherrschen können. Erst nach erfolgreicher Abbildung kann eine Bewertung erfolgen und schließlich eine Entscheidung herbeigeführt werden. Im Rahmen dieser Dissertation soll ein Fokus auf die Analysephase gelegt werden, da diese Voraussetzung für alle weiteren Phasen ist und den größten Zeitanteil des gesamten Prozesses (vgl. Abbildung 3.21) in Anspruch nimmt. Die funktionale Bewertung wird in Kapitel 6 erläutert.

### Komplexitätsmanagement

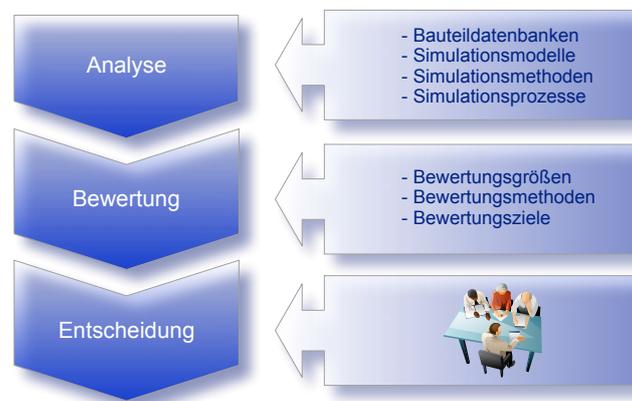


Abb. 3.21: Phasen des Komplexitätsmanagements

Die Beherrschung der Prozesskomplexität (vgl. Kapitel 1.3.1) stellt ein weiteres Potential dar, da innerhalb der Organisationskomplexität durch neue methodische Ansätze eine Reduktion der Anzahl der Entwicklungspartner, der involvierten Mitarbeiter sowie der Arbeitsteiligkeit erfolgen kann. Überdies können weitere Potentiale durch die Kompatibilität der Entwicklungsmethoden durch die in Kapitel 3.3 beschriebenen Verbesserungen zwischen CAD- und CAE-Kommunikation und innerhalb der CAE-Methoden eröffnet werden. Die Kommunikationskomplexität als letztes Schlüsselement im Prozess kann schließlich durch genannte Optionen sowohl in ihrer Varietät als auch in ihrer Konnektivität reduziert werden.

## 4 Optimierungsansätze in der Fahrwerksentwicklung

Die in den vorangegangenen Kapiteln erörterten Herausforderungen der Fahrwerksentwicklung von Nutzfahrzeugen, die bestimmt sind durch die Komplexität und Varianz der Produkte sowie die dadurch entstehende Komplexität der Entwicklungsprozesse, bieten, wie in Kapitel 3 erläutert, Potentiale zur Verbesserung an. Unter diesen Optimierungspotentialen, die sowohl den Menschen, den Prozess, das Produkt als auch die Entwicklungsmethoden betreffen, gilt es unter gegebenen Randbedingungen und für die aktuelle Situation im Unternehmen jene Potentiale zu identifizieren, die zu einem bestmöglichen Fahrwerksentwicklungsprozess führen. Dieses soll im Folgenden als das Optimum betrachtet werden, das jedoch nur temporäre Gültigkeit aufweist und sowohl in den Methoden als auch im Prozess einem kontinuierlichem Fluss unterliegt. Als Optimum wird dabei der zum jetzigen Zeitpunkt beste Kompromiss aus Zeit, Kosten, Akzeptanz und Realisierbarkeit betrachtet. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die interdisziplinären Bereiche der Optimierung:



Abb. 4.1: Kriterien für die Optimierung im Entwicklungsprozess

## 4.1 Workflow- und Methodenoptimierung

Der Entwicklungsprozess von Nutzfahrzeugfahrwerken scheint über die in Kapitel 3.1.3 erläuterten heutigen Entwicklungsmethoden des Frontloading, Simultaneous Engineering und aller CAD- und CAE-Methoden bereits eine stetige Verbesserung erfahren zu haben, ist beim NFZ jedoch im direkten Vergleich zum PKW, nicht nur aufgrund anderer betrieblicher Voraussetzungen und Produktmargen, nicht so weit implementiert. Gründe hierfür sind in der erläuterten großen Komplexität und Varianz zu suchen, die die Realisierung herkömmlicher Methoden schwierig gestaltet. Beispielhaft könnte hier die Fahrwerksaus-

legung einer PKW-Reihe mit maximal 5 Varianten mit der Fahrwerksauslegung eines einzelnen LKW-Typs<sup>1</sup> mit über 1000 Varianten genannt werden. Obligatorisch ist hierbei, dass die Auslegungskriterien im PKW deutlich andere Maßstäbe setzen als im Nutzfahrzeug und folglich die Auslegung einer einzelnen Variante im Fahrwerk deutlich komplexer und zeitlich aufwändiger ist als im Nutzfahrzeug. Trotz der deutlich einfacheren Auslegung des Nutzfahrzeugfahrwerks ist die Fülle der Varianz mit heute üblichen CAE-Methoden nicht abbildbar. Einschränkungen hierbei sind die in Kapitel 3.1.3 erläuterten Engstellen im Simulationsworkflow, der an den erläuterten Stellen immer wieder verzögert wird und so nur für ausgewählte Varianten nutzbar scheint. Auf der anderen Seite stehen dem gegenüber die Entwicklungsworkflows der Fahrwerkskomponenten, die ebenfalls Engstellen und in Folge Verzögerungspotentiale besitzen. Für eine Verbesserung der gesamten Entwicklungsabläufe stehen auf Prozess- und Workflowebene die Optionen offen, durch eine Verbesserung des Simulationsworkflows den Entwicklungsworkflow zu verbessern, der selbst wiederum auch Optimierungspotentiale bietet. In beiden Fällen kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass durch einfache Auslassung von Prozessschritten eine Verbesserung im Sinne einer Verkürzung erzielt werden kann, da die in Kapitel 3.1.3 formulierten Prozessmodelle bereits in ihrer kürzest möglichen Form dargestellt sind.

### 4.1.1 Simulationsworkflow

Die erste Engstelle im Simulationsworkflow, die sich auf die Mehrkörpersimulation bezieht, entsteht bereits bei Formulierung des Simulationsziels, das zumeist Interpretationsspielraum lässt und im Regelfall personen- oder gruppengebunden ist. Abhängig von den Vorkenntnissen und bereits bearbeiteten Projekten fallen virtuelle funktionale Überprüfungen von Konstruktionen sehr unterschiedlich aus, da diese zumeist auf vorhandenen Simulationsmodellen basierenden Analysen unterschiedliche Detaillierungstiefen besitzen oder auf unterschiedlichen Präferenzen basieren. Aus diesen Gründen können Streuungen der Resultate nicht nur bei externen, sondern auch internen Untersuchungen beobachtet werden.

Häufigster durchlaufener Prozessschritt nach Definition des Simulationsziels ist der Prozesswegweiser zur „Überarbeitung von Modellen“, der in Kombination mit der Überprüfung auf „Lauffähigkeit“ zumeist die erste zeitliche Verzögerung darstellt. Selten kann der Schritt des vollständigen (neuen) Modellaufbaus beobachtet werden, da dieser innerhalb des normalen Prozesses mit seiner engen zeitlichen Begrenzung nicht möglich ist und im Regelfall kontinuierlich erfolgt. Eine Optimierung kann an dieser Stelle stattfinden, indem unternehmensweit bestehende Simulationsmodelle zur Verfügung gestellt werden und für periodische Aufgaben standardisierte Lastfälle mit Einheitsmodellen genutzt werden. Ebenso besteht hier in den Prozessschritten der Ergebnisverarbeitung

---

<sup>1</sup>Die „Schwere Reihe“ (TGX/TGS) des MAN Portfolios beinhaltet aktuell 49 verschiedene Typen

(Postprocessing) als Abschluss des Simulationsworkflows großes Potential durch standardisierte Auswerteverfahren sowie Reports, deren Bereitstellung ebenfalls zentral im gesamten Unternehmen, sowie zu den externen Entwicklungsschnittstellen erfolgen sollte. Beobachtet wird hier allerdings, dass der Faktor „Mensch“ eine entscheidende Rolle spielt, da Simulationsanwender gerne eigen entwickelte Modelle und Auswertungen nutzen, da hier der individuelle Kenntnisstand sowie die persönlichen Vorlieben Berücksichtigung gefunden haben, was trotz gleicher Ausgangsbedingungen zur oben erwähnten Ergebnistreueung führt. Zielführend sind erwähnte Standardisierung von MKS-Modellen über Datenbanken oder der Aufbau und die Vereinheitlichung von universellen, aufgabenspezifischen Simulationsmodellen. Letztere enthalten ebenfalls standardisierte Lastfälle und Szenarien sowie ein vereinheitlichtes Postprocessing.

Als zentraler Prozessschritt im Simulationsworkflow kann die Beschaffung der simulationsrelevanten Produktdaten gesehen werden, da hier im Gegensatz zur Festigkeitsanalyse mittels FEM nicht direkt CAD-Bauteile und -Assemblies genutzt werden können, sondern eine meist manuelle Aufbereitung der Daten erforderlich ist. Die aktuelle Situation bei MAN macht ein Datenpreprocessing über mehrere EDV- und zwei CAD-Systeme notwendig, was sich im Simulationsworkflow in Bezug auf den zeitlichen Horizont als kritisch einstufen lässt. So sind hier zum einen die 2D- und 3D-CAD-Daten betroffen, bei denen im Regelfall, von der Einbindung elastischer Strukturen abgesehen, lediglich Koordinatenpunkte genutzt werden, zum anderen aber auch CAE-relevante Produktdaten, die z.B. Steifigkeits- oder Dämpfungsverläufe enthalten und über Hersteller und Versuchsberichte bezogen bzw. selbst ausgelegt werden. Interne Untersuchungen bestätigen die hier vorhandenen Potentiale zur Prozessoptimierung, da laut Expertenaussage aktuell ca. 60% der Zeit im MKS-Bereich für die Modellparametrierung, respektive Datenbeschaffung, Aufbereitung und Verifikation aufgewandt wird. Eine Methode sowie der Prozess zur Bereitstellung und Verwaltung von simulationsrelevanten Daten wird in Kapitel 6.2 vorgestellt und verdeutlicht die Potentiale der erläuterten Verfahren.

Nachfolgende Elemente des Simulationsworkflows können mit unterschiedlich großer Effizienz zur Optimierung genutzt werden:

- Standardisierter Modellaufbau und Bereitstellung,
- Verbesserte, konsistente und valide Datenbereitstellung,
- Lastfall/Szenario Standardisierung,
- Standardisierung des Postprocessing.

### 4.1.2 Entwicklungsworkflow

Betrachtet man den Entwicklungsworkflow, der Bestandteile des oben erläuterten Simulationsworkflows enthält, so wird ersichtlich, dass eine Optimierung der Simulationsabläufe

bereits eine direkte Verbesserung der Entwicklung bewirkt, da die Prozesswegweiser der funktionalen Überprüfung schneller abgearbeitet werden können. Genügt im Falle des Achseinbauprozesses eine analytische Voruntersuchung zur Bestimmung der Federvorspannkraft, so wird die Bestimmung der Achslasten im Falle eines Mehrachsfahrzeugs nicht mehr über eine lineare Näherungslösung behandelt werden können, so dass hier ein Subprozess ausgelöst werden muss, der in genanntem Beispiel simulativ bearbeitet wird. Selbst bei verhältnismäßig einfachen Auslegungsaufgaben, die sich über erwähnte Handrechnungen lösen lassen, entstehen, wie im Simulationsprozess auch, unterschiedliche Vorgabegrößen und Auswerteverfahren entsprechend dem personengebundenen individuellen Wissen. So ergibt sich bereits für die ersten konzeptionellen, primär periodischen Fragestellungen, der Bedarf nach einer Standardisierung und allgemeinverfügbaren Bereitstellung der Berechnungsmodelle<sup>2</sup>. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese meist mittels Drittprogrammen wie MS-Excel durchgeführten Analyseschritte gute Ergebnisse liefern, seit Jahren existieren und überdies etabliert sind. Der Schritt zur Standardisierung besteht folglich nur noch in einer Bereitstellung sowie Kopplung an eine konsistente Datenbasis. Ein Beispiel hierfür ist das seit Jahrzehnten bei MAN im Einsatz befindliche Programm zur polytropen Luftfederbalganalyse, das immer wieder erweitert und redesigned wurde, im Berechnungskern aber erhalten geblieben ist und nach wie vor aktiv im Entwicklungsprozess genutzt wird. Im Rahmen des Optimierungsprozesses sollte hier lediglich eine allgemein verfügbare Bereitstellung im Unternehmen sowie die Kopplung an die Simulationsdatenbasis erfolgen, wie in Kapitel 6.2.4 beschrieben.

Während dieser Sammlungs- und Aufbereitungsphase von CAE-Werkzeugen, die im Unternehmen an verschiedensten Stellen entstanden sind, können der oder die Programmurheber in fünf Typen bezüglich der Kooperationswilligkeit im Sinne der Wissenspreisgabe eingeteilt werden, die nachfolgend erläutert sind:

1. Der Wissensurheber ist nicht mehr aktiv im Unternehmen
2. Der Wissensurheber teilt sein Wissen unverbindlich und ist froh, Verantwortlichkeiten abzugeben
3. Der Wissensurheber teilt sein Wissen unverbindlich, will aber die Hoheit behalten
4. Der Wissensurheber teilt sein Wissen unwillig, erkennt aber seinen persönlichen Nutzen bei Kopplung an z.B. Datenbasen
5. Der Wissensurheber weigert sich, Wissen zu teilen

Essentiell bei 3 und 4 ist, dass diese Typen nicht das Gefühl der Enthebung von Verantwortung erfahren, sondern vielmehr Unterstützung im Sinne der Weiterentwicklung ihrer persönlich entwickelten Methodik durch z.B. die Kopplung an eine Datenbasis und die weitere effektive Nutzung im Prozess erwarten. Es konnte beobachtet werden, dass der

---

<sup>2</sup>Ein Berechnungsmodell kann an dieser Stelle auch als "physikalisch basierter Algorithmus" interpretiert werden

hier geschaffene Anwendernutzen der Datenversorgung innerhalb der CAE-Tools einen großen Anreiz zur kontinuierlichen Datenpflege erzeugt, da hier direkt der Effekt und Nutzen sichtbar werden. Im Laufe des Projektes traten primär die Typen 1, 2 und 3 auf, so dass eine Integration von Entwicklungswerkzeugen im Regelfall eher nicht an Mitarbeitern scheiterte. Durch die Vernetzung und Bereitstellung solcher Werkzeuge kann von einem Wissensmanagement gesprochen werden, da hier individuell gesammelte Informationen und Erfahrungen zu Wissen gebündelt werden und Dritten zur Verfügung gestellt werden (vgl. hierzu Kapitel 3.4). Obligatorisch ist jedoch, dass diese analytischen Werkzeuge nur mit Einschränkungen eingesetzt werden können und für größere Systeme wie das Gesamtfahrzeug zu ungenauen Ergebnissen erzielen. Das Einsatzspektrum ist jedoch im Rahmen der Toleranzpotentiale deutlich größer als beispielsweise im PKW-Umfeld (vgl. hierzu Kapitel 3.2).

Dort, wo im Prozess Übergabepunkte von der Konstruktion zur Simulation entstehen und komplexe Fragestellungen zum Gesamtfahrzeug eine zumeist numerische Lösung erforderlich machen, existieren Optimierungspotentiale innerhalb der Schnittstellen, die unter anderem in Kapitel 4.1.1 erläutert werden. Eine Schnittstellenoptimierung erfolgt durch oben erwähnte Standardisierung und Datenbasenkopplung von selbst sehr einfachen Werkzeugen, da so im nachfolgenden Prozess auf bereits vorhandene Daten zugegriffen werden kann. So entsteht durch die erwähnte Bereitstellung von CAE-Werkzeugen an drei Stellen ein Nutzen, da Wissen verteilt wird, Workflows geschaffen werden und eine konsistente Datenbasis für weitere Prozesse geschaffen wird.

Speziell in der Mehrkörpersimulation, die üblicherweise keine enge Bindung zu CAD-Daten aufweist und in der beispielsweise die Konstruktionskoordinatensysteme<sup>3</sup> manuell in ISO-Koordinaten transformiert werden oder Kinematikpunkte aufbereitet werden müssen, entsteht der Bedarf nach optimierten Schnittstellen im Sinne von aufbereiteten Konstruktionsdaten. Aktuell gibt es bei MAN Bestrebungen, Konstruktionsrichtlinien für die simulationsgerechte Nutzung von CAD-Daten zu entwickeln, womit zukünftig automatisiert MKS-Geometrieparameter aus den CAD-Bauteilen und -Baugruppen abgeleitet werden können, was die Pflege der simulationsrelevanten Aspekte der Bauteilgeometrien erheblich vereinfachen würde. Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses befanden sich diese Richtlinien aufgrund der gerade erst vollzogenen CATIA-V5- und ENOVIA-LCA-Einführung aber lediglich in der Definitionsphase, so dass dieser Aspekt nur strukturell berücksichtigt werden konnte. Als Folge dieser unternehmensinternen Strukturen wurde ein Konzept zur Bereitstellung von Simulationsparametern erarbeitet, das die Schnittstellen zwischen Konstruktion und unvermeidbaren Simulationsabläufen vereinfacht (vgl. hierzu Kapitel 6.2).

Die bisher erläuterten Optimierungsmaßnahmen implizieren aber nach wie vor Parameterschnittstellen zwischen Konstruktion und Berechnung, so dass bei Betrachtung

---

<sup>3</sup>Üblich ist hier eine Drehung von 180° um die z-Achse

komplexer Fragestellungen wie z.B. den Auswirkungen der Fahrwerkslenker- oder Lenkungsbauteilgeometrie auf das Reifenverschleißverhalten des Gesamtfahrzeugs nach wie vor große zeitliche Verzögerungen entstehen. Die an den Schnittstellen aufbereiteten und übergebenen Parameter verbessern zwar den Prozessverlauf, lösen aber das prinzipielle Problem der Entwicklungsschleifen über Abteilungsgrenzen hinweg nicht zufriedenstellend. Überdies erfordert die Analyse dieser sehr häufigen, meist standardisierten Fragestellungen hohe Kapazitäten in den Berechnungsabteilungen, die eigentlich für unvorhergesehen auftretende Effekte wie Schwingungsphänomene etc. genutzt werden könnten. Aus diesem Grund wird für diesen Teil der Prozessoptimierung eine Methode gesucht, die einerseits komplexe Fragestellungen des Gesamtfahrzeugs abbilden kann, andererseits aber keine Entwicklungsschleife über eine Abteilungsgrenze hinweg erfordert. Im Idealfall gelänge dies, ähnlich wie bei den für einfachere Fragestellungen entwickelten CAE-Tools, durch die Bereitstellung von beispielsweise Mehrkörpersimulationstechnik für Konstruktionsabteilungen in vorgefertigter Form.

Die normalerweise von Simulationsexperten genutzten Programme haben im Regelfall aber den Nachteil, dass sie für einen simulationsunerfahrenen Konstrukteur schwierig zu bedienen sind, spezifisches Fachwissen und viel Erfahrung im Umgang erfordern. Überdies gestaltet sich die Ergebnisverarbeitung und Darstellung meist sehr komplex, da hier wiederum spezifisches Fachwissen zur Auswertungsmethodik vorhanden sein muss. Einige Hürden, die bei der Nutzung von kommerziellen CAE-Berechnungsmethoden auftreten können, sind nachfolgend dargestellt:

- Aufwändige Einarbeitung in die Benutzerumgebung
- Hohes Maß an (simulationsspezifischem) Systemverständnis erforderlich
- Hohe Anzahl an Modellelementen (Substrukturen kombiniert zu einem Gesamtfahrzeug)
- Aufwendige Parametrierung
- Komplexe Auswerteverfahren
- Teure Softwarelizenzen

Die von [Eig07] vorgenommene Klassifizierung von Berechnungsmethoden (vgl. Kapitel 2.3) verweist hier auch darauf, dass die “Methode B” gerade noch vom Konstrukteur, die “Methode C” aufgrund ihrer Komplexität nicht mehr gehandhabt werden kann, sondern nur noch von Spezialisten beherrscht wird. Aus diesen Gründen müssten bei der Bereitstellung in Konstruktionsabteilungen die Nutzungshürden soweit minimiert werden, dass auch als Methode C klassifizierte Berechnungsverfahren handhabbar werden. Ein Schritt hierzu ist neben der Standardisierung der Simulationsmanöver und Auswerteverfahren die in Kapitel 5.2.2 ebenfalls erläuterte unternehmensweite Bereitstellung.

Im letzten Schritt wird für ausgewählte periodische Prozessschritte ein Verfahren empfohlen, das eine Kombination von “Berechnungsmethode C” und Nutzung in Konstruktions-

abteilungen abbilden kann, ohne dabei eine Überforderung der Anwender zu provozieren, indem zu den bereits genannten Hürden die Einarbeitungs- sowie die Parametrierungshürden beherrschbar werden. Vorteile durch die Nutzung von dieser Berechnungsmethodik in den Konstruktionsabteilungen wäre zum einen die direkte Verbesserung des Prozesses, zum anderen aber auch die Optimierung nachfolgender Prozesse. Hier kann dann, basierend auf den bereits angewandten, kompatiblen Methoden, ein schnellerer Simulationsprozess erfolgen. Erwähnt werden sollen an dieser Stelle aber auch die Risiken, die durch diese Maßnahme entstehen und die in Kapitel 4.5 erläutert sind. Nachfolgend sind die wesentlichen Optimierungsansätze zusammengefasst.

- Standardisierung bestehender Entwicklungswerkzeuge,
- Kopplung von Entwicklungswerkzeugen an simulationspezifische Datenbasen,
- Nutzung der Datenbasen als neue Schnittstelle für CAE-Prozesse,
- Konzept zur Aufbereitung von Konstruktions- und Simulationsdaten,
- Methode zur Abbildung (fast) aller möglichen Varianten,
- Parametermapping innerhalb der Simulationsmethoden,
- Methode zur Beherrschung der Komplexität von Simulationsmethoden,
- Nutzung von Simulationsmethoden in Konstruktionsabteilungen (Substitution),
- Kompatibilität der Werkzeuge,
- Weiternutzung der Parameter und Modelle im Prozess.

Die hier erwähnten Verbesserungsmaßnahmen bauen in ihrer Abfolge teilweise aufeinander auf, so dass der vorherige Aspekt Voraussetzung für den nachfolgenden sein kann. So ist beispielsweise ohne eine Methodik zur Komplexitätsreduktion eine Nutzung in Konstruktionsabteilungen unmöglich oder unzumutbar. Voraussetzung für eine Komplexitätsreduktion wäre unter anderem eine optimierte Datenbereitstellung und ein Datenmapping.

### 4.1.3 Identifikation von Schlüsselprozessen

Nachfolgend sollen, basierend auf dem in Kapitel 4.1.2 erarbeiteten Prozessmodell zum Achseinbau sowie der Lenkungsanalyse, jene Prozessschritte herausgegriffen werden, bei denen exakt diese zuvor erwähnte Methodik der Prozesssubstitution als möglich und realisierbar erachtet wird. Die Analyse erfolgt hierbei Top-Down vom Gesamtfahrzeug zu den Komponenten, da diese oftmals vorab in ihren physikalischen Eigenschaften untersucht werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist die für die elastokinematische Lenkungsauslegung zwingend erforderliche Voruntersuchung der kinematischen Lenkungsbauteile, bei der Bauteilsteifigkeiten abgeschätzt werden müssen.

#### 4.1.3.1 Achseinbautwicklungsprozess

Eine Analyse des Achseinbaus, der im Entwicklungsprozess diverse Male, selbst für gleiche Fahrzeuge mit ähnlichen Achslasten, durchlaufen werden muss, erfordert wiederholte Untersuchungen das Gesamtfahrzeug betreffend, die im Regelfall unter statischen Bedingungen erfolgen. Anders als beim Lenkungsentwicklungsprozess sind für den Achseinbauprozess weitaus mehr Voruntersuchungen von Komponenten notwendig. Zum einen müssen Federungselemente, egal ob Fahrwerksfederung oder Stabilisatoren, analysiert werden, zum anderen deren Auswirkungen in Kombination mit der Achsführung unter Berücksichtigung des Eigenlenk- und Verschleißverhaltens des Gesamtfahrzeugs. Aus diesem Grund sollten hier „kleine“ CAE-Tools zur Verfügung gestellt werden, um Tragfähigkeiten von Luftfederbälgen und Blattfedern zu simulieren oder die Torsionssteifigkeit von Stabilisierungselementen vor-auszulegen, um dann auf Achseinbauebene Analysen des Federungs- und im NFZ entscheidenden Wankstabilisierungsverhaltens durchzuführen.

Nach Abschluss der Einzelbetrachtung der Achseinbauten erfolgt üblicherweise eine Verbundbetrachtung aller Achsen, die neben der Wankachsenkompatibilität eine Analyse des statischen und dynamischen Wankverhaltens des Fahrzeugs beinhaltet. Da speziell schwere LKW gekennzeichnet sind durch den Einbau von bis zu fünf Achsen, welche durch unterschiedlichste Ladungen in ihrer Tragfähigkeit und Stabilisierung an den späteren Verwendungszweck angepasst werden müssen, entstehen hier sehr häufige Wiederholungen dieser genannten Variantenentwicklungsprozesse. Überdies fordert der Gesetzgeber einen Kippstabilitätsnachweis nach der ECE-R111-Richtlinie für Tankzüge. Speziell im militärischen, hochgeländegängigen Sektor, werden von Seiten der Kunden Kippnachweise und Beladungsgrenzen für die unterschiedlichsten Aufbauten und Fahrerhäuser angefordert. Der Achseinbautwicklungsprozess wird aus diesem Grund als ein Schlüsselprozess erachtet. Voraussetzung zur Beherrschung der Gesamtfahrzeuganalyse ist allerdings die Voruntersuchung aller beteiligten Federungs- und Dämpfungselemente.

#### 4.1.3.2 Lenkungsentwicklungsprozess

Neben dem Achseinbau wiederholt sich im Fahrwerksbereich der Prozess zur Lenkungsentwicklung varianzbedingt sehr häufig, da neben der Kurbeltriebauslegung an sich auch das Verhalten der Lenkanlage und der Lenktrapeze auf das Gesamtfahrzeug untersucht werden muss. Auffällig hierbei ist der frühe Analyseschritt des Lenktrapezes, da neben der funktionalen Untersuchung der Kinematik und Elastokinematik bereits in der Konzeptphase die Auswirkungen einer Baugruppe (konkret der gelenkten Achse) auf zukünftige Fahrzeugkombinationen analysiert werden muss. Da hier Fragestellungen nichtlinearer Natur wie Reifenverschleiß, elastisches Bauteilverhalten und Wendekreisanalysen von Mehrachsfahrzeugen Berücksichtigung finden müssen und dieser Prozess überdies bei

Fahrzeugen mit mehreren gelenkten Achsen häufiger durchlaufen werden muss, kann dieser Prozessschritt als weiterer Schlüsselprozess gesehen werden.

Zweiter Subprozess der Lenkungsentwicklung ist die Positionierung des Lenkgetriebes sowie die darauf aufbauende Gestaltung des Kurbeltriebs. Die Lenkgetriebeposition, die primär durch das Package von Rahmen, Frontend, Kühler und Fahrerhaus bestimmt ist, bildet die Grundlage für das Kurbeltriebkonzept von LKW und Bussen. Der Prozess zur Analyse der Kurbeltriebkonstruktion beinhaltet selbst bei nur einer gelenkten Vorderachse sehr viele Abhängigkeiten, die im ersten Schritt von den Kugelkopfpositionen des am Lenkgetriebe befindlichen Lenkstockhebels und dem radträgerfestem Lenkhebel abhängig sind (vgl. Abbildung 2.28), da hier das Federungsverhalten der Achskonstruktion starken Einfluss nimmt. Voraussetzung hierfür ist speziell bei durch Blattfedern geführten Vorderachsen die Analyse der Momentanpole beim Paralleleinfedern, verschränktem Einfedern sowie bei Bremsung. Weitere Aspekte wie die Lenkungssymmetrie, die Lenkbarkeit des Fahrzeugs in Kombination mit der hydraulischen Verstärkung des Lenkgetriebes sowie die resultierende Wendigkeit des Gesamtfahrzeugs bilden weitere Subprozesse des Kurbeltrieb- und Lenkgetriebeentwurfs. Schließlich müssen nach Abschluss der funktionalen Auslegungen Packageuntersuchungen erfolgen, die neben den üblichen Analysen der Kinematik auch elastokinematische Analysen erforderlich machen, die durch die sehr hohen Lenkkräfte notwendig werden. Voraussetzung hierfür ist die Abbildung der LenkungsbauteilstEIFigkeiten, die dann auch in die Missbrauchsuntersuchungen wie „Lenken an den Bordstein“ einfließen und letztendlich als Vorgabegröße für die Betriebsfestigkeitsanalyse dienen. Da dieser Prozess aufgrund der unterschiedlichen Achseinbauten sowie dem Auftreten von zwei gelenkten Vorderachsen in Kombination mit einer gelenkten Vor- oder Nachlaufachse mehrmals durchlaufen werden muss, kann er als weiterer Schlüsselprozess in der Entwicklung angesehen werden.

## 4.2 Menschliches Handeln optimieren

*„Das Talent, die individuellen Kenntnisstände, die Berufserfahrung und Motivation der Mitarbeiter eines Unternehmens beeinflussen den Unternehmenserfolg am Markt erheblich“.* Diese Aussage, die in jedem großen Unternehmen verifiziert werden kann, bedeutet im Regelfall für einen Entwicklungsprozess, dass einige Bereiche im Unternehmen über-, andere unterdurchschnittliche Leistungen, abhängig von den individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter, erbringen [Jos08]. Neben den genannten menschlichen Eigenschaften liegt dies allerdings auch an der Auslastungsgrenze aller involvierten Mitarbeiter sowie den prozeduralen, verwaltungstechnischen Randbedingungen, die in der Regel mit steigender Unternehmensgröße ebenfalls zunehmen. Eine individuelle Förderung der Mitarbeiter ist deshalb unabdingbar, soll ein über alle Bereiche hinweg optimaler Prozess etabliert werden. Speziell im Entwicklungsprozess bedeutet dies die Überwindung von Entwick-

lungshürden sowie eine Reduktion des leider immer noch vorhandenen Abteilungsdenkens und des „Wissenschutzes“. Die Optimierung menschlichen Handelns impliziert hier zum einen Interessen zu Wecken und die persönlichen Kenntnisse zu erweitern zum anderen eine Sensibilisierung für die nachfolgenden Entwicklungsabläufe.

Eine „Optimierung“ menschlichen Handelns bezogen auf den Entwicklungsprozess kann auch nicht ad hoc vollzogen werden, indem Informationen bereitgestellt und Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden, sondern vielmehr durch eine kontinuierliche und individuelle Vermittlung von Wissen, die, so haben Beobachtungen gezeigt, nicht durch die reine Darstellung von Wissen über die z.B. erläuterten Webportale möglich ist (vgl. Kapitel 2.1.2.2). Vielmehr entstehen durch die praktikable Nutzung von Entwicklungswerkzeugen in Kombination mit kurzen Schulungen Systemverständnis und in Folge auch verstärktes Interesse. Ein weiterer Effekt, der durch die Nutzung von diesen CAE-Werkzeugen beobachtet werden konnte, war ein großes Maß an Begehrlichkeiten, die nach sehr kurzer Zeit der Nutzung entstanden sind und von den Anwendern direkt kommuniziert wurden. Beispiel hierfür sind Forderungen bezüglich einer Abbildung des exakten Blattfederverhaltens bei Federn und Bremsen (S-Schlag) nach erster Nutzung des im Zuge dieser Arbeit entstandenen, MKS-basierten Lenkungsanalysetools *SimuLENK* oder die Erweiterung des Achslastsimulationsprogramms *SimuLAST* um eine Ladungsvariation und Luftfederdifferenzventile zwischen Trieb- und Nachlaufachsen (vgl. Kapitel 6.3) .

