

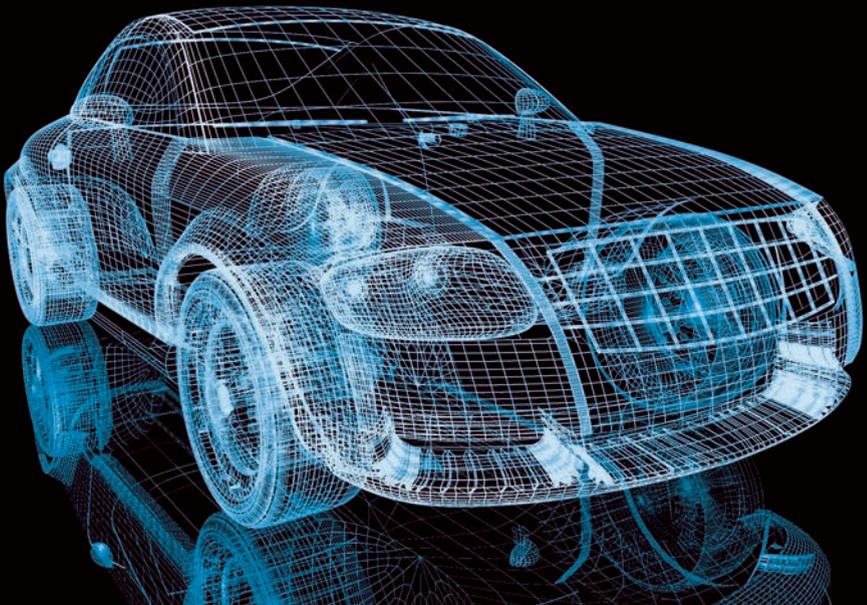
Patrick Rossbacher

Beitrag integrierter Konzeptmodelle zur virtuellen Gesamtfahrzeugentwicklung in der frühen Entwurfsphase

FTG 7

MONOGRAPHIC SERIES TU GRAZ
REIHE FAHRZEUGTECHNIK

FTG



Patrick Rossbacher

**Beitrag integrierter Konzeptmodelle zur virtuellen
Gesamtfahrzeugentwicklung in der frühen Entwurfsphase**

Monographic Series TU Graz

Reihe Fahrzeugtechnik

Herausgeber:

Institut für Fahrzeugtechnik

Monographic Series TU Graz

Reihe Fahrzeugtechnik Band 7

Patrick Rossbacher

Beitrag integrierter Konzeptmodelle zur virtuellen Gesamtfahrzeugentwicklung in der frühen Entwurfsphase

Diese Schrift wurde im November 2018 unter dem Titel "Beitrag integrierter Konzeptmodelle zur virtuellen Gesamtfahrzeugentwicklung in der frühen Entwurfsphase" als Dissertation am Institut für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Graz eingereicht.

Begutachtung:

Mario Hirz (Technische Universität Graz)

Detlef Gerhard (Ruhr-Universität Bochum)

Cover Foto	'concept car' von ArchMen (modifiziert) Fotolia / Adobe Stock
Cover Layout	Christina Fraueneder, TU Graz Stefan Schleich, TU Graz
Druck	DATAFORM Media Ges.m.b.H.

© 2020 Verlag der Technischen Universität Graz
www.tugraz-verlag.at

Print

ISBN 978-3-85125-728-1

E-Book

ISBN 978-3-85125-729-8

DOI 10.3217/978-3-85125-728-1



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

*Das Ganze ist mehr als die Summe
seiner Teile.*

ARISTOTELES, 3. Jahrhundert v. Chr.
Griechischer Philosoph und
Naturforscher

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz im Rahmen eines industriellen Forschungsprojektes, das zusammen mit der Magna Steyr Fahrzeugtechnik und der Volkswagen Konzernforschung durchgeführt wurde. An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Assoc. Prof. Dr.techn. Mario Hirz bedanken, der mir die Möglichkeit zur Promotion geboten hat und mit seiner fachlichen Unterstützung einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet hat. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Wilhelm Dietrich bei der Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co. KG sowie bei den Herren Dr. Andreas Hillebrand und Dr. Matthias Heitmann bei der Volkswagen AG für die regen Diskussionen und wissenschaftlichen Anmerkungen bedanken.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Daniela und meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung und ihr Verständnis während der gesamten Zeit eine große Stütze waren und zum Gelingen dieser Arbeit ebenfalls beigetragen haben.

Raaba, im September 2018

Patrick Rossbacher

Kurzfassung

Die Automobilentwicklung sieht sich heute einem vielfältigen Spektrum an unterschiedlichen Herausforderungen gegenüber. So führt etwa die drohende Verknappung fossiler Energieträger zusammen mit der steigenden Urbanisierung zu Diskussionen um alternative und innovative Antriebssysteme, Nutzung regenerierbarer Energieträger und effizientere, kleinere und leichtere Fahrzeuge. Seitens der Automobilhersteller resultiert dies u. a. in Überlegungen hinsichtlich neuer Fahrzeugarchitekturen, welche sich beispielsweise flexibel entsprechend den jeweiligen Marktbedingungen und Kundenwünschen anpassen lassen.

Aufgrund der heute stark globalen Ausprägung des Automobilmarktes sehen sich die Fahrzeughersteller einem wachsenden Wettbewerb ausgesetzt. Dies bedingt das Bestreben, die erforderliche Entwicklungszeit zu reduzieren, um möglichst schnell am globalen Markt mit innovativen Fahrzeuglösungen vor den Wettbewerbern präsent zu sein. Prozesseitig versucht man dieser Herausforderung durch die Nutzung zweier wesentlicher Mechanismen zu begegnen: Zum einen ist es erforderlich das Produktwissen in frühen Phasen der Entwicklung zu erhöhen, um mögliche Fehlentscheidungen und Tendenzen eines Konzeptes rasch vorab identifizieren zu können, da Änderungen am Fahrzeug zu späteren Zeitpunkten mit hohen Kosten verbunden sind. Dies führt zur gezielten Vorverlagerung von Auslegungstätigkeiten in frühe Phasen der Entwicklung, um das Produktwissen gezielt zu erhöhen (*Frontloading*). Zum anderen wird versucht, durch eine gezielte Parallelisierung von Prozesssträngen die Entwicklungszeit zu verkürzen, bzw. die resultierende Zeitersparnis zur Untersuchung alternativer Lösungsvarianten zu nutzen. Dieses Vorgehen wird auch als Simultaneous Engineering oder Concurrent Engineering bezeichnet.

Für das Gesamtfahrzeug hat dies weitreichende Folgen: Das Fahrzeug in seiner Gesamtheit wird durch die sogenannte Fahrzeugarchitektur verantwortet. Diese legt die verfügbaren Bauräume im Fahrzeug fest und moderiert im Zuge der Entwicklung die technische Lösungsfindung. Aufgrund der steigenden Fahrzeugfunktionen und wachsenden Anforderungen, z. B. aus den Bereichen Gesetz, Ergonomie oder Crash, sinkt das zur Verfügung stehende Bauraumangebot trotz des Trends steigender Außenabmessungen. Daher resultiert der Bedarf seitens der Fahrzeugarchitektur, möglichst früh neben klassischen geometrischen Aspekten auch funktionale Betrachtungen eines Konzeptes durchführen zu können, um grundlegend geometrisch und funktional validierte Bauräume den entwickelnden Fachbereichen bereitstellen zu können. Dies gestaltet sich in der frühen Konzeptphase als große Herausforderung. Zum einen stehen die technischen Randbedingungen oft nicht in der benötigten Reife und Schärfe zur Verfügung. Zum anderen fehlen bei Fahrzeugentwürfen mit hohem technischen Neuerungsgrad oft konkrete technische Lösungskonzepte für die benötigten Fahrzeugfunktionen. Deshalb werden an dieser Stelle vielfach sogenannte Expertenwerkzeuge in der virtuellen Entwicklung angewandt. Diese ermöglichen, auf Basis von Erfahrung, empirischen Modellen oder vereinfachten Funktions- und Geometriemodellen, erste Aussagen zu relevanten Fahrzeugeigenschaften und Formgebung tätigen zu können.

Hierzu wurde am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz das vierjährige industrielle Forschungsprojekt „ParamKA“ (Parametrische Konzeptauslegung) in enger Kooperation mit der Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co. KG, Abt. für Geometrische Integration,

und der Volkswagen Konzernforschung, Abt. Gesamtfahrzeug und Elektronik, durchgeführt. Dieses hatte zum Ziel, neue Methoden und Strategien für die Gesamtfahrzeugentwicklung zu finden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes entstand die Motivation zur vorliegenden Dissertation.

In der frühen Konzeptphase herrscht der höchste Freiheitsgrad bezüglich des Lösungsraums, gleichzeitig ist die Produktreife aufgrund fehlenden Wissens minimal. Aufgrund der steigenden Bedeutung der frühen Konzeptphase aus Perspektive des Gesamtfahrzeugs besteht daher ein hoher Bedarf an Methoden und Modellen, die es ermöglichen trotz der beschriebenen Randbedingungen rasch erste geometrische und funktionale Aussagen treffen zu können. Zur Unterstützung der Gesamtfahrzeugentwicklung in der frühen Phase soll daher ein möglicher Ansatz zu einem integrierten Konzeptmodell vorgestellt werden. Kern des Ansatzes ist die Idee, vorhandene Auslegungsinstrumente und Expertenwerkzeuge im Kontext des Gesamtfahrzeugs konsistent vernetzen zu können, um rasch geometrische und funktionale Aussagen zu einem Konzept tätigen zu können. Aufgrund der nach wie vor geometrischen Zentrierung der Fahrzeugarchitektur-Entwicklung bildet die Grundbasis des vorgestellten Ansatzes ein parametrisch-assoziatives Führungsmodell, das alle wesentlichen Elemente für die geometrische Darstellung eines Konzeptes beinhaltet. Durch die Nutzung von Schnittstellen und Automationsmechanismen können Berechnungs- wie Simulationsmodelle mit dem Führungsmodell bidirektional verknüpft werden. Das Führungsmodell wird hierbei vollständig durch entsprechende implementierte Steuerungsmechanismen verwaltet, wodurch sich eine flexible Parametrik realisieren lässt. Diese ermöglicht die variable Anpassung der im Modell abgelegten Beziehungen entsprechend der Erfordernisse im Konzept. Des Weiteren ermöglicht dieses Datenmodell die Darstellung verschiedener Zustände (z. B. Ziel-Sicht, Ist-Sicht), um den prozessualen Erfordernissen in der Konzeptentwicklung gerecht zu werden. Neben der Darstellung eines virtuellen Fahrzeugmodells verfügt der Ansatz über eine wissensbasierte Dimension. Durch die Nutzung einer speziellen Bewertungssystematik und Archivierungslogik auf Basis des objektorientierten Datenmodells kann nicht nur das Fahrzeugmodell selbst, sondern auch das den jeweiligen Analysen zugrundeliegende Wissen im Modell gespeichert werden. Dadurch kann das entstehende Auslegungswissen im Laufe eines Fahrzeugprojektes oder in neuen Projekten effizient wiederverwendet werden.

Die praktische Umsetzbarkeit des entwickelten Ansatzes wird anhand von ausgewählten Beispielen aus dem Bereich der konzeptionellen Fahrzeugauslegung gezeigt. Der Schwerpunkt soll hierbei auf die parametrischen und prozessualen Interaktionen der einzelnen Modelle untereinander gelegt werden.

Abstract

Today, automotive development has to face a broad spectrum of numerous exciting challenges. For instance, the imminent shortage of fossil energy in combination with the increasing urbanisation leads to discussions in the direction of alternative and innovative drive-trains, usage of regenerative energy sources and lighter as well as more efficient cars. This causes automotive companies to think about new vehicle architectures, which can be flexibly adapted to the specific market and customer needs.

Because of today's globalisation of the automotive customer market, vehicle producers have to face a growing number of competitors. This leads to the attempt to reduce the required development time, to be present on the global market before other competitors with innovative product solutions as fast as possible. From the process point of view there are two basic mechanisms, which are used simultaneously to meet this challenge: On the one hand there are strong efforts to increase the product knowledge in early phases of the development process in order to identify possible wrong decisions and tendencies of a particular concept already in advance, because modifications that are carried out in later phases lead to high costs. This causes a target-oriented forward displacement in early phases of the development process in order to increase the product knowledge (*front-loading*). On the other hand there are attempts to parallelise specific sections of the development process, in order to reduce the required development time or to use the gained time to analyse more concept variants. This is called *simultaneous engineering* or *concurrent engineering*.

This has extensive implications on the entire vehicle: The so called vehicle architecture department is accounted for the overall physical representation of the vehicle. This department defines the authorised technological spaces within the car and moderates spatial conflicts during the technical development and solution finding process. Because of the increasing number of vehicle functions and rising demands, e.g. legislation, ergonomics or crash, the available technical space within the car decreases despite the trend of rising exterior dimensions. This requires the exploration of functional aspects of the vehicle concept besides the traditional sole geometrical considerations already in the preliminary development phase, in order to provide essential geometrically and functionally evaluated technical space. This is a great challenge within the early concept phase. On the one hand it lacks of the availability of necessary technical boundary conditions of the required maturity and severity. On the other hand vehicle concepts with a high level of technical innovations often lack of precise technological solutions for the stated vehicle functions. This causes the application of so-called expert tools in virtual development. Those support the estimation of relevant vehicle properties and shape related topics on the basis of engineering experience, empirical models or simplified functional or geometric models.

To this, an industrial research project with a four year duration called "ParamKA" has been carried out together with Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co. KG department of geometrical integration and the Volkswagen group research department entire vehicle and electronics. The project aims the identification and development of new methods and strategies on the entire vehicle level.

The early concept phase offers the highest degree of freedom in terms of the possible technical solution space, whereas the product maturity is at a minimum. Because of the rising importance of the early concept phase out of the entire vehicle's perspective, there is a high need for methods and virtual models, which allow the fast and efficient preliminary prediction of geometrical and functional vehicle aspects despite the mentioned boundary conditions. In order to support the entire vehicle development in the early concept phase, a novel approach for an integrated concept model is introduced. The basic idea of the approach is to enable a consistent interconnection between CAx-applications and expert tools in the context of the entire vehicle, in order to allow the efficient evaluation of geometrical and functional vehicle aspects of a concept. Because of the strong geometric focus of a vehicle architecture department, the core of the approach is a parametric-associative master-model, which contains all essential elements for the representation of the geometrical aspects of a concept. The use of interfaces and automation-based routines allows the bidirectional linkage with calculations and simulation models with the master-model. The master-model is fully maintained by implemented control routines, which allows the provision of a flexible parametrisation within the integrated concept model. This enables a variable adaptation of the implemented model relations according to the requirements of the concept. Furthermore, the data model allows the representation of different states (e.g. target-state, current-state), in order to satisfy the process-related demands within the conceptual development. Besides the representation of a virtual vehicle model, the presented approach offers a knowledge-based dimension. The application of a specialised evaluation system and archiving logic allows the storage of the engineering knowledge generated during the conceptual development. This supports an efficient and comprehensible reuse of the engineering knowledge in later project phases or in new vehicle projects.

The practical realisation of the stated approach is shown by means of selected examples in the area of conceptual development. The focus is put on the parametric and process-related interaction of the different sub-models of the integrated concept model.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Herausforderungen und Spannungsfelder in der Fahrzeugentwicklung	1
1.2	Definition der Fahrzeugarchitektur	3
1.3	Konsequenzen für die physische Fahrzeugarchitektur	4
1.4	Der Produktentwicklungsprozess in der Automobilentwicklung	5
1.5	Schlussfolgerungen für die virtuelle Fahrzeugentwicklung auf Ebene des Gesamtfahrzeugs	8
2	Aufgabenstellung und Struktur der Arbeit	11
2.1	Motivation und Zielsetzung	11
2.2	Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen und Erweiterung des Standes der Technik	13
2.3	Aufbau und Gliederung der Arbeit	14
3	Die frühe Konzeptphase im PKW-Entwurf	17
3.1	Grundlegende Gestalt der frühen Entwurfsphase	17
3.2	Architekturkonzepte in der PKW-Konstruktion	21
3.3	Bestandteile eines virtuellen Architekturkonzepts	25
3.3.1	Darstellung von Anforderungen an das Fahrzeugkonzept	25
3.3.2	Das Fahrzeugmaßkonzept	27
3.3.3	Das Fahrzeugdesign	30
3.3.4	Die Produktstrukturliste	32
3.3.5	3D-Grobpaket und DMU-Produktstruktur	34
3.3.5.1	Randbedingungen für das Paket	34
3.3.5.2	Bestandteile des Pakets	35
3.3.5.3	Paket-Aufbau und Analyse	37
3.3.6	Funktionen auf Gesamtfahrzeugebene	40
3.3.6.1	Einfluss von Funktionen auf die Fahrzeugarchitektur	40
3.3.6.2	Hauptfunktionsgruppen auf Gesamtfahrzeugebene	41
3.3.6.3	Funktionsmodelle auf Gesamtfahrzeugebene	42
4	Stand der Technik	45
4.1	Computergestützte Geometriemodellierung (CAD)	45
4.1.1	Allgemeines zur rechnergestützten Modellierung	45
4.1.2	Modellierungsverfahren in der Automobilentwicklung	47
4.1.2.1	Subdivisionsmodellierung	47
4.1.2.2	Explizite und dynamische Modellierung	48
4.1.2.3	Parametrisch-assoziative Modellierung	48
4.1.3	Repräsentationsformen von Geometrie	53
4.1.4	CAD-Datentypen	54
4.1.5	Wissensbasiertes CAD und Automation	56
4.2	Das DMU (Digital Mock Up)	57
4.3	Das integrierte Produktmodell	60

4.4	Produktdatenmanagement in der Fahrzeugentwicklung	62
4.5	Informationsaustausch entlang der Datenprozesskette	64
4.5.1	Grundsätzliche Herausforderungen	64
4.5.2	Neutrale Datenformate	66
4.5.2.1	JT (Jupiter Tessellation)	67
4.5.2.2	IGES (Initial Graphics Specification)	67
4.5.2.3	STEP (Standard for the Exchange of Product Data)	67
4.5.2.4	STL (Surface Tessellation Language)	68
4.5.2.5	VRML (Virtual Reality Modelling Language)	69
4.6	CAD-basierte Expertensysteme in der virtuellen Fahrzeugentwicklung	70
4.6.1	Definition und Einsatz von Expertensystemen	70
4.6.2	Aufbau von CAD-basierten Expertenwerkzeugen aus Datensicht	71
4.6.3	Planung von Expertenwerkzeugen	73
4.7	Spezielle Ansätze zur Unterstützung der Fahrzeugkonzeption	75
4.7.1	Forschungsthemen auf Ebene der Fahrzeugarchitektur	75
4.7.2	Darstellung und Verwaltung von Vorgaben	75
4.7.3	Fahrzeugkonzeptionssysteme im Gesamtfahrzeugumfeld	77
4.7.3.1	Gesamtfahrzeugauslegungssysteme	77
4.7.3.2	Auslegungssysteme im Gesamtfahrzeugkontext	80
4.7.4	Ergonomie- und Menschmodelle	81
4.8	Fazit	83
5	Integriertes CAD-Konzeptmodell für die frühe Entwurfsphase	87
5.1	Anforderungen und Ziele der integrierten Konzeptarbeit	87
5.2	Architektur und Komponenten des integrierten Konzeptmodells	90
5.3	Komponenten des integrierten Konzeptmodells	93
5.3.1	Das Parametermodell	93
5.3.2	Geometriemodelle	98
5.3.2.1	CAD-Datentypen	98
5.3.2.2	Semantik von CAD-Modellen	99
5.3.2.3	Modifikation von CAD-Datensätzen	99
5.3.2.4	Positionierung von CAD-Datensätzen	100
5.3.2.5	Verbindlichkeit von CAD-Daten	101
5.3.2.6	Kontext und Verknüpfung von CAD-Datensätzen	101
5.3.2.7	Geometrische Modellstabilität	102
5.3.3	Die Konzeptproduktstruktur	104
5.3.3.1	Grundsätzliche Gliederung der Konzeptproduktstruktur	105
5.3.3.2	Erforderliche Basis-Attribute der Konzeptproduktstruktur	105
5.3.3.3	Abbildung der Konzeptproduktstruktur im CAD	106
5.3.3.4	Massenmanagement auf Basis der Konzeptproduktstruktur	107
5.3.4	Funktionsmodelle	113
5.3.4.1	Funktion im Kontext der Fahrzeugarchitektur	113
5.3.4.2	Allgemeine Gestalt von Funktionsmodellen im Kontext des Gesamtfahrzeugs	114