Diese Beispiele verdeutlichen die Potentiale, die durch diese Art der Entwicklung in den Mitarbeitern freigesetzt werden können, da hier durch den Wissenserwerb auch ein kreativer Prozess ausgelöst werden kann. In gleichem Maß erfolgt durch die Nutzung der CAE-Werkzeuge eine Sensibilisierung für die „Datenwelt“ der Simulation, die sich teilweise erheblich von der konstruktiven Sichtweise unterscheidet. Die Erkenntnis der Verwendbarkeit von Bestandteilen der Konstruktionsdaten in Simulationswerkzeugen schafft auch gleichzeitig einen Anreiz zur Pflege der Daten, da zum einen eine individuelle Partizipation entsteht, auf der anderen Seite aber auch erkannt wird, dass basierend auf diesen Daten weitere Untersuchungen stattfinden, von denen wiederum partizipiert werden kann.

## 4.3 Komplexitätshandling

### 4.3.1 Produktkomplexität optimieren

Die erläuterten Potentiale, die sich durch ein Komplexitätsmanagement ergeben, basieren in erster Linie auf der Vermeidung, Reduktion sowie der Beherrschbarkeit einer nicht vermeidbaren Komplexität, die primär in Form von Varianz auftritt. Die in Kapitel 4.1.2 erarbeitete Methodik zur Optimierung des Entwicklungsworkflows kann bei erfolgreicher Umsetzung genutzt werden, um die Produktkomplexität zu reduzieren. Diese

hauptsächlich auf die große Varianz abzielende Optimierung, die heute über Baukästen, Baugruppen und Plattformkonzepte realisiert wird, erfordert eine Abbildung aller im Lastenheft vorgegebenen Funktionalitäten, um so wesentliche funktionale Kombinationen zu identifizieren. Wie in Kapitel 3.5 bereits erläutert erfordert dies eine idealerweise virtuelle Abbildung der Varianten bezogen auf die geforderten funktionalen Anforderungen. Notwendig hierfür sind auf der einen Seite die entsprechenden Werkzeuge zur funktionalen Untersuchung, auf der anderen Seite die erläuterte Methodik zur Datenbereitstellung. Ebenso Voraussetzung für diese Art der Analyse, die im ersten Schritt ein Reengineering des aktuellen Produktportfolios bedeutet, ist eine Automatisierung der Simulations- und Auswerteverfahren, da nur so die große Varianz im Fahrwerksbereich systematisch untersucht werden kann.

Ein Lösungsansatz hierfür ist die Kopplung von CAE-Tools mit den Produktdaten sowie den Auswertekriterien, da nur auf diese Weise zielorientierte Ergebnisse erzeugt werden können. Ein Beispiel für dieses Auswerteverfahren ist die Variantenanalyse von Fahrwerkskombinationen bezogen auf das stationäre Wank- und Kippverhalten, bei dem sehr viele Kombinationen auftreten können und das mittels bisher verfügbarer Methodik nicht handhabbar ist. Bei entsprechender Verfügbarkeit der Daten wäre dann über die Nutzung der Methodik eine erfolgreiche Analyse bestehender Fahrzeugkonfigurationen möglich.

Neben dem Reengineering bestehender Produkte können durch die beschriebene Methodik Variantenuntersuchungen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses durch einen Konstrukteur erfolgen, der somit ein Werkzeug zur Verfügung hat, das die Auswirkungen der Variante auf die funktionalen Anforderungen des Gesamtfahrzeugs abbilden kann. So bietet sich hier bereits bei ersten Packageuntersuchungen die Option der Variantenreduktion, da die Auswirkungen von Baugruppen und Baukästen im Gesamtfahrzeug Berücksichtigung finden. Als Beispiel kann hier die Wendekreis- und Verschleißanalyse von Lenktrapezen angeführt werden, da diese üblicherweise in verschiedenen Radstands- und Achskombinationen gleichermaßen eingesetzt werden.

### 4.3.2 Prozesskomplexität optimieren

Durch die Substitution von Prozessschritten, die mittels neuer Berechnungsmethodik am Konstrukteursarbeitsplatz erfolgen kann, ergeben sich mehrere Effekte, die aktiv die Komplexität der Entwicklungsprozesse reduzieren. Primärer Vorteil ist die Reduktion der Arbeitsteiligkeit sowie die Anzahl der involvierten Mitarbeiter, die ihrerseits wieder auf standardisierte, kompatible Entwicklungsmethoden zurückgreifen. Über die Reduktion der beteiligten Mitarbeiter reduziert sich folglich die Zahl der Kommunikationsschnittstellen, so dass neben der Verringerung der Organisationskomplexität auch von einer Minderung der Kommunikationskomplexität gesprochen werden kann.

Erfolgt ein Prozessschritt aus speziellen Gründen nicht am Konstruktorsarbeitsplatz sondern über die Abteilungsschnittstelle hinweg, so bleibt die Organisationskomplexität optimal, da schnittstellenkonforme Entwicklungsmethoden und standardisierte Auswerteverfahren eine bidirektionale Kommunikation gewährleisten. Eine Workflowabweichung erfolgt immer dann, wenn innovative technische Lösungen analysiert werden müssen, die so nicht methodisch berücksichtigt werden konnten und auch sollten. Ein Beispiel hierfür ist die Lenkungsauslegung von einzelradgeführten gelenkten Nachlaufachsen, bei denen ein Schnittstellenübergang zum MKS-Berechnungsingenieur in der Praxis problemlos verlief, da eine kinematisch ähnliche, bestehende Nachlaufachse fertig parametrisiert durch die Konstruktionsabteilungen bereitgestellt werden konnte.

## 4.4 Voraussetzungen für die Optimierungsansätze

### 4.4.1 Darstellung der aktuellen CAE-Situation

Die von den Fachbereichen eines Unternehmens eingesetzten CAE-Werkzeuge und Methoden, die oftmals Abteilungsgrenzen nie überschreiten und deren Existenz folglich für andere Unternehmensbereiche unbekannt ist, stellt eine Hürde innerhalb eines Entwicklungsprozesses dar, da hier zum Teil redundante Entwicklungen stattfinden oder aber Prozesse einfacher und schneller ablaufen würden, wenn Erkenntnisse über die Existenz einer Methode vorhanden wären. Es kann beobachtet werden, dass selbst in unterschiedlichen Disziplinen oftmals Werkzeuge eingesetzt werden, die in ähnlicher Form bereits existieren, von denen aber keine Kenntnis genommen wird oder werden kann, da ihre Existenz nicht kommuniziert wird. Eine Integration von existierenden CAE-Werkzeugen, wie sie Kapitel 4.1.2 erläutert ist, erfordert zuvor allerdings eine Darstellung der aktuellen Ist-Situation im Unternehmen, um prozesskritische Elemente zu identifizieren und eine Integration vorzubereiten.

Neben diesen Aspekten ist für das Management von Simulationsdaten eine Darstellung der aktuellen CAE-Situation innerhalb eines Unternehmens erforderlich, um die CAE-werkzeugspezifische Anforderung an das informationstechnische System zu erfüllen. Aus diesen Gründen wurde von MAN eine Analyse aller virtuellen Entwicklungsmethoden veranlasst, die einerseits als Überblick über die eingesetzten Werkzeuge dient, zum anderen evtl. bestehende Lücken innerhalb der CAE-Landschaft aufdeckt und eine Validierung unternehmensweit eingesetzter Werkzeuge ermöglicht. Von Interesse hierbei sind neben dem Simulationsziel der eingesetzten Methode unter anderem ihr Einsatz im Produktentwicklungsprozess sowie die verantwortlichen Personen, Abteilungen und nachgelagerten Prozesse. Die Analysemethodik der CAE-Landschaft wird hierbei vor zwei Herausforderungen gestellt, die zum einen die Erhebung der Daten betreffen, die unternehmensweit über viele Abteilungen und Standorte verteilt erfolgen muss, zum

anderen die Darstellungsmethode dieses multidimensionalen Problems. Die Erhebung der Daten erfolgt redaktionell über ein Formular, das von den entsprechenden Fachabteilungen befüllt wurde und eine Sammlung aller im Unternehmen genutzter CAE-Methoden enthält. Eine erste matrixförmige Gliederung der erhobenen Daten erfolgte horizontal nach Fakultät der Aufgabe, der dazugehörigen Disziplin sowie den involvierten Fachabteilungen (vgl. Abbildung 4.2). Vertikal erfolgte eine Einteilung des Gesamtfahrzeugs in 2 Ebenen, die als Hauptkomponenten und Unterkomponenten bezeichnet wurden und die Baukasten- und Baugruppenlogik abbilden. Die ursprünglich angedachte Gliederung der Matrix in eine rein funktionale Sichtweise des Fahrzeugs wurde aus Gründen der Handhabbarkeit in den Fachabteilungen verworfen. Nachfolgende Darstellung veranschaulicht die Form der CAE-Matrix:

		Fakultät 1		Fakultät 2	
		Disziplin 1	Disziplin 2	Disziplin 1	Disziplin 2
Hauptkomponente 1	Unterkomponente 1				
	Unterkomponente 2				
	Unterkomponente 3				
	...				
Hauptkomponente 2	Unterkomponente 1				
	Unterkomponente 2				
	Unterkomponente 3				
	...				

Abb. 4.2: Schema der CAE-Matrix

Die Darstellung des Ist-Standes im Unternehmen erfolgt aus Gründen der Vollständigkeit über alle Unternehmensbereiche hinweg und schloss sowohl das Fahrzeug als auch den Verbrennungsmotor ein. Für die Gesamtdarstellung aller genutzten CAE-Werkzeuge ergab sich nach Abschluss der Analysephase eine 33x45 Matrix. Die zweidimensionale Matrix mit den in den Feldern dargestellten CAE-Werkzeugen wurde, wo möglich, um weitere Dimensionen ergänzt, die unter anderem die Verfügbarkeit der Methode, den Reifegrad im Prozess, den Einsatz im Prozess bis zu gewissen Meilensteinen sowie voraussichtliche Investitionsaufwände und daraus folgende geschätzte Einsparungen

darstellen. Nachfolgender Matrixauszug verdeutlicht die Analyse, wobei im weiteren Verlauf, aus Gründen der Übersichtlichkeit, ein Fokus auf die, im Rahmen der Dissertation erarbeiteten, CAE-Methoden der Fahrwerksentwicklung gesetzt wird.

Ebenso wurden bereits geplante oder als erforderlich identifizierte Werkzeuge, die entweder aufgrund von fehlender Methodik oder aus finanziellen Gründen noch nicht im Einsatz waren, mit in die Matrix aufgenommen, da diese aussagekräftiger sind als „weiße Felder“ und bereits erste Hinweise auf einen Bedarf geben. Aus der aktuellen Situation heraus ebenfalls bewertet und gekennzeichnet wurden Kombinationen von CAE-Methode und Baugruppen, die als „nicht sinnvoll“ erachtet wurden. Aus diesem Grund werden die in Kapitel 2.3 erläuterten Klassifizierungsschemata nach [Eig07] und [BS01] um weitere Dimensionen ergänzt. Nachfolgende Abbildung erläutert die Bewertungsschemata:

	Eigner	Braess	Wölfe (Erweiterung VDI 2221)
Mathematisches Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analytische Lösung</li> <li>- Näherungslösung</li> </ul>		
Berechnungstyp	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensionierungsrechnung</li> <li>- Auslegungsrechnung</li> <li>- Optimierungsrechnung</li> <li>- Kontrollrechnung</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Überschlagsrechnung</li> <li>- Auslegungsrechnung</li> <li>- Nachrechnung</li> <li>- Optimierungsrechnung</li> </ul>
Klassifizierung der Nutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A: einfache Auslegungsrechnung</li> <li>- B: gerade noch vom Konstrukteur handhabbare Berechnung</li> <li>- C: Spezialisten Berechnung</li> </ul>		
Vorhersagegenauigkeit		<ul style="list-style-type: none"> <li>- a: Prognosesicher</li> <li>- b: Unterstützung der Entwicklung</li> <li>- c: Beschränkter Einsatz wegen unvollständiger Methodik</li> </ul>	

Abb. 4.3: Klassifizierungen nach Eigner [Eig07], Braess [BS01], Wölfe [Wöl98]

Die Klassifizierung von Simulations-/Berechnungsmethoden wurde für die CAE-Matrix adaptiert, indem folgende weitere Merkmale eingefügt wurden:

- Einsatzbereiche im PEP (auch Mehrfacheinsätze)
- Personenkreise der Nutzer (z.B. Konstrukteur, FEM-Spezialist, MKS-Spezialist)
- Akzeptanz und Nutzungshäufigkeit

Die erweiterte Klassifizierung wurde dann als Grundlage für die Entwicklung von Prozesselementen genutzt, da so der Erfolg der Entwicklungen im Vorfeld besser abgeschätzt werden konnte. Die Klassifizierung des Einsatzbereiches von CAE-Methoden und Werkzeugen im PEP beinhaltet zum Teil rein nutzfahrzeugspezifische Probleme, da es häufiger vorkommen kann, dass CAE-Werkzeuge nach Abschluss eines PEP eingesetzt werden, um vertriebsbedingte Fragestellungen zu beantworten.

Im Fahrwerksbereich konnten so zu Beginn des Projektes an diversen Stellen CAE-Werkzeuge identifiziert werden, die zum Teil veraltet oder deren Einsatz mit sehr großem Aufwand verbunden waren, jedoch als etabliert und gelebt klassifiziert werden mussten. Die Analyse ergab außerdem, dass häufig größere Entwicklungsschleifen über Abteilungen hinweg notwendig waren, um funktionale Fragestellungen zu beantworten. Konkret waren dies z.B. im Lenkungsentwicklungsprozess Iterationen zwischen Konstruktionsabteilung und Berechnungsabteilung, konkret zwischen CAD-Systemen, die primär kinematische Modelle zur DMU-Untersuchung enthielten, und MKS-Modellen, die neben der Kinematik auch elastische Elemente, Dämpfer und Kennlinien enthielten. Ein Lenkungseinbau in Kombination mit dem in der Achse vorgegebenen Lenktrapez erforderte so mehrere Schleifen, um beispielsweise den resultierenden Reifenverschleiß von Lenkungsbauteilen im Gesamtfahrzeug abzuschätzen.

### 4.4.2 Datenversorgung

Die in Kapitel 4.1.2 erläuterte Voraussetzung für eine Verbesserung sowohl des Simulations- als auch des gesamten Entwicklungsprozesses liegt unter anderem in einer optimalen Datenversorgung der CAE-Werkzeuge. Hierzu ist einerseits ein Konzept zur technischen Umsetzung notwendig, andererseits aber auch ein Prozess zur Pflege der Daten, die beide sowohl Kenntnisse über die CAE-Werkzeuge als auch die unternehmensinternen Strukturen erfordern.

#### 4.4.2.1 Methode zur Datenbereitstellung

Die Versorgung von Simulationsmodellen mit Daten als zentraler Bestandteil der Prozessoptimierung, der auch häufig in der Literatur beschrieben wird und in Kapitel 2.5.4 erläutert wurde, gestaltet sich in der industriellen Praxis im Regelfall schwierig. Zum einen wird jedes an der Entwicklung beteiligte Unternehmen von einer sehr großen, teilweise undurchsichtigen CAE-Landschaft beherrscht, zum anderen lassen sich existierende

Systeme, die produktiv im Einsatz sind und ein gewisses Maß an Akzeptanz erfahren haben, schwer ersetzen. Diese existierenden Strukturen, ohne entsprechende Prozesse und Richtlinien, machen auch einen Automatismus zwischen den CAD- und CAE-Daten extrem schwierig, so dass hier im ersten Schritt Interimslösungen vorteilhaft erscheinen, um die Handlungsfähigkeit zu gewährleisten. Im zweiten Schritt kann, bei Änderung der Randbedingungen, eine Anpassung der Strukturen erfolgen, so dass die Prozessgüte weiter verbessert werden kann. Die Situation bei MAN stellte sich zu Projektbeginn so dar, dass sämtliche Freigabeprozesse auf 2D-Zeichnungen basierten und CATIA V4 in Kombination mit VPM als Bauteilverwaltungssystem als CAD-Lösung genutzt wurde. Bis heute (Stand Februar 2010) erfolgte eine sukzessive Migration auf CATIA V5 und LCA. Aus historischen sowie Komplexitätsgründen wurden unter anderem die Achseinbau- und Lenkungsvarianten lediglich 2D-Zeichnungs-basiert dokumentiert, was eine ganzheitliche Variantenbetrachtung schwierig gestaltet. Bei Projektabschluss wurde im Unternehmen über zukünftige Methoden zur Variantenabbildung über Datenbanken diskutiert, diese befanden sich jedoch zum Abschluss der Arbeit noch nicht im Einführungsprozess. Bis dato erfolgte allerdings an ausgewählter Stelle über Excel-Tabellen eine partielle Dokumentation von Schlüsselvarianten zur vereinfachten Kippstabilitätsberechnung außerhalb des Freigabeprozesses.

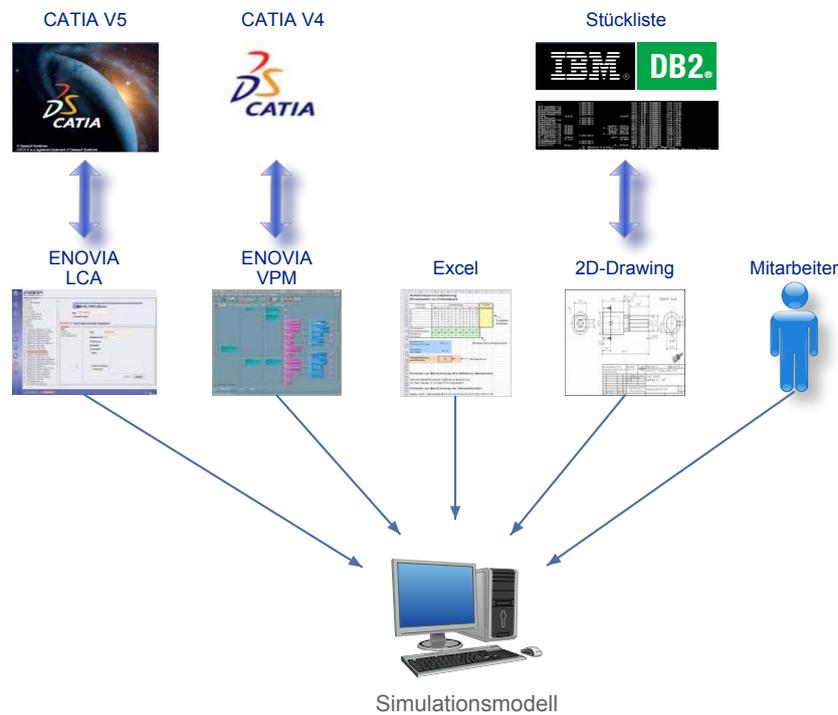


Abb. 4.4: Abbildung der MAN-Dokumentationssysteme aus Sicht der Simulation

Auf der Ausgangssituation aufbauend soll folglich eine Methode zur Bereitstellung von Simulationsdaten/Parametern entwickelt werden, die die in Kapitel 4.1.2 erläuterten Anforderungen erfüllen kann. Dies ist zum einen die notwendige Flexibilität, die Anforderungen diverser CAE-Werkzeuge zu erfüllen, simulationsrelevante Anteile der Konstruktionsdaten aufzunehmen, sowie deren Änderungen zu verfolgen. Aus diesem Grund muss eine mehrschichtige Architektur entwickelt werden, die die notwendige Modularität gewährleisten kann und auf Änderungen flexibel und schnell reagieren kann. In Anlehnung an die in Kapitel 2.5.3 erläuterte Sicht auf Produktdaten kann überdies ein Mapping der Daten auf die Simulationsmodelle erfolgen, damit eine bidirektionale Schnittstelle realisiert werden kann. Nachfolgend sind die Module aufgelistet, die zur Datenbereitstellung als vorteilhaft angesehen werden:

1. Modularität in den CAE-Schnittstellen
2. Integration von simulationsrelevanten Konstruktionsdaten
3. Änderungsverfolgung dieser Datenteile
4. Ergänzung der Daten mit simulationsspezifischen Informationen

5. Sichtweisen auf die Daten
6. Mapping der Daten mit den Simulationsmodellen
7. Nutzerverwaltung

Die Bereitstellung von Konstruktionsdaten ohne ein PDM-System sowie entsprechend formulierte Prozesse und Richtlinien erfordert einen großen Anteil an manueller Pflege, die im nachfolgenden Kapitel gesondert erörtert werden soll. Ein Fokus hierbei sollte folglich aber auch immer auf die zukünftigen Entwicklungen im Unternehmen gelegt werden, da solche Prozesse und Systeme flexibel genug sein müssen, um auf Änderungen zu reagieren.

#### 4.4.2.2 Prozess zur Datenbereitstellung

Die Idealvorstellung eines Simulationsprozesses sieht eine automatisierte Datenversorgung der bereits existierenden Simulationsmodelle mit Konstruktionsdaten vor, so dass der zeitliche Aspekt der Parametrierung in den Hintergrund gerät und schnell Ergebnisse erzeugt werden können. Bei Betrachtung realer Prozesse wird jedoch schnell klar, dass zum einen oftmals keine Konstruktionsdaten vorhanden sind oder diese wie bereits erläutert mühsam aufbereitet werden müssen. Weitere Aspekte sind die in der Konstruktion teilweise überhaupt nicht verfügbaren physikalischen Parameter gewisser Bauteile und die bereits erwähnte Sichtweise auf Bauteildaten. So ist auf konstruktiver Seite primär die Geometrie ausschlaggebend und auch in den CAD-Datenverwaltungssystemen vorhanden, der funktionale Blickwinkel jedoch momentan mit bestehenden Systemen nicht abbildbar. Lösungsansätze liefern die in Kapitel 2.5.2 erläuterten ganzheitlichen Datenformate wie STEP in Kombination mit PLM-Lösungen, die aber einen zeitlichen Horizont zum Produktiveinsatz von mehreren Jahren haben. Ein üblicher Simulationsprozess bei MAN impliziert die Beschaffung der Daten aus den unterschiedlichsten EDV-Systemen sowie über persönliche Kontakte in den Projektgruppen. Der primäre Arbeitsanteil zur Datenbeschaffung und Aufbereitung fällt dabei auf den Mitarbeiter zurück, der die simulative Untersuchung durchführt, da dieser zum einen Kenntnisse über das Ziel der Untersuchung besitzt, zum anderen die Ergebnisverantwortlichkeit hat. Konsequenz daraus ist, dass die Datenbeschaffung, wie auch in der Literatur beschrieben, eine verhältnismäßig lange Zeit in Anspruch nimmt. In Anlehnung an das Wissensmanagement kann hier von einem Pull-Prinzip durch die CAE gesprochen werden. Problematisch an dieser Stelle ist allerdings, dass das Pull-Prinzip zwar bedarfsgerechter ist als das Push-Prinzip, jedoch deutliche zeitliche Nachteile mit sich bringt.<sup>4</sup>

Für die Simulationsdatenbeschaffung stellt sich daher die Frage, ob unter gegebenen Voraussetzungen das Push-Prinzip für gewisse Datenbereiche die sinnvollere, weil schnellere

---

<sup>4</sup>Anmerkung: Der Begriff der Push-Pull-Techniken ist auch oft in der Logistik zu finden.

Methode darstellt. Die theoretische Überlegung hierzu ist, dass gerade im konstruktionsseitigen Anteil der Simulationsdaten eine allgemeine Aufbereitung von Konstruktionsseite erfolgt, da hier der Aufwand des Einzelnen durch die üblicherweise stark vereinzelt Tätigkeiten verhältnismäßig gering ist. Konkret würde dies bedeuten, dass der Konstrukteur die Konstruktionsdaten in seinem Konstruktionsbereich für die Simulation aufbereitet und bereitstellt. Die Voraussetzungen hierfür sind, dass der Konstrukteur die Daten, die er für simulative Untersuchungen zur Verfügung stellt, in seiner gewohnten „Welt“ weitergeben kann und selbst einen offensichtlichen Nutzen durch seine Tätigkeit erkennt, indem er z.B. die Daten für eigene Untersuchungen nutzen kann. Nachfolgend sind die dafür als notwendig erachteten Voraussetzungen zusammengefasst:

- Weitergabe der Konstruktionsdaten aus der Konstruktionssicht (z.B. Koordinaten und Einheiten)
- Verständnis für verschiedene Sichtweisen auf die Daten
- Nutzen durch den Mehraufwand erkennbar gestalten

Letzter Punkt ist Grundvoraussetzung für den Erfolg der Methode, da ohne einen Zwang durch fest formulierte Prozesse zur Datenaufbereitung eine nicht zu realisierende Lösung entsteht. Die Festlegung solcher fest formulierter Prozesse kann im Regelfall nur durch die Verantwortlichen im Unternehmen erfolgen, so dass die Methodik für eine erste Umsetzung auf oben erläuterte Voraussetzungen basieren muss. Zukünftig kann dies unter bestimmten technischen wie prozeduralen Voraussetzungen z.B. durch die Nutzung von Konstruktionstemplates realisiert werden, die dann ein automatisiertes Mapping von Konstruktionsdaten ermöglichen. Erwähnt werden soll an dieser Stelle auch der menschliche Faktor, da die Nutzung solcher Konstruktionstemplates große Disziplin erfordert und besagte Prozesse ohne eine Akzeptanz bei den Mitarbeitern nicht gelebt werden können. Unklar ist hier auch das Verhältnis von Aufwand und Nutzen für die prozessbeteiligten Parteien, da noch nicht geklärt werden konnte, ob die aus prozeduraler Sicht strikte Einhaltung der Richtlinien in Summe nicht einen Mehraufwand im Vergleich zur manuellen Bereitstellung von Konstruktionsdaten bedeutet.

### 4.4.3 Bewertungsmethodik

Das bereits erwähnte Partizipieren des Konstrukteurs an seiner Datenaufbereitung impliziert eine Nutzbarmachung der bereitgestellten Daten für andere Non-Expert Users<sup>5</sup>, womit der entstandene Aufwand zur Datenpflege gerechtfertigt erscheint. Die vom Konstrukteur genutzten CAE-Programme, die entsprechend der Definition in Kapitel 4.1.2 unter anderem auch Berechnungsmethoden der Klasse C beinhalten sollten, implizieren neben der Beherrschung der Parameter Vielfalt und Komplexität einen sicheren Umgang

---

<sup>5</sup>Gemeint sind hier Anwender, die nicht regelmäßig CAE-Werkzeuge nutzen (z.B. Konstrukteure)

mit den Simulationsergebnissen sowie deren Interpretation. Notwendig hierfür ist das bereits erwähnte standardisierte Postprocessing sowie eine Möglichkeit der Ergebnisinterpretation, da nur durch die Kombination von beiden eine maßstäbliche Bewertung durch einen Anwender ohne spezifische Systemkenntnisse möglich ist (vgl. hierzu Kapitel 3.4). Voraussetzung hierfür ist die Verknüpfung der CAE-Tools mit den Produktdatenbasen sowie eine Kopplung an eine Wissensdatenbank, mit deren Hilfe Ergebnisse nicht nur für Simulationsspezialisten interpretierbar werden. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die notwendige Interaktion der CAE-Tools mit den Bewertungskenngrößen:

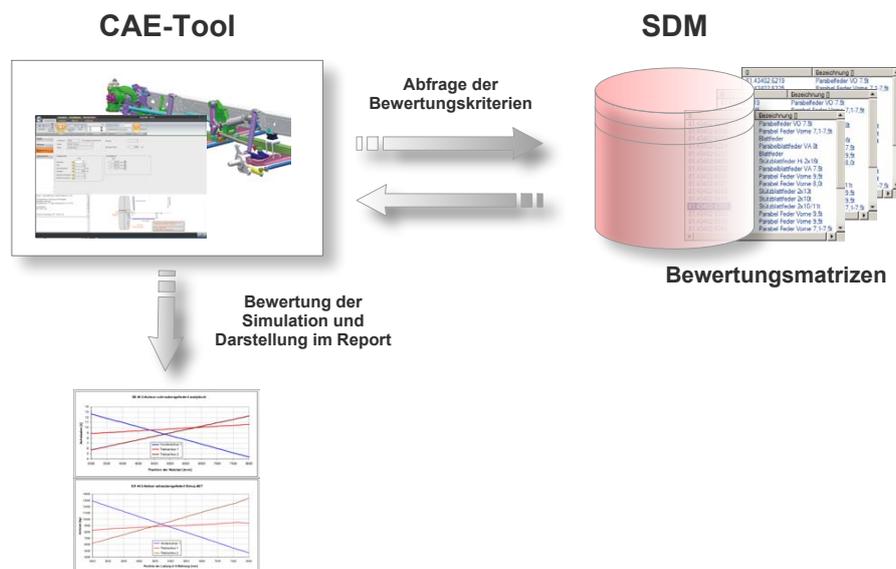


Abb. 4.5: Kopplung der CAE-Tools an Bewertungsdatenbanken

## 4.5 Risiken der Optimierung

Die im vorhergehenden Kapitel aus der Potentialanalyse abgeleiteten Optimierungsansätze basieren auf einem idealisierten Modell von Entwicklungs- und Simulationsprozessen, das so praxisgerecht und kompakt wie möglich konstruiert ist. Trotzdem treten im realen PEP Abweichungen und Vorgehensweisen auf, die nicht vorhersehbar sind und nicht modelliert werden können. Dieses im Produktentwicklungsprozess auftretende teilweise unzulängliche Vorgehen ist zentraler Bestandteil von Innovationsprozessen und unabdingbare Voraussetzung für kreatives Denken und Handeln. Aus diesem Grund soll nachfolgend eine Darstellung von Risiken der entwickelten Methode erfolgen, um diese entsprechend einfließen zu lassen.

### 4.5.1 Risiken der Datenpflege

Die in Kapitel 4.4.2 erläuterte Methodik zur Datenbereitstellung im Fahrwerksentwicklungsprozess, die ohne durch die Unternehmensleitung festgelegte Zwänge auskommt und auf dem Push-Prinzip der Datenbereitstellung durch die Konstruktionsabteilungen basiert, lebt wie erwähnt von der Bereitschaft der Mitarbeiter zur Datenpflege. Diese wiederum profitiert von dem Aufwand-Nutzen Prinzip, das einen persönlichen Nutzen für jeden einzelnen erkennen lässt, da die Daten für den persönlichen Projekterfolg genutzt werden können. Diese Bereitwilligkeit zur Datenpflege wurde beobachtet, unabhängig ob eine CAE-Analyse selbst oder durch eine weitere Person durchgeführt wurde, da im ersten Fall die Auswirkung der Datenpflege unmittelbar abrufbar war, im zweiten Fall ein zeitlichen Vorteil durch die Datenpflege realisiert wurde.

Kritisch ist allerdings der Zeitfaktor der Datenpflege einzuordnen, da dieser fest im Zeitbudget der Mitarbeiter vorgesehen sein muss und dieser Bedarf auch an übergeordneter Stelle verinnerlicht werden muss. Im Tagesgeschäft, in dem häufig eine zeitliche Überbeanspruchung beobachtet werden kann, entsteht an dieser Stelle ein Flaschenhals, da dann die Datenpflege teilweise nur nach Bedarf durchgeführt werden kann. In der Folge besteht durch diese Methode immer ein Risiko des Datenmangels, der sich aber ohne die Vorgabe von Datenpflegeprozessen nicht beheben lässt. An dieser Stelle wird deshalb ausdrücklich auf die Erfordernis eines Datenpflegeprozesses hingewiesen und eine Einführung dringend empfohlen.