5.3.4.3	Klassifikation von Funktionsmodellen im Kontext des Gesamtfahrzeugs	115
5.4	Das Konzept-Framework	116
5.4.1	Allgemeine Eigenschaften des Konzept-Frameworks	116
5.4.2	Das Geometrie-Framework	117
5.4.2.1	Struktur und Übersicht des Geometrie-Frameworks	117
5.4.2.2	CAD-Parameter	118
5.4.2.3	3D-CAD-Referenzen	119
5.4.2.4	Vorgaben	121
5.4.2.5	Das Konzept	122
5.4.2.6	3D-CAD-Output	125
5.4.2.7	Einbindung von CAD-Modellen in das Geometrie-Framework	126
5.4.3	Das Funktions-Framework	128
5.4.3.1	Aufbau und Struktur des Funktions-Frameworks	128
5.4.3.2	Workflows im Funktions-Framework	129
5.4.4	Das Konfigurationsmodell	131
5.4.5	Das Kontrollmodell	132
5.5	Klassifikations- und Sichtenmodell	135
5.6	Bewertungsmodell und -systematik	138
5.7	Datenbankmodell und Archivierungssystematik	142
5.8	Das Prozessmodell	143
5.9	Datenschnittstelle zu externen Prozessen	145
5.9.1	Austausch parametrischer Informationen	146
5.9.2	Geometrieexport	146
5.9.3	Geometrieimport	147
5.10	Fazit	148
6	Anwendung eines integrierten Konzeptmodells in der Entwurfsphase	153
6.1	Architektur der prototypischen Umsetzung	153
6.2	Bedatung des integrierten Konzeptmodells	155
6.3	Geometriemodelle	156
6.3.1	Konzept-Vorgabenmodell	156
6.3.2	3D-Konzept-Proportionsmodelle und Packagekomponenten	157
6.3.3	Fahrzeugquerschnittsfläche	162
6.3.4	Das 2D/3D-Fahrzeuglayout	163
6.3.5	Generierung von Fahrwerkshüllen	164
6.3.6	Ergonomieadapter	167
6.3.7	Ableitung des Innenraumvolumens für die Klimatisierungsvorauslegung	168
6.3.8	Design-Vorgabemodell	170
6.4	Modelle zur Analyse funktionaler Produktmerkmale	170
6.4.1	Betrachtung von Masse, Masseverteilung und masseaffiner Größen	171
6.4.1.1	Erforderliche Masse-Eigenschaften in der frühen Konzeptphase	171
6.4.1.2	Ableitung von Nutzung von Gewichtswerten im integrierten Konzeptmodell	171

6.4.1.3	Wesentliche Komponenten in der konzeptionellen Gewichtsbe- trachtung	173
6.4.1.4	Abbildung des Massenpackage im CAD	174
6.4.2	Betrachtung der Fahrleistung	175
6.4.3	Bewertung der Querdynamik	178
6.4.4	Überschlagsneigung	181
6.4.5	Analyse und Bewertung des Wendekreises	182
6.4.6	Einbindung von FE-Rohbaumodellen	184
6.5	Steuerungskonzept der prototypischen Umsetzung	186
6.6	Anwendungsprozess zur integrierten Konzeptarbeit	188
6.6.1	Grundlegendes Vorgehensmodell in der integrierten Konzeptarbeit	188
6.6.2	Technische Randbedingungen und Ziele des Beispielkonzeptes	190
6.6.3	Bedatung des integrierten Konzeptmodells	191
6.6.4	Ableitung des geometrischen Grundkonzeptes	191
6.6.5	Grundlegende Bewertung ergonomischer Aspekte	194
6.6.6	Einbindung und Bewertung des Fahrzeugdesigns	196
6.6.7	Betrachtung von Fahrzeuggewicht und Schwerpunkt	198
6.6.8	Bewertung funktionaler Fahrzeugeigenschaften	201
6.6.9	Anwendung der Bewertungsmethodik	203
7	Fazit und Diskussion der Ergebnisse	207
8	Zusammenfassung	215
A	Anhang	221
A.1	Fahrzeugvorlagen	221
A.2	Einfluss des Abstandes auf das Massenträgheitsmoment	221
A.3	Euler-Winkel	222
A.4	Parameter des Software-Prototypen	223
A.5	Bewertungen im Software-Prototypen	257
	Tabellenverzeichnis	259
	Abbildungsverzeichnis	261
	Literaturverzeichnis	269

Abkürzungen

API	Automation Program Interface
BEM	Boundary Element Method
BEV	Battery Electric Vehicle
BREP	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAS	Computer Aided Styling
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMS	Crash Management System
COM	Carry Over Module
COP	Carry Over Part
CSG	Constructive Solid Geometry
DMU	Digital Mock-Up
EM	Elektromotor
ESD	Endschalldämpfer
EVA	Eingabe Verarbeitung Ausgabe
FEM	Finite Elemente Methode
FOL	Fertigungsorientierte Strukturlogik
FRP	Fersenreferenzpunkt
GCIE	Global Car Manufacturer Exchange Group
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HRP	Heel Reference Point
HV	Hochvolt
IGA	Isogeometrische Analyse
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IT	Informationstechnologie
JT	Jupiter Tessellation
KA	Konzeptauswahl

KS	Konzeptstart
KPS	Konzeptproduktstruktur
LOD	Level of Detail
MKS	Mehrkörpersimulation
ML	Messlast
MS	Meilenstein
MQB	Modularer Querbaukasten
NURBS	Non Uniform Rational B-Spline
OEM	Original Equipment Manufacturer
PDM	Produktdatenmanagement
PEP	Produktentwicklungsprozess
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PRP	Pedalreferenzpunkt
PS	Projektstart
RPT	Rapid Prototyping
SDM	Simulationsdatenmanagement
SDK	Software Development Kit
SgRP	Seating Reference Point
SOP	Start of Production
STEP	Standard for the exchange of product model data
VBA	Visual Basic for Applications
VDA	Verband der Automobilindustrie
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VRML	Virtual Reality Modelling Language
ZB	Zusammenbau

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Aufstandsfläche des Fahrzeugs
$A_{P,x}$	m^2	Projektionsfläche des Fahrzeugs in x-Richtung
\bar{a}	m/s^2	Beschleunigung
a_y	m/s^2	Querbeschleunigung
α_h	$^\circ$	Schräglaufwinkel Hinterachse
α_v	$^\circ$	Schräglaufwinkel Vorderachse
β	$^\circ$	Schwimmwinkel
c_w	–	Strömungsbeiwert
c_{av}	–	Auftriebsbeiwert Vorderachse
c_{ah}	–	Auftriebsbeiwert Hinterachse
c_{sv}	$\text{N}/-$	Seitensteifigkeit Vorderachse
c_{sh}	$\text{N}/-$	Seitensteifigkeit Hinterachse
c_t	$\text{N m}/^\circ$	Torsionssteifigkeit
$C_{VR,ML}$	mm	Zentrum des Vorderrades in einer spezifischen Messlast
$C_{HR,ML}$	mm	Zentrum des Hinterrades in einer spezifischen Messlast
δ	mm	Lenkwinkel
δ_i	mm	Lenkwinkel kurveninneres Rad
δ_a	mm	Lenkwinkel kurvenäußeres Rad
d	mm	Paralleler Abstand zu einer Trägheitsachse
EG	s^2/m	Eigenlenkgradient
\vec{F}	N	Kraft
$F_{v,y}$	N	Seitenführungskraft am Vorderrad
$F_{h,y}$	N	Seitenführungskraft am Hinterrad
F_L	N	Luftwiderstand
F_{St}	N	Steigungswiderstand
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
i_D	–	Übersetzung Differential
$i_{G,max}$	–	Maximale Getriebeübersetzung

l	mm	Radstand
L	s^2/m^4	Leichtbaugüte
l_v	mm	Abstand Vorderachse zu Schwerpunkt
l_h	mm	Abstand Hinterachse zu Schwerpunkt
m	kg	Masse
m_{Fz}	kg	Fahrzeugmasse
m_{Ger}	kg	Rohbaugewicht
m_i	kg	Gewicht einer einzelnen Komponente
m_r	kg	Gewicht einer einzelnen Komponente, die als schwerpunktrelevant indiziert wird.
Θ	kg m^2	Massenträgheitsmoment
Θ_M	kg m^2	Massenträgheitsmoment eines Moduls
$M_{kalk.}$	kg	Kalkulatorisches Gewicht
n_{Mot}	U/min	Motordrehzahl
$n_{Mot,max}$	U/min	Maximale Motordrehzahl
p	%	Steigfähigkeit
p_{max}	%	Maximale Steigfähigkeit
P_e		Eingabeparameter
P_a		Ausgabeparameter
$\dot{\psi}$	$^\circ/\text{s}$	Gierrate
r	mm	Abstand eines Massenelementes zur Rotationsachse
R	m	Kurvenradius
r_{dyn}	mm	Dynamischer Reifenradius
R_{stat}	mm	Statischer Reifenradius
$R_{stat,vo}$	mm	Statischer Reifenradius des Vorderrades
$R_{stat,hi}$	mm	Statischer Reifenradius des Hinterrades
R_x	$^\circ$	Drehung um die x-Achse des absoluten Fahrzeugkoordinatensystems
R_y	$^\circ$	Drehung um die y-Achse des absoluten Fahrzeugkoordinatensystems
R_z	$^\circ$	Drehung um die z-Achse des absoluten Fahrzeugkoordinatensystems
\vec{S}	mm	Schwerpunkt

SSF	mm	Static Stability Factor
S_x	mm	X-Koordinate des Schwerpunktes im CAD-0-Koordinatensystem
S_y	mm	Y-Koordinate des Schwerpunktes im CAD-0-Koordinatensystem
S_z	mm	Z-Koordinate des Schwerpunktes im CAD-0-Koordinatensystem
\vec{u}	mm	Verschiebung
\vec{u}_S	mm	Verschiebevektor des Ersatzschwerpunktes einer Komponentenmasse
\vec{v}	m/s	Geschwindigkeit
v_{ch}	m/s	Charakteristische Geschwindigkeit
v_{krit}	m/s	Kritische Geschwindigkeit
v_{max}	m/s	Maximalgeschwindigkeit
$x_{S,M}$	mm	X-Koordinate des Modulschwerpunktes

1

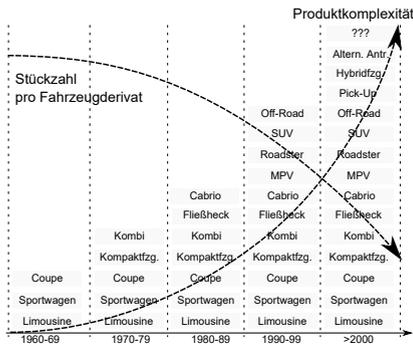
Einleitung

1.1 Herausforderungen und Spannungsfelder in der Fahrzeugentwicklung

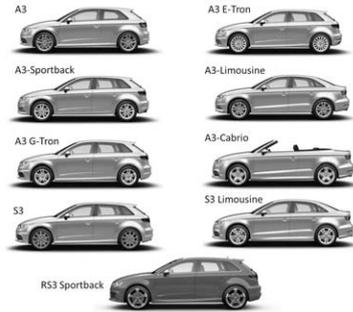
Die Automobilentwicklung sieht sich heute einem breiten Spektrum an vielfältigen Herausforderungen gegenüber. Diese resultieren unter anderem aus dem beschleunigten Wandel in ökologischer, ökonomischer, sozialer und technologischer Hinsicht [16], aber auch auf Grund der verstärkten Einflussnahme seitens Gesetzgebung und verschiedener konsumentenorientierter Prüfverfahren, wie etwa dem EURO-NCAP Crash-Test. So führt beispielsweise die gesetzlich forcierte kontinuierliche Senkung erlaubter CO₂-Emissionen¹ für verbrennungsmotorisch betriebene Personenkraftwagen (PKW) zusammen mit der steigenden Schadstoffbelastung in urbanen Gebieten zu Diskussionen um neue umweltverträgliche und regenerative Energiebereitstellung, sowie zu umfangreichen Anstrengungen im Bereich der Entwicklung alternativer Antriebssysteme, wie etwa Hybrid- oder Elektroantriebe.

Ökonomisch betrachtet trägt die wachsende Globalisierung zu steigender Komplexität in der Fahrzeugentwicklung bei. Die Auswirkungen zeigen sich auf mehreren Ebenen. Durch die stagnierende Nachfrage aufgrund gesättigter Marktregionen werden die Fahrzeughersteller in einen verschärften Wettbewerb gedrängt. Daher versuchen die Hersteller gewinnbringende Nischen zu identifizieren [39], [15] und diese mit neuen und innovativen Produkten zu belegen [16], bzw. gänzlich neue Bedürfnisse bei den Kunden zu generieren, um den Marktsättigungseffekten entgegen zu wirken und dennoch Erlöse bei sinkenden Stückzahlen pro Derivat zu erwirtschaften [86], [30]. So lassen sich etwa zu Beginn der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts im Wesentlichen lediglich drei grundlegende Fahrzeugkarosseriegrundformen identifizieren (s. Abb. 1.1 (a)). Demgegenüber steht heute eine breite Vielzahl an unterschiedlichen Karosserieformen und Fahrzeugvarianten (s. Abb. 1.1 (a)). Aufgrund der zum Teil stark unterschiedlichen lokalen Marktanforderungen, hat sich daher heute bei vielen Fahrzeugherstellern die sogenannte *Derivatentwicklung* etabliert. Hierbei entstehen neue Fahrzeuge durch die sukzessive Abwandlung eines sogenannten Basisfahrzeugs [39]. Dies kann Karosserie-, bzw. Designalternativen beinhalten sowie unterschiedliche Antriebstechnologien. So umfasst etwa die aktuelle Familie des Audi A3 insgesamt neun Derivate (s. Abb. 1.1 (b)). Dadurch lassen sich neue Fahrzeuge flexibel an die jeweiligen lokalen Marktbedingungen anpassen. Die Summe aller Derivate bildet die *Fahrzeugfamilie* (s. auch Kap. 3.2).

¹In der Europäischen Union gilt ab dem Jahr 2021 ein Flottengrenzwert von 95g CO₂/km [35].



(a) Fahrzeugvarianten im Wandel der Zeit (Quelle: Pätzold, ProSTEP AG)



(b) Derivate des Audi A3 in Anlehnung an [4]

Abb. 1.1: Produktkomplexität durch Varianten und Derivate

Die dadurch entstehende große Anzahl an unterschiedlichen Varianten und Derivaten ist jedoch aus kosten- und produktionstechnischer Sicht eine enorme Herausforderung, da hierfür viele unterschiedliche Bauteile bzw. Module nötig sind. Daher streben Fahrzeughersteller danach, durch geeignete Modularisierung flexible Fahrzeugarchitekturen zu schaffen, welche ein möglichst breites Derivatspektrum bei gleichzeitig hohem Gleichteileumfang ermöglichen. Durch die gezielte Nutzung von Synergien soll trotz hoher Modell- und Ausstattungsvielfalt eine gewinnbringende Fertigung sichergestellt werden. Dadurch lässt sich eine maximale äußere Produktvarianz bei minimaler innerer Variantenvielfalt realisieren [86].

Als weitere Herausforderung addieren sich die wachsende Urbanisierung und die damit einhergehenden Problemstellungen, wie etwa der zunehmende Verlust freier Stellflächen oder die steigende Verkehrsdichte. Daher ist im städtischen Bereich ein Trend in Richtung kleinerer und kompakterer Fahrzeuge sowie völlig neuer Fahrzeugkonzepte zu beobachten (s. Abb. 1.2).



(a) Konzeptfahrzeug VW-Nils [120]



(b) Konzeptfahrzeug Peugeot BB1 [81]

Abb. 1.2: Neue Fahrzeugkonzepte für den urbanen Bereich

Weitere Herausforderungen an die PKW-Entwicklung resultieren aus dem immer rascheren Wandel und neuen Innovationen im technologischen Umfeld. Die zunehmende Rechenleistung von Prozessoren sowie die kontinuierliche Weiterentwicklung von Elektronik und Verarbeitungsalgorithmen schaffen etwa die Basis für neue Assistenzsysteme im Fahrzeug. Neue Materialien und Verbindungstechnologien ermöglichen neue Karosserie- und Strukturkonzepte [15], um leichtere und sicherere Fahrzeuge zu entwickeln. Die steigende elektronische Durchdringung unseres Alltagslebens führt zu einer ständigen Präsenz mobiler elektronischer Geräte bzw. Funktionen,

die heute auch im Fahrzeug integriert zur Verfügung stehen sollen. Diese Geräte und Technologien gehen stets mit einem entsprechenden Raumbedarf und ergonomischen Anforderungen im Fahrzeug einher. Des Weiteren erhöht sich der Elektronikanteil im Fahrzeug bedingt durch die wachsende Anzahl an Assistenz- und Regelungssystemen sowie die Nutzung mechatronischer Komponenten [15].

Als weitere treibende Kraft steht die Gesetzgebung im Raum. Diese greift in wachsendem Ausmaß in die Fahrzeugentwicklung durch die Festlegung von Vorgaben und Richtlinien in Bereichen wie Crash, Sicht, Geräuschemission und Schadstoffausstoß ein. Aufgrund des weltweiten Fahrzeugmarktes unterliegen gesetzliche Anforderungen globalen sowie marktspezifischen Ausprägungen. Daher werden vielfach lokal angepasste Derivate eines Fahrzeugs entwickelt, wie etwa für den nordamerikanischen Markt. Abb. 1.3 zeigt exemplarisch Vorgaben und Richtlinien im Bereich der Fahrzeugsicht auf.

Sichtfeld SVZ0 635 ECE ENT WP29/431 Mindestsichtfeld Säulenverdeckung Wischfeld ISO / TC22 / SC17 Messung und Beurteilung SAE J1059a Beschreibung und Messung des Fahrersichtfeldes EWG 77/649 Mindestsichtfeld nach vorne Verdeckungen FMVSS 128 Mindestsichtfeld Verdeckungen Sonnenblenden	Scheibenwischer und Scheibenwascher FMVSS 104 ISO 3469 EWG 78/318 Wischfeld Funktion Windschutzscheiben-entfroster EWG 78/317 Bereiche Ziel SAE 802 Entfrosterung Beschlagentfernung ISO 3468 FMVSS 103 Entfrosterung Beschlagentfernung	Sicherheitsglas BSI 5282 Spezifikation ISO 3538 optische Eigenschaften ECE L 77-002 FMVSS 205 Windschutzscheiben-Luft-Dösenausstattung ISO 3470 Testmethoden Heckscheiben Wisch- u. Waschsysteine ISO ENT DP 6255 Anforderungen	Rückspiegel SVZ0 656 STZ-018 Anordnung F.2 Ausstattung Sichtfeld ART 25 Ausrichtung ADR-12 ADR-14 ERL 49-11-20 ERL 70-12-15 ART 44-1 ART 44-2 Sicht u. Sicherheit EG EWG 74/1127 ECE-R46 FMVSS 101 Anordnung Sichtfeld Bedienung FMVSS 107
Schattenblinder SAE J100			

Abb. 1.3: Vorgaben die Fahrzeugsicht betreffend [56]

1.2 Definition der Fahrzeugarchitektur

Bevor auf die resultierenden Konsequenzen für die physische Fahrzeugarchitektur eingegangen wird, soll an dieser Stelle zunächst eine Erklärung und Präzisierung der Begrifflichkeit Fahrzeugarchitektur und in dem Zusammenhang stehenden Termini vorgenommen werden. Der Begriff „Fahrzeugarchitektur“ obliegt keiner einheitlichen wissenschaftlichen Definition und wird in der Literatur sehr unterschiedlich verwendet. Die Grundlage für den Terminus Fahrzeugarchitektur bildet der im Maschinenbau verbreitete Begriff der Produktstruktur nach Pahl/Beitz:

„Die Produktstruktur ist das Beziehungsschema zwischen der Funktionsstruktur eines Produktes und seiner physikalischen Struktur, also der Baustruktur. [80]“

Kuchenbuch [67] skizziert hierzu die Begrifflichkeit Fahrzeugarchitektur gemäß Abb. 1.4:

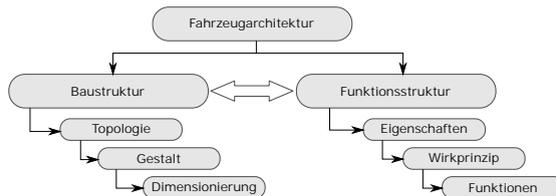


Abb. 1.4: Gliederung der Fahrzeugarchitektur nach Kuchenbuch [67]

Aufgrund der Fokussierung der vorliegenden Arbeit auf die primär geometrische Auslegung eines Gesamtfahrzeugs unter Berücksichtigung funktionaler Aspekte, soll unter der Fahrzeugarchitektur ausschließlich die Baustruktur und damit die physische Fahrzeugarchitektur verstanden werden. Die Fahrzeugarchitektur beschreibt daher die physische Topologie des Fahrzeugs. Sie beschreibt die räumliche Anordnung zentraler Fahrzeugkomponenten und inkludiert des Weiteren die Beschreibung der wesentlichen Fahrzeugproportionen. Inhaltlich verantwortlich für die Fahrzeugarchitektur ist in den meisten Unternehmen eine Fahrzeugarchitektur-Abteilung (s. Kap. 3.1). Diese verantwortet die Vergabe und Verwaltung der entsprechenden Bauräume in der technischen Entwicklung. Die Funktionsstruktur fließt über die Hauptfunktionsgruppen in die angestellten Überlegungen ein (s. Kap. 3.3.6).

Die Architekturentwicklung beschreibt die technische Auslegungstätigkeit der Fahrzeugarchitektur (s. Kap. 3). Zur Architekturentwicklung gehören ein entsprechender Prozess sowie alle Tätigkeiten im Umfeld der Fahrzeugarchitektur, die durch die jeweilige Fahrzeugarchitektur-Abteilung verantwortet werden, wie etwa das Maßkonzept oder das 3D-Package.