### 4.5.2 Grenzen der Workflow-Automatisierung

Die Automatisierung und Standardisierung von Entwicklungsprozessen über Workflows, die eine Nutzung von vorgeschriebenen Werkzeugen einschließt, kann und sollte nur für ausgewählte Prozesse erfolgen, die sich relativ gut planen lassen und von häufigen Wiederholungen geprägt sind. Diese in Kapitel 3.1 bereits erläuterten Voraussetzungen schließen in der Fahrwerksentwicklung von Nutzfahrzeugen diverse Prozesse ein, die voraussichtlich auch zukünftig noch mit ähnlichen technischen Lösungen realisiert werden. Ein Beispiel hierfür ist der Entwicklungsprozess des Vorderachseinbaus, der nach wie vor zumeist über radführende Blattfedern realisiert wird, und in dem sich erwartungsgemäß in naher Zukunft keine groben technischen Änderungen ergeben werden, so dass hier ein automatisierter, prozesssicherer Workflow realisierbar ist. Anders verhält sich dies bei von Innovationen geprägten Prozessen, wie sie im Nutzfahrzeug häufig im Elektronikbereich zu finden sind, da hier die Ausprägung der technischen Realisierung nicht abgeschätzt werden kann. Im Fahrwerksbereich des Nutzfahrzeugs werden nach Expertenbefragung bei MAN aber lediglich im Bereich der aktiv geregelten Fahrwerke gravierende Änderungen erwartet.

Bei Definition von Workflows mittels CAE-Tools ist folglich immer vorab abzuklären, ob Aufwand und Nutzen in einem akzeptablen Verhältnis zueinander stehen. Dies betrifft zum einen das CAE-Tool, das sich im Idealfall nur auf die bis dato absehbaren Standardlösungen beschränkt, zum anderen auf den Workflow selbst, dessen Definition nur für wiederkehrende Standardfragestellungen sinnvoll ist. Obligatorisch hierbei ist, dass sich beide Systeme in permanentem Fluss befinden und eine kontinuierliche Pflege sowie eine Adaption an die gegebenen Randbedingungen erfolgen muss. Ein Beispiel hierfür ist die nach etwa 2 Jahren erweiterte Lenkungssimulationssoftware um Lenktrapeze, die über einen Zentralhebel achsmittig angelenkt werden, da ab einem gewissen Zeitpunkt die Auslegung dieser Variante aufgrund der Häufigkeit in einen Entwicklungsworkflow aufgenommen wurde. Treten innerhalb der im Regelfall sehr konservativ ablaufenden Entwicklung von Nutzfahrzeugfahrwerken dennoch Kreativprozesse auf, die konzeptionelle Untersuchungen erfordern, so können bestehende Workflowwerkzeuge zumindest für ein Preprocessing für erweiterte Untersuchungen genutzt werden.

### 4.5.3 Risiko der Kreativitätsbehinderung

Die Vorgabe der Funktionserfüllung durch ein CAE-Werkzeug, das dem Anwender beispielsweise drei verschiedene Arten von Lenktrapezen zur simulativen Untersuchung zur Verfügung stellt, kann einen Anwender zur Nutzung existierender technischer Standardlösungen verleiten. Zum einen hemmt diese Vorgabe das kreative Denken, da ein Nutzer bereits einen vorgegebenen Lösungsweg zur Verfügung gestellt bekommt und so in seiner Entscheidung beeinflusst wird, auf der anderen Seite fördert es den Wissenstransfer und das Systemverständnis, da nicht nur die Resultate der Funktionsprüfung übermittelt werden, sondern ein „Warum“ ersichtlich wird. Eine Behinderung der menschlichen Kreativität erfolgt aber nur dann, wenn im Kreativprozess, der heute zumeist in Projektgruppen stattfindet, eines der besagten CAE-Werkzeuge Verwendung findet. Vielmehr kann durch eine Nutzung im Regelfall ein Wissensaufbau beobachtet werden, der wiederum einen positiven Effekt auf die Kreativität hatte, da besagtes Systemverständnis weitere technische Lösungen provoziert.

### 4.5.4 Risiko von Simulationen durch „Non-Expert Users“

Durch die Nutzung von komplexer CAE-Technologie durch Non-Expert Users besteht trotz Hilfsfunktionen in eigenentwickelten User-Interfaces, Plausibilitätschecks der Nutzereingaben sowie Unterstützung bei der Ergebnisinterpretation die Gefahr, dass fehlerhafte Simulationsergebnisse im weiteren Prozess genutzt werden. Während der Pilotphase konnten mehrere Arten von Fehlern identifiziert werden, die teilweise auf fehlerhafte Parametrierung, falschen Annahmen oder fehlerhafte Ergebnisinterpretationen zurückzuführen waren. Weitere Fehlerquellen waren missverständliche Parameterangaben sowie

eine Überforderung des Anwenders durch eine zu große Parameteranzahl. Eine signifikante Fehlerreduktion ergab sich allerdings bei persönlicher Schulung der Anwender sowie Hilfestellungen bei den ersten realen Anwendungsfällen. Die Ergebnisfehler, die sich auf falsche Parametrierung zurückführen ließen, traten jedoch mit ähnlicher Häufigkeit auch bei Berechnungsspezialisten auf.

Ein weiteres Risiko bei der Nutzung von komplexen Gesamtfahrzeugmodellen durch den „Nicht-Simulationsanwender“ ergab sich bei der Akzeptanz der CAE-Software, die sich in gleichem Verhältnis zu den vom Anwender sichtbaren Parametern verhielt. Die Überschreitung einer gewissen Komplexitätsgrenze der Software, die in Folge die Akzeptanz signifikant herabsetzt, konnte bei den Anwendern als sehr individuell eingestuft werden und war entsprechend den Vorkenntnissen sowie der Nutzungshäufigkeit verschoben. Bei sehr seltener Nutzung durch einen Anwender konnte ein Anstieg des geleisteten Support beobachtet werden, der auf eine gestiegene Anwendungsfehlerquote schließen lässt. Signifikant verbessert werden konnte die Nutzungsfreundlichkeit durch die Parametrierung über Datenbanken, da so für den Anwender nur der Kopf der Datensätze sichtbar wird und die Parameterzahl drastisch sinkt. Selbst bei prototypischen Datensätzen, die zuvor in die Datenbasis eingepflegt werden mussten, stieg das Akzeptanzlevel aufgrund des offensichtlich vollzogenen Systemdenkens. Ein Beispiel hierfür ist die Pflege einer Kraft-Weg-Kennlinie eines Federelementes durch einen Anwender im Simulationsdatenmanagementsystem und die darauffolgende Nutzung der zuvor parametrierten Kennlinie in einem CAE-Tool zur Achslastberechnung. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die qualitative Verschiebung der Akzeptanzschwelle durch eine Kopplung der CAE-Werkzeuge an Datenbanken.

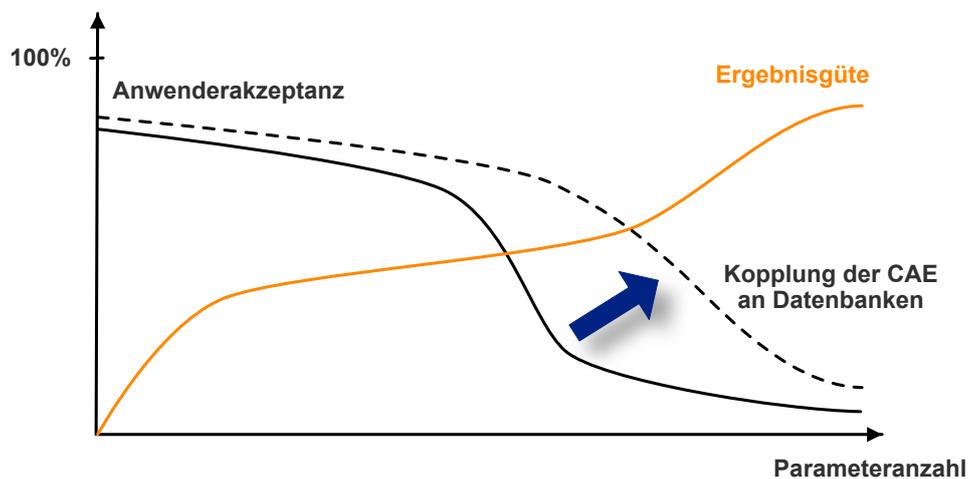


Abb. 4.6: Preprocessing von Simulationsdaten zur Komplexitätsbeherrschung (Qualitative Verläufe)

## 5 Ableitung eines Konzepts für optimierte Entwicklungsprozesse

Die aus den Potentialen abgeleiteten Optimierungsansätze, die neben der Prozessoptimierung eine Verbesserung der Komplexität sowie des Unternehmenswissens ermöglichen, sollen im Folgenden in ein ganzheitliches Konzept überführt werden und eine Umsetzung anhand der bei MAN eingeführten Methoden erläutert werden. Im Konzept für die optimierten Entwicklungsprozesse wurden neben der Berücksichtigung der kreativen PEP-Phasen auch dem Entwicklungsprozess nachgelagerte Abläufe berücksichtigt, da diese im Nutzfahrzeugsektor im Vergleich zum PKW sehr häufig auftreten und zumeist durch Großkunden und Aufbauhersteller abgerufen werden.

### 5.1 Konzept zur Datenversorgung

Zentraler Aspekt der Optimierungsansätze und Voraussetzung für eine Verbesserung von Entwicklungsprozessen und Workflows ist die in Kapitel 4.4.2 erarbeitete Datenversorgung. Den abgeleiteten unternehmensspezifischen Prozess zur Pflege der Daten vorausgesetzt, müssen genannte Kriterien der Datenversorgung erfüllt werden können, um in Folge eine Prozessverbesserung zu erzielen.

Der beschriebene Prozess der Datenpflege impliziert eine für den Anwender optimale Bedienbarkeit bei gleichzeitig maximal möglicher Fehlerresistenz, da wie erläutert im ersten Schritt eine manuelle Datenpflege unumgänglich ist. Aus diesem Grund muss die für den Anwender sichtbare Benutzeroberfläche so einfach und klar wie möglich gestaltet sein und darf überdies nicht mehr als die unbedingt notwendigen Funktionalitäten anbieten. In der Praxis bedeutet dies im einfachsten Fall diverse, zentral bereitgestellte Tabellen mit Bauteil- und Fahrzeugdaten, in die zellenweise Informationen abgelegt werden können und die über zugewiesene Benutzerrechte ein gewisses Maß an Datensicherheit haben. Unterschiedliche Sichtweisen auf die Daten, die mehrere Aspekte beinhalten und nachfolgend dargestellt sind, werden erforderlich, um erstens die Bedienbarkeit zu vereinfachen und zweitens eine virtuelle Grenze zwischen der Konstruktions- und Simulationswelt zu ziehen:

- Darstellung von Informationen (Sichtbarkeit),

- Physikalische Einheit der Informationen (z.B. Millimeter oder Meter),
- Bezugssystem der Informationen (Koordinatensystem-Wechsel).

Die Perspektive auf die Daten als Voraussetzung für eine praktikable Datenpflege bedeutet folglich, dass das System zur Datenpflege Datensatzbereiche nutzerspezifisch ausblenden und umrechnen können muss. Für oben genanntes Tabellenbeispiel folgt daraus das Ein- und Ausblenden von Spalten (zeilenweise Datensätze vorausgesetzt) sowie die gegenseitige Umrechnung von Zellen. Spätestens bei einer detaillierteren Benutzerverwaltung sowie der Änderungsverfolgung von Bauteilen über Stücklistensysteme stoßen einfache tabellenförmige Verwaltungen an ihre Grenze. Auch ein Mapping von Produktdaten mit den CAE-Tools und Simulationsmodellen lassen sich hier aufgrund der Komplexität nur noch schwer realisieren. Globales Ziel bei der Gestaltung des Systems ist ein Vorgehen nach dem Verursacherprinzip, womit gewährleistet ist, dass eine Datenpflege immer an den dafür vorgesehenen Stellen des Unternehmens erfolgt. Dies bedeutet eine Pflege der simulationsrelevanten Anteile der Konstruktionsparameter durch die Konstruktionsabteilung und eine Ergänzung der Daten durch simulationsspezifische Anteile über die Berechnungsabteilungen. Aus diesen Gründen ist eine Einteilung der SDMS-Anwender in Benutzergruppen erforderlich, die unter anderem Konstruktionsanwender und Simulationsanwender enthalten (vgl. hierzu Kapitel 5.1.3).

### 5.1.1 Virtuelle Abbildung des Fahrzeugs

Aus besagten Gründen erfolgt hier eine Datenbereitstellung über relational verknüpfte Datenbanktabellen, die fein granularisiert das primär auf das Fahrwerk bezogene Gesamtfahrzeug abbilden und über eine Benutzeroberfläche ansprechbar sind. Die Datenverwaltung erfolgt hierbei bauteilbasiert, die in Folge über Baugruppen zu einem Gesamtfahrzeug kombiniert werden. Im Gegensatz zur CAD-basierten Verwaltung erfolgt in der Simulationsdatenverwaltung aber keine Granularisierung ähnlich der Stücklistenlogik, sondern auf rein funktionaler Ebene. In der Praxis bedeutet dies, dass nicht, wie im PDM-System, jede Verschraubung abgebildet wird, sondern nur die für die Simulation relevanten Parameter.

Bauteil- und Baugruppentabelle müssen über 1:1, 1:n und n:m Beziehungen miteinander verknüpft werden, so dass wie in der Datenbanktechnik üblich in einer übergeordneten Baugruppe verfügbare Bauteile manuell oder automatisiert ausgewählt und kombiniert werden können. Auf diese Weise muss hier primär eine Datenpflege auf unterster Ebene erfolgen, da die übergeordneten Ebenen durch die Baukastenlogik der Stücklistensysteme zusammengesetzt werden können. Diese Abfrage der Baukasten- und Baugruppenlogik erfordert allerdings eine Kopplung der Simulationsdatenverwaltung an die Stücklistensysteme, um somit vorhandene Elemente zu kombinieren (vgl. Kapitel 6.2.5). Bezogen auf das Fahrwerk des Nutzfahrzeugs erfolgt eine Gliederung der Datenbankstruktur in

Basisbauteile, mehrere Ebenen von Baugruppen sowie Einbauten. Die Einbauten als letzte Schicht vor dem Gesamtfahrzeug beschreibt die Kombinatorik der Baugruppen mit Basisbauteilen des Fahrwerks, die auch physikalisch die Verbindung zwischen Achse und Chassis realisieren. Grundelemente sind Federn, Dämpfer, Stabilisatoren und Fahrwerkslenker. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht in Auszügen die Fahrzeugstruktur innerhalb der Datenbank.

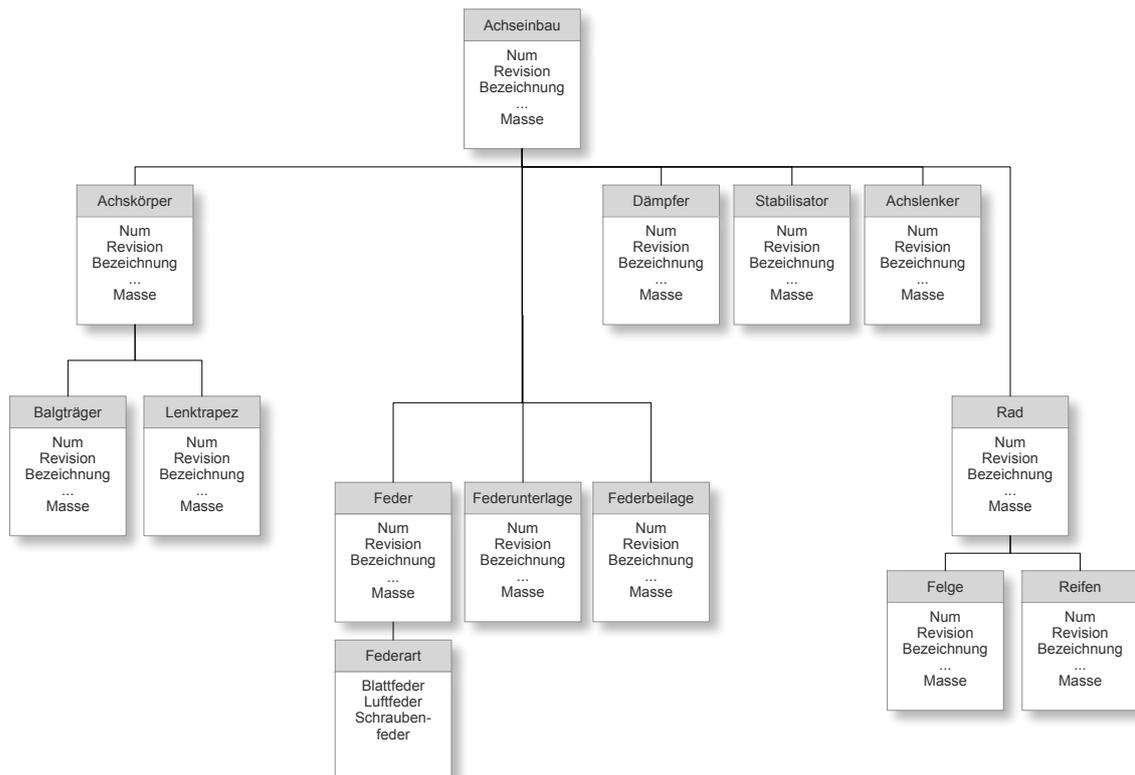


Abb. 5.1: Schematischer Auszug der Datenbankstruktur von Fahrwerkelementen

### 5.1.2 Stücklistenkopplung

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert ist eine Änderungsverfolgung der in der Datenbank vorhandenen Datensätze unabdingbar, um sowohl die Aktualität, als auch die damit verbundene Validität zu gewährleisten. Aus diesem Grund muss eine Indexabfrage der Bauteile und Baugruppen über das Stücklistensystem erfolgen und veraltete Datensätze gekennzeichnet werden, damit sie auf simulationsparameterbezogene Änderungen hin überprüft werden können. Die an dieser Stelle notwendige manuelle

Pflege ist mit im Unternehmen bestehender Konstruktions- und PDM-Logik, so wie sie in Kapitel 4.4.2 erläutert ist, notwendig, da bei Indexerhöhung nicht automatisiert geprüft werden kann, ob simulationsrelevante Änderungen vollzogen wurden. Ein Beispiel hierfür ist eine herstellerbezogene Änderung des Zeichnungsindex, die keinerlei Auswirkungen auf die simulationsrelevanten Konstruktionsparameter hat, vom Bauteilverantwortlichen im Simulationsdatenmanagement-System aber aktualisiert werden muss. Aus diesem Grund ist neben der Ernennung von Verantwortlichen für Bauteile und Baugruppen ein Informationsdienst mit Eskalationsstufen notwendig, der Hinweise zur Datensatzprüfung bei Indexänderung geben kann. Ebenso müssen Bauteile, die sich nicht mehr im aktuellen Produktionsprogramm befinden, vom System gekennzeichnet werden, aus der Indexüberwachung ausgeschlossen werden und auf eventuell vorhandene Ersatzbauteile referenziert werden.

Voraussetzung bei Neuanlage von Bauteilen und Baugruppen ist die Überprüfung der Bauteilnummer auf Vorhandensein im Stücklistensystem, damit Prototypenteile gesondert gekennzeichnet und sortiert werden können und in Folge Variationsrechnungen sowie simulative Produkt- und Baukastenoptimierungen möglich sind. Nachfolgende Liste fasst die Anforderungen zusammen:

- Überwachung der Indices,
- Überprüfung auf in Produktion befindliches Bauteil/Baugruppe (PET/PAT),
- Überprüfung neuer Datensätze auf bestehendes Bauteil oder Prototyp,
- Kombinatorik bestehender Baugruppen aus Bauteilen.

### 5.1.3 Datendefinitionstabellen

Die bereits erläuterte Gliederung von Anwendern in Benutzergruppen sowie die Berechnung von Datenbankwerten auch über relationale Tabellen hinweg erfordert zu jedem Bauteil/Baugruppe Hilfstabellen, über die genannte Funktionalitäten realisiert werden können. Die multidisziplinäre Sichtweise auf Daten erfordert unter anderem Einheitennummernrechnungen sowie Koordinatentransformationen und eine Visualisierungslogik, um eine anwenderspezifische Datenkonsistenz zu realisieren. Aus diesen Gründen bestehen neben den eigentlichen Datentabellen Definitionstabellen, die exakt diese notwendigen Funktionalitäten bereitstellen. Nachfolgend sind die notwendigen Hilfstabellen erläutert:

- Berechtigungstabelle (Lesen, Schreiben, Ändern, Löschen),
- Wertetabelle (physikalische Einheiten, mehrsprachige Beschreibungen, Sortierungen, etc.),
- Relationstabelle (Abhängigkeiten einzelner Datenfelder von anderen Datenfeldern)  
Beispiel: Bevor ein Achskörper ausgewählt werden kann, muss die Federungsart und die Achsart gewählt werden.

- Triggertabelle (Visualisierungen, die in Abhängigkeit von anderen Elementen getriggert werden) Beispiel: Lenktrapez darf nur bei Achstypen 1, 2 und 3 visualisiert werden.
- Berechnungstabelle (Berechnungsvorschriften, Bedingungen, Ober- und Untergrenzen),
- Dateiverknüpfungstabelle (abgelegte Dateien).

Ein Mapping der in nachfolgendem Kapitel erläuterten CAE-Toolparameter mit den Datenbankparametern erfolgt ebenfalls über die genannte Wertedefinition, in der die Relation zu den CAE-Werkzeugen hinterlegt ist.

## 5.2 Konzept zur Bereitstellung von CAE-Werkzeugen

Der in den Optimierungsansätzen herausgearbeitete Bedarf an CAE-Werkzeugen, welche hochspezifiziert Workflowschritte innerhalb des Entwicklungsprozesses substituieren können, erfordert Methoden, die einerseits die Bedienkomplexität reduzieren, zum anderen aber auch eine direkte Kopplung zu den erläuterten Datenbasen hat, um automatisiert Simulationsmodelle zu bedaten und die Nutzbarkeit weiter zu vereinfachen. Hierbei muss ein Kompromiss aus den zu erwarteten Vorteilen und den potentiellen Risiken gefunden werden. Überdies müssen für die Bereitstellung von komplexen Gesamtfahrzeugmodellen CAE-Werkzeuge geschaffen werden, die auf konventioneller CAE-Methodik wie MKS oder FEM basieren, da eine analytische Berechnung an vielen Stellen nicht mehr handhabbar wäre. Aus diesem Grund kann z.B. im Fahrwerksbereich, in dem zur Funktionsanalyse primär Mehrkörpersimulation eingesetzt wird, der Code-Export gesamter MKS-Modelle genutzt werden, auf dessen Basis nachfolgend CAE-Werkzeuge aufgebaut werden können.

Auf Komponentenebene können allerdings auch analytisch arbeitende, meist linearisierte Berechnungswerkzeuge eingesetzt werden, da im Rahmen der Toleranzbänder die Nutzung genügend exakte Resultate liefern kann. CAE-Werkzeuge für die Komponentenauslegung dienen in den meisten Fällen als Preprocessingschritt für die Gesamtfahrzeuguntersuchungen und werden zumeist in den früheren Entwicklungsphasen zur Absicherung der Geometrie konzepte genutzt. Beispiele hierfür sind analytische Steifigkeitsberechnungen von Lenkungsbauteilen, deren Ergebnisse daraufhin in die elastokinematische Lenkungsauslegung des Gesamtfahrzeugs fließen, oder die Dimensionierungsberechnung von Luftfederbälgen, die für die Achslastdimensionierung erforderlich sind.

Eine Abbildung aller aus aktueller Sicht technisch relevanter Lösungen mittels Simulationswerkzeugen stellt zum einen die Modellbildung, als auch die Benutzeroberfläche vor die Herausforderung des Komplexitätshandlings. An dieser Stelle stehen im Modellbildungsprozess zwei Alternativen zur Verfügung: Entweder für jede mögliche Fahrzeugvariante

ein eigenes, spezifisches Modell bereitzustellen oder aber in einem Modell alle Fahrzeugvarianten abzubilden. Erste Alternative bietet Vorteile in der Modellkomplexität, der Parametrierung und dem Postprocessing, da immer exakt die Fahrzeugkombination (z.B. ein dreiachsiges blattgefedertes Fahrzeug) modelliert ist, die untersucht werden soll. Bei den Achseinbauuntersuchungen ergäbe dies aber, bedingt durch die unterschiedlichen Achskonzepte, eine Gesamtfahrzeugmodellanzahl von über 40, so dass hier eine Modellpflege nicht zu realisieren ist. Auch für eine Lenkungsauslegung wäre die Modellanzahl bedingt durch bis zu drei gelenkte Achsen zu groß, um eine fahrzeugspezifische Modellierung umzusetzen, so dass hier eine andere Strategie verfolgt werden muss. Aus diesem Grund sollte die Option der Integration aller möglichen Varianten in ein einzelnes oder einige wenige Modelle angestrebt werden. Nachteil dieser Strategie ist zwar die sehr aufwändige Modellierung, da eine Vielzahl von Substrukturen und Parametern sowie eine Aktivierungslogik der Varianten benötigt werden, auf der anderen Seite müssen diese vom CAE-Fachmann aber nur an einer Stelle gepflegt werden. In der Modellierungsstrategie sollten daher alle vorgesehenen technischen Lösungen in einem Gesamtfahrzeugmodell kombiniert werden und eine Methode zur Aktivierung der vom Benutzer ausgewählten Elemente erfolgen. Die Modellierung von fahrzeugspezifischen Elementen soll aus diesem Grund ausschließlich der MKS-Umgebung vorbehalten bleiben. (Vgl. hierzu die Modellierung des in Abbildung 5.2 dargestellten universellen LKW-Modells)

### 5.2.1 Bereitstellung über Code Export

Die in der Fahrzeug- und Motorenentwicklung bei MAN eingesetzte MKS-Software SIMPACK bietet die Option, Mehrkörpersimulationsmodelle in eine eigenständig ablaufende Datei zu exportieren, die daraufhin alleinstehend oder in Programmen wie Matlab-Simulink ablaufen, um beispielsweise auch erläuterte Co-Simulationen durchzuführen. Mit Einschränkungen lassen sich so sehr komplexe Gesamtfahrzeugmodelle ohne das eigentliche MKS-Programm ausführen. Voraussetzung sind lediglich „Code-Execution“-Lizenzen, die zentral im Netzwerk bereitgestellt werden können. Die Parametrierung der Simulationsmodelle erfolgt über eine zentrale Parameterdatei sowie Reifen-, Fahrbahn- und Kennfelddateien. Für erfahrene Simulationsanwender mit ausreichenden Modellkenntnissen genügen hier bereits die ASCII-basierten Dateien (z.B. die in Abbildung 5.2 dargestellte Parameterliste) aus, um Modelländerungen vorzunehmen, was jedoch in Realität sehr umständlich und im Regelfall fehleranfällig ist. Nachfolgend ist die Systematik des Code-Exports in SIMPACK sowie die Interaktion mit der CAE-Benutzeroberfläche dargestellt:

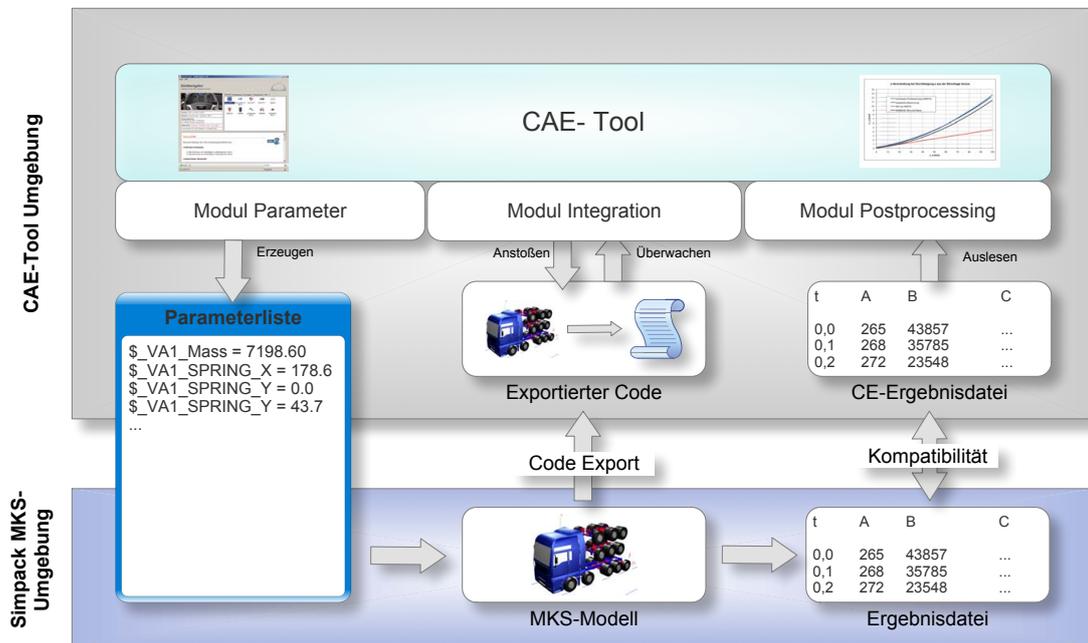


Abb. 5.2: Code Export Methodik zur Bereitstellung von MKS-Modellen nach [IFM06]

Eine Bereitstellung auch für „Nicht-Simulationsanwender“ erfordert folglich Maßnahmen zur schnellen und fehlerresistenten Parametrierung des Simulationsmodells über Benutzeroberflächen. Abbildung 5.2 verdeutlicht den Code Export Ansatz, der aus MKS-Modellen abgeleitet wird und die dargestellten Parameterdateien für die Simulationsmodellparametrierung nutzt. Die ausgegebenen Ergebnisdateien sind dabei untereinander kompatibel, so dass ein Postprocessing an beiden Stellen möglich ist. Die Postprocessingmethodik, die in der Benutzeroberfläche genutzt wird, ist in Kapitel 5.3.3 erläutert. Im Entwurf der CAE-Tools sollte das Auftreten verschiedener Benutzergruppen vorgesehen werden, da auf diese Weise komplexe Simulationsmodelle mit unterschiedlichen Detaillierungslevels (LOD) bereitgestellt werden können. So ist es möglich, auf Basis eines Modells Benutzer aus Vertriebs-, Konstruktions-, und Berechnungsabteilungen zu bedienen, indem in der Benutzeroberfläche der LOD gruppenspezifisch eingestellt wird.

## 5.2.2 Verfügbarkeit im Unternehmen

Sowohl die CAE-Werkzeuge mit Gesamtfahrzeugmodellen als auch die Komponentenmodelle müssen im Unternehmen an entsprechenden Stellen dem Anwender zur Verfügung

gestellt werden, um eine standardisierte Nutzung zu fördern und eine zentrale Anlaufstelle für Simulationswerkzeuge zu schaffen. Berücksichtigt werden dabei folgende Kriterien, die in vorangegangenen Kapitel erarbeitet wurden:

- Unternehmensweite Bereitstellung an allen Standorten
- Information der Mitarbeiter
- Anwenderhilfe bereitstellen
- Risiko der Non-Experts-User-Simulationen minimieren
- Mitarbeiter- und Unternehmenswissen bewahren und fördern

Eine unternehmensweite Bereitstellung lässt sich im Firmennetzwerk über ein Simulationsportal bewerkstelligen, das alle verfügbaren CAE-Werkzeuge enthält und das über eine Zentralinstallation oder Webanwendung an jedem Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt werden kann. Darin müssen CAE- und Hilfsanwendungen enthalten sein, die in die verschiedenen Hauptkomponenten des Fahrzeugs kategorisiert sind. Über das Simulationsportal sollten ebenfalls Informationen über die kommerziellen CAE-Anwendungen wie SIMPACK etc. erreichbar sein, so dass hier eine zentrale Anlaufstelle für alle Simulationsanwender entsteht. Über Informationsseiten kann eine Verbreitung von Release Notes und Neuerungen erfolgen, so dass neben den hinterlegten Handbüchern und Anwenderhilfen eine Information aller Mitarbeiter erfolgt. Das Informationsportal sollte, wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, über eine Browsingfunktion sowie eine Suchfunktion verfügen, die neben einem „Stöbern in Informationen“ auch eine gezielte Suche ermöglicht.