1.3 Konsequenzen für die physische Fahrzeugarchitektur

Die physische Fahrzeugarchitektur definiert die räumliche Anordnung aller relevanten Komponenten im Fahrzeug. Aufgrund der steigenden Funktionsvielfalt moderner Fahrzeuge wächst die Anzahl an zu integrierenden Komponenten stetig. Die jeweilige Anordnung der Bauteile im Fahrzeug hat einen großen Einfluss auf wesentliche Produktmerkmale des Automobils, wie etwa den Fahrzeugschwerpunkt, das Massenträgheitsmoment oder resultierende Platzverhältnisse im Innenraum. Daher stellt die möglichst frühe Kenntnis über die mögliche physische Beschaffenheit sowie erforderliche Platzbedarfe einen wesentlichen Schlüssel für eine erfolgreiche und effiziente Fahrzeugentwicklung dar. Eine der wesentlichen Herausforderungen in der Architekturplanung liegt daher in der Abschätzung technologischer Trends, künftiger Kundenwünsche und der Entwicklung gesetzlicher Vorgaben in den jeweiligen Zielmärkten zu sehr frühen Zeitpunkten im Entwicklungsprozess, um diese in den jeweiligen Architekturkonzepten technisch und wirtschaftlich abbilden sowie bewerten zu können. Je nach Fertigungs- und Produktionsstrategie findet die Architekturauslegung daher zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt (s. Kap. 3). Im Falle der Nutzung von baukasten- bzw. baureihenorientierten Entwicklungsstrategien ergeben sich für die Architekturtopologie nur noch geringe Freiheitsgrade in der möglichen räumlichen Anordnung der erforderlichen Komponenten. Deshalb ist es notwendig bei der Planung von Baukästen bzw. Baureihen Anforderungen möglicher darauf aufbauender Fahrzeuge zu berücksichtigen [16].

Die Integration von neuen Technologien in bestehende Architekturkonzepte gestaltet sich je nach Aufgabenstellung als Herausforderung. Während die geometrische Integration eines PHEV-Antriebsstranges² grundsätzlich, aufgrund der bestehenden Affinität zu rein verbrennungskraftmaschinenbasierenden Antriebssystemen, in ein bestehendes Fahrzeug prinzipiell möglich ist, gestaltet sich die Implementierung eines rein elektrischen Antriebssystems als außerordentliche Herausforderung, da diese technologisch eine komplett andere Topologie des Rohbaus und Unterbodens erfordert. Im Falle elektrischer Antriebssysteme ist seitens der Fahrzeughersteller die Schaffung eigenständiger Architekturen auf Basis alternativer Antriebssysteme zu beobachten. Als Beispiel sei die Architektur des BMW i3 angeführt (s. Abb. 1.5).

²Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

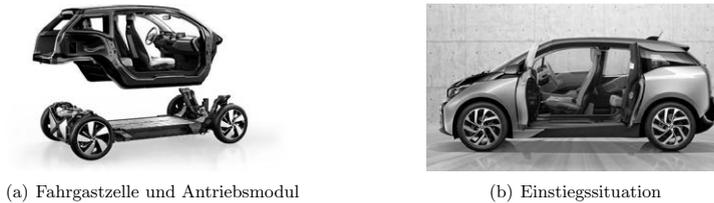


Abb. 1.5: Architektur des BMW i3 [10]

Das Fahrzeug besteht im Wesentlichen aus zwei Modulen – der Fahrgastzelle und dem Antriebsmodul. Bedingt durch die vollständige Unterbringung der Traktionsbatterie in das Antriebsmodul resultiert ein hoher Einstieg in das Fahrzeug und bedingt durch die z-Maßkette im Interieur eine insgesamt hohe Aufbauhöhe von 1578 mm.

1.4 Der Produktentwicklungsprozess in der Automobilentwicklung

In der Automobilentwicklung stellen die konsequente Verkürzung der erforderlichen Entwicklungszeit bei paralleler Anhebung der Produktqualität wesentliche Schlüssel für das Bestehen im globalen Wettbewerbsumfeld dar. Die hierfür notwendigen Prozessbedingungen schafft der sogenannte Produktentwicklungsprozess (PEP). Dieser umfasst die vollständige Beschreibung und zeitliche Einordnung aller erforderlichen Abläufe und Meilensteine in Bezug auf den gewünschten Produktionsstart (SOP³). Dieser stellt damit einen zentralen Fixpunkt innerhalb der Prozessplanung dar. Allgemeine Definitionen zu Entwicklungsprozessen finden sich etwa in der VDI 2221 [115] oder in Produktentstehungsmodellen nach Pahl/Beitz [80] oder z. B. Spur/Krause [101]. Diese sind jedoch von zumeist stark verallgemeinerter Natur, um auf sämtliche Felder des Maschinenbaus angewandt werden zu können [39]. Die im Automobilbau genutzten Prozesse erfordern eine wesentlich detailliertere Beschreibung der Abläufe sowie Meilensteine aufgrund der hohen Quervernetzungen innerhalb des Prozesses. Einen Standard hierzu gibt es in der Automobilindustrie nicht, da die Prozesse im Detail stark unternehmensspezifisch gestaltet sind. Dennoch lassen sich trotz teils unterschiedlicher Phasen und Bezeichnungen starke Ähnlichkeiten identifizieren [93], [17]. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen soll daher ein vereinfachter Vergleichsprozess Anwendung finden, der die wesentlichen Prozessstränge und damit verbundenen Herausforderungen widerspiegelt. Dieser ist in Abb. 1.6 aus Sicht eines Original Equipment Manufacturer (OEM) skizziert.

³Start of Production (SOP)

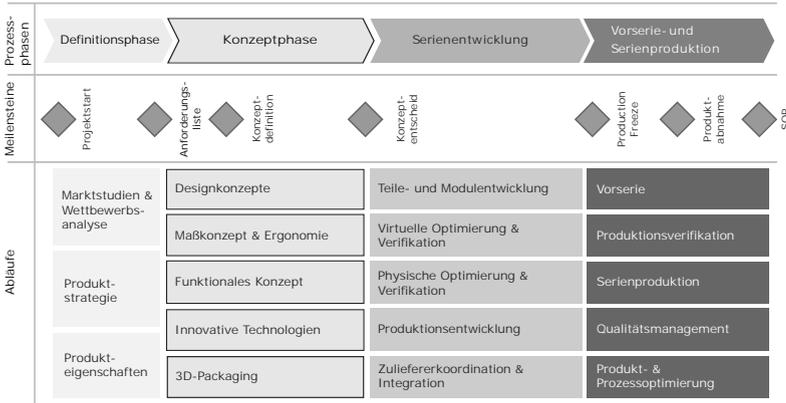


Abb. 1.6: Exemplarischer Produktentwicklungsprozess aus Sicht eines OEM in Anlehnung an Hirz [49]

Der Produktentwicklungsprozess beginnt mit der Definitionsphase. Darin werden die technischen, ökonomischen und gestalterischen Rahmenbedingungen für das entstehende Fahrzeug festgelegt. Dies umfasst etwa den gewünschten Fahrzeugtyp, das Aggregateprogramm, die Hauptabmessungen, die Anzahl an Passagieren, die Zuladung oder die geforderte Reichweite bzw. den Verbrauch [15]. Die Definitionsphase legt damit den Grundstein für alle nachfolgenden Entwicklungsabschnitte. An die Definitionsphase schließt die Konzeptphase an. Ein Konzept ist definiert [32] als eine erste festgelegte, prinzipielle Lösung. Folglich erfolgt im Abschnitt der Konzeptphase die Erarbeitung erster Lösungsansätze unter Berücksichtigung der gesetzten Auslegungsprämissen. Aufgrund der heute mannigfaltigen Anzahl an zu erfüllenden Eigenschaften und Funktionen stellt die Konzeptphase stets die Suche nach dem besten Kompromiss aus festgelegten Anforderungen und technischer Umsetzbarkeit dar [15]. Das Ziel der Konzeptphase ist daher die Machbarkeit der verschiedenen Lösungsansätze zu untersuchen und entsprechend des möglichen Erfüllungsgrades hinsichtlich gesetzter Randbedingungen zu bewerten.

In der darauffolgenden Phase, der sogenannten Serienentwicklung, erfolgt die weitere Verfeinerung der gewählten Lösungskonzepte und es wird mit der Detailkonstruktion aller erforderlichen Bauteile/Module begonnen. Parallel dazu erfolgt die virtuelle Absicherung der Teile-/Moduleigenschaften sowie deren Baubarkeit über entsprechende Geometrie- und Simulationsmodelle. Des Weiteren wird mit der virtuellen Produktions- und Fertigungsplanung begonnen, welche die Simulation aller relevanten Fertigungs- und Produktionsvorgänge umfasst, um etwa die optimale Montagereihenfolge zu bestimmen. Das Ergebnis der Serienphase ist damit ein vollständig baubares Fahrzeug, das hinsichtlich seiner Funktionen und Eigenschaften virtuell wie physisch bestmöglich abgesichert ist.

An die Serienentwicklung knüpft die letzte Phase an, die Vorserie- und Serienproduktion. Die Vorserie ist als Vorlaufprozess zur Serienproduktion aufzufassen, in dem alle Schritte der Serienproduktion vorab überprüft werden, um bei Bedarf entsprechende Korrekturen vornehmen zu können. Dazu zählt die finale physische Verifikation von Baubarkeit, Montierbarkeit, Montagereihenfolge im Serienanlauf und anderer produktionstechnischer Belange, wie beispielsweise

Einstellungen die Anlagen betreffend. Nach Abschluss der Entwicklung startet die Serienproduktion, die von einem laufenden Qualitätsmanagement begleitet wird, das die korrekte Fertigung und Montage des Fahrzeugs unter Berücksichtigung gesetzter Toleranzen und Produktqualitätsansprüche überwacht und gegebenenfalls geeignete Korrekturmaßnahmen sowie Optimierungen einleitet.

Aufgrund der engen Verzahnung von Design, Technik und Produktion sowie wirtschaftlichen Faktoren ist der Produktentwicklungsprozess hochgradig iterativer Natur. Um eine Straffung der erforderlichen Entwicklungszeit herbeiführen zu können, werden heute unterschiedliche Maßnahmen und Strategien verfolgt. Abb. 1.7 zeigt hierzu einen schematischen Entwicklungsablauf, wie er für die Automobilentwicklung typisch ist. Ein zentrales Merkmal heutiger Entwicklungsprozesse ist der hohe Parallelisierungsgrad der einzelnen Prozessstränge und Auslegungstätigkeiten. Im angeführten Beispiel beginnen bereits in der Vorbereitungsphase alle wesentlichen Prozessschritte. Deutlich zu erkennen ist das Bestreben, möglichst viele Tätigkeiten in frühe Phasen der Entwicklung zu verlagern (*Frontloading*).

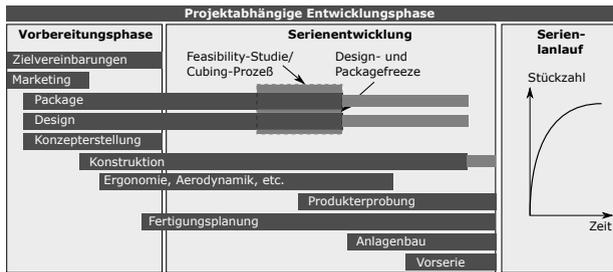


Abb. 1.7: Nach Gesichtspunkten des Simultaneous Engineering erstellter Produktentstehungsprozess am Beispiel der Automobilentwicklung [39]

Die grundsätzlichen Zusammenhänge für die Vorverlagerung werden in Abb. 1.8 dargestellt. Die Konzeptphase ist mit einer hohen Kostenverantwortung verbunden. Fehler im technischen oder wirtschaftlichen Konzept oder falsche Entscheidungen im Fahrzeugdesign, können hohe Kosten zu späteren Phasen der Entwicklung nach sich ziehen. Daher wird eine Erhöhung des Produktwissens in frühen Phasen der Entwicklung angestrebt (s. Abb. 1.8), um mögliche Problemherde frühzeitig identifizieren zu können und um geeignete Lösungen und Maßnahmen entwickeln zu können, da der Freiheitsgrad in der Lösungsfindung in der Konzeptphase am höchsten ist. Abb. 1.8 zeigt hierzu die Verteilung des Produktwissens und der Kostenverantwortung im PEP.

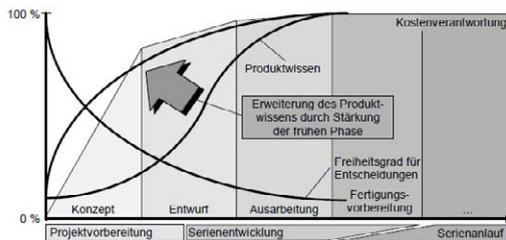


Abb. 1.8: Produktwissen und Kostenverantwortung im PEP [126]

In diesem Zusammenhang fokussieren alle angestellten Überlegungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf den Abschnitt der Konzeptphase. Im Folgenden soll die Konzeptphase einer genaueren Betrachtung unterzogen werden. Für weitere Überlegungen soll die nachfolgende Prozessgestalt gemäß Abb. 1.9 dienen.



Abb. 1.9: Beispielhafte Gestalt einer automobilen Konzeptphase

In der Automobilentwicklung gliedert sich die Konzeptphase typischerweise in eine frühe Konzeptphase sowie in eine Detaillierungsphase. Den Abschluss bildet die Lösungsentscheidung. Demnach werden in der frühen Konzeptphase zunächst grundlegende Überlegungen hinsichtlich möglicher Ausprägungen der Fahrzeugarchitektur angestellt, mit dem Ziel eine grundlegende technische Machbarkeit nachzuweisen. Dies umfasst den Aufbau vereinfachter Volumenmodelle und die Durchführung erster Berechnungen und Simulationen, um erste Aussagen sowie Tendenzen zu geometrischen wie funktionalen Eigenschaften tätigen zu können. Des Weiteren wird die initiale Konzeptproduktstruktur festgelegt, welche die grundsätzliche Strukturierung erforderlicher Komponenten und Komponentengruppen vornimmt. Je nach Unternehmen fließen weitere Aspekte wie beispielsweise Modularisierung, Baukastenstrategien (s. Kap. 3), mögliche Derivate und neue Materialkonzepte in die Betrachtungen mit ein. Am Ende der frühen Phase stehen bezüglich der Grundeigenschaften abgesicherte Basiskonzepte zur Verfügung, wobei die vielversprechendsten Ansätze einer weiteren Verfeinerung und Analyse im Detailkonzept unterzogen werden. Dieser Abschnitt dient daher der Vorfilterung gänzlich ungeeigneter Varianten. In der Konzeptdetaillierung erfolgt, auf Basis der zuvor festgelegten Grundarchitektur, der Aufbau von Detailkonzepten. Dies umfasst erste 3D-CAD-Konstruktionen zur erweiterten Bauraumbewertung und Funktionsbetrachtung sowie die Analyse erster Designentwürfe und Proportions-tendenzen des Fahrzeugs. Parallel dazu können Berechnungen und Simulationen auf Basis der ersten geometrischen Informationen durchgeführt werden.

1.5 Schlussfolgerungen für die virtuelle Fahrzeugentwicklung auf Ebene des Gesamtfahrzeugs

In der technischen Entwicklung von Automobilen werden rechnerbasierte Auslegungsinstrumente und virtuelle Methoden über den gesamten Prozess hinweg in verschiedenster Ausprägung und Intensität genutzt. Die Forderung nach verstärktem Frontloading, Parallelisierung von Auslegungstätigkeiten und die steigende Produktkomplexität selbst stellen hohe Anforderungen an die virtuelle Entwicklung sowie die IT-Infrastruktur im Fahrzeugbau (s. Abb. 1.10) und sind mit einer kontinuierlichen Neu- und Weiterentwicklung von Methoden sowie rechnergestützten Modellen und Werkzeugen verbunden.

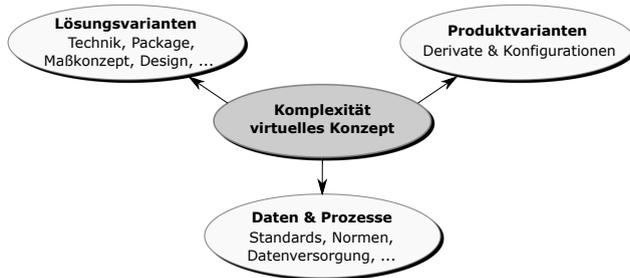


Abb. 1.10: Spannungsfeld der virtuellen Entwicklung von Gesamtfahrzeugen

Aus Perspektive der Gesamtfahrzeugarchitektur ergeben sich in diesem Zusammenhang vielerlei Herausforderungen: In der frühen Konzeptphase sowie bei Forschungsfahrzeugen kommen für die initiale Abschätzung von geometrischen und funktionalen Produktmerkmalen vielfach sogenannte *Expertensysteme* zum Einsatz (s. Kap. 4.6). Diese versuchen durch zielgerichtete Nutzung von Näherungsmodellen, empirischen Verfahren oder ingenieurmäßiger Erfahrung bereits in frühen Phasen der Entwicklung mögliche technische Zielwerte sowie Randbedingungen abzuleiten. Dies ist unter anderem dadurch begründet, dass typischerweise zu Beginn einer Neuentwicklung die verfügbare Produktsubstanz sehr gering ist. Randbedingungen liegen vielfach nur in sehr unscharfer Form vor und es sind keine, oder wenige technischen Lösungskonzepte definiert.

Expertenwerkzeuge stellen im Gegensatz zu regulären Programmen im Entwicklungsumfeld, wie etwa Konstruktionssoftware, Berechnungssoftware oder Office-Werkzeuge, stark spezialisierte und auf die Bedürfnisse weniger Anwender und Anwenderinnen zugeschnittene Software dar, die z. T. durch die jeweilige Abteilung selbst entwickelt wird. Aus Gesamtfahrzeugsicht ergeben sich in diesem Zusammenhang mannigfaltige Herausforderungen: Aufgrund der steigenden Produktkomplexität und dem damit verbundenen Schwindens verfügbaren Bauraums ist die Fahrzeugarchitektur zusehends gezwungen, neben den primär geometrisch fokussierten Aufgabenstellungen, wie etwa dem Aufbau eines Maßkonzeptes und der Gestaltung eines 3D-Packages, auch funktionale Aspekte bereits zu frühen Zeitpunkten in der Entwicklung einzubinden. Hierbei werden verschiedene Ziele verfolgt: Zum einen sollen die entwickelnden Fachbereiche bereits im Vorfeld mit entsprechend grundlegend funktional abgesicherten Bauräumen versorgt werden können. Dadurch sollen Iterationsschleifen bereits in der preliminären Bauraumabstimmung reduziert werden können. Zum anderen ermöglicht eine funktionale Integration die bessere Nachvollziehbarkeit sowie Sichtbarmachung von Auswirkungen funktionaler Produktmerkmale auf das Gesamtfahrzeugkonzept. Dies macht es erforderlich, vorhandene Expertenwerkzeuge im Gesamtfahrzeugkontext nutzbar zu machen. Da für Expertensysteme vielfach keine einheitlichen Standards und Datenstrukturen gelten, sowie diese zumeist die Sicht auf eine Problemstellung aus Perspektive des jeweiligen Fachbereichs darstellen, gestaltet sich die durchgängige Kopplung auf Gesamtfahrzeugebene als schwierig. Da sich die Nutzung des jeweiligen Expertensystems zumeist auf den entsprechenden Fachbereich beschränkt, werden die erforderlichen Datenmodelle zudem selten mit der gebotenen Weitsicht geplant, wodurch sich nachträgliche Änderungen und Erweiterungen nur schwer implementieren lassen. Zum anderen unterliegen diese Werkzeuge selten regulären IT-Wartungsmechanismen, wodurch es vielfach zu Problemen vor allem in stark heterogenen IT-Landschaften kommt (vgl. [17]), wenn das jeweilige Expertensystem die Kopplung vieler unterschiedlicher Softwarelösungen verlangt. Im Falle von Release-Wechseln

involvierter Softwareprodukte kann es damit im schlimmsten Fall zu einer vollständigen Funktionsunfähigkeit des jeweiligen Expertensystems kommen.

Die eigentliche Domäne der Fahrzeugarchitektur stellt das Computer Aided Design (CAD) bzw. das Digital Mock-Up (DMU) dar. Darin lassen sich jedoch nur stark eingegrenzt funktionale Fragestellungen betrachten bzw. beantworten. Funktionen wie etwa Antrieb, Lenkung oder Fahrkomfort, die nur eingeschränkt geometrische Anknüpfungspunkte aufweisen, lassen sich in einem typischen Geometriemodell nicht darstellen und folglich damit auch nicht bewerten. Aus Sicht der Architektur besteht daher der Wunsch, Berechnungen sowie Simulationen in die CAD-Welt zu integrieren bzw. geeignete Kopplungs- und Schnittstellen zur Einbindung bereitzustellen. Zur Integration funktionaler Gesichtspunkte in die geometrische Entwicklung finden sich zahlreiche Forschungsansätze, die von allgemein methodischen und prozessualen Betrachtungen bis hin zu spezifischen Beschreibungen von CAX-Auslegungswerkzeugen⁴ reichen.

⁴Das Akronym CAX steht für Computer Aided, das x kennzeichnet die jeweils gemeinte Disziplin wie etwa CAD (Computer Aided Design), CAE (Computer Aided Engineering) oder CAM (Computer Aided Manufacturing).