Um das Risiko von falschen Simulationsergebnissen zu reduzieren, muss eine Einschränkung der CAE-Tools über Benutzergruppen erfolgen, da nur so sichergestellt werden kann, dass nur geschulte Anwender Programme in Nutzung haben. Überdies erfolgt diese Einschränkung aus Gründen des Wissensschutzes, da in den Anwendungen sehr viel Konzern- und Mitarbeiterwissen enthalten ist, das zum einen die Berechnungsalgorithmen, zum anderen die Auswerterroutinen und die nochmals gesicherten Auslegungsrichtlinien enthält. Unabhängig von den Richtlinien des Simulationsportals sollten aus genannten Gründen alle CAE-Anwendungen nur im Unternehmensnetzwerk lauffähig sein.

### **5.3 Datenverbundkonzept**

Zentraler Bestandteil optimierter Entwicklungsprozesse ist neben den Methoden und dem Prozess der Datenverbund, der sich aus den CAE-Werkzeugen, den Produktdaten sowie den Bewertungskriterien ergibt. Um eine handhabbare Komplexität der Simulationswerkzeuge zu erzielen, ist die direkte Verknüpfung von Produktdaten mit den CAE-Tools vorzusehen genauso wie deren Zugriff auf die Bewertungskriterien, um im Postprocessing-Prozess Simulationsresultate zu bewerten. Schließlich erfolgt für die Anwendungsprogrammstruktur ein dynamischer, datenbankbasierter Programmaufbau.

### 5.3.1 Kopplung der CAE an die Produktdaten

Die in Kapitel 4.5 erläuterte Komplexität der Simulationswerkzeuge, die signifikant reduziert werden kann, wenn beispielsweise Kennlinien und Baugruppen über Datenbanken parametrisiert werden können, erfordert die Anbindung und Vernetzung der CAE-Tools an Produktdaten, die aus konstruktions- und simulationsspezifischen Parametern bestehen können. Neben der Verfügbarkeit solcher Datenbanken muss die Funktionalität des Parametermappings erfüllt werden können, um den verschiedenen Produktdaten Parameter im Tool zuzuweisen. Die in Kapitel 5.3.2 erläuterte Methodik der Programmsteuerung über Datenbanken erleichtert hier das Parametermapping, da innerhalb der Datenbank eine Koppeltabelle das Mapping zwischen Parametername der Anwendung und dem Datenbanknamen vollzieht. Weiterer Vorteil hierbei ist, dass im gleichen Zug ein Mapping zu weiteren MKS-Modellen, z.B. einer Truck-Database, erfolgen kann und die Daten so an weiteren Stellen Verwendung finden können. Abbildung 5.3 verdeutlicht die Datenbankvernetzung.

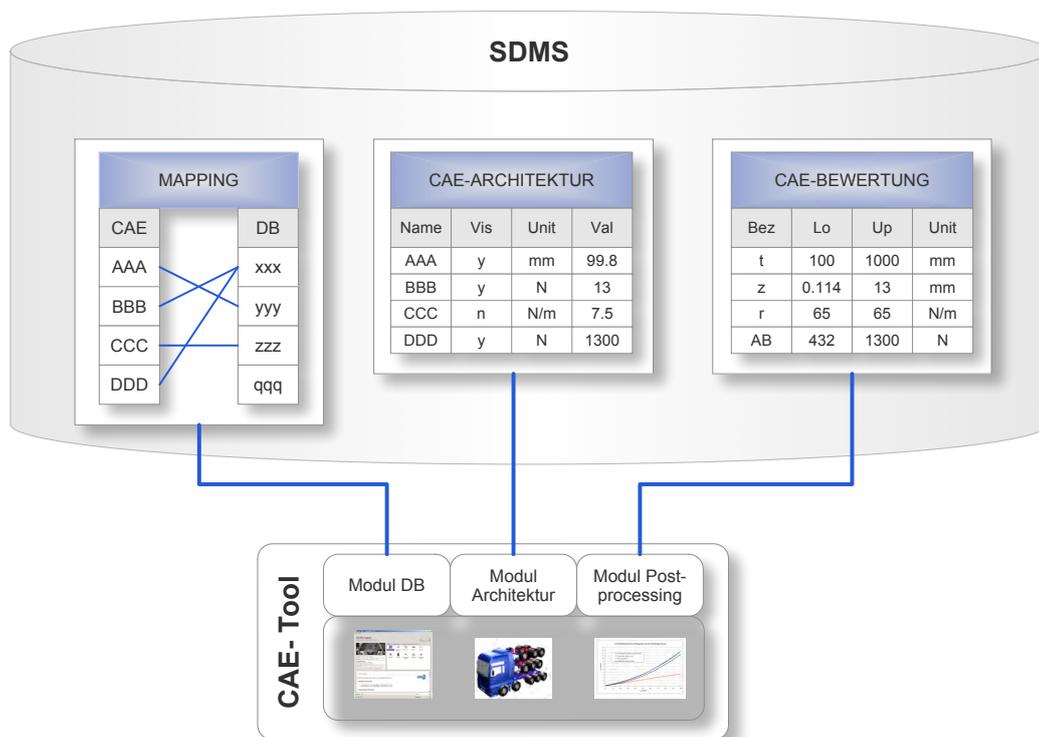


Abb. 5.3: Vernetzung der Tools mittels Datenbanken

Innerhalb der CAE-Programme sollte abhängig vom Benutzerlevel die Darstellung variiert werden, so dass der Anwender vom ausgewählten Datensatz entweder nur eine Sachnummer, ausgewählte Parameter oder den vollständigen Parametersatz sieht. So können Berechnungen von der Angebotserstellung durch Vertriebsmitarbeiter bis zu prototypischen Variantenrechnungen innerhalb des PEP durchgeführt werden, die im Regelfall auf der Modifikation existierender Bauteil- und Baugruppendaten basieren. Klarer Vorteil dieser LOD-Strategie sind die Bidirektionalität der Berechnungsvorgänge sowie eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse selbst über die Produktentwicklungsphasen hinaus. Irrelevant für die Methodik ist das verwendete Datenbankformat, das aus Gründen der Nachvollziehbarkeit in einer ersten prototypischen Phase auf Excel-Tabellen basiert und dann im weiteren Verlauf der Arbeit auf eine SQL-Datenbank umgestellt wurde.

### 5.3.2 Steuerung der CAE über Datenbanken

Das in Kapitel 5.3.1 erläuterte Mapping von Produktdaten mit Simulationsmodellen sowie das in der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) notwendige Mapping der Eingabefelder mit den Produktdaten erfordert eine (Teil-) Automatisierung des GUI-Aufbaus. Auf diese Weise können CAE-Parameter, respektive Simulationsmodellparameter, die einmalig in der Datenbank gemapped wurden, bei entsprechender Softwaregestaltung automatisiert Benutzeroberflächen erstellen. Notwendig hierfür ist neben einer Koppeltabelle, die ein Mapping auf die Bauteiltabellen realisiert, eine Datenbanktabelle mit den Parameternamen des Simulationsmodells sowie allen relevanten Steuerungsparametern der Benutzeroberfläche. Auf diese Weise muss bei Modelländerungen nur eine Anpassung der Steuerungstabelle erfolgen, die dann das Anwendungsprogramm neu aufbaut. Nachfolgende Liste enthält eine Auswahl der an der Programmsteuerung beteiligten Parameter:

- Parametername
- Beschreibung/ Benutzerhilfen
- Defaultwerte
- MKS-Mapping-Name
- Einheit
- Steuerungs- und Visualisierungsspalten
- Erlaubte Ober- und Untergrenzen

Bis auf wenige Ausnahmen kann eine CAE-Benutzeroberfläche vollständig aus der Programmdatenbasis aufgebaut werden, in der auch alle Steuerungsabhängigkeiten hinterlegt sind, so dass eine Programmiererweiterung ohne erneutes Kompilieren mit geringem Aufwand möglich wird und so auch gleichzeitig ein Mapping mit den Datenbankparametern

vollzogen werden kann. Ein Beispiel hierfür sind Blatt- oder Luftfedern, die als Bauteile in der CAE-Software ausgewählt werden können und hinter denen ein Parametersatz in der Datenbank steht, dessen Einzelparameter und Kennlinien zwischen Bauteildatenbank und Softwareausgabefeld gemappt werden. Wählt der Nutzer einen Datensatz in der Software aus, so werden über die Koppeltabelle Bauteileigenschaften in die Benutzeroberfläche geladen, die darauf folgend über eine zweite Koppeltabelle das Simulationsmodell parametrieren. Nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Systematik vom Aufbau der Benutzeroberfläche über das Mapping von Bauteilparametern sowie der Parametrierung der Simulationsmodelle.

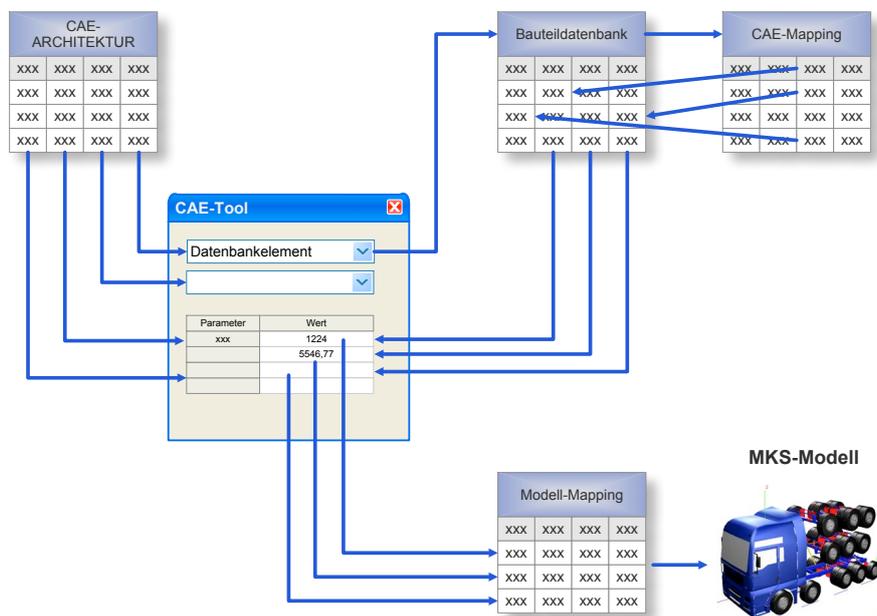


Abb. 5.4: Datenbankbasierte Programmsystematik

Unerheblich an der Systematik ist hier ebenfalls, welche Datenbanktechnik genutzt wird, da sich die Schnittstellen der CAE-Werkzeuge beliebig anpassen lassen. Vereinfachend wirkt hier, dass sowohl Produktdaten als auch die Softwarelogik in der selben Datenbank verwaltet werden und dort dann ein Mapping sehr schnell und konsistent ablaufen kann.

### 5.3.3 Kopplung der CAE an die Bewertungskriterien

Ein standardisiertes Postprocessing der Simulationsergebnisse erfordert neben dem Mapping des Ergebnisvektors, das im Regelfall programmintern gehandhabt wird, eine sich

im Fluss befindliche Bewertung der Resultate. Die aus numerischen oder analytischen Berechnungen gewonnenen Ausgabegrößen können nun programmintern verarbeitet und entsprechend den vorgesehenen Simulationszielen umsortiert, gekürzt und miteinander verrechnet werden, so dass eine nachgelagerte Bewertung durchgeführt werden kann. Die Zielgrößen der Bewertung, die in derselben Datenbank wie die Programmstruktur und die Koppeltabellen hinterlegt sind, werden aus den Lastenheften, unternehmensinternen Richtlinien oder gesetzlichen Randbedingungen erzeugt und befinden sich in permanentem zeitlichen Fluss. Eine Bewertung kann einerseits innerhalb der CAE-Tools erfolgen, andererseits in einem Datenblatt.

Durch die Internationalisierung der Märkte sowie unterschiedlichen Kundenanforderungen und gesetzlichen Richtlinien ergeben sich daher verschiedene Einschränkungen und Randbedingungen, die im und teilweise nach dem Entwicklungsprozess Berücksichtigung finden müssen. Hierzu werden die Simulationsergebnisse auf die Einhaltung von unterschiedlichen Kriterien überprüft und in einem Fahrzeugdatenblatt markiert, so dass ein Vergleich der funktionalen Eigenschaften eines Fahrzeugs anhand verschiedener Randbedingungen erfolgen kann. Möglich ist sowohl eine einzelne als auch eine mehrdimensionale Bewertung von Entwürfen, die dann z.B. die gesetzlichen Kriterien mit den Kriterien durch Kundenvorgaben kumuliert. Beispiele hierfür sind die Bewertung von Wende- und Spurbereichen eines Gesamtfahrzeugs anhand unterschiedlichster regionaler Randbedingungen oder die konzerninterne Bewertung der stationären Wanksteifigkeit mit den gesetzlichen Vorgaben. Die Bewertungskriterien selbst werden in drei verschiedene Kategorien eingeteilt:

- Kriterien des Lasten-/Pflichtenheftes (sofern formuliert)
- Kriterien durch interne Richtlinien (auch mitarbeiterbezogen)
- Kriterien des Gesetzgebers (regionale Kriterien)

Obligatorisch an der vorgestellten Methodik ist, dass die Pflege der Kriteriendatenbanken in der industriellen Praxis sehr aufwändig ist. Lassen sich Vorgaben der Gesetzgeber relativ gut nachvollziehen und warten, so sind unternehmensinterne Vorgaben und Richtlinien oftmals nicht formuliert, sondern als personengebundenen tacit Wissen innerhalb der Konstruktions-, Berechnungs- und Versuchsabteilungen vorhanden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Dissertation die technisch-methodischen Randbedingungen geschaffen. Eine Sammlung von Kriterien konnte jedoch nur an ausgewählten Stellen erfolgen. Aktuell erfolgt bei MAN eine interne Erhebung genau dieser Auslegungskriterien basierend auf den Fahrzeugfunktionalitäten, die im gesamten Unternehmen an besagten Stellen stattfindet und in naher Zukunft in die Simulationsbewertung einfließen soll. Die Verwaltung der Kriterien erfolgt an selber Stelle in der globalen Datenbasis des SDMS, so dass ein Mapping der Simulationsergebnisse der einzelnen CAE-Tools mit der Kriteriendatenbank erfolgen kann, was schließlich eine automatisierte Bewertung ermöglicht.

### 5.3.4 Ergebnisverwaltung

Die letzte vorgesehene Komponente des Datenverbundkonzeptes besteht aus der Ergebnisverwaltung, die den Simulationsläufen von Bauteilen, Baugruppen und Gesamtfahrzeugen ein im PDM-System vorhandenes CAD-Pendant zuordnet. Aufgrund der erläuterten PDM-Entscheidung im Unternehmen konnte im Rahmen des Projektes keine Kopplung an bestehende Produktdatensysteme erfolgen, so dass im ersten Schritt eine zentrale dateibasierte Ablage erfolgt. Die Überwachung und Archivierung der Ablage erfolgt über Datentabellen, die dann den Simulationsergebnissen ein Bauteil oder Fahrzeug zuordnen. Das in Kapitel 6.2 vorgestellte SDM-System, in dem die simulationsrelevanten Daten von Bauteilen und Baugruppen hinterlegt sind, wurde für die interimswise Verwaltung von Simulationsdaten vorgesehen, so dass unabhängig von einem PDM-System zu den entsprechenden vorhandenen Fahrzeugen und Komponenten Ergebnisse abgelegt werden können. Im einfachsten Fall wird hier das Berechnungsprotokoll an den Datensatz angefügt und die aus der Simulation gewonnenen physikalischen Eigenschaften hinterlegt, so dass sie für weitere Untersuchungen genützt werden können. Speziell aus den CAE-Tools zur Bauteilsimulation können hier, unter der Voraussetzung der entsprechenden Berechtigung, Daten bidirektional sowohl ausgelesen als auch in die Datenbank zurückgespeichert werden. Auf diese Weise lassen sich für prototypische Untersuchungen schnell neue Bauteile in den Gesamtfahrzeugsimulationen nutzbar machen.

Für zukünftige PDM/PLM Entscheidungen ist innerhalb der Datenbankstruktur eine Verknüpfung mit den PDM-System vorgesehen, so dass die Simulationsergebnisse in Form von standardisierten Reports und Bauteilparametern mit den CAD-Daten verknüpft werden können.

## 6 Umsetzung des Konzepts

Das Konzept zur ganzheitlichen Optimierung des Fahrwerksentwicklungsprozesses, das im vorangegangenen Kapitel abgeleitet wurde, soll im Folgenden anhand der identifizierten Schlüsselprozesse verifiziert werden. Zudem wird das im Hintergrund arbeitende Simulationsdatenmanagementsystem erläutert, das neben der Verwaltung von Simulationsdaten deren Mapping steuert sowie die CAE-Softwaresteuerung und die Ergebnisbewertung übernimmt. Die erwähnte Bereitstellung von CAE-Software im Unternehmen wird anhand der Simulationsplattform *SimNavigator* erläutert, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurde und seit 2008 bei MAN im Einsatz ist. Eingebettet wurden sämtliche Aktivitäten als Teilelemente in das Projekt *VirtualTruck*, das sich in einen basic- und einen advanced-Bereich gliedert und im Lauf dieser Dissertation entwickelt wurde. Gegenstand der Betrachtung in dieser Arbeit sind primär die Fahrwerkskomponenten und ihre Auslegung, so dass hier im Folgenden kein Anspruch auf ein vollständiges virtuelles Fahrzeug gelegt wird. Ein Fokus wurde auf die erläuterte Prozessdurchgängigkeit gelegt, die die beiden Bereiche miteinander verbindet und eine standardisierte Kommunikation ermöglicht. Nachfolgend sind wesentliche Elemente systematisch dargestellt:

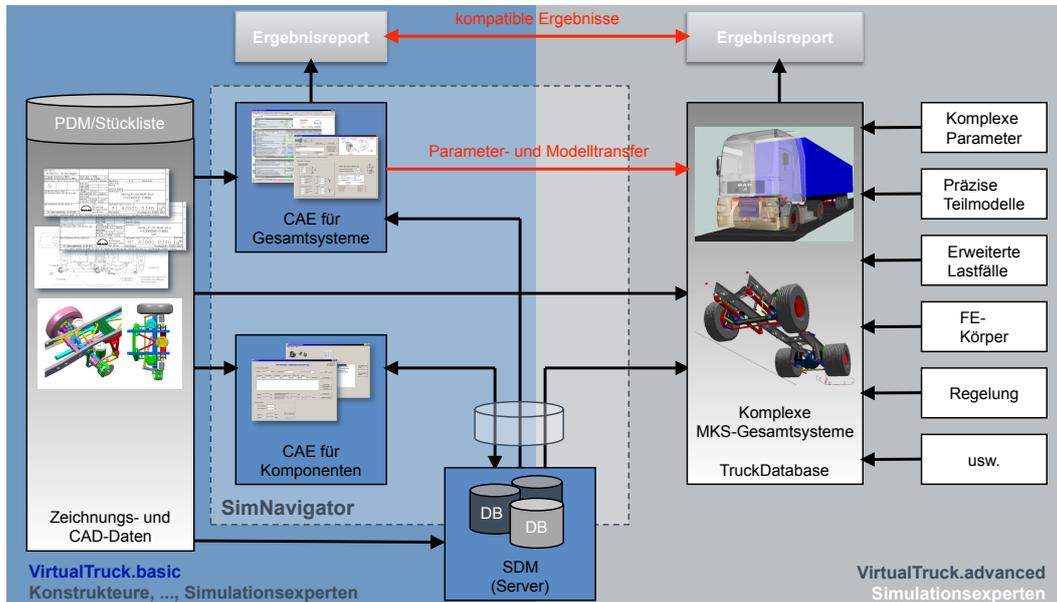


Abb. 6.1: Topologie des VirtualTruck (Teilelemente Fahrwerk)

Kern des VirtualTruck ist die Kompatibilität zwischen dem basic-Bereich links und dem advanced-Bereich rechts, die beide über ein SDM-System verbunden sind. Die simulationsrelevanten Komponenten und Baugruppenparameter können dabei über CAE-Tools erzeugt werden und über die Datenbank sowohl in den basic- als auch advanced-Gesamtfahrzeugmodellen genutzt werden. Überdies bleibt so bei einem Modelltransfer von der basic- in die advanced-Umgebung die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse gewährleistet. Die Mappingfunktion bietet zudem die Möglichkeit, basic-Modellparameter mit advanced-Modellparametern zu verknüpfen und so eine gemeinsame Datenbasis zu ermöglichen.

## 6.1 Simulationsplattform

Mit Bereitstellung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulationsplattform *SimNavigator* im Januar 2008 erfolgte der erste Schritt zur Konzentration und Verbreitung von CAE im Unternehmen. Das Konzept beruht auf einer graphischen Benutzeroberfläche, die neben einer Gliederung der Simulationswerkzeuge in Fahrzeugkomponenten eine Verbindung zum Simulationsdatenmanagementsystem aufweist. Zusätzlich zu den Programmverknüpfungen erfolgt eine Information der Anwender über Neuigkeiten in den Anwendungen, Dokumentationen und Handbüchern sowie Release Notes. Die Informati-

onsbereitstellung erfolgt zum einen durch eine gezielte Suchfunktion, auf der anderen Seite aber auch durch eine webseitenähnliche Browsingfunktion.

Die Benutzerverwaltung des Simnavigator gestattet neben den Einzelberechtigungen für die verschiedenen CAE-Anwendungen Gruppenrichtlinien, die eine Unterscheidung zwischen Konstruktions-, MKS- sowie weiteren frei definierbaren Anwendergruppen gestattet. Über den *SimNavigator* konnten so beispielsweise auch die userspezifischen MKS-Software-Installationen mit *SIMPACK* realisiert werden. Nachfolgende Abbildung zeigt die Benutzeroberfläche des *SimNavigators* nach Programmaufruf:



Abb. 6.2: Benutzeroberfläche der Simulationsplattform *SimNavigator*

Neben den Funktionalitäten der Benutzerverwaltung und den Programmaufrufen wurde eine Volltextsuche in der Programminformationsdatenbank implementiert, die es dem Anwender erlaubt, alle bestehenden CAE-Beschreibungen nach Schlüsselbegriffen zu durchsuchen. In der CAE-Dokumentation ist ebenfalls eine Verknüpfung zu den in der Software genutzten Datenbanken enthalten so dass, entsprechende Berechtigung vorausgesetzt, von hier ein direkter Zugriff erfolgen kann.

Mit der Simulationsplattform *SimNavigator* konnte gezeigt werden, dass die zentrale

Bündelung und Bereitstellung von CAE-Software erfolgreich im Unternehmen vollzogen werden kann und eine Verfügbarkeit bei großen Benutzergruppen gewährleistet ist. Die Anwender im Unternehmen erhalten über die Simulationsplattform erstmals einen Überblick, welche Simulationsmöglichkeiten auch außerhalb ihres Fachbereichs existieren, so dass hier Interessen geweckt werden. Dies lässt sich am besten durch ein Zitat eines Mitarbeiters aus der Achsentwicklung erläutern:

*“Ich wusste gar nicht, dass wir auch ein Simulationstool zur Berechnung der Schlepptangensteifigkeit haben. Kann ich das auch nutzen?”*

Neben den Berechnungs- und Konstruktionsabteilungen befindet sich das System auch in den Versuchsabteilungen im Einsatz, die so z.B. fehlende Messgrößen simulativ erzeugen können und Vorabuntersuchungen zu Versuchsszenarien sowie Plausibilitätschecks der Messungen durchführen. Der *SimNavigator* wird an MAN-Standorten in Deutschland, Österreich und Polen von aktuell über 100 Anwendern eingesetzt. Obwohl in den Jahren 2008 und 2009 keine Entwicklung einer neuen Fahrzeugreihe durchgeführt wurde, erfolgte im Durchschnitt über 100 Aufrufe im Monat, die sich seit Anfang 2009 auf einem gleichbleibend steigendem Niveau eingependelt haben und nachfolgend für den Zeitraum Juni 2008 bis Juni 2009 dargestellt sind. Mehrfachöffnungen an einem Tag durch einen Anwender wurden in der Auswertung ausgeschlossen.

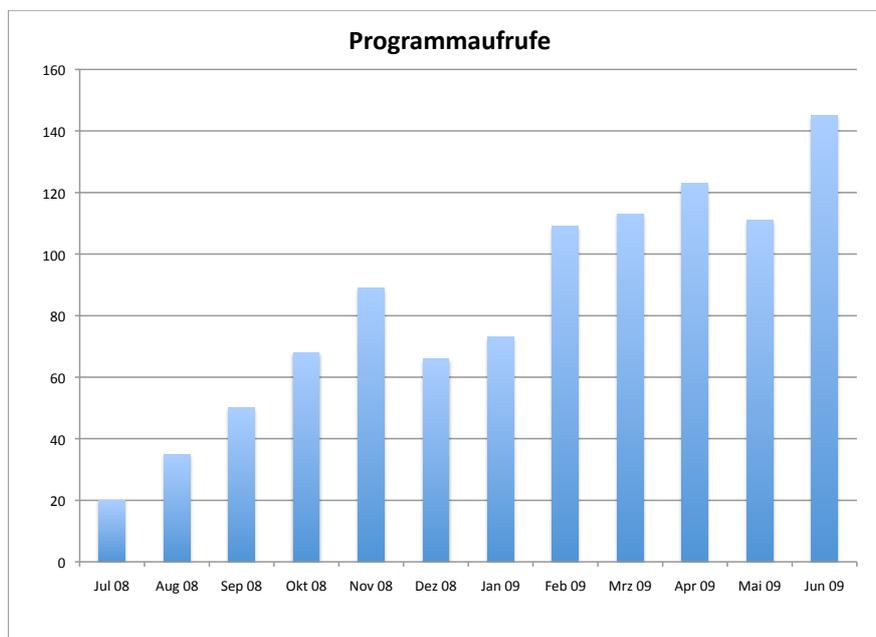


Abb. 6.3: Nutzungshäufigkeit SimNavigator

## 6.2 Simulationsdaten-Managementsystem - SDMS

Das Konzept zur Datenbereitstellung wurde im Rahmen dieser Arbeit in einer Benutzeroberfläche umgesetzt, die als lokale, serverbasierte Installation auf den Anwenderrechnern installiert wird und über den *SimNavigator* aufgerufen werden kann. Eine webbasierte Implementierung wurde zum einen aufgrund der geforderten Funktionalitäten, zum anderen aus Gründen der Kompatibilität zu den anderen CAE-Tools verworfen, die ebenfalls mit sehr ähnlicher Architektur und Programmiersprache entwickelt wurden, so dass gemeinsam Bibliotheken genutzt werden können. Der Datenkern des SDMS basiert auf einer ORACLE-SQL-Datenbank, die in der aktuellen Version über eine 2-Schicht-, zukünftig aber auch über ein 3-Schicht-Architektur angesprochen wird, um weltweit eine bessere Performanz zu erzielen.

### 6.2.1 Architektur

Um auf die im Fluss befindliche CAx- und PDM/PLM-Landschaft reagieren zu können, ist eine gekapselte Architektur jedes beteiligten Systems des SDMS erforderlich. Es gliedert sich in den Programmkern, die Datenbankbindung, Import- und Exportschnittstellen sowie eine PDM-Schnittstelle, die sich alle im Bedarfsfall modular ergänzen und austauschen lassen, so lange die Schnittstellenkonventionen eingehalten werden. Die Schnittstelle zur Datenbank erfolgt über eine gekapselte Bibliothek (DLL<sup>1</sup>), die von der Datenbanksprache SQL<sup>2</sup> in die objektorientierte, schnittstellenkonforme SDMS-Sprache übersetzt und für alle Datenbankoperationen wie Lesen, Schreiben, Löschen, etc. zuständig ist. Auf diese Weise kann neben der 2-Schicht- auch eine 3-Schicht-Architektur realisiert werden, da dort lediglich eine weitere Datenbank-DLL an das SDMS angekoppelt wird, über die die Datenbankabfragen und Befehle abgesetzt werden. Für weitere Informationen bezüglich der Kopplung von Anwendungssoftware an Datenbanken (2-/3-Schicht-Architektur) sei hier an [Ste03] verwiesen.

---

<sup>1</sup>Dynamic Link Library

<sup>2</sup>Structured Query Language

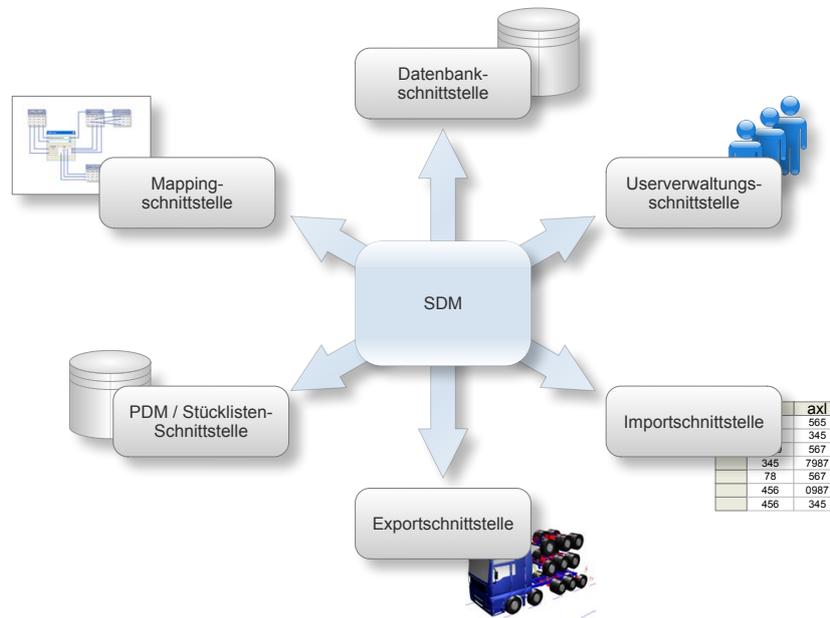


Abb. 6.4: Schnittstellen des SDM

Die Import-Export-Schnittstellen des SDM-System erlauben neben dem ASCII-Format basierten Export von Kennlinien und Kennfeldern einen gezielten Datensatzexport durch vordefinierte Schnittstellenmodule, die Daten in den entsprechenden Zielsystemen exportieren und importieren können. Hierzu wird das in der Datenbank hinterlegte Mapping (vgl. hierzu Kapitel 6.2.4) auf das Zielsystem genutzt, um Daten im entsprechenden Format auszugeben. Eigenentwickelte CAE-Programme können direkt über die DLL sowie das entsprechende Mapping Datensätze aus dem SDMS abrufen und dem Anwender zur Verfügung stellen. In kommerziellen Anwendungen werden Parameterdateien der entsprechenden Modellelemente erzeugt, wobei hier auch proprietäre Schnittstellen angekoppelt werden können, da diese als Plugin-Module geladen werden können. Die PDM-Schnittstelle stellt, wie in Kapitel 6.2.5 erläutert, die Datenvalidität sicher, indem sie Stücklisten- und PDM-Daten ankoppelt.