2

Aufgabenstellung und Struktur der Arbeit

2.1 Motivation und Zielsetzung

Die Motivation zur Bearbeitung der vorliegenden Arbeit entstand im Rahmen eines industriellen Forschungsprojektes, das gemeinsam mit der Volkswagen Konzernforschung Abt. Elektronik und Gesamtfahrzeug, sowie der Magna Steyr Fahrzeugtechnik Abt. Geometrische Integration Gesamtfahrzeug am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Graz bearbeitet wurde. Das Forschungsprojekt beschäftigte sich mit der Erforschung neuer Methoden zur geometrischen sowie funktionalen Bewertung von Gesamtfahrzeugkonzepten in der initialen automobilen Entwurfsphase. Aufgrund des heute geforderten Frontloadings zur Erhöhung der Produktsubstanz zu frühen Zeitpunkten in der Entwicklung ist es notwendig, vorhandene und zukünftige Expertenwerkzeuge im Kontext des Gesamtfahrzeugs nutzen und vernetzen zu können, um rasch Aussagen über funktionale sowie geometrische Produktmerkmale tätigen zu können. Aus Sicht der Fahrzeugarchitektur stehen dabei die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Abbildung funktionaler Einflüsse auf die Dimensionierung und topologische Ausprägung erforderlicher Proportionsmodelle im Fahrzeug
- Flexibilität genutzter Konzeptmodelle hinsichtlich des maßlichen Verhaltens
- Nutzung und Vernetzung vorhandener Expertensysteme im Gesamtfahrzeugkontext
- Reproduzierbarkeit entstehender Ergebnisse
- Konservierung und Wiederverwendung des entstehenden Auslegungswissens

Nach wie vor besteht ein großer Bedarf an übergreifenden sowie vernetzenden Methoden und Vorgehensmodellen in der virtuellen Entwicklung, um die steigende Produkt- und Entwicklungskomplexität moderner Automobile auf Ebene der Fahrzeugarchitektur zu beherrschen. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht daher darin, ein Konzept zur konsistenten Vernetzung vorhandener und künftiger Expertenwerkzeuge und CAx-Modelle zur Unterstützung der frühen Phase der technischen Konzeptentwicklung zu gestalten – das integrierte Konzeptmodell. Dieses hat zum Ziel eine Reihe von erforderlichen technologischen Aspekten eines Entwurfs konsistent aus der Perspektive der Fahrzeugarchitektur virtuell abbilden zu können (s. Abb. 2.1).

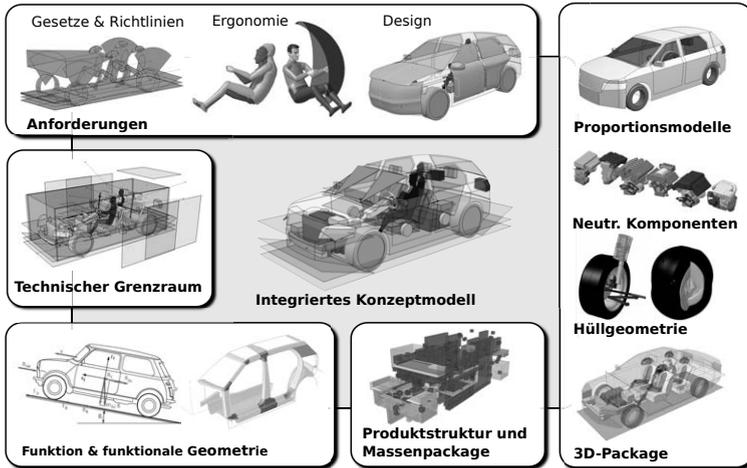


Abb. 2.1: Wesentliche technologische Aspekte der integrierten Konzeptentwicklung im Kontext der Fahrzeugarchitektur

Aufgrund des primär geometrischen Fokus der Fahrzeugarchitektur soll das Fundament der Idee zu einem integrierten Konzeptmodell ein parametrisch-assoziatives Führungsmodell, erweitert um entsprechende Schnittstellen zur Einbindung externer Daten und Funktionsmodelle, darstellen (s. Kap. 5). Um die Durchgängigkeit zu vervollständigen werden zudem definierende Vorgaben und Richtlinien im Modell abgelegt, sowie Schnittstellen zu abnehmenden Entwicklungstätigkeiten und Prozessschritten integriert. Das integrierte Konzeptmodell kann damit als zentrales Steuerungs- und Verwaltungsinstrument für die Gesamtfahrzeugkonzeptentwicklung gesehen werden. Hierzu sollen in der Arbeit die folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen und Herausforderungen im Kontext des Gesamtfahrzeugs geklärt werden:

1. Modellierung und Integration geometrischer sowie funktionaler Produktmerkmale im Rahmen eines ganzheitlichen integrierten Konzeptmodells
2. Anforderungen an Informationsmodelle aus Sicht des Gesamtfahrzeugs zur transparenten Bewertung von Fahrzeugeigenschaften
3. Betrachtung von Archivierungsanforderungen zur Sicherung des Konzeptauslegungswissens und zur Reproduktion von Konzeptdatenständen
4. Untersuchung von Datenschnittstellen im Rahmen der CAx-Datenversorgungskette

Dieses Themenspektrum resultiert aus dem Umstand, dass isolierte Betrachtungen der jeweiligen Aufgabenstellungen im Gesamtfahrzeugkontext nicht zielführend sind, da die unterschiedlichen Quervernetzungen untereinander nicht oder nur in begrenztem Umfang berücksichtigt werden können. Dies ist jedoch zur Entwicklung eines gesamtheitlichen Ansatzes unerlässlich.

In der Modellierung geometrischer und funktionaler Produktmerkmale steht die Frage im Vordergrund, welche Anforderungen Konzeptmodelle erfüllen müssen, um in einem übergeordneten

Führungsmodell konsistent aber dennoch mit der erforderlichen flexiblen Parametrik eingebunden werden zu können. Dies beinhaltet die Betrachtung geeigneter Modellierungs- und Parametrisierungsstrategien, sowie Vorgaben die Datenstrukturierung betreffend. Insbesondere soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich parametrisch-assoziative Führungsmodelle als datentechnisches Zentrum in einem integrierten Konzeptmodell eignen.

Wesentlich für die effektive Nutzung eines integrierten Konzeptmodells ist das zugrundeliegende Datenmodell. In diesem sind die erforderlichen Datenobjekte, benötigten Verknüpfungen, Schnittstellen und Konfigurationen definiert. Um den Entwickler bzw. die Entwicklerin an dieser Stelle optimal unterstützen zu können ist eine zweite Komponente erforderlich – ein durchgängiges Bewertungskonzept. Dieses beschreibt die erforderlichen Elemente um auf Basis des Datenmodells reproduzierbare Analysen durchführen zu können. Durch dieses Bewertungskonzept soll zudem die Wiederverwendung von bestehendem Auslegungswissen erleichtert werden.

Die elektronische Archivierung entstehender, bzw. vorhandener Konzeptmodelle und Entscheidungen im Gesamtfahrzeugkontext sind heute zentraler Bestandteil jedes Entwicklungsprozesses. Vor dem Hintergrund der bereits angeführten Forderung nach Reproduzierbarkeit von Modellzuständen und darauf aufbauender Entscheidungen ist die Entwicklung geeigneter Archivierungsstrategien unabdingbar.

Den letzten Baustein stellt die Beleuchtung von Anforderungen aus dem Datenversorgungsprozess in der Entwicklung dar. Da eine isolierte Betrachtung von Entwicklungsansätzen in Zeiten wachsender computergestützter Integration und Vernetzung nicht zielführend ist, müssen die angestellten Überlegungen auch in prozessualer Ebene gedacht werden. Hierbei spielen die besonderen Bedürfnisse heute genutzter Datenmanagementsysteme sowie Daten- und Entwicklungsstandards eine wesentliche Rolle.

2.2 Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen und Erweiterung des Standes der Technik

Das Bestreben nach effizienter Darstellung geometrischer und funktionaler Produktmerkmale in frühen Phasen der Entwicklung ist nicht neu. Bereits in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts finden sich mit Einführung der rechnergestützten Konstruktion erste Ansätze zur gesamtheitlichen Fahrzeugbetrachtung, etwa von Rasenack [85] und Niemierski [79]. Diese stellen auf die Geometrie begrenzte Entwurfssysteme für die frühe Konzeptphase vor. Aktuellere Arbeiten in diesem Umfeld stellen etwa Forsen [36], Gessner [39] oder Sander [93] mit jeweils unterschiedlichen Zielsetzungen im Gesamtfahrzeugkontext dar (s. Kap. 4.7).

Aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur sind die bisherigen Ansätze in Richtung Gesamtfahrzeugauslegung als nicht befriedigend anzusehen. Dies hat mehrerlei Gründe: Bisherige Lösungskonzepte zu Entwurfssystemen auf Gesamtfahrzeugebene stellen oft abgegrenzte Insellösungen dar, die eine starre Parametrierung bzw. ein starres Datenmodell besitzen. Aufgrund des raschen technologischen Wandels in Hinblick auf das Fahrzeug selbst, aber auch informationstechnologischer Methoden sind starre Gebilde nicht zielführend, da sie im Kontext neuer Anforderungen und Aufgabenstellungen nur schwer erweitert werden können. Des Weiteren fokussieren sich viele der verfügbaren Ansätze entweder verstärkt auf die globale Darstellung von Fahrzeugfunktionen, wie etwa von Sander [93], und lassen dabei detaillierte geometrische Betrachtungen außer Acht,

oder sie fokussieren sich wie beispielsweise Klug [64] auf spezifische Aspekte der Gesamtfahrzeugentwicklung. Darüber hinaus werden prozessuale Bedürfnisse, wie etwa die Weiterverarbeitbarkeit von Daten im Entwicklungsprozess oft nur ungenügend berücksichtigt. Ein umfassendes Fahrzeugauslegungssystem ist mit Stand der Erstellung der vorliegenden Arbeit nach wie vor nicht existent [84]. Raabe identifiziert hierzu neben den bereits angeführten Gründen den oft zu starken Abstraktionsgrad im Gesamtfahrzeugkontext, wodurch die Nutzung von Forschungsansätzen in der industriellen Praxis nicht gelingt. Aufgrund der bereits angeführten wachsenden Bauraumanspannungen im Fahrzeug besteht jedoch ein konkreter Bedarf an übergreifenden Methoden und Vorgehensmodellen. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellte integrierte Konzeptmodell erweitert hierzu den aktuellen Stand der Technik in den folgenden Gebieten:

- Beschreibung eines flexiblen und erweiterbaren Parameterkonzeptes
- Entwicklung von Strategien zur Vernetzung von Expertensystemen und CAx-Modellen im Gesamtfahrzeugkontext
- Darstellung einer Bewertungssystematik zur durchgängigen Reproduktion durchgeführter Analysen
- Entwicklung einer gesamtheitlichen Archivierungsstrategie im Kontext des Gesamtfahrzeugs

2.3 Aufbau und Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf aufeinander aufbauende Hauptteile, die in Abb. 2.2 dargestellt sind.