## 6.2.2 Basisfunktionen

Die Benutzeroberfläche des SDMS informiert den Anwender bei Programmstart über Änderungen, die sich in seinem Zuständigkeitsbereich entsprechend der vergebenen Tabellenberechtigungen und Verantwortlichkeiten befinden und fordert zur Überprüfung

von veralteten Datensätzen sowie zur Pflege neuer Datensätze auf. Die Darstellung der Fahrzeugdaten erfolgt in einer Baumstruktur, die sich entsprechend den Anwendergruppenanforderungen anpassen lassen und bildet das relationale Grundgerüst des Fahrzeugs. Entsprechend der Zweige der Baumstruktur erfolgt eine Darstellung der einzelnen Datensätze von Hauptbaugruppen, Baugruppen und Basisteilen, die selektiert und visualisiert werden können. Abbildung 6.5 zeigt die Baumstruktur eines Achseinbaus in der Benutzeroberfläche mit selektierter Blattfeder (grüner Haken).

Über die Auswahl einer Fahrzeugkomponente kann dann die Selektion eines Datensatzes erfolgen, dessen Parameter entsprechend der Benutzersicht und Berechtigung im Hauptfenster visualisiert werden. Hierzu zählen neben numerischen Werten auch Kennlinien, eine Beschreibung sowie die bei Baugruppen auftretende relationale Verknüpfung mit Bauteilen. Zusätzlich können Dateien, die z.B. Kennfelder oder Dokumentationen enthalten, an den Datensatz angehängt werden, damit diese dann in CAE-Werkzeugen genutzt werden können. Ein Beispiel hierfür sind Verbrauchskennfelder und Getriebewirkungsgradkennfelder, die für die längsdynamische Simulation von Fahrzeugen benötigt werden. Nachfolgend ist das Hauptfenster des SDMS mit ausgewähltem Blattfederdatensatz und Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Auf die Darstellung des Blattfederdickenverlaufs der selektierten Parabelfeder wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

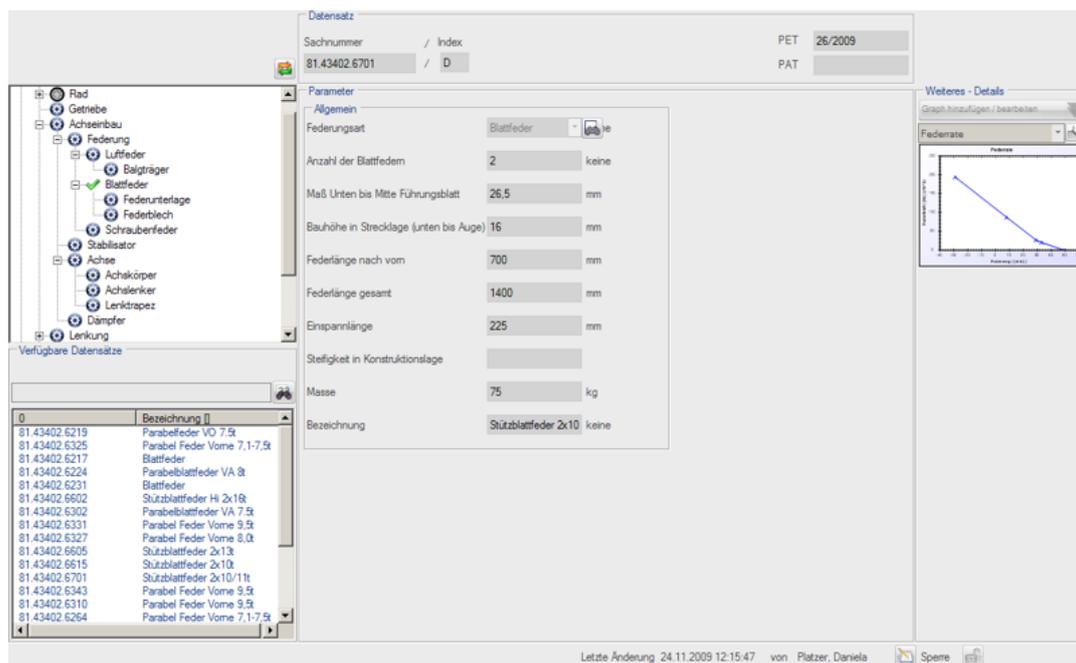


Abb. 6.5: Hauptfenster des SDM mit selektierter Blattfeder

Neben der Darstellung der Fahrzeugdaten über die Baumstruktur lassen sich die heute in der Datenbanktechnik üblichen Filterfunktionen zur gezielten Suche nach Datensätzen über Fahrzeuggruppen hinweg durchführen.

Die Bauteilparameter sind in unterschiedliche, frei definierbare Perspektiven und Klassen gegliedert, die den entsprechenden Nutzergruppen zugeordnet sind und unterschiedliche Sichtweisen auf die Datensätze ermöglichen. Folglich sieht ein Konstruktionsanwender im Regelfall nur die in seiner „Welt“ definierten Bauteilparameter, die auch gleichzeitig den Basisdatensatz bilden und neben geometrischen Parametern physikalische Eigenschaften wie Steifigkeiten oder Dämpfungen enthalten. Die Pflege der Daten erfolgt primär aus Konstruktionsicht, die dann sukzessive durch Simulationsspezialisten erweitert werden können.

### 6.2.3 Berechnungslogik

Die in Kapitel 5.1 erläuterte Berechnungslogik zur Einheitenkonvertierung, Koordinatentransformation und Eigenschaftsberechnung kann für jedes Bauteil und jede Baugruppe über die Hilfstabellen „*[Tabellename]*#Calc“ definiert werden. Zum einen können Berechnungen innerhalb der Tabelle, zum anderen über mehrere relationale Tabellen hinweg erfolgen, die in beiden Fällen über übliche mathematische Operatoren definiert werden. Die Relationalität der Berechnung wird über das Symbol „@“ gekennzeichnet und über den entsprechenden Primärschlüssel im Berechnungsstring definiert. Ein Beispiel hierfür ist das über die relationale Tabelle (Achse) hinweg berechnete wirksame Hebelverhältnis  $i_R$  des vorderen zum hinteren Luftfederbalg, das in der Baugruppe Achseinbau benötigt wird:

$$i_R = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{l_R}{l_F + l_R}\right)$$

Es liegt in folgender Syntax in der Datenbank vor:

```
0.5*(1-'LEVERARMREAR@AXLE_ID'/'LEVERARMFRONT@AXLE_ID'+'LEVERARMREAR@AXLE_ID')
```

Neben der Berechnung können aus Konsistenzgründen Bedingungen (Conditions) definiert werden, ohne deren Erfüllung keine Verarbeitung erfolgt. Voraussetzung für die Berechnung der Hebelarmverhältnisse ist im konkreten Fall ein positiver Wert für den vorderen und hinteren Hebelarm, der wie folgt angegeben wird:

```
'LEVERARMFRONT@AXLE_ID'>0 AND 'LEVERARMREAR@AXLE_ID'>0
```

Basierend auf den Hebelarmverhältnissen können bei entsprechender Achslast die Federsteifigkeit und der Druck der Luftfederbälge berechnet werden. Die Auswertung (parsen)

des Berechnungsstrings erfolgt über das SDMS und läuft beim Speichern oder Aktualisieren von Datensätzen ab. Durch die Verwendung von mehrstufigen Berechnungsschritten und diverser mathematischer Operatoren, unter denen auch trigonometrische und komplexe Funktionen vorkommen können, wird die Voraussetzung geschaffen, unterschiedliche Simulationsdisziplinen mit verschiedenen Sichtweisen zu bedienen. Die Formulierung dieser Berechnungsvorschriften erfolgt durch die entsprechend berechtigten Anwender über eine Benutzeroberfläche.

#### **6.2.4 Mapping von Daten**

Zentrale Funktionalität des SDMS ist das Mapping von Datenbankparametern mit beliebigen CAE-Parametern. Die Verwaltung der Mapping-Daten erfolgt in der SDM-Datenbank über eine Benutzeroberfläche, in der eine Zuordnung durch den Anwender durchgeführt werden kann. Auf diese Weise gelingt es, eigen entwickelte CAE-Software direkt an die Datenbank anzukoppeln, indem die Grunddaten eines Datensatzes wie Bezeichnung, Bauteilnummer und Revisionsnummer vom Anwender ausgewählt werden können und daraufhin die eigentlichen Bauteilparameter des Datensatzes in die entsprechenden CAE-Parameter geschrieben werden. Die Benutzeroberfläche des SDM erlaubt eine 1:1 oder 1:n Zuordnung von Parametern in der Datenbank mit den CAE-Parametern, die nachfolgend abgebildet ist:



### 6.2.5 PDM-Schnittstelle

Die IT-Landschaft eines Unternehmens, die einem kontinuierlichen Fluss unterworfen ist und heterogene Anwendungen beinhaltet, stellte enge Randbedingungen für die Entwicklungen von Systemen, die innerhalb dieser Grenzen interagieren. Basierend auf bestehenden Stücklistensystemen und PDM-Lösungen muss für das SDM eine aus der Simulationswelt betrachtete optimale Ankopplung erfolgen. Theoretisch bedeutet dies, bestehende Bauteile und Baugruppen in ihrer Änderung zu verfolgen, um die Validität der Daten sicherzustellen und im Fluss befindliche CAD-Daten so abzugreifen, dass sie direkt für die Simulation genutzt werden können. Praktisch gesehen kann aus den in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Gründen kein vollständig automatisiertes Mapping zwischen CAD- und CAE-Daten erfolgen, so dass hier mit bestehender MAN-Landschaft vorerst nicht auf manuelle Datenpflege verzichtet werden kann. Aus diesem Grund erfolgte im SDMS vorerst nur eine modulare Kopplung an das Stücklistensystem über eine DLL. Dieses prüft zum einen bestehende Datensätze auf Aktualität und informiert den Tabellenverantwortlichen über Änderung des Index, zum anderen wird bei Neuanlage eines Datensatzes überprüft, ob es sich dabei um einen Prototypendatensatz handelt, der gesondert gekennzeichnet wird.

Über die selbe Schnittstellenmethodik können zukünftig an die vorgesehenen Stücklisten- und PDM-Systeme verbunden werden und, entsprechende Konstruktionsrichtlinien vorausgesetzt, CAD-Daten für die Simulation aufbereitet werden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Methodik der Simulationsdatenbereitstellung unabhängig von zukünftigen Systemen abläuft und in neutralen Datenformaten, wie sie in Kapitel 2.5.2 erläutert sind, gelesen und geschrieben werden kann.

### 6.2.6 Userverwaltung

Anwenderberechtigungen können im SDMS entweder personen- oder gruppenbezogen vergeben werden. Die Gruppengestaltung und die enthaltenen Berechtigungen der Gruppe sind dabei frei wählbar und im Regelfall auf Fahrzeugkomponenten bezogen. Im ersten Schritt wurden Fahrwerks-, Kühlungs- und Antriebsstranggruppen eingeführt, die entsprechende Leseberechtigungen innerhalb der betroffenen Baugruppen besitzen. Neben den Gruppenberechtigungen werden personenbezogene Berechtigungen vergeben, die sich in Lese-, Schreib- und Tabellenmanagerberechtigungen gliedern. Managerberechtigungen erlauben zusätzlich das Anlegen neuer Datenfelder oder Kennlinien innerhalb der Tabelle sowie ein Hinzufügen von weiteren Anwendern mit Lese- und Schreibberechtigungen. Überdies erhalten der oder die Manager in Eskalationsstufen gestaffelte, bereits erwähnte Meldungen zu veralteten Datensätzen sowie die Mappingfunktionalitäten zwischen SDMS und CAE.

### 6.2.7 Fazit

Mit dem in dieser Dissertation erarbeiteten MAN-SDMS konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, ein zentrales System zur Verwaltung von Simulationsdaten und Parametern, das zusätzlich Mappingfunktionen übernimmt und CAE-Modelle sowie CAE-Software steuert, zu realisieren und die konzeptionellen Überlegungen aus den vorherigen Kapiteln zu bestätigen. Es konnte beobachtet werden, dass sowohl das erste prototypische SDMS mit einfacher Tabellenverwaltung als auch das aktuell im Einsatz befindliche ORACLE-SQL basierte SDMS zusätzlich zu einem Nachschlagewerk innerhalb des Unternehmens geworden ist, da es technische Bauteil- und Baugruppeninformationen sehr stark kondensiert und bündelt. Ein Beispiel hierfür ist die durch die Konstruktionsabteilungen erfolgte Anlage von über 1700 Datensätzen mit Lenkungseinbauten, die als Varianten- und Wissenspool genutzt werden, da diese Informationen aufgrund der vorherrschenden Dokumentation auf 2D-Zeichnungen in dieser Konstellation aktuell nicht über CAD oder Stückliste abbildbar sind. Nicht zu vernachlässigen ist der aktuell erforderliche Pflegeaufwand für die Daten durch die Konstruktionsabteilungen, der sich zwar durch die Arbeitsteiligkeit und Granularisierung in Grenzen hält, im Tagesgeschäft der Serienentwicklung jedoch einen nicht zu vernachlässigenden Faktor bedeutet. Unklar ist bis dato auch, wie sich die Aufwände für die Datenpflege des SDM auf der einen Seite und den zukünftig geplanten Konstruktionsrichtlinien auf der anderen Seite verhalten, welche dann ein gewisses Maß an Automation erlauben würden.

## 6.3 Anwendungsfälle für die CAE-Tools

Die Workflowschritte in der Fahrwerksentwicklung von Nutzfahrzeugen und die daraus abgeleiteten Schlüsselprozesse/Workflows des Achs- und Lenkungseinbaus wurden im Rahmen dieser Arbeit mit den erläuterten Konzepten der unternehmensweiten Nutzbarmachung von CAE sowie dem Datenverbundkonzept in mehreren CAE-Werkzeugen realisiert. Eine Implementierung erfolgt für eine reduzierte Gesamtfahrzeugsimulation primär mittels vorgestellter MKS-Methodik (vgl. Kapitel 5.2.1), da analytische Verfahren hier, trotz der in Abschnitt 3.2 erläuterten Toleranzpotentiale, speziell bei Betrachtungen der Toleranzgrenzen zu ungenaue Ergebnisse liefern würden (vgl. Anhang). Notwendige Grundlagen für die Entwicklung der CAE-Tools sind zum einen die genauen Kenntnisse der üblicherweise durchlaufenen Prozessschritte und Anforderungen, zum anderen eine enge Zusammenarbeit sowie kontinuierliche Abstimmung mit zukünftigen Anwendern. Notwendig ist dies, da die CAE-Werkzeuge die beschriebenen, häufig durchlaufenen Entwicklungsschleifen zwischen Konstruktion und Simulation substituieren sollen, indem Standardauslegungsaufgaben mit der Aussagekraft numerischer Simulationsmethoden direkt in den Konstruktionsabteilungen erfolgen können. Die Entwicklung aller CAE-Werkzeuge gliederte sich hierbei in zwei Schritte. Zum einen in die Entwicklung der

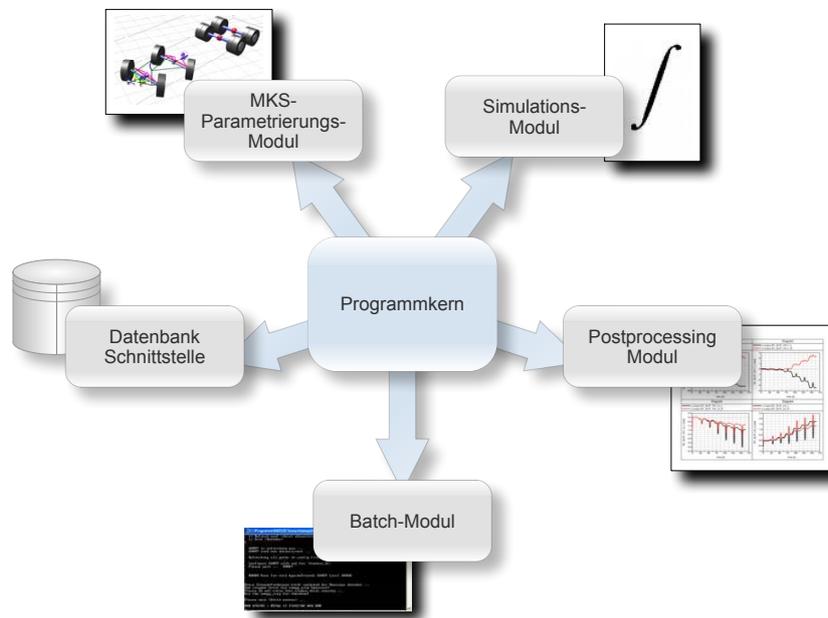
numerischen oder analytischen, allgemeingültigen Modelle und zum anderen in die Benutzeroberflächen, die so gestaltet wurden, dass die erwähnten Risiken minimiert wurden und eine Parametrierung und Ergebnisinterpretation möglichst einfach durchgeführt werden kann.

### 6.3.1 Lenkung

Die Prozessschritte der Lenkungsentwicklung, die bei genauerer Betrachtung diverse Modelle erforderlich machen würden, um Lenktrapeze, Lenkanlagen von Zwei- oder Mehrachsfahrzeugen sowie Laufachsenlenkung abzubilden, bieten sich, wie in Kapitel 4.1.3 erarbeitet, bei Beherrschung der Komplexität sehr gut für die Prozesssubstitution an. Zur Substitution dieser Prozessschritte bietet sich die Entwicklung mehrerer auf gleichen Substrukturen basierenden MKS-Modelle an, die schlussendlich von einer Benutzeroberfläche gesteuert werden. Vorteil zur analytischen Betrachtung ist neben der Einbindung eines Reifenmodells die Betrachtung der resultierenden Kräfte und Momente, die beim Einlenken des Gesamtfahrzeugs entstehen. Das in dieser Arbeit entstandene CAE-Werkzeug *SimuLENK* wurde in seiner letzten Version nach der beschriebenen Methodik des Datenverbundkonzeptes aufgebaut, das neben der Mappingfunktionen zwischen CAE und Datenbank sowie dem dynamischen und halbdynamischen Benutzeroberflächenaufbau auch Bewertungen im Postprocessing übernimmt. Hierbei sollte konsequent darauf geachtet werden, dass so viele Parameter wie möglich über die Datenbanken geladen werden, um den Anwendern einerseits eine Möglichkeit des Komplexitätshandlings bereitzustellen, andererseits Fehlerquellen weitestgehend auszuschließen. Die Anbindung an die Datenbank erfolgt über die in Kapitel 6.2 erläuterten Datenbankmodule, die in gleicher Form auch für das SDM-System genutzt werden. In der aktuellen Version werden nachfolgende Datenbanken zur Parametrierung genutzt:

- Reifendatenbank
- Achsdatenbank (Lenktrapezkoordinaten)
- Fahrerhauskonturdatenbank
- Lenk- und Spurstangen-Datenbank (Beta Test)

*SimuLENK* besteht wie das SDMS aus einem Programmkern sowie Elementen zur Parametrierung, Simulationssteuerung, Postprocessing und der Ergebnisdarstellung (Reporterstellung). Zusätzlich zu diesen Elementen kann der Programmkern in einem Hintergrundmodus (Batch-Modul) ausgeführt werden, so dass Berechnungsläufe automatisiert über das SDMS erfolgen können (Vgl. Abbildung 6.7).

Abb. 6.7: Software-Elemente von *SimuLENK*

Für *SimuLENK* wurde ein Detaillierungskonzept der Simulationsmodelle entworfen, das von rudimentären kinematischen Analysen zur konzeptionellen Untersuchung in den sehr frühen Phasen des PEP bis zur Gesamtfahrzeuganalyse in den nachgelagerten Entwicklungsprozessschritten reicht. Die bei der Schlüsselprozessanalyse gewonnenen Erkenntnisse durch das Prozessmodell, die unter anderem Analysen der Lenktrapeze, Lenkanlagen und Gesamtfahrzeugauswirkungen bzgl. der Wendigkeit und Lenkbarkeit erforderlich machen, wurden schrittweise in das CAE-Konzept integriert und stellen heute ein Standardwerkzeug bei MAN dar. Nachfolgende Analysefunktionen werden von *SimuLENK* in der derzeitigen Version abgedeckt und stellen gleichzeitig einen standardisierten Referenzlastfallkatalog dar:

- Lenktrapezanalyse (kinematisch, elastokinematisch)
- Lenkverhalten Gesamtfahrzeug (Wendigkeit, Reifenverschleiß)
- Lenkverhalten aktiv- und adhäsionsgelenkter Laufachsen (Reifenverschleiß, Wendigkeit)
- Kurveneinlaufverhalten (Heckauslenkung, Busnachläufer)
- Lenkanlagen (kinematisch, elastokinematisch, Kräftebetrachtung, Missbrauchsanalyse)

Durch die vom Anwender nutzbaren verschiedenen Detaillierungsstufen ergibt sich ein Einsatzspektrum, das von dem sehr häufig durchlaufenen Prozess der Fahrgestellzeichnungserstellung bis zur Neuauslegung von Lenkanlagen und Laufachsregelungen reicht. Wichtige Voraussetzung hierfür ist allerdings das Vorhandensein der entsprechenden Lenkungsbauteilparameter oder eine beherrschbare Methodik zur Erzeugung. Die geometrischen Eigenschaften der involvierten Elemente werden, so haben Beobachtungen ergeben, von Konstruktionsseite als gut beherrschbar betrachtet, so dass die auf Datenbankparametern basierende Analysen mit variierender Geometrie erfolgen. Ein Beispiel für einen notwendigen Preprocessing-Schritt ist die Erzeugung von Kraft-Weg-Kennlinien von Lenkungsbauteilen wie Spurstangen und Schubstangen, um elastokinematische Analysen durchzuführen. Bei vorhandenen Bauteilen können diese Kennlinien üblicherweise durch den Hersteller bezogen werden, bei prototypischen Bauteilen müssen sie rechnerisch erzeugt werden. Aus diesem Grund kann für diesen Bedarf ein analytisches CAE-Tool zur linearisierten Steifigkeitsberechnung von geraden und gekröpften Zug- und Druckstäben genutzt werden, um beispielsweise Durchmesser, Wandstärke oder Geometrie des Lenkgestänges zu variieren und die Auswirkungen auf das Lenk- und Verschleißverhalten des Gesamtfahrzeugs abzuschätzen.

Um die gesamte MAN-Fahrzeugpalette simulativ abzudecken, mussten in den MKS-Modellen fünfsachsige Fahrzeuge mit bis zu drei gelenkten Achsen vorgesehen werden, die mit oder ohne Antrieb, mit verschiedenen Lenktrapezen und unterschiedlichen Bereifungen konfiguriert werden können. Das dafür notwendige Universalmodell enthält alle theoretisch möglichen Kombinationen an Achskonfigurationen und Lenkanlagen und wird analog der Parametrierung durch die Benutzeroberfläche in der entsprechenden Kombinatorik zusammengestellt. Nachfolgende Abbildung veranschaulicht die kombinatorischen Optionen eines Fahrzeugs mit Nachlaufachse. Zu beachten ist, dass Vorder- und Triebachsen im aktuellen MAN-Produktportfolio bis zu zweimal pro Fahrzeug<sup>3</sup> verbaut werden, Laufachsen einmal. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht eine mögliche Kombination, die aus den verschiedenen im MKS-Modell enthaltenen Subsystemen gebildet werden:

---

<sup>3</sup>Beispiel: 8x4 Fahrzeuge mit zwei gelenkten Vorderachsen und zwei Triebachsen

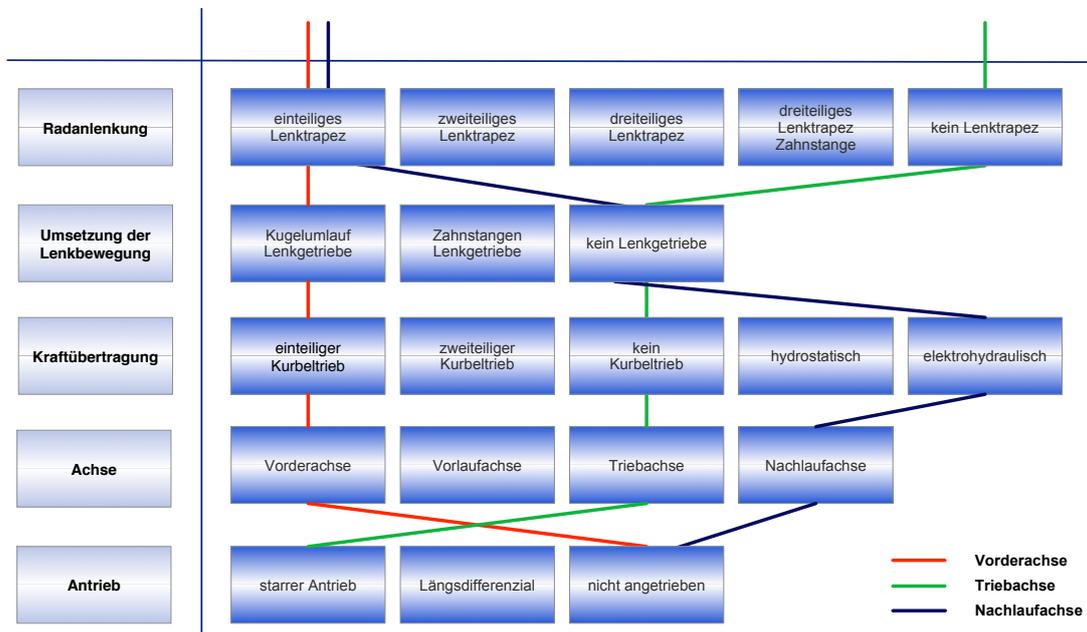


Abb. 6.8: Kombinatorik eines dreiachsigen LKW mit gelenkter Nachlaufachse

Ein weiterer Aspekt der Entwicklung war die CAE-CAE-Prozessdurchgängigkeit, um die nicht ersetzbaren Simulationsprozesse, die über die Berechnungsabteilung im konkreten Fall von MKS-Spezialisten durchgeführt werden, zu gewährleisten. Jedes im Hintergrund über Code-Export genutzte *SimuLENK*-MKS-Modell lässt sich für weitere Untersuchungen exportieren und simulationsfertig parametrisiert in der MKS-Umgebung öffnen, so dass ein verlustfreier Schnittstellenübergang gewährleistet ist. Im praktischen Einsatz erfolgt hier zumeist eine Parametrierung durch den Konstrukteur, der dann für weitere nicht standardisierte Analysen oder nicht implementierte prototypische technische Lösungen die *SimuLENK*-Projektdatei an die Berechnungsabteilung übergibt. Vorteil hieran ist die prozessdurchgängige, bidirektionale Betrachtung von Gesamtfahrzeugeigenschaften ab der ersten Entwicklungsphase, da die sonst aus den frühen Konzeptphasen gewonnenen Erkenntnisse nicht oder nur ansatzweise in parametrisierte Modelle eingeflossen sind.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt im Postprocessing-Modul, das auf in der Datenbank hinterlegte Referenzwerte zur Bewertung der Simulationsergebnisse zurückgreift. Eine standardisierte Darstellung der Ergebnisse und Bewertungen ausgewählter Größen erfolgt im Tabellenkalkulationsprogramm Excel, da dieses auf jedem Rechner im Unternehmen standardmäßig verfügbar ist. Auf diese Weise lassen sich bereits ab der Konzeptphase standardisierte Aussagen zu technischen Lösungen erzeugen, die auch zu späteren Entwicklungsphasen aufgrund der beschriebenen Parametrierungssystematik

reproduzierbar sind.

Mit dem CAE-Tool *SimuLENK* konnte in der industriellen Praxis gezeigt werden, dass die Methodik zur Bereitstellung und Nutzung der numerischen Simulationstechnik MKS in Konstruktionsabteilungen möglich ist und auch ein großes Maß an Akzeptanz erfährt. Die erarbeiteten Konzepte zur Datenversorgung senken die Komplexität soweit, dass die Methodik als sicherer Entwicklungsbaustein im PEP integriert werden konnte. Ebenso können für zukünftige Fahrzeuggenerationen Variantenuntersuchungen effektiv, zeitnah und auch automatisiert durchgeführt werden, so dass dadurch eine bessere Komplexitätsbeherrschung möglich wird. Neben diesen quantifizierbaren Eigenschaften konnte durch den bisherigen Einsatz von *SimuLENK* im Unternehmen ein stetig steigendes Interesse an Simulation sowie eine kontinuierliche Verbesserung des Systemverständnisses beobachtet werden. Die Interpretation erfolgte aufgrund der stetigen Forderung der Anwender nach mehr Funktionalitäten und Ausgabegrößen sowie den Bedarf an weiteren CAE-Tools, aufgrund dessen z.B. eine zukünftige Integration der Blattfeder-Momentanpolsimulation angestrebt wird (vgl. hierzu Anhang).

Hingewiesen wird an dieser Stelle auf den nicht zu vernachlässigenden Schulungs- und Supportaufwand sowie die eigentlich notwendige Entwicklungstätigkeit der Modelle und Benutzeroberflächen. Für beide Tätigkeiten ist dabei in etwa der gleiche zeitliche Aufwand einzukalkulieren, wobei zu berücksichtigen ist, dass der Modellaufbau bedingt durch die Abbildbarkeit nahezu aller möglichen Fahrzeugvarianten deutlich aufwändiger ist als bei konventioneller Modellierungsstrategie. Aus diesen Gründen wurden auch nur aktuelle und zu erwartende<sup>4</sup> technische Lösungen implementiert, da hier eine klare Abgrenzung zum Innovationsprozess über die MKS-Umgebung und Berechnungsabteilung, respektive dem VirtualTruck advanced Bereich (siehe Abbildung 6.1), erfolgt.

### 6.3.2 Achseinbau

Neben dem beschriebenen Lenkungsentwicklungsprozess sind die Schritte zur Analyse und Absicherung des Achseinbauprozesses der zweite zentrale Aspekt der Fahrwerksentwicklung von Nutzfahrzeugen. In den Fokus rücken hierbei sehr häufig die Auswirkungen einzelner Achseinbauten auf das Verhalten des Gesamtfahrzeugs sowie die gegenseitige Beeinflussung der Achsen. Beispiele hierfür sind die Achslastverteilung von echten<sup>5</sup> stahlgedederten Drei- und Vierachsfahrzeugen oder die Lastverhältnisse zwischen luftgedederten Trieb- und Laufachsen, die entweder über die kraftwirksamen Flächen der Luftfederbälge oder Druckdifferenzventile dargestellt werden und in beiden Fällen nicht über eine Linearisierung analysiert werden können. Eine Prozesssubstitution ist, wie bereits erörtert, vor allem bei der Gesamtfahrzeugbetrachtung besonders effektiv, da hier

<sup>4</sup>Theoretisch möglich sind z.B. Lenkungslösungen mit Zahnstangenlenkung

<sup>5</sup>Gemeint sind hier Fahrzeuge ohne Pendelausgleich zwischen den Triebachsen

die Komplexität aller beteiligten Systeme ein bereits schwierig zu beherrschendes Ausmaß erreicht hat. Notwendige Voraussetzung für diese Betrachtungen ist wie bei der Lenkung auch ein Preprocessing von Komponenten, um diese vor allem bei Prototypenständen im Gesamtfahrzeug berücksichtigen zu können. Die Ergebnisse der Preprocessingworkflows können entweder direkt oder über die Datenbank in *SimuLAST* importiert werden und sind in nachfolgender Abbildung verdeutlicht:

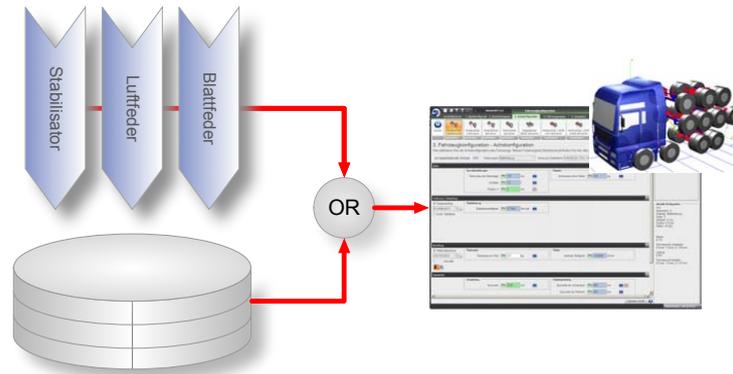


Abb. 6.9: Preprocessing der Gesamtfahrzeugsimulation

Zur Umsetzung erfolgte im Rahmen der Dissertation die Analyse des Prozessmodells und eine Ableitung eines universellen MKS-Modells, das von der Benutzeroberfläche des CAE-Werkzeugs *SimuLAST* angesprochen wird und genau wie *SimuLENK* nach dem Datenverbundkonzept konzipiert wurde. Die Benutzeroberfläche von *SimuLAST* wird nahezu vollständig dynamisch durch die Datenbank aufgebaut, was ein schnelles und variables Mapping von Datenbankparametern mit dem Simulationsmodell ermöglicht. Ebenso wurde das Konzept der Datenbankparametrierung zur Komplexitätsminimierung konsequent verfolgt, so dass neben allen Komponenten auch existierende Achseinbauten geladen werden können. Nachfolgende Datenbanken können vom Anwender angesprochen werden:

- Reifen/Räder,
- Stabilisatoren,
- Schwingungsdämpfer,
- Schraubenfedern,
- Blattfedern,
- Luftfedern,

- Achseinbauten.

Aufgrund der Unvollständigkeit der Datenbasen können aktuell noch keine Gesamtfahrzeuge automatisiert aus dem SDMS zusammengestellt werden, die Funktion ist jedoch vorgesehen und technisch bereits jetzt möglich. Die Programmarchitektur in *SimuLAST* ist der beschriebenen *SimuLENK*-Architektur sehr ähnlich, da sie hier auch in modulare Komponenten gegliedert ist. Eine Erläuterung der Programmkomponenten, die im Falle der Simulationssteuerung, Datenbankanbindung und dem Batch-Modul sogar identisch sind, kann Abbildung 6.7 entnommen werden.

Die Modellierungsstrategie umfasst alle aktuell im MAN-LKW-Produktportfolio vorkommenden Achskonzepte, die in einem gemeinsamen MKS-Modell integriert wurden. Neben der Unterscheidung Blatt-, Schrauben- und Luftfederung erfolgt eine weitere Segmentierung der Luftfedern in LKW- und Sattelzugfederung, die sich in der Verrohrungsstrategie unterscheiden. Zusätzlich erfolgte eine weitere Unterscheidung der Triebachsen in Doppelachsen mit Pendelausgleich sowie Blatt-Luft-Federungssystemen, so dass das Modell in Summe 11 Achssubstrukturen aufweist, von denen maximal sechs gleichzeitig genutzt werden können. Bis auf Lenkachsen kann jede Achse mit Einzel- oder Zwillingsbereifung simuliert werden, womit auch die typische Ausstattung geländegängiger Fahrzeuge abgebildet werden kann. Darstellung 6.10 gibt einen Überblick der möglichen Kombinationen eines 8x2-6 Fahrzeugs aus den Einzelmodulen des MKS-Modells, dessen Trieb- und Nachlaufachsen-Luftfedersysteme gekoppelt sind:

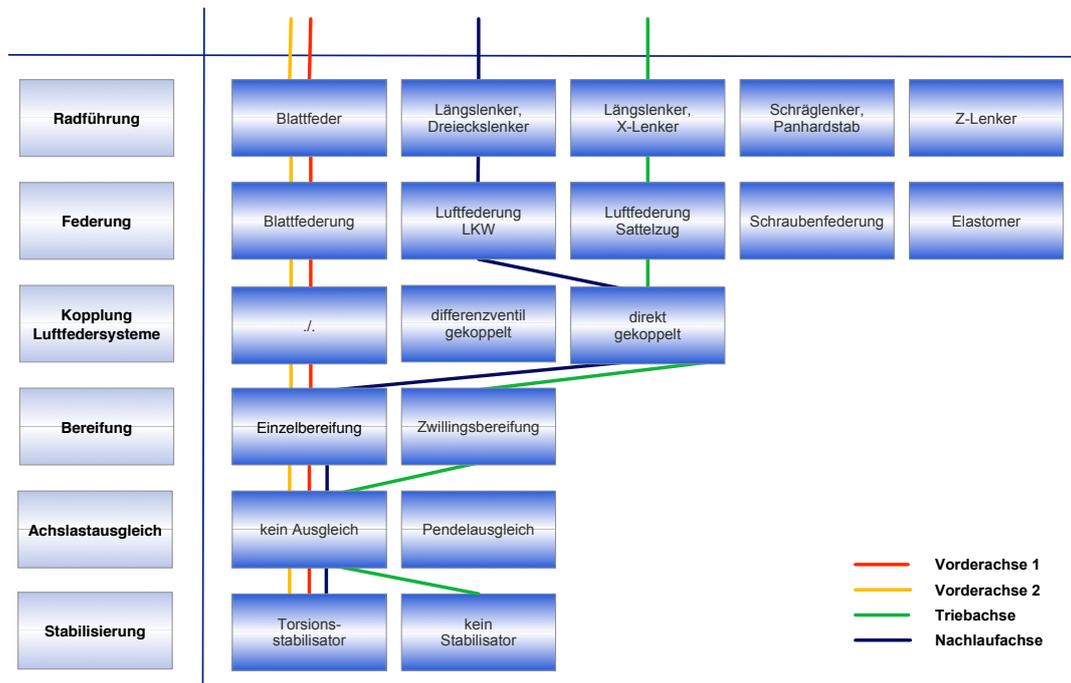
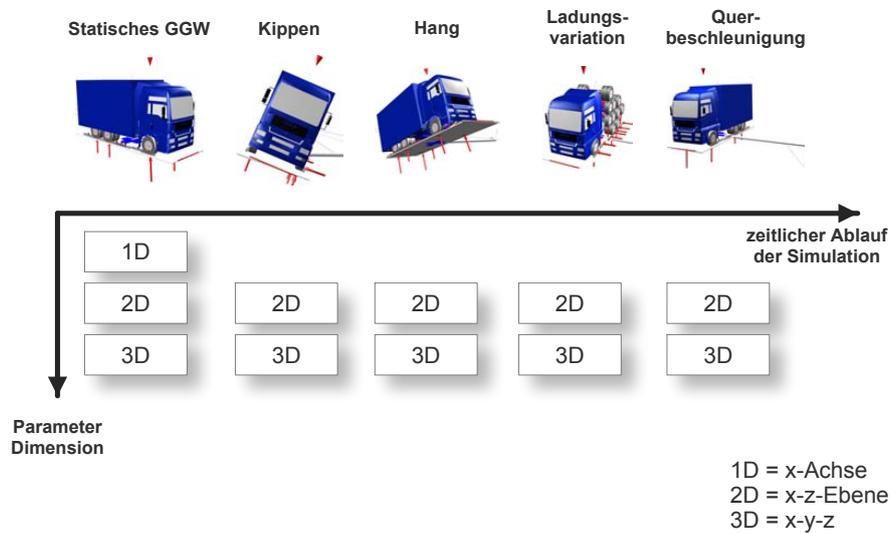


Abb. 6.10: Kombinatorik eines luftgefederten 8x2-6 Fahrzeugs

Die Analyse des Entwicklungsprozesses und der Lastenhefte im Militär- und Zivilbereich zeigt einen Bedarf an mehreren Simulationsszenarien auf, die vom Benutzer auswählbar sein müssen. Obligatorisch ist die statische Berechnung des Fahrzeugs ohne und mit Beladung sowie die dafür notwendige Regelung der Luftfedersysteme. Zusätzlich erfolgen quasistatische Szenarien am Hang bei Querbeschleunigung und auf einer Kippplattform sowie bei Variation des Ladungsschwerpunktes, die in nachfolgender Abbildung verdeutlicht sind. Die Fahrzeug- und Ladungsparametrierung kann dabei in verschiedenen Dimensionen erfolgen, die von einer eindimensionalen ebenen Betrachtung in x-Richtung bis zu einer auf die Fahrzeuglängsachse bezogenen asymmetrischen Parametrierung mit einem Höhenschwerpunkt reicht:

Abb. 6.11: Szenarien des *SimuLAST* Modells

Das Postprocessing der Simulationsergebnisse erfolgt wie in *SimuLENK* auch innerhalb der Software, wobei auf die Bewertungskenngrößen in der Datenbank zurückgegriffen wird. Die Darstellung erfolgt wiederum in MS-Excel.

Auch mit dem CAE-Tool *SimuLAST* konnte gezeigt werden, dass die Substitution von Entwicklungsprozessschritten gelingen kann, wenn durch eine Datenbankanbindung zur Bauteil- und Baugruppenbedatung sowie zur Bewertung die Komplexität reduziert wird und die durch den Anwender sichtbare Benutzeroberfläche intuitiv bedienbar ist. Neben dieser innerhalb des PEP ablaufenden messbaren Verbesserung gelingt durch die einfachere und schnellere Darstellung der Varianz auch eine zuverlässigere Bewertung von unnötigen Konfigurationen, sodass die Voraussetzungen für ein erfolgreiches zukünftiges Komplexitäts- und Variantenmanagement gegeben sind (vgl. Kapitel 3.5).

Bei einem Übergang in die MKS-Welt, die aus Gründen der Analyse innovativer, nicht implementierter Konzepte erforderlich sein kann, konnte eine Beschleunigung des Simulationsworkflows beobachtet werden, da ein praktikabler verlustfreier Schnittstellenübergang vorhanden ist. Wie bereits bei *SimuLENK* beobachtet, kann man von den Forderungen der Anwender nach weiteren Funktionalitäten auf ein gesteigertes Systemverständnis und folglich auf einen Wissenstransfer schließen, der in diesem Maße über bisher kein Informationssystem im Unternehmen erzielt werden konnte. Wie für andere Gesamtfahrzeug-CAE-Werkzeuge gilt auch für *SimuLAST* der nicht zu unterschätzende

Entwicklungs- und Wartungsaufwand<sup>6</sup>. In Folge ist lediglich eine Entwicklung häufig genutzter Konzepte und Szenarien rentabel.

## 6.4 Zukünftige Anwendungsfälle

Der Fokus dieser Arbeit auf Methoden des bereits sehr großen Themengebietes der funktionalen Fahrwerksentwicklung mit den häufig durchlaufenen Prozessschritten sowohl der Komponenten- aber auch der Gesamtfahrzeugsimulation lässt sich nach Abschluss der methodischen Entwicklung und Verifikation durch die erläuterten Anwendungsfälle beliebig für weitere Teilprozesse der Nutzfahrzeugentwicklung wie auch andere Simulationsmethoden adaptieren. Die bereits stark in den Konstruktionsabteilungen vertretene lineare Bauteil-FEM könnte beispielsweise für häufige Prozesse durch nichtlineare Berechnungsverfahren von Baugruppen ergänzt werden, indem standardisierte Simulationsvorlagen (Templates) durch FEM-Spezialisten zur Verfügung gestellt werden.

Auch die Auslegung der Motor-Getriebe-Antriebstrang-Kombinatorik stellt einen wesentlichen Faktor zur Kundenzufriedenheit dar und erfordert Prozesse mit komplexen Gesamtfahrzeugsimulationen durch Expertensysteme. Durch die Vielzahl von Motoren, die mit unterschiedlichen Getrieben und Achsvarianten kombiniert werden können, ergeben sich bei Falschwahl gravierende Verbrauchsunterschiede, so dass zukünftig im Idealfall eine kundenspezifische Fahrzeugabstimmung entsprechend dem Einsatzzweck (Kollektiv der Strecke) beim Fahrzeugkauf erfolgen könnte. Notwendige Voraussetzung ist neben der Datenbereitstellung der Einsatz des Konzepts zur CAE-Bereitstellung, da die Masse an Berechnungen nicht mehr von Entwicklungsabteilungen geleistet werden könnten und die Parameteranzahl durch den Anwender beherrscht werden muss.

---

<sup>6</sup>Schließt hier neben den Updates auch den Anwendersupport ein

## 7 Fazit

Die heute in der Fahrzeugindustrie übliche zumeist virtuelle Entwicklungsmethodik zur Steigerung der Entwicklungsleistung bei Verbesserung der Qualität und Reduktion der Kosten bietet bei einer differenzierteren Betrachtung speziell der Nutzfahrzeugsparte Optimierungspotentiale. Aufgrund der Produktstruktur im Nutzfahrzeug werden häufig ähnliche Entwicklungsschritte durchlaufen, deren Abarbeitung mit bestehender virtueller, computergestützter Entwicklungsmethodik erfolgt, so dass hier eine Adaption der Verfahren eine Beschleunigung der Entwicklung erzielen kann. Bezogen auf den Fahrwerkentwicklungsprozess, der hier im Fokus steht, ist eine Methode entwickelt worden, die eine durch große Varianz geprägte Entwicklung von Nutzfahrzeugen in ihrer Gesamtheit analysiert, Potentiale aufdeckt und Lösungsansätze bietet. Hierzu werden neben den Entwicklungswerkzeugen und Workflows auch die Verknüpfung aller Systeme behandelt und anhand der Lenkungs- und Achsentwicklung kritische Entwicklungsschritte erörtert.

### 7.1 Nutzen der Methode

Durch den ganzheitlichen, produktiven Einsatz der Entwicklungsmethodik, der primär seit Frühjahr 2009 erfolgt ist, konnten Erfahrungen bezüglich der Nutzungshäufigkeit und Akzeptanz gesammelt werden. Der Einsatz von Teilelementen der Methode erfolgte bereits ein Jahr zuvor, wodurch Erfahrungen bei der Nutzung von CAE-Werkzeugen in die letzten Entwicklungen einfließen konnten. So wurde beobachtet, dass sich trotz der aktuellen Situation der Produktentwicklung bei MAN, die sich momentan für die neue schwere LKW-Reihe in einer frühen Definitionsphase befindet, sowohl die Nutzungshäufigkeit als auch die Resonanz in Form von Support und Bugreporting kontinuierlich weiterentwickeln. Bei leichten und militärischen LKW erfolgte ein standortübergreifender Einsatz primär aufgrund von Konstruktionsänderungen, die durch Fehlerbeseitigungsteams initiiert wurden, oder durch Erweiterung und Änderung des Produktportfolios von Achseinbau- oder Lenkungsvarianten. Neben den konstruktiven Änderungen werden im zivilen Sektor häufig Kippstabilitätsuntersuchungen mit den kundeneigenen Aufbauten durchgeführt. Im militärischen Bereich erfolgen schon im Ausschreibungsverfahren häufig Kippuntersuchungen im Gelände, die über die neue Methodik nun vollständig virtuell abgebildet werden können. Mit Fertigstellung des CAE-Tools *SimuLAST* zur Simulation

von Beladungsszenarien konnte ein Großteil der Berechnungsverfahren für Ausschreibungen direkt den entsprechenden Abteilungen zur Verfügung gestellt werden, womit neben der Ablaufverbesserung im PEP auch eine Verbesserung von nachgelagerten Prozessen stattgefunden hat.

Über die Nutzung standardisierter Bewertungsverfahren und Kenngrößen entsteht zum einen eine sehr gute Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse, zum anderen wird durch uniforme Bewertungskriterien die Interpretation von Simulationsergebnissen auch durch den Konstruktionsanwender möglich. Voraussetzung hierzu ist allerdings die Bereitstellung dieser Bewertungskriterien primär durch Versuchs- und Simulationsabteilungen.

Für die Omnibusentwicklung konnte eine kontinuierlich hohe Nutzung des in dieser Arbeit entstandenen CAE-Werkzeugs *SimuLENK* festgestellt werden, da hier sowohl bei Chassisbussen als auch bei Stadtbussen ein sehr hoher kundenspezifischer Konstruktionsanteil vorherrscht. Dieser entsteht bei den Chassisbussen aufgrund der frei wählbaren Fahrzeuglänge durch den Kunden oder den nachträglichen Anbau von Busnachläufern, deren Lenkungs- und Wendigkeitsauslegung für jeden Typ gesondert erfolgen muss. Bei Stadtbussen, die bei großen Abnahmemengen ebenfalls nach Kundenwunsch modifiziert werden, erfolgt eine häufige Neu- oder Änderungsauslegung der Lenkung aufgrund der geforderten Wendigkeit oder Bereifung (Lenkungsendanschläge).

Die große Akzeptanz der CAE-Werkzeuge im Unternehmen, speziell in den Konstruktionsabteilungen, konnte erst seit der konsequenten Datenversorgung der CAE-Tools über zentrale Datenbanken beobachtet werden. Diese wiederum hatte einen positiven Effekt auf die Datenpflege selbst, da die Anwender die Notwendigkeit der Datenpflege erkennen konnten und in Folge die Bereitschaft zur Pflege der Daten signifikant anstieg. Die Datenbankhaltung wurde durch die Fachabteilungen teilweise sogar selbst angeregt, da diese die Notwendigkeit eines Werkzeugs zur Variantenübersicht oder eines Nachschlagewerks erkannten. Auf diese Weise konnte im Rahmen der Dissertation die Methodik in Form eines Datenbankskeletts sowie einer zentralen Verbreitungsplattform *SimNavigator* gestellt werden, die dann von den Fachabteilungen selbst gepflegt werden.

Neben der vorgesehenen Nutzung der Methodik in den Konstruktionsabteilungen zur Substitution von Entwicklungsprozessschleifen über die Berechnungsabteilung erfolgte ein Einsatz der CAE-Technik heute in den Versuchsabteilungen, die hierüber z.B. exakte Beladungsszenarien voruntersuchen oder Versuchsanordnungen pre- und postprocessen können. Ein Beispiel hierfür ist die sonst übliche iterative Landungsverschiebung bei Mehrachsfahrzeugen ohne Pendelausgleich an Doppelachsaggregaten, um die Nennachslasten und Höhenschwerpunkte zur Versuchsdurchführung exakt einzustellen. Diese Prozesse konnten unter Zuhilfenahme von CAE massiv beschleunigt werden, da die nichtlineare Fahrzeugreaktion auf die Ladungsverschiebung sonst schwierig abzuschätzen ist. Ein Beispiel für das Postprocessing von Prüfstandsversuchen ist die elastokinematische CAE-Untersuchung der Versuchsanordnung, um fehlende oder ausgefallene Sensorsignale einer

Betriebsfestigkeitsanalyse (im konkreten Fall Winkelsensoren) durch Simulationsergebnisse zu ersetzen und in Folge Teile von Versuchsreihen verwertbar zu gestalten.

Abschließend konnte festgestellt werden, dass ein offensichtlich gesteigertes Systemverständnis durch den Einsatz der CAE-Methoden stattgefunden haben musste, da die Anwender kontinuierlich Wünsche zu weiteren Berechnungswerkzeugen geäußert haben, die sowohl das Gesamtfahrzeug- als auch die Komponentensimulation betrafen. Überdies konnte durch die Methodik der zentralen Informations- und CAE-Bereitstellung, der Bewertung von Simulationsergebnissen und die Integration von Mitarbeiterwissen in Form von Berechnungswerkzeugen ein gelebtes Wissensmanagement erzeugt werden, das sich über zuvor bereits vorhandene Wissensdatenbanken nicht realisieren ließ.

Nachfolgend sind die Anwendungsfälle und profitierenden Bereiche der Methodik aufgelistet:

- Beschleunigung Ausschreibungsverfahren (Vertrieb/Projektierung)
- Beschleunigung des PEP der Fahrwerksentwicklung (Konstruktions- und Berechnungsabteilung)
- Verbesserte Kundenbetreuung durch Konstruktionsabteilung Bus/Militär
- Verbessertes Systemverständnis (Konstruktionsabteilung)
- Gesteigertes Interesse (Konstruktionsabteilung)
- Kapazitätsgewinn durch Entfall von Entwicklungsschleifen (alle)
- Wissensmanagement durch Sammlung und Verbreitung (alle)
- Verbesserte Versuchsvorbereitung (Versuchsabteilung)
- Verbesserte Versuchsnachbearbeitung (Versuchsabteilungen)
- Einheitliche Ergebnisdarstellungen und Bewertungsverfahren (alle)

Die erarbeitete Entwicklungsmethodik zur prozessoptimierten Simulation von Nutzfahrzeugfahrwerken, die unter anderem auf der Substitution von Entwicklungsprozessschritten beruht, stößt immer dann an eine technische Grenze, wenn die Komplexität der betrachteten Systeme einen gewissen Komplexitätslevel überschreiten oder schlicht keine Methodik wie z.B. der Code Export von Mehrkörpersimulationsmodellen oder eine analytische Betrachtung genutzt werden kann. Diese technische Grenze, die durch das beschriebene Datenverbundkonzept stellenweise auch für komplexe Gesamtfahrzeugsysteme deutlich verschoben werden kann, indem dem Anwender die Modellparametrierung erleichtert wird, steigt mit dem Abstraktionslevel der Modelle an. So sind beispielsweise Elastomer- und Dämpfermodelle von „Non-Expert-Usern“ trotz Datenbankbindung schwer zu parametrieren, da hier teilweise gänzlich unbekannte, abstrakte Kenngrößen genutzt werden, die vor allem bei Einsatz phänomenologischer Modelle nicht nachvollziehbar

sind. Obligatorisch ist folglich, dass eine Substitution von Prozessschritten nie gänzlich erfolgen kann, jedoch die Grenze speziell im Nutzfahrzeug, bedingt durch die Toleranzpotentiale, relativ weit in Richtung Gesamtfahrzeugsimulation verschoben werden kann. Ein Beispiel für eine nicht durchführbare Substitution wäre die Komfortuntersuchung des Fahrerarbeitsplatzes im Gesamtfahrzeug, für deren reale Abbildung die Modellierung eines elastischen Rahmens sowie ein hochfrequentes Reifenmodell unabdingbar ist und dessen Untersuchung außerhalb der MKS-Welt nicht möglich wäre.

Beobachtungen des Anwenderverhaltens haben gezeigt, dass ab einer bestimmten Komplexitätsschwelle der Gesamtfahrzeugmodelle und in Folge auch der Benutzeroberflächen die Akzeptanz der Anwender stark gesunken ist, da diese offensichtlich aufgrund der Parameteranzahl überfordert waren. Als Beispiel hierfür kann die erste *SimuLAST*-Version genannt werden, bei der von Seiten der Anwender vermutlich wegen zu wenigen (zwei) Datenbankverbindungen eine Verweigerungshaltung festgestellt werden konnte, die auf die Parameteranzahl von knapp 500 zurückgeführt wurde. Die letzte Version von *SimuLAST*, in der über 800 Parameter genutzt werden, weist hingegen eine hohe Akzeptanz auf, da hier ein Großteil der Parameter über Datenbanken geladen werden kann. Für diese menschliche Grenze der Methode, die sehr individuell ist, kann aus momentaner Sicht nur eine Lösung durch Schulungen erreicht werden. Erwähnt werden soll an dieser Stelle auch die mögliche Gefahr einer Kreativitäts-Einschränkung, die durch zu "starre" Systeme und Vorgaben bei den Anwendern entstehen kann, jedoch in der industriellen Praxis im Rahmen dieser Dissertation nicht beobachtet werden konnte.

Im Falle der Datenpflege könnten Zwänge durch Konstruktionsrichtlinien und die Vorgabe fester Prozessschritte eine weitere Prozesssicherung erzielen, indem Daten für die Simulation voll- oder teilautomatisiert aufbereitet werden könnten. Unklar ist hier aber auch, inwieweit Aufwand- und Nutzenverhältnis von sehr strikten Konstruktionsrichtlinien und der momentanen Methodik von Seiten der Konstruktion zueinander stehen.

Neben der technischen und menschlichen Grenze stößt die vorgestellte Methodik auch immer an eine Kosten-Nutzen-Grenze, die immer dann erreicht wird, wenn der Versuch erfolgt, nicht-periodische oder nicht-standardisierbare Prozessschritte zu substituieren, da dann der Entwicklungsaufwand für die CAE-Werkzeuge sowie die Datenbereitstellung durch die Konstruktionsabteilungen unrentabel wird. Auch bei bereits substituierten Prozesselementen wie dem Lenkungsentwicklungsprozess können in den CAE-Werkzeugen niemals alle technisch möglichen Lösungen abgebildet werden, sondern es sollte immer auf State-of-the-Art-Systeme zurückgegriffen werden, da sonst der Aufwand schnell den Nutzen überschreiten würde. Der Innovationsprozess mit gänzlich neuen technischen Systemen, wie beispielsweise eines Radnabenantriebs mit Lenkfunktion, wird mit beschriebener Methode ausgeschlossen.

---

Nachfolgend sind die Grenzen der vorgestellten Methodik zusammengefasst:

- Technische Grenze,
- Kosten-Nutzen-Grenze,
- Menschliche Grenze.

## 7.2 Empfehlungen für die weitere Entwicklung

Mit den Anwendungsfällen konnte gezeigt werden, dass das Konzept zur prozessoptimierten Simulation mit Einschränkungen auch für sehr komplexe Systeme einsetzbar ist und diverse Vorteile nicht nur für den eigentlich angestrebten Produktentwicklungsprozess liefert. Eine Aufweitung der Grenzen mit erläuterter Methodik kann primär durch eine intensivere Nutzung des Datenverbundkonzeptes im Sinne der Datenbankanbindung und Ergebnisbewertung erzielt werden. Eine methodische Weiterentwicklung ist also hauptsächlich über die Verwendung anderer oder neuer CAE-Methoden möglich, die nicht zu vorgestellten analytischen oder MKS-Technologien gezählt werden. Hier könnte beispielsweise eine Prozesssubstitution in anderen Fakultäten des Gesamtfahrzeugs über bereits erwähnte nichtlineare FEM- oder CFD-Templates sowie über die Bereitstellung von Greybox-Modellen erfolgen, so wie sie heute üblicherweise in der Fahrzeuglängsdynamik oder der Kühlkreislaufsimulation genutzt werden. Wie für alle anderen CAE-Anwendungen gelten für den Transfer des Konzeptes in andere CAE-Disziplinen aber die Voraussetzungen der Datenbereitstellung und der Bewertungsmethodik über das Datenverbundkonzept.

Neben der abgeschlossenen methodischen Entwicklung erfordern die Konzepte zur prozessoptimierten Fahrwerkssimulation allerdings eine kontinuierliche, operative Weiterentwicklung und Pflege aller Produkt- und Bewertungsdatenbanken. In gleichem Maße müssen, bedingt durch den kontinuierlichen technologischen Fluss, auch die CAE-Modelle und Simulationsszenarien adaptiert werden, da diese mindestens den State-of-the-Art-Status abdecken sollten. Durch die dynamische Benutzeroberflächengenerierung und das Mappingkonzept ist durch die beschriebenen Konzepte allerdings eine schnelle Reaktion auf veränderte technologische und gesetzliche Randbedingungen möglich.

## Literaturverzeichnis

- [AG10] AG, MAN N.: *Interne Studie: Marktsituation 2009/2010*. MAN Nutzfahrzeuge AG, 2010
- [AGP93] ANDERL, R. ; GRABOWSKI, H. ; POLLY, A.: *Integriertes Produktmodell*. Beuth: Berlin, Wien, Zürich, 1993
- [AJ98] ADAM, D. ; JOHANNWILLE, U.: *Die Komplexitätsfalle in: Adam, D. (Hrsg): Komplexitätsmanagement*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998
- [AL01] ANTON, O. ; LERCHER, B.: *Mechatronik: Integrator von CAx- und PDM-Tools?* 2001
- [AM09] ANDERL, R. ; MALZACHER, J.: *SimPDM - Simulationsdatenmanagement-Standard nach Maß*. CAD CAM 1-2/2009 Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [Amp02] AMPFT, M.: *Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung*. 2002
- [AR01] ABRAMOVICI, M. ; RICHTER, K.: *Maximizing the Value of Integrated Product Data Management as a Key for e-Business*. Ruhr-Universität Bochum, 2001
- [AV08] AG-VMTM, MAN N.: *Grundlagen Nutzfahrzeugtechnik*. MAN Nutzfahrzeuge AG, 2008
- [BAG09] *Marktbeobachtung Güterverkehr*. Bundesamt für Güterverkehr, 2009
- [BDW<sup>+</sup>04] BURR, H. ; DEUBEL, T. ; WEBER, C. ; VIELHABER, M. ; HAASIS, S.: *PLM-Herausforderungen und -Strategien in der Automobilindustrie*. CAD-CAM Report Nr. 5, 2004
- [BGK08] BAUER, S. ; GRUBER, K. ; KNAUST, U.: *CAD-/CAE-Integration - Entwicklung einer durchgängigen Berechnungsprozesskette*. 2008
- [BGL09] *Kostenentwicklung Güterverkehr*. BGL, Aufruf: 20.11.09 URL:[http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten\\_kalkulator.htm?v=2](http://www.bgl-ev.de/web/initiativen/kosten_kalkulator.htm?v=2)
- [Bod06] BODENDORF, F.: *Daten- und Wissensmanagement*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006

- [BS01] BRAESS, H.-H. ; SEIFFERT, U.: *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Bd. 2. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 2001
- [BW97] BULLINGER, H.-J. ; WARSCHAT, J.: *Forschungs- und Entwicklungsmanagement - Simultaneous Engineering Projektmanagement Produktplanung Rapid Product Development*. B. G. Teubner Stuttgart, 1997
- [Cam10] *Camex*. Siemens PLM, Aufruf: 09.01.2010 (Camex). <http://www.camtex.de/CAD-Datenformate-fuer-Konverter-und-Schnittstellen.26.0.html>
- [Deu06] DEUSCHL, M.: *Gestaltung eines Prüffelds für die Fahrwerksentwicklung unter Berücksichtigung der virtuellen Produktentwicklung*. 2006
- [DIN88] DIN: *DIN 66301*. Deutsches Institut für Normungen, 1988
- [EH06] EICHLSEDER, H. ; HIRSCHBERG, W.: *CAx in Automotive and Engine Technology*. TU Graz, 2006
- [Ehr07] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2007
- [Eig07] EIGNER, M.: *Virtuelle Produktentwicklung 2*. Martin Eigner, 2007
- [Eig09] EIGNER, M.: *Why PLM Projects (still) fail ...* ProSTEP iViP Symposium 2009 - Mechatronic Development, an Interdisciplinary Challenge, 2009
- [ES09] EIGNER, M. ; STELZER, R.: *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [Fab07] FABIAN, G.: *Integration of Simulation and Computation in a PDM-Environment (SimPDM)*. 5th Technology Workshop Bilbao - AutoSim, 2007
- [FD08] FÜERMANN, T. ; DAMMASCH, C.: *Prozessmanagement: Anleitung zur ständigen Prozessverbesserung*. Carl Hanser Verlag München, 2008
- [FI07] FLEISCHHACKER, J. ; ILLE, T.: *MKS-Simulationsmethodik auf Basis von Code Export für die Entwicklung von Nutzfahrzeug-Lenkungen*. ChassisTech München, 2007
- [FI09] FLEISCHHACKER, J. ; ILLE, T.: *Projekt Zwischenbericht Virtual Truck.basic*. MAN Nutzfahrzeuge AG, 2009
- [FIH09] FLEISCHHACKER, J. ; ILLE, T. ; HIRSCHBERG, W.: *Methode zur prozessoptimierten, virtuellen Fahrwerksentwicklung von Nutzfahrzeugen*. 2. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, 2009
- [Fre05] FRESE, E.: *Grundlagen der Organisation*. Gabler Wiesbaden, 2005

- [Gaa10] GAAG, A.: URL: <http://www.cidad.de/portal/>. Technische Universität München - Produktentwicklung, Aufgerufen: 06.01.10
- [Gad01] GADATSCH, A.: *Management von Geschäftsprozessen - Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis*. Vieweg und Sohn Verlag: Wiesbaden, 2001
- [GEK01] GAUSEMEIER, J. ; EBBESMEYER, P. ; KALLMEYER, F.: *Produktinnovation - Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2001
- [GEN10] *Bibling*. Bd. Ruhr Universität Bochum. Ruhr Universität Bochum, Aufgerufen: 14.01.10 URL:[http://www.ikmfbs.ing.tu-bs.de/forschung\\_projekte/genial/genial.html](http://www.ikmfbs.ing.tu-bs.de/forschung_projekte/genial/genial.html)
- [Gen94] GENTNER, A.: *Entwurf eines Kennzahlensystems zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung von Entwicklungsprojekten*. Vahlen, München, 1994
- [Gia98] GIAPOULIS, A.: *Modelle für effektive Konstruktionsprozesse*. Shaker Aachen und Dissertation TU München 1996, 1998
- [GIN10] GINA. Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Aufgerufen: 14.01.10 URL: <http://www.gina-net.de>
- [Got04] GOTTSCHALK, B.: *Aktuelle Entwicklung des globalen Nutzfahrzeugmarktes*. Presse-Workshop; Nutzfahrzeuge - Mobile der Zukunft; Frankfurt am Main, 2004
- [Got05] GOTTSCHALK, B.: *"Respektables Ergebnis": Neuer Exportrekord*. VDA <http://www.vda.de/de/meldungen/archiv/2005/12/05/1188>; Aufruf 16.12.2009, 2005
- [Gra07] GRAU, M.: *Simulation Data Management with Interoperability across domains*. 5th Technology Workshop Bilbao - AutoSim, 2007
- [GS08] GUMM, H.P. ; SOMMER, M.: *Einführung in die Informatik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2008
- [Gün01] GÜNTHER, M.: *Numerische Aspekte der Co-Simulation gekoppelter Systeme*. ASIM-Workshop Modellierung und Simulation technischer Systeme, Dresden, 2001
- [Hai06] HAIBACH, E.: *Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [HBA<sup>+</sup>08] HOEPKE, E. ; BREUER, S. ; APPEL, W. ; BRAEHLER, H. ; DAHLHAUS, U. ; ESCH, T. ; KOPP, S. ; RHEIN, B.: *Nutzfahrzeugtechnik*. Bd. 5. Vieweg + Teubner, Braunschweig/Wiesbaden, 2008
- [Hei06] HEISSING, B.: *Strassenfahrzeuge: Entwurf und Simulation*. Skriptum FTM TU-München, 2006

- [Hei07] HEISSING, B. ; ERSOY, Metin (Hrsg.): *Fahrwerkhandbuch*. Vieweg und Sohn Verlag: Wiesbaden, 2007
- [HNB<sup>+</sup>99] HABERFELLNER, R. ; NAGEL, P. ; BECKER, M. ; BÜCHEL, A. ; MASSOW, H. von: *Systems Engineering*. Verlag Industrieller Organisation Zürich, 1999
- [IFM06] ILLE, T. ; FLEISCHHACKER, J. ; MARTINEZ, A.C.: *Code Export von MKS-Modellen zur Entwicklung einfacher Simulationstools am Beispiel von Nutzfahrzeug-Lenkungen*. VDI - Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau; Würzburg, 2006
- [ISO04] *Die SQL Normen ISO/IEC 9075*. ISO, 2004
- [Jan04] JANIA, T.: *Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung*. 2004
- [Jos08] JOST, P. J.: *Organisation und Motivation - Eine ökonomisch-psychologische Einführung*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2008 (2)
- [JT110] *JT Open*. Siemens PLM Software, Aufgerufen: 09.01.2010 (JT Open). URL: <http://www.jtopen.com>
- [KE06] KEMPER, A. ; EICKLER, A.: *Datenbanksysteme - Eine Einführung*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2006
- [Kla03] KLABUNDE, S.: *Wissensmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2003
- [KOM10] *KOMSOLV*. Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Aufgerufen: 14.01.10 URL:<http://www.komsolv.de>
- [Kra04] KRASTEL, M.: *Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM Umgebung - die Arbeitsgruppe SimPDM*. Produktdatenjournal Nr.2, 2004 (2)
- [Kra07] KRASTEL, M.: *Erfolge bei Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM-Umgebung*. 2007 (2)
- [Kre06] KRENZ, W.: *Dem Markt voraus: Wie sich erfolgreiche OEM heute schon ruesten können*. Mercer Management Consulting, 2006
- [LDHS01] LIEBIG, S. ; DRONKA, S. ; HELDUSER, S. ; STÜWING, M.: *Die Modellierung und Simulation gekoppelter mechanischer und hydraulischer Systeme*. ASIM-Workshop Simulationsmethodik Dresden, 2001
- [Lin09] LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [LRZ06] LINDEMANN, U. ; REICHWALD, R. ; ZÄH, M.: *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006

- [Mai07] MAISCH, M.: *Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten*. Dissertation Universität Stuttgart Institut für Maschinenelemente; Bertsch, 2007
- [Mat10] MATHWORKS: *Matlab und Simulink*; <http://www.mathworks.de>; Aufrufdatum 11.05.10. Mathworks, 2010
- [MDS08] MLEKUSCH, B. ; DORNBERG, C. ; STREICHER, F.: *CAE-Prozessintegration und Optimierung*. LS-DYNA Anwenderforum Bamberg, 2008
- [Mei10] MEIER, M.: *Digitale Bibliothek*. ETH Zürich, Aufgerufen: 14.01.10 URL:<http://www.diglib.ethz.ch/>
- [Mei07] MEIER, A.: *Relationale Datenbanken: Leitfaden für die Praxis*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007
- [Mey07] MEYWERK, M.: *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Springer, 2007
- [Mic10] MICROSOFT: *Microsoft Office*. Microsoft Deutschland GmbH <http://office.microsoft.com> Aufrufdatum: 10.07.10, 2010
- [Mil81] MILLING, P.: *Systemtheoretische Grundlage zur Planung der Unternehmenspolitik*. Berlin: Duncker und Humblot, 1981
- [MK06] MERKT, T. ; KRASTEL, M.: *Virtuelle Produktabsicherung auf Basis eines CAE-Datenmanagements*. VDI - Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau; Würzburg, 2006
- [Mod09] MODELICA: *Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling - Specifications*. Modelica, 2009
- [MT08] MEYER-TUVE, H.: *Modellbasiertes Analysetool zur Bewertung der Fahrzeugquerdynamik anhand von objektiven Bewegungsgrößen*. Dissertation TU München Verl. Dr. Hut, 2008
- [NA09] NUTZFAHRZEUGE-AG, MAN: *Geschäftsbericht 2008 MAN Aktiengesellschaft*. BurdaYukom Publishing GmbH, 2009
- [NR08] NAWOTKI, A. ; ROHRBACH, J.: *CAE-Datenmanagement - ein Praxisbericht*. 2008
- [Nyf06] NYFFENEGGER, F.: *Informationstechnische Unterstützung der frühen Phasen der Produkt-Innovation*. 2006
- [OL03] OERTEL, H. ; LAURIEN, E.: *Numerische Strömungsmechanik*. Vieweg und Sohn Verlag: Wiesbaden, 2003
- [Ott09] OTTER, M.: *Modelica Overview*. Modelica, 2009

- [Pae04] PAETZOLD, K.: *Workflow-Systeme im Produktentwicklungsprozess*. In: Design for X - Beiträge zum 15. Symposium, (Hrsg. Meerkamm, H.), Neukirchen, 14./15. Oktober, 2004
- [Pan08] PANZER, J.: *Referenzmodell für den kooperativen Simulationsdatenaustausch*. Dissertation TU Kaiserslautern, 2008
- [PP08] PETERSON, D. ; PAWELA, Z.: *Sim Enterprise: Capabilities and Current Status*. CPDA, 2008
- [Pre08] PRENNINGER, K.: *Objektive Beurteilung der Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, insbesondere schwerer Nutzfahrzeuge, mittels modellbasierter Parameteridentifikation*. Dissertation TU Graz, 2008
- [PRO10] *Prostep*. ProSTEP iViP, Aufrufdatum: 09.01.2010 <http://www.prostep.org/de/standards-amp-infos/was-ist-step/architektur-und-aufbau.html>
- [PRR06] PROBST, G. ; RAUB, S. ; ROMHARDT, K.: *Wissen managen - Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2006
- [PTL08] POHL, T. ; THÜRMER, M. ; LEGLER, R.: *CAE Modelling Strategies for the new GM Global Mid-Size-class and Opel/Vauxhall INSIGNIA*. 2008
- [Rah07] RAHMFELD, J.: *Steuerung der frühen Phasen des Innovationsprozesses unter Verwendung des Werttreiberansatzes in der Nutzfahrzeugindustrie*. 2007
- [Rei93] REISS, M.: *Komplexitätsmanagement I und II*. WISU S. 54-60 und S. 132-137, 1993
- [RUB10] *Bibling*. Ruhr Universität Bochum, Aufgerufen: 06.01.10 URL:<http://www.ub.ruhr-uni-bochum.de/Projekte/Bibling/Ingenieur.htm>
- [Sau02] SAUER, H.: *Relationale Datenbanken - Theorie und Praxis*. Addison-Wesley-Verlag, München, 2002
- [SBM<sup>+</sup>06] SCHEER, A.-W. ; BOCZANSKI, M. ; MUTH, M. ; SCHMITZ, W.-G. ; SEGELBACHER, U.: *Prozessorientiertes Product Lifecycle Management*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [Sch01] SCHMIDT, R.: *Unternehmensübergreifender Engineering Workflow - Verteilte Produktentwicklung auf der Grundlage eines parameterbasierten Daten- und Prozessmanagements*. Papierflieger Clausthal-Zellerfeld, 2001
- [Sch05a] SCHALDACH, R.: *Modellbildung und Simulation*. USF Kassel, 2005
- [Sch05b] SCHUH, G.: *Produktkomplexität managen*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2005

- [SI08] SAAKSUVUORI, A. ; IMMONEN, A.: *Product Lifecycle Management*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008 (3)
- [Sie07] *Open product lifecycle data sharing using XML - White Paper*. Siemens PLM Software, 2007
- [Sie10] *www.plm.automation.siemens.com*. Siemens PLM, Aufruf: 09.01.2010
- [Sim08] *Simulation Data Management*. ProStep, 2008
- [Ste03] STEINER, R.: *Grundkurs Relationale Datenbanken*. Vieweg + Teubner, Braunschweig/Wiesbaden, 2003
- [Ste07] STEINKE, P.: *Finite-Elemente-Methode*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [SW08] SENDLER, U. ; WAWER, V.: *CAD und PDM Prozessoptimierung durch Integration*. Hanser München, Wien, 2008
- [TF00] THOMKE, S. ; FUJIMOTO, T.: *The Effect of Front-Loading Problem-Solving on Product Development Performance*. Bd. 17: 128-142. Elsevier Science Inc. New York, 2000
- [TOB07] TOBOLÁR, J. ; OTTER, M. ; BÜNTE, T.: *Modelling of Vehicle Powertrains with the Modelica PowerTrain Library*. Haus der Technik Essen - Systemanalyse in der Kfz-Antriebstechnik IV, 2007
- [Tri02] TRIPPNER, D.: *Vorgehensmodell zum Management von Produktdaten in komplexen und dynamischen Produktentwicklungsprozessen*. Shaker Aachen, Dissertation Universität Karlsruhe, 2002
- [USP97] *Initial Graphics Exchange Specification 5.3*. U.S. Product Data Association (US PRO), 1997
- [VDA08] *VDA-Recommendation 4967 - Simulation Data Management*. Verband der Automobilindustrie, 2008
- [VDI93] VEREIN-DEUTSCHER-INGENIEURE: *VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Beuth Berlin, Wien, Zürich, 1993
- [VFF96] VDI-FACHBEREICH-FABRIKPLANUNG: *VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Begriffsdefinitionen*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 1996
- [Vos00] VOSSEN, G.: *Datenbankmodelle, Datenbanksprachen und Datenbankmanagementsysteme*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München Wien, 2000

- [Wei06] WEISS, Sascha: *Konzept und Umsetzung eines Navigators für Wissen in der Produktentwicklung*. 2006
- [Wer10] WERNER, H.: *The Semiral*. Universität des Saarlandes und brainframe GmbH, Aufgerufen: 14.01.10 URL:<http://www.theseमारil.de/de/index.html>
- [Wil00] WILDEMANN, H.: *Komplexitätsmanagement: Vertrieb, Produkte, Beschaffung, FundE, Produktion und Administration*. TCW Transfer Centrum Verlag GmbH, München, 2000
- [Wil06] WILDEMANN, H.: *Variantenmanagement - Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung*. TCW Transfer-Centrum, München, 2006
- [Wöl98] WÖLFLE, F.: *Virtuelle Berechnungskompetenzzentren als Dienstleister zur Integration von Gestaltung und Berechnung*. Dissertation TU Berlin VDI Fortschritts-Bericht Reihe 20 Nr. 274, 1998
- [WW05] WEBER, H. ; WEGGE, M.: *Potentiale und Restriktionen von Produktionskonzepten für die Nutzfahrzeugproduktion im Vergleich zur PKW-Produktion*. 2005
- [ZFW07] ZÄH, M. F. ; FÖCKERER, T. ; WAIBEL, M.: *Simulation in der Entwicklung Lohnend oder Luxus?* Seminarbericht IWB - Mechatronik: Vorsprung durch Simulation, TU München, 2007

# A Anhang

## Anhang 1

### Use-Case Achslastberechnung

Untersuchungsgegenstand ist ein dreiachsiges Fahrzeug, dessen Radlasten mittels einer analytischen linearisierten Gleichgewichtsrechnung ermittelt werden und die in Folge mit einer nichtlinearen MKS-Analyse mit abgebildeter Fahrwerkskinematik verglichen werden.

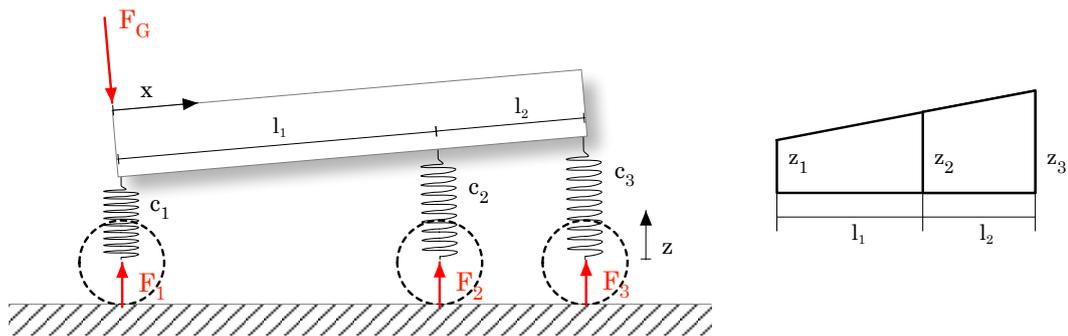


Abb. A.1: Prinzipskizze idealisierter 3-Achser

Voraussetzung für die Analyse ist ein starrer Rahmen, der mit einer verschiebbaren generalisierten Masse ausgestattet ist, die sich in Richtung der positiven x-Koordinate bewegt und so die sonst idealisiert masselosen Elemente belastet. Aus dem Kräfte- und Momentengleichgewicht folgt für sehr kleine Winkel:

$$\sum F_z = 0 : \quad F_1 + F_2 + F_3 + F_G = 0 \quad (1)$$

$$\sum M_3 = 0 : \quad F_1 (l_1 + l_2) + F_2 \cdot l_2 - F_G (l_1 + l_2 - x) = 0 \quad (2)$$

Unter der Annahme linearer Federkennlinien erfolgt für den Federweg  $z_i$  und einer Steifigkeit  $c_i$  über das Hook'sche Gesetz die Federkraft  $F_i$ :

$$F_i = z_i \cdot c_i \quad (3)$$

und die Abhängigkeit der z-Koordinaten voneinander über den Strahlensatz (Annahme von kleinen Nickwinkeln)

$$\frac{z_3 - z_1}{l_1 + l_2} = \frac{z_2 - z_1}{l_1} \quad (4)$$

Nach Umformung folgt für den Federweg 3:

$$z_3 = \frac{1}{l_1} (z_2 \cdot l_1 + z_2 \cdot l_2 - z_1 \cdot l_2) \quad (5)$$

Mit (5) und (3) in (1) eingesetzt folgt:

$$F_1 + F_2 + c_3 \cdot \frac{1}{l_1} (z_2 \cdot l_1 + z_2 \cdot l_2 - z_1 \cdot l_2) = -F_G \quad (6)$$

$$F_1 + F_2 + \frac{c_3}{l_1} \left( \frac{F_2}{c_2} \cdot l_1 + \frac{F_2}{c_2} \cdot l_2 - \frac{F_1}{c_1} \cdot l_2 \right) = -F_G \quad (7)$$

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot \left( \frac{c_3}{c_1} \cdot \frac{l_2}{l_1} - 1 \right) - F_G}{1 + \frac{c_3}{c_2 \cdot l_1} (l_1 + l_2)} \quad (8)$$

Eingesetzt in das Momentengleichgewicht (2) folgt:

$$F_1 (l_1 + l_2) + l_2 \cdot \frac{F_1 \cdot \left( \frac{c_3}{c_1} \cdot \frac{l_2}{l_1} - 1 \right) - F_G}{1 + \frac{c_3}{c_2 \cdot l_1} (l_1 + l_2)} + F_G (l_1 + l_2 - x) = 0 \quad (9)$$

und nach Umformung:

$$F_1 \left[ (l_1 + l_2) + \frac{l_2 \cdot \left( \frac{c_3}{c_1} \cdot \frac{l_2}{l_1} - 1 \right)}{1 + \frac{c_3}{c_2 \cdot l_1} (l_1 + l_2)} \right] = F_G \left[ \frac{l_2}{1 + \frac{c_3}{c_2 \cdot l_1} (l_1 + l_2)} - (l_1 + l_2 - x) \right] \quad (10)$$

Die Kräfte der ersten und zweiten Achse lassen sich analog durch Einsetzen von (10) in (1) berechnen. Basierend auf den Berechnungsformeln erfolgte die idealisierte Analyse eines dreiachsigen, schraubengefederten Fahrzeugs, auf dessen Pritsche verschiedenste Ladungen platziert werden können. Ziel der Untersuchung ist die Erzeugung von Grenzkurven für die Beladung mit verschiedenen Massen und unterschiedlichen Höhenschwerpunkten unter der Einhaltung folgender Randbedingungen:

- Zulässige Achslasten dürfen nicht überschritten werden
- Vorderachslast darf 20% der Summe aller Achslasten nicht unterschreiten (Homologationskriterium Lenkung)
- Radlastunterschiede zwischen links und rechts dürfen 5% der mittleren Radlast nicht überschreiten
- Kippstabilität

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Beladungsgrenzkurve für genannte Kriterien, die Beladungsgrenzkurven in der x-y-Ebene sind nicht dargestellt. Die Berechnung der Grenzkurven erfolgte über das CAE-Tool *SimuLAST*.

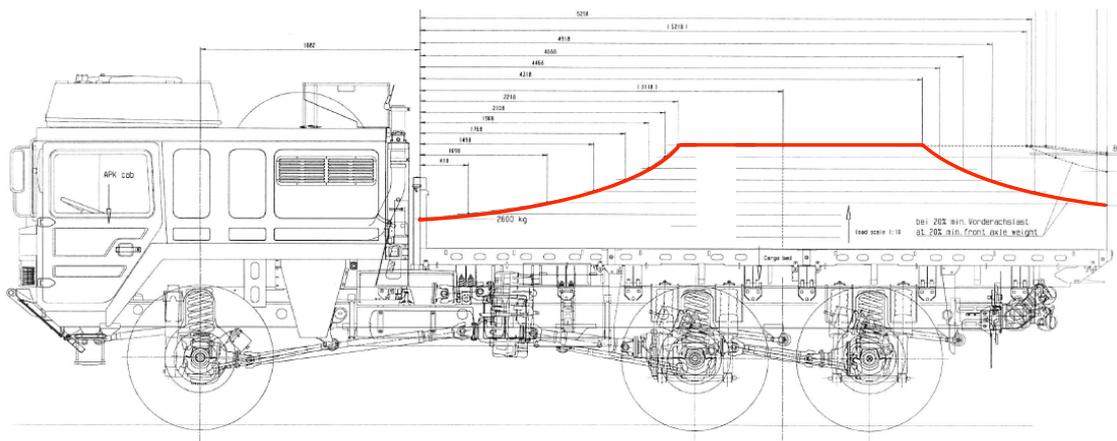


Abb. A.2: MAN-SX44 Beladungsgrenzkurve

Ein Vergleich der analytischen Berechnung nach obiger Herleitung mit einer nichtlinearen MKS-Simulation verdeutlicht, dass vor allem in den Randpositionen der verschobenen Masse deutliche Unterschiede zwischen den Berechnungsverfahren auftreten. Dies ist auf die Linearisierung der Federsteifigkeit im analytischen Berechnungsmodell zurückzuführen, das den Arbeitsbereich der Fahrwerksfederung idealisiert bei konstanter Steifigkeit  $c_i$  betrachtet. Im Fahrzeug ist die Federsteifigkeit einer Achse eine Funktion des Federwegs und setzt sich aus einer Parallelschaltung von drei Federelementen pro Seite zusammen

(eine Schraubenfeder und zwei Elastomerfedern). Nachfolgend sind die resultierenden Achslasten über dem Verschiebeweg der Ladung dargestellt. Ersichtlich ist eine relativ gute Übereinstimmung im Mittelbereich und die starken Abweichungen vor allem der zweiten Triebachse, die bei exakter Berechnung deutlich stärker überlastet ist.

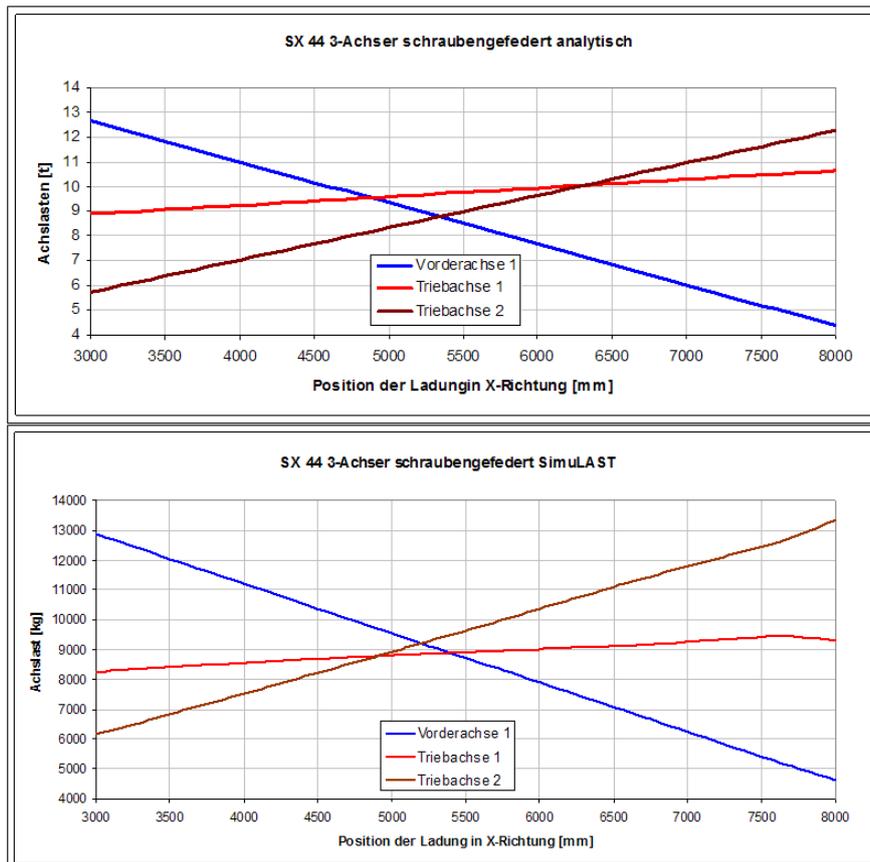


Abb. A.3: Vergleich analytisches Berechnungsverfahren (oben) SimuLAST (unten)

Eine standardisierte Analyse aller geländegängigen Fahrzeuge erfolgt direkt am Konstruktorsarbeitsplatz über das erläuterte Konzept der Daten- und CAE-Bereitstellung mittels SDM und *SimuLAST* und hat in den letzten Monaten gezeigt, dass neben einer deutlichen Entlastung der Berechnungsabteilung ein Zeit- und Kostenvorteil im Entwicklungs- und Vertriebsprozess erzielt werden konnte. Die Simulationsergebnisse konnten mittels Versuch validiert werden, so dass die beschriebene Methodik im Rahmen der Toleranzen als prozess- und aussagesicher angesehen wird.

## Use Case Preprocessing Lenkungssimulation

Blattfedergeführte starre Vorderachsen erfordern für die Auslegung der Lenkungskinetik Kenntnisse über das Blattfederverhalten, bezogen auf Paralleleinfedern, verschränktes Einfedern und Bremsungen (S-Schlag-Verhalten), da nur so ein Kompromiss für die Lage des Lenkstockhebelkugelkopfes gefunden werden kann. Eine Vermeidung von selbsttätigem Lenken bei Einfedern und Bremsung ist hier ein wesentliches Auslegungskriterium, aufgrund dessen das elastokinematische Blattfederverhalten analytisch oder numerisch approximiert werden muss. Auf Basis der Blattfedermomentanpole kann dann eine Lenkungsauslegung mittels *SimuLENK* erfolgen.

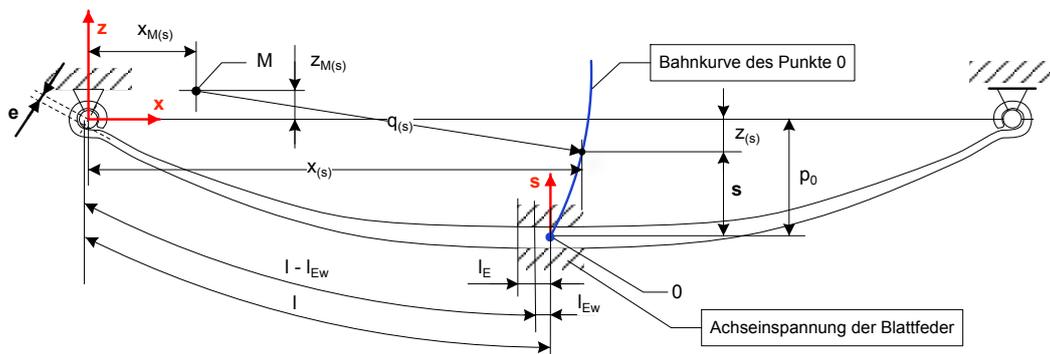


Abb. A.4: Maße der Blattfeder

Die Analyse von Blattfedern erfolgt bei MAN über ein analytisches Berechnungsverfahren, das nachfolgend erläutert ist. Die idealisierte symmetrische Einblattfeder ist im Lagerpunkt A fest und im Lagerpunkt B gleitend gelagert. Die z-Komponente der Bewegung des Achseinspannpunktes 0 berechnet sich aus der entspannten Lage  $p_0$  und dem Federweg  $s$  zu:

$$z(s) = s - p_0 \quad (1)$$

Als Approximation, die über Komponentenversuche ermittelt wurde, hat sich für die Blattfedereinspannung von Parabelfedern der Faktor  $l_{Ew} = 0,5 \cdot l_E$  ergeben. Für  $A(s)$  und  $B(s)$  als Funktionen eines Kreisbogens ergeben sich nach Umformung:

$$A(s) = \sqrt{(l - l_{Ew})^2 - \frac{4}{3} \cdot (p_0 - e - s)^2 - 8 \cdot e \cdot (p_0 - e - s)} \quad (2)$$

$$B(s) = \sqrt{(l - l_{Ew})^2 - \frac{4}{3} \cdot (p_0 - e - s)^2} \quad (3)$$

Daraus errechnet sich die x-Komponente des Einspannpunktes über die Mittelung der Funktionen  $A(s)$  und  $B(s)$  zu:

$$x(s) = \frac{A(s) + B(s)}{2} + l_{Ew} \quad (4)$$

Für den Krümmungsradius der Bahnkurve ergibt sich über die Krümmung eines Graphen:

$$q(s) = -\frac{(1 + x'^2(s))^{\frac{3}{2}}}{x''(s)} \quad (5)$$

die Koordinate des Krümmungsmittelpunktes  $x_M(s)$  zu:

$$x_M(s) = x(s) + \frac{(1 + x'^2(s))}{x''(s)} \quad (6)$$

und die Koordinaten des Krümmungsmittelpunktes  $z_M(s)$  zu:

$$z_M(s) = z(s) + \frac{x'(s) \cdot (1 + x'^2(s))}{x''(s)} \quad (7)$$

durch die erste Ableitung für die Koordinate  $x$  aus (3) folgt:

$$x'(s) = \frac{dx}{ds} = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{p_0 + 2 \cdot e - s}{\sqrt{A(s)}} + \frac{p_0 - e - s}{\sqrt{B(s)}} \right) \quad (8)$$

und für die zweite Ableitung der Koordinate  $x$ :

$$x''(s) = \frac{d^2x}{ds^2} = -\frac{2}{3} \cdot \left[ \frac{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{(p_0 + 2 \cdot e - s)^2}{A(s)}}{\sqrt{A(s)}} + \frac{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{(p_0 - e - s)^2}{B(s)}}{\sqrt{B(s)}} \right] \quad (9)$$

Ein Vergleich des analytischen Berechnungsverfahrens, das mit relativ geringem Aufwand in Konstruktionsabteilungen über entsprechende Benutzeroberflächen durchgeführt werden kann, mit nichtlinearer FEM, verdeutlicht, dass die Berechnungsmethodik sehr gut

dem realen Blattfederverhalten der Einblattfeder für Paralleleinfedern entspricht. Nicht durch die Berechnungsmethodik abgebildet ist hingegen die nichtlineare Verdrehung der Blattfeder bei Bremsung (S-Schlag), die aktuell mittels nichtlinearer FEM berechnet wird. In Arbeit ist hier ebenfalls eine Substitution des aktuellen Berechnungsverfahrens mittels beschriebener Methodik der CAE-Bereitstellung. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Differenzen der verschiedenen Blattfederberechnungsverfahren. Dargestellt sind neben der analytischen Berechnung und der nichtlinearen FEM mittels ANSYS ein Biegebalken nach der Balkentheorie sowie ein aus ANSYS für die MKS-Simulation erzeugtes, lineares Modell:

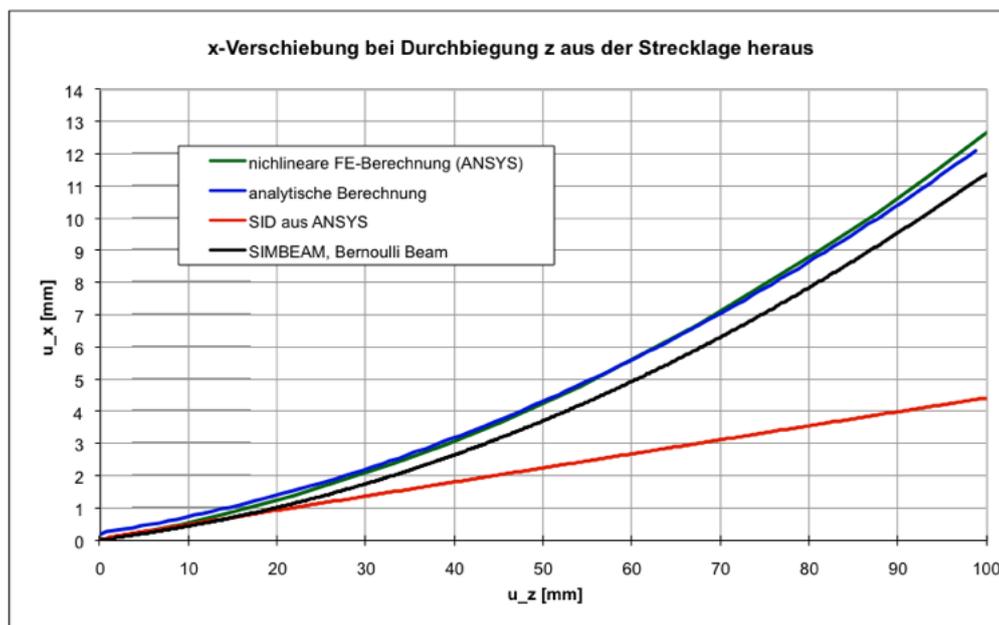
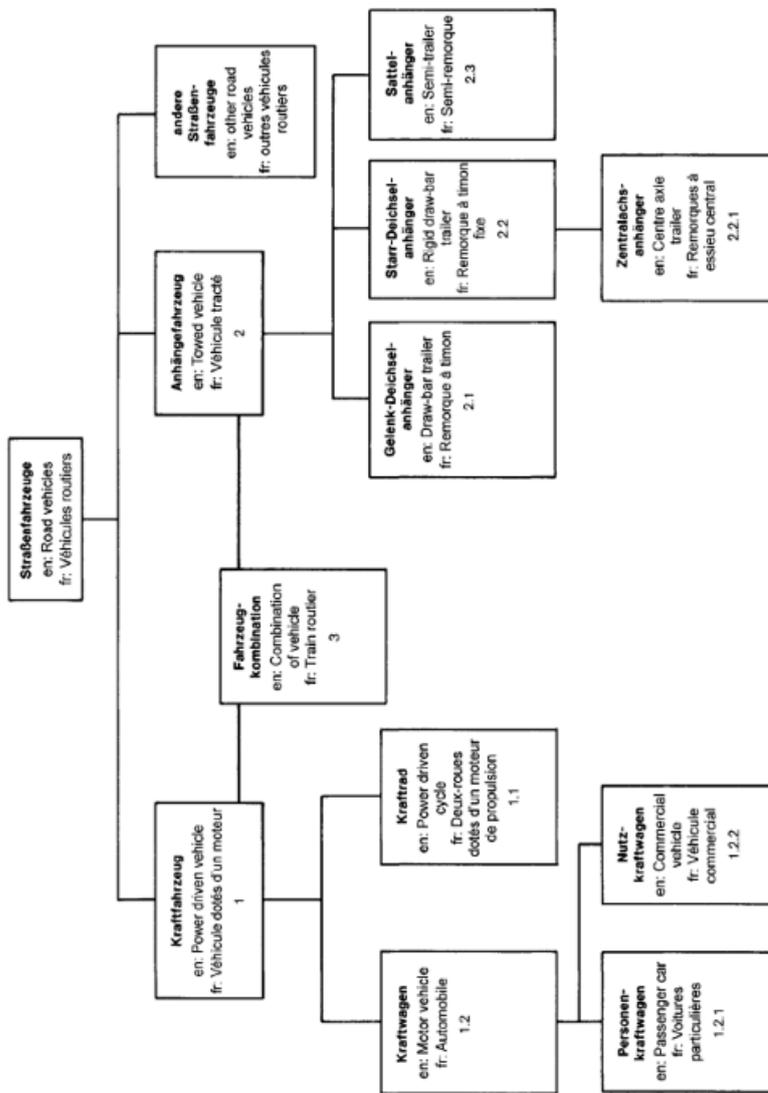


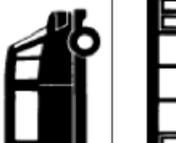
Abb. A.5: Vergleich der Blattfederberechnungsverfahren (Quelle: MAN Nutzfahrzeuge AG)

## **Anhang 2**

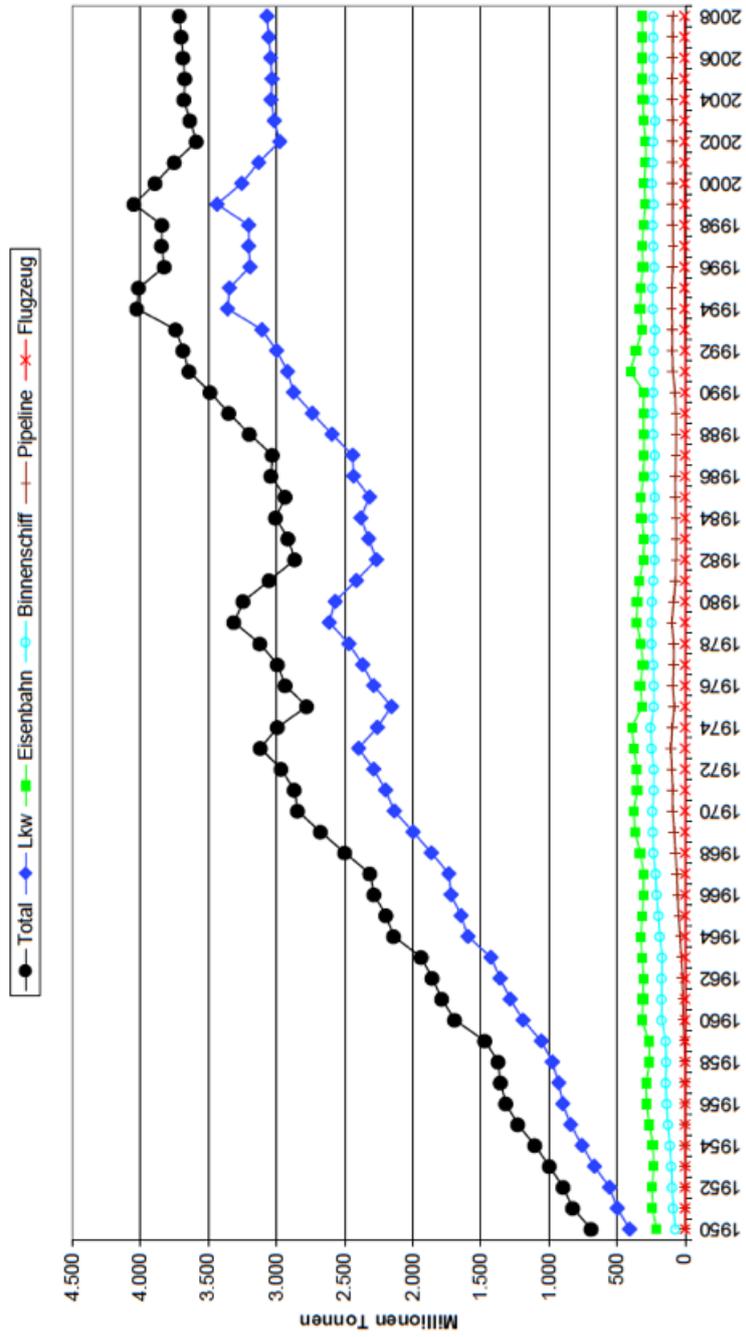
Nachfolgend wird ein Überblick über die nach DIN 70010 definierte Systematik der Straßenfahrzeuge sowie die transportspezifischen Statistiken des BGA gegeben. Ein Fokus wurde hierbei auf das Nutzfahrzeug und seine Anhänger gelegt, PKW sind nicht dargestellt worden.



1.2.2	<b>Nutzkraftwagen</b> (Nkw) en: Commercial vehicle fr: Véhicule commercial	Kraftwagen, der nach seiner Bauart zur Beförderung von Personen, Gütern und für besondere Einsatzzwecke oder zur Leistung einer besonderen Arbeit und/oder zum Ziehen von Anhängergefahrzeuge bestimmt ist, Personenkraftwagen (siehe Nr 1.2.1) sind ausgeschlossen.	
1.2.2.1	<b>Kraftomnibus</b> (KOM) en: Bus fr: Autobus	Nutzkraftwagen, der nach seiner Bauart und Einrichtung zur Beförderung von mehr als 9 Personen (einschließlich Fahrzeugführer) und ihres Reisegepäcks oder für besondere Einsatzzwecke bestimmt ist. Dieser kann ein oder zwei Decks (Benennung „Doppeldeckerbus“) haben.	

Nr	Benennung	Definition	Darstellung
1.2.2.1.1	<b>Kleinbus</b> en: Minibus fr: Minibus	Kraftomnibus mit einem Deck, der zur Beförderung von maximal 17 ausschließlich sitzenden Personen (einschließlich Fahrzeugführer) bestimmt ist.	
1.2.2.1.2	<b>Linienbus</b> en: Urban bus fr: Autobus urbain	Kraftomnibus, der zur Beförderung von sitzenden und stehenden Personen im Stadt- und Vorort-Linierverkehr bestimmt ist, wobei der dem häufigen Halten entsprechenden Beweglichkeit der Personen zum Ein- und Aussteigen Rechnung getragen ist.	
1.2.2.1.3	<b>Überlandlinienbus</b> en: Interurban coach fr: Autocar interurbain	Kraftomnibus, der für den Einsatz im Überland-Linierverkehr bestimmt ist, ohne spezielle Stehplätze, wobei auf kurzen Strecken im Gang stehende Personen befördert werden können.	
1.2.2.1.4	<b>Reisebus</b> en: Long distance coach fr: Autocar (long courrier)	Kraftomnibus, der nach Bauart und Einrichtung für Reisen über lange Wegstrecken bestimmt ist. Dieses Fahrzeug ist mit besonderem Komfort für sitzende Fahrgäste ausgestattet; stehende Fahrgäste werden nicht befördert.	
1.2.2.1.5	<b>Gelenkbus</b> en: Articulated bus fr: Autobus articulé	Kraftomnibus, bestehend aus zwei starren Teilen, die bleibend durch einen Gelenkabschnitt winkelig beweglich miteinander verbunden sind. Bei Fahrzeugen dieser Art sind die Fahrgasträume der beiden starren Fahrzeugabschnitte miteinander verbunden. Der Gelenkabschnitt ermöglicht den Fahrgästen freien Durchgang zwischen den beiden starren Teilen. Er kann ausgestattet sein wie Busse nach Nr 1.2.2.1.2 bis Nr 1.2.2.1.4. Ein Gelenkbus, bestehend aus drei starren Teilen, wird als „Doppelgelenkbus“ bezeichnet.	
1.2.2.1.6	<b>Oberleitungsbus (O-Bus)</b> en: Trolley bus fr: Trolleybus	Kraftomnibus, der elektrisch angetrieben wird und den Fahrtrom aus einer Fahrleitung entnimmt. Er kann bestimmt sein für Einsatzzwecke und ausgestattet sein wie Busse nach Nr 1.2.2.1.2, Nr 1 2.2.1.3 und Nr 1.2.2.1.5. <b>ANMERKUNG</b> Oberleitungsbus, der zusätzlich mit einem Verbrennungsmotor zum Antrieb ausgestattet ist, wird als „Duo-Bus“ bezeichnet.	
1.2.2.1.7	<b>Spezialbus</b> en: Special bus fr: Autobus spécial	Kraftomnibus, der nach seiner Bauart und Einrichtung zur Beförderung von Personen, für die besondere Vorkehrungen erforderlich sind, bestimmt ist (z. B. für Behinderte, Gefangene usw.).	

## Güteraufkommen der Verkehrsträger im Bundesgebiet 1950-2008



Quellen: DIW, Berlin; ifo, München; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden; Prognos/ProgTrans, Basel und Berechnungen des BGL  
 © BGL e.V. - Verwertung und Vervielfältigung nur mit Quellenangabe gestattet.

Nr	Benennung	Definition	Darstellung
1.2.2.2	<b>Lastkraftwagen</b> (Lkw) en: Lorry (truck) fr: Véhicule utilitaire	Nutzkraftwagen, der nach seiner Bauart und Einrichtung zum Transport von Gütern bestimmt ist.	
1.2.2.2.1	<b>Vielwecklastkraftwagen</b> en: General purpose goods vehicle fr: Véhicule utilitaire à usage général	Lastkraftwagen, der dazu bestimmt ist, Güter auf einem offenen (z. B. Pritsche, Kipper usw.) oder in einem geschlossenen Aufbau (z. B. Kasten, Koffer usw.) zu transportieren.	
1.2.2.2.2	<b>Speziallastkraftwagen</b> en: Special commercial vehicle fr: Véhicule utilitaire spécial	Lastkraftwagen (siehe Nr 1.2.2.2), der auf Grund seines(r) besonderen Aufbaus/Ausrüstung und Einrichtung – zur Beförderung von speziellen Gütern – für besondere Einsatzzwecke bestimmt ist (z. B. Tankkraftwagen, Feuerwehrfahrzeug, Abschleppwagen, Autotransporter, Pannenfahrzeug, Mehrzweckfahrzeug, Rettungswagen, Bestattungswagen, Müllfahrzeug, Straßenreinigungsfahrzeug, Winterdienstfahrzeug, Gruben- und Kanalreinigungsfahrzeug, Lastkraftwagen für Container, Wechselbehälter, Wechsellaufbauten oder Wohnmobil).	
1.2.2.3	<b>Zugmaschine</b> en: Towing vehicle fr: Véhicule tracteur	Nutzkraftwagen (siehe Nr 1.2.2), der ausschließlich oder überwiegend zum Mitführen von Anhängern bestimmt ist.	
1.2.2.3.1	<b>Anhänger-Zugmaschine</b> en: Trailer towing vehicle (drawbar tractor) fr: Véhicule tracteur de remorque	Zugmaschine zum Mitführen von Gelenk- oder Starr-Deichselanhängern (siehe Nr 2.1 und Nr 2.2). Sie kann Güter auf einer Hilfsladefläche befördern. <sup>10)</sup>	
1.2.2.3.2	<b>Sattelzugmaschine</b> en: Semi-trailer towing vehicle (fifth wheel tractor) fr: Véhicule tracteur de semi-remorque	Zugmaschine, die eine besondere Vorrichtung zum Mitführen von Sattelanhängern hat, wobei ein wesentlicher Teil des Gewichtes des Sattelanhängers von der Sattelzugmaschine getragen wird.	

<sup>10)</sup> Maßgebend ist die gesetzlich festgelegte Grenze für die Größe der Hilfsladefläche und die auf dieser zu befördernde Nutzlast.

Nr	Benennung	Definition	Darstellung
2.3	<b>Sattelanhänger</b> en: Semi-trailer fr: Semi-remorque	Anhängfahrzeug, bei dem - anstelle der bei den Gelenk-Deichselanhängern vorhandenen ersten Achse eine Sattelvorrichtung angeordnet ist und - ein wesentlicher Teil seines Gesamtgewichts auf eine Sattelzugmaschine (siehe Nr 1.2.2.3.2) (auch Deichselachse (Dolly)) übertragen wird.	
2.4	<b>Lastanhänger</b> en: Goods trailer fr: Remorque utilitaire	Anhängfahrzeug nach Nr 2.1 bis Nr 2.3, das zum Transport von Gütern bestimmt ist.	
2.5	<b>Busanhänger</b> en: Bus trailer fr: Remorque d'autobus	Anhängfahrzeug nach Nr 2.1 bis Nr 2.3, das nur zur Beförderung von Personen einschließlich ihres Gepäcks bestimmt ist. Es kann entsprechend Nr 1.2.2.1.1 bis Nr 1.2.2.1.4 ausgerüstet sein.	
2.6	<b>Caravan</b> en: Caravan fr: Caravane	Zentralachsanhänger, der für Wohnzwecke bestimmt und eingerichtet ist.	
2.7	<b>Spezialanhänger</b> en: Special trailer fr: Remorque spéciale	Anhängfahrzeug nach Nr 2.1 bis Nr 2.3, das - zur Beförderung von speziellen Gütern, - zur Leistung einer besonderen Arbeit oder - für besondere Einsatzzwecke bestimmt ist (z. B. Tieflader-, Tank-, Luftkompressor-, Turmdrehkran-, Baubüden-, Schausteller-Anhänger).	
3 (t, u)	<b>Fahrzeugkombination</b> en: Combination of vehicles fr: Train routier	Zusammenstellung aus einem Kraftfahrzeug (siehe Nr 1) und einem oder mehreren Anhängfahrzeugen (siehe Nr 2).	
2.2.1	<b>Zentralachsanhänger</b> en: Centre axle trailer fr: Remorque à essieu central	Starr-Deichselanhänger mit starrer Zugeinrichtung, dessen Achse(n) nahe dem Schwerpunkt des gleichmäßig beladenen Fahrzeugs so angeordnet ist (sind), dass nur eine geringfügige statische Stützlast, die 10 % der größten Masse des Anhängers bzw. eine Last von 1 000 daN nicht übersteigt (es gilt der jeweils niedrigere Wert), auf die Zugmaschine übertragen wird.	

Nr	Benennung	Definition	Darstellung
3.2	<b>Ornibuszug</b> en: Passenger road train fr: Train routier à passagers	Zusammenstellung aus einem Kraftomnibus (siehe Nr 1.2.2.1) und einem oder mehreren Anhängerfahrzeugen (siehe Nr 2). Der Fahrgastraum ist nicht durchgehend. Eine begehbare Verbindung kann jedoch vorgesehen sein.	
3.3	<b>Lastkraftwagenzug</b> en: Road train fr: Train routier utilitaire	Zusammenstellung aus einem Lastkraftwagen (siehe Nr 1.2.2.2) und einem oder mehreren Gelenk- oder Starr-Deichselanhängern (siehe Nr 2.1 und Nr 2.2).	
3.4	<b>Zugmaschinenzug</b> en: Drawbar tractor combination fr: Train routier (convoy exceptionnel)	Zusammenstellung aus einer Anhänger-Zugmaschine (siehe Nr 1.2.2.3.1) oder einem Traktor (siehe Nr 1.2.2.3.3) und einem oder mehreren Gelenk- oder Starr-Deichselanhängern (siehe Nr 2.1 und Nr 2.2).	
3.5	<b>Sattelkraftfahrzeug</b> en: Articulated vehicle fr: Véhicule articulé	Zusammenstellung aus einer Sattelzugmaschine (siehe Nr 1.2.2.3.2) und einem winkelbeweglich aufgesattelten Sattelanhänger (siehe Nr 2.3).	
3.6	<b>Sattelzug</b> en: Double road train fr: Train routier double	Zusammenstellung aus einem Sattelkraftfahrzeug (siehe Nr 3.5) und einem Anhängerfahrzeug (siehe Nr 2).	
3.7	<b>Brückenzug</b> en: Platform road train fr: Train routier à plateforme	Zusammenstellung aus einem Lastkraftwagen (siehe Nr 1.2.2.2) oder einer Zugmaschine (siehe Nr 1.2.2.3.1; Nr 1.2.2.3.2) und einem Spezialanhänger (Nachläufer), bei der die in der Länge unteilbare Last, die kein Ladungsträger ist, sowohl auf dem Kraftfahrzeug als auch auf dem Spezialanhänger winkelbeweglich liegt. Hilfseinrichtungen zur Unterstützung dieser Last können vorhanden sein. Diese Last und/oder ihre Unterstützungseinrichtung stellt die Einrichtung zur Verbindung der beiden Fahrzeuge dar.	

**Entwicklung der Lkw-Mautsätze in Deutschland von 2005 bis 2011**

<b>Mautsätze für Lkw ab 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit bis zu 3 Achsen</b>									
Emissions-klasse	Kat.	01.01.2005 bis 30.9.2006	bis 30.8.2007	bis 31.12.2008	Emissions-klasse	Kat.	ab 01.01.2009	Steigerung gegenüber 2008	ab 01.01.2011
EURO 0	C	0,130 €/km	0,130 €/km	0,145 €/km	EURO 0	D	0,274 €/km	+ 89 %	0,273 €/km
EURO I	C	0,130 €/km	0,130 €/km	0,145 €/km	EURO I	D	0,274 €/km	+ 89 %	0,273 €/km
EURO II	C	0,110 €/km	0,130 €/km	0,145 €/km	EURO II	D	0,274 €/km	+ 89 %	0,273 €/km
EURO III	B	0,110 €/km	0,110 €/km	0,120 €/km	EURO III / EURO II + PF *)	C	0,190 €/km	+ 58 %	0,210 €/km
EURO IV	B	0,090 €/km	0,110 €/km	0,120 €/km	EURO IV / EURO III + PF *)	B	0,169 €/km	+ 41 %	0,168 €/km
EURO V	A	0,090 €/km	0,090 €/km	0,100 €/km	EURO V	A	0,141 €/km	+ 41 %	0,140 €/km
EEV *)	A	0,090 €/km	0,090 €/km	0,100 €/km	EEV *)	A	0,141 €/km	+ 41 %	0,140 €/km

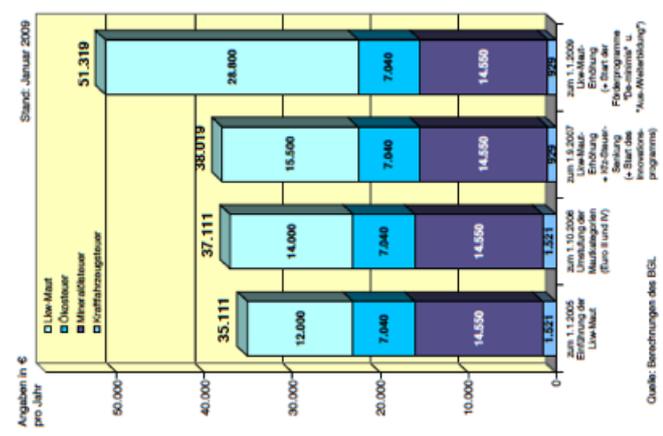
<b>Mautsätze für Lkw ab 12 t zulässigem Gesamtgewicht mit 4 oder mehr Achsen</b>									
Emissions-klasse	Kat.	01.01.2005 bis 30.9.2006	bis 30.8.2007	bis 31.12.2008	Emissions-klasse	Kat.	ab 01.01.2009	Steigerung gegenüber 2008	ab 01.01.2011
EURO 0	C	0,140 €/km	0,140 €/km	0,155 €/km	EURO 0	D	0,288 €/km	+ 86 %	0,287 €/km
EURO I	C	0,140 €/km	0,140 €/km	0,155 €/km	EURO I	D	0,288 €/km	+ 86 %	0,287 €/km
EURO II	C	0,120 €/km	0,140 €/km	0,155 €/km	EURO II	D	0,288 €/km	+ 86 %	0,287 €/km
EURO III	B	0,120 €/km	0,120 €/km	0,130 €/km	EURO III / EURO II + PF *)	C	0,204 €/km	+ 57 %	0,224 €/km
EURO IV	B	0,100 €/km	0,120 €/km	0,130 €/km	EURO IV / EURO III + PF *)	B	0,183 €/km	+ 41 %	0,182 €/km
EURO V	A	0,100 €/km	0,100 €/km	0,110 €/km	EURO V	A	0,155 €/km	+ 41 %	0,154 €/km
EEV *)	A	0,100 €/km	0,100 €/km	0,110 €/km	EEV *)	A	0,155 €/km	+ 41 %	0,154 €/km

\*) EEV = Enhanced Environmentally Friendly Vehicle; PF = Partikelfilter

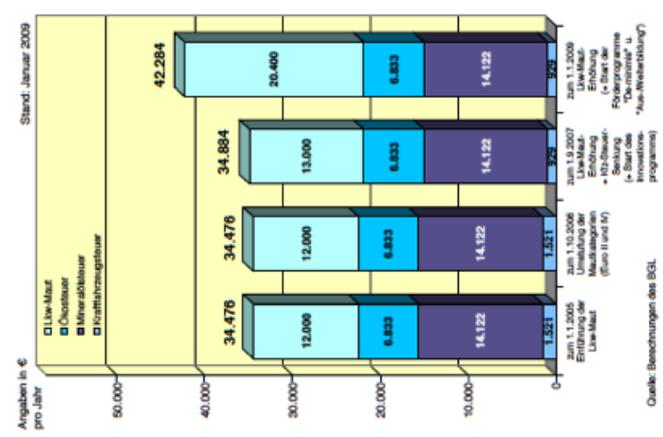
© Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V., Frankfurt am Main; Stand: Januar 2009

## Entwicklung der Jahresabgabenbelastung eines deutschen 40 t-Sattelzuges von 2005 – 2009

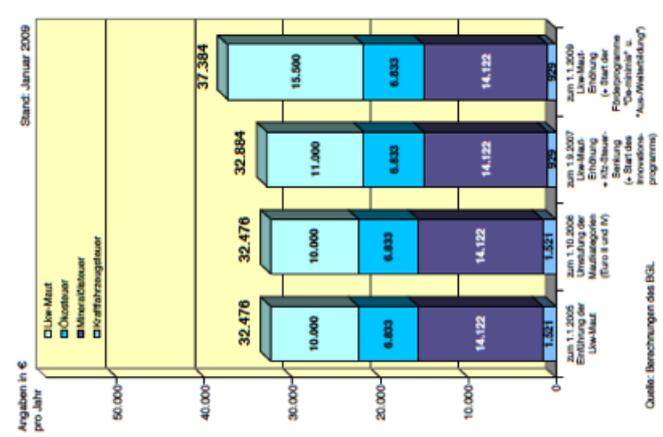
**der Emissionsklasse Euro II**  
 (Jahresfahrleistung: 135.000 km, davon  
 100.000 km auf deutschen Autobahnen;  
 Verbrauch: 34 Liter Diesel/100 km)



**der Emissionsklasse Euro III**  
 (Jahresfahrleistung: 135.000 km, davon  
 100.000 km auf deutschen Autobahnen;  
 Verbrauch: 33 Liter Diesel/100 km)

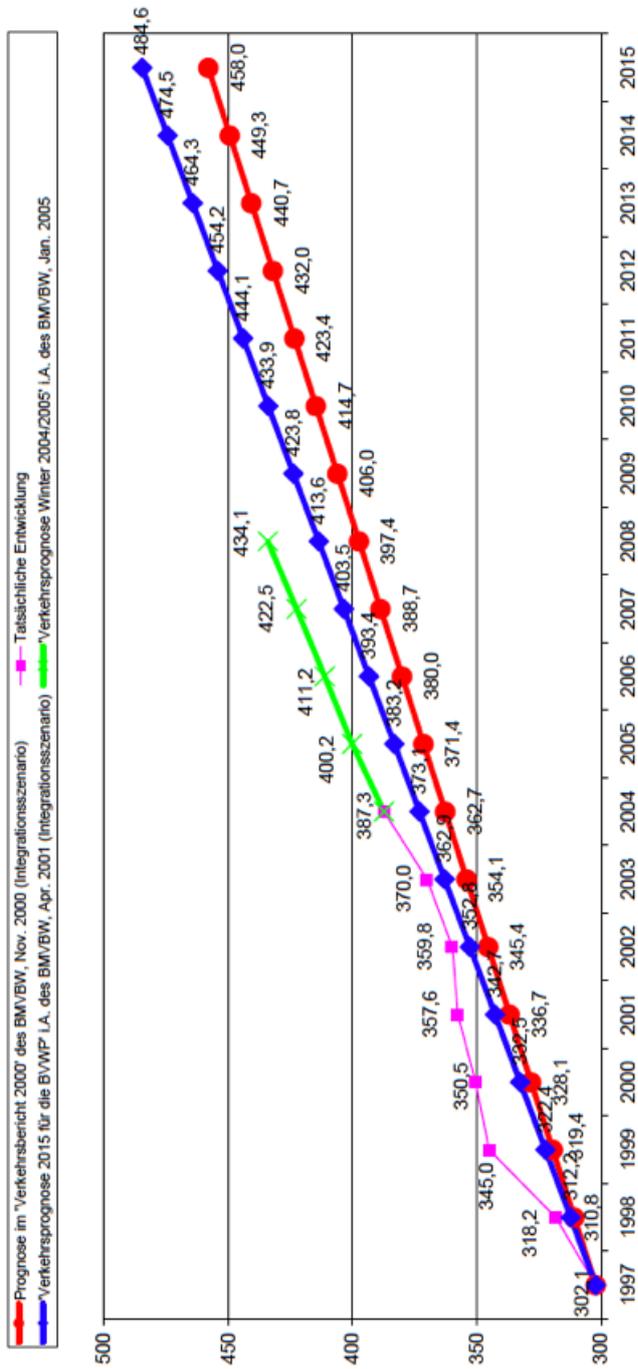


**der Emissionsklasse Euro V**  
 (Jahresfahrleistung: 135.000 km, davon  
 100.000 km auf deutschen Autobahnen;  
 Verbrauch: 33 Liter Diesel/100 km)



© Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V., 03/2009; Alle Angaben ohne Gewähr! Verwertung und Vervielfältigung nur mit Quellenangabe gestattet.

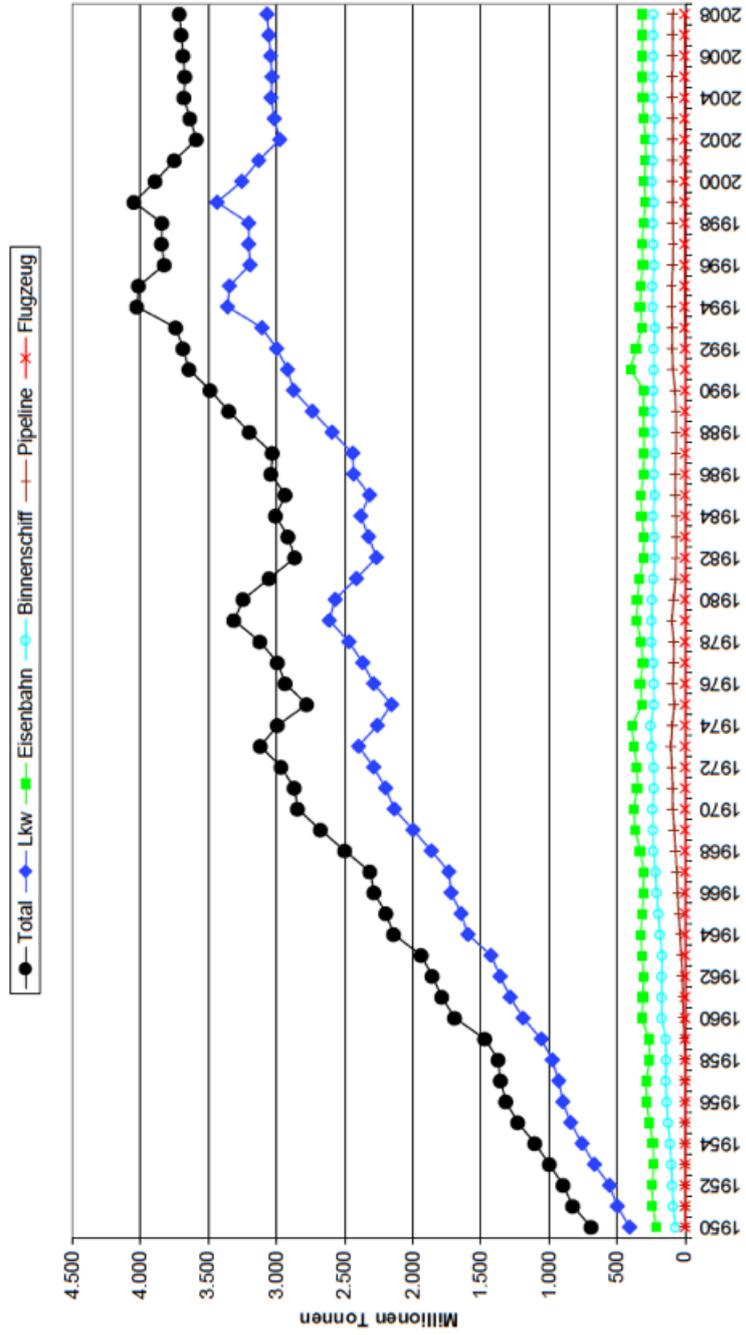
## Straßengüterverkehr in Deutschland 1997-2015 (in Mrd. tkm)



Quellen: Prognos und ProgTrans, Base; BMVBW, Berlin; ifo, München; BAG, Köln und Berechnungen des BGL

© Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V. - Verwertung und Vervielfältigung nur mit Quellenangabe gestattet.

## Güteraufkommen der Verkehrsträger im Bundesgebiet 1950-2008



Quellen: DIW, Berlin; ifo, München; Statistisches Bundesamt, Wiesbaden; Prognos/ProgTrans, Basel und Berechnungen des BGL  
 © BGL e.V. - Verwertung und Vervielfältigung nur mit Quellenangabe gestattet.