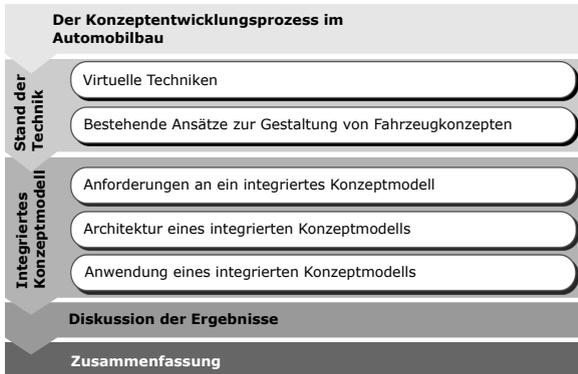


Abb. 2.2: Struktur der Arbeit

Zunächst soll der Konzeptentwicklungsprozess im Automobilbau aus Perspektive der Gesamtfahrzeugarchitektur betrachtet werden. Der Fokus liegt hierbei auf den technischen und informationstechnischen Herausforderungen im Kontext der Gesamtfahrzeugkonzeption.

Im daran anschließenden Kapitel *Stand der Technik* werden die Grundlagen zu rechnergestützten Modellen, Methoden und Verfahren im Bereich der Gesamtfahrzeugarchitektur behandelt. Die

Hauptverantwortlichkeit einer Fahrzeugarchitekturabteilung besteht heute in der geometrischen Integration erforderlicher Komponenten in das jeweilige Fahrzeugkonzept und der Verwaltung von Bauraumbedarfen für die involvierten Fachbereiche (s. Kap. 3). Daher soll der Fokus vor dem Hintergrund des vorgestellten Ansatzes in der vorliegenden Arbeit auf Methoden und Verfahren aus dem Bereich des CAD sowie angrenzender Themengebiete wie etwa dem DMU, dem integrierten Produktmodell oder des Produktdatenmanagements gelegt werden. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Analyse des Stands der Technik hinsichtlich der Identifikation von herrschenden Lücken in der virtuellen Entwicklung aus dem Blickwinkel der Gesamtfahrzeugarchitektur.

Aufbauend auf die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik werden die Anforderungen an ein integriertes Konzeptmodell erarbeitet. Diese sind Voraussetzung für die Beschreibung der informationstechnischen Architektur eines integrierten Konzeptmodells. Des Weiteren erfolgt die Betrachtung der umgebenden Systemlandschaft, aus der sich erforderliche Schnittstellenanforderungen ableiten lassen, die zur systemischen Integration des Ansatzes erforderlich sind. Auf Basis dieser Anforderungen erfolgt die Beschreibung des integrierten Konzeptmodells. Diese umfasst die benötigten Komponenten sowie die Topologie des gewählten Lösungsansatzes und die Verknüpfung aller wesentlichen Bestandteile untereinander. Des Weiteren beinhaltet das Kapitel die Beschreibung des erforderlichen Datenmodells und des darauf aufbauenden Bewertungsmodells.

Daran schließt die *Anwendung eines integrierten Konzeptmodells* an. In diesem Kapitel werden die resultierenden Workflows und Vorgänge im realen Entwicklungsumfeld untersucht, welche sich durch die Nutzung eines integrierten Konzeptmodells in der Gestaltung von Fahrzeugentwürfen ergeben. Der Fokus wird auf erforderliche Modelle sowie deren Interaktionen gelegt.

Im Kapitel *Diskussion der Ergebnisse* werden die gewonnenen Erkenntnisse kritisch reflektiert und diskutiert. Dem entstehenden Mehrwert durch Nutzung eines integrierten Konzeptmodells in der frühen Konzeptphase werden mögliche Herausforderungen in der systemischen Integration in bestehende Prozessgebilde und IT-Landschaften gegenübergestellt und diskutiert. Das Kapitel *Zusammenfassung* bildet den Abschluss der Arbeit, fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsfragen.

3

Die frühe Konzeptphase im PKW-Entwurf

Aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur ist das Ziel der frühen Konzeptphase die grundsätzliche technische Umsetzbarkeit/Machbarkeit eines Fahrzeugentwurfs unter Berücksichtigung gesetzter Prämissen und Zielwerte zu untersuchen [15]. Dieser Prozess wird auch als *Feasibility* bezeichnet. Hierbei agiert eine Fahrzeugarchitektur-Abteilung nicht losgelöst sondern in enger Zusammenarbeit mit den technischen Fachbereichen sowie anderen Bereichen im Unternehmen wie etwa Vertrieb, Marketing oder Controlling. Aufgrund dieser Breite und vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit soll die Betrachtung der frühen Konzeptphase daher bewusst auf die Belange der Fahrzeugarchitektur eingegrenzt werden. Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich daher im Detail mit den prozessualen Gegebenheiten sowie der Daten- und Informationslage in der frühen Konzeptphase aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur.

3.1 Grundlegende Gestalt der frühen Entwurfsphase

In der Einleitung wurde bereits auf die wesentlichen prozessualen Abläufe und Gegebenheiten in der automobilen Konzeptphase eingegangen. In der vorliegenden Arbeit ist insbesondere der initiale Abschnitt – die frühe Konzeptphase – von Interesse. Diese nimmt innerhalb der Konzeptphase eine Schlüsselrolle ein, da hier die möglichen Freiheitsgrade die Lösungsfindung betreffend am Größten sind, wodurch ein hoher Produktbeeinflussungsgrad entsteht. Der Wunsch, bereits möglichst früh im Entwicklungsprozess über ein hohes Produktwissen in Form von Zielwerten sowie CAx-Näherungsmodellen zu verfügen, führt zu dem Bestreben, Entwicklungstätigkeiten in frühere Phasen zu verlegen und nach Möglichkeit erforderliche Prozessstränge zu parallelisieren [39]. Abb. 3.1 zeigt hierzu eine typische Gestalt und wesentliche Prozessbausteine der frühen automobilen Konzeptphase.

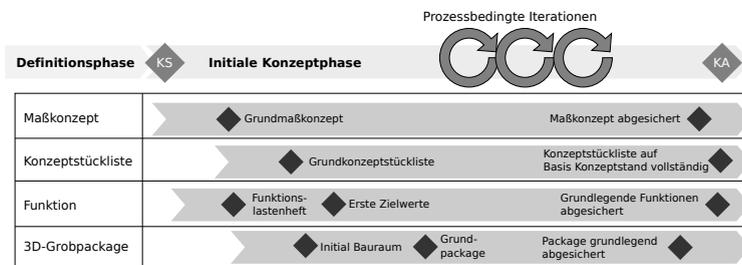


Abb. 3.1: Die frühe Konzeptphase im Überblick

Die grundlegenden technischen Randbedingungen für das Konzept resultieren aus der sogenannten *Definitionsphase*. Die Definition erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte, wie etwa angestrebte Differenzierung zum Wettbewerbsfeld, unternehmerische Anforderungen, gesetzliche Gegebenheiten oder Kundenwünsche im anvisierten Zielmarkt. Diese Randbedingungen umfassen vielfältige Aspekte, die angefangen von konkreten technischen Eigenschaftswerten, wie beispielsweise erforderliche Steigfähigkeit, Maximalgeschwindigkeit oder Kraftstoffverbrauch, bis hin zur Festlegung zu nutzender Teile- oder Modulumfangen reichen können. Ein moderner PKW stellt aufgrund der enormen Komplexität des Gesamtsystems stets einen Kompromiss aus zu erzielenden Eigenschaften, technischer Umsetzung sowie wirtschaftlichen und unternehmerischen Anforderungen dar. Daher ist die systematische und zielgerichtete Suche nach dem optimalen Kompromiss auf technischer Ebene eine der zentralen Aufgaben innerhalb der Entwicklung. Einen wesentlichen Gradienten in der Identifikation geeigneter Kompromisse stellen die gestellten Fahrzeugeigenschaften dar. Diese werden entsprechend ihrer Einflussnahme und Relevanz auf das Fahrzeug gewichtet. So weisen etwa für ein sportlich positioniertes Fahrzeug antriebspezifische Eigenschaften, wie etwa die erforderliche Zeit zur Beschleunigung von 0 auf 100 km/h, die erreichbare Maximalgeschwindigkeit oder das Lenkverhalten eine hohe Relevanz auf, während etwa die Auslegung eines familienorientierten PKW Schwerpunkte in Bereichen wie Beladungskonzept, niedriger Verbrauch und hohes Platzangebot für die Passagiere haben wird. Wesentlichen Einfluss auf die gewählte Gewichtung üben auch die korrespondierenden Eigenschaftswerte der jeweiligen Wettbewerber aus.

Darauf aufbauend beginnt die eigentliche Konzeptarbeit auf Ebene der Fahrzeugarchitektur. Ein Gesamtfahrzeugentwurf gliedert sich aus technischer Perspektive in verschiedene voneinander abhängige Bausteine. In Abb. 3.2 sind hierzu typische Bestandteile eines frühen Konzeptentwurfs dargestellt.



Abb. 3.2: Wesentliche Bestandteile eines virtuellen Fahrzeugkonzeptes

Den ersten Schritt stellt typischerweise die preliminäre Gestaltung des sogenannten *Maßkonzeptes* dar. In diesem wird die grundlegende Festlegung aller wesentlichen Außen- und Innenabmessungen, relevanter Maßketten sowie die Definition der gewünschten Sitzpositionen für Fahrer und Fondpassagiere des Fahrzeugs vorgenommen. Damit bildet ein Maßkonzept das maßliche Fundament für das zu entwickelnde Fahrzeug bzw. die Fahrzeugfamilie. Neben den Prämissen aus der Definitionsphase bilden ergonomische sowie anthropometrische Zusammenhänge die zweite Quelle für die Ableitung von Maßwerten des Maßkonzeptes. Je nach Gestalt des Fahrzeugprojektes müssen bereits im Maßkonzept mögliche Derivate oder andere Varianten der Fahrzeugfamilie

betrachtet werden. Dies kann etwa unterschiedliche Radstände, Antriebssysteme oder marktspezifische Abweichungen implizieren.

Auf Grundlage des ersten Entwurfs zum Maßkonzept erfolgt der parallele Aufbau des initialen Fahrzeugarchitekturrobenentwurfs – des sogenannten *3D-Grobpackages*. Dieses dient der Planung und Analyse möglicher Bauraumkonstellationen. Die Fahrzeugarchitektur-Abteilung übernimmt hierbei innerhalb der technischen Entwicklung die Rolle der Bauraumsteuerung sowie der übergeordneten Integration erforderlicher Technik in das Gesamtfahrzeug. Eine Fahrzeugarchitektur-Abteilung entwickelt typischerweise selbst keine Technik – dies liegt im Verantwortungsbereich der technischen Fachbereiche. Hierzu ist das grundlegende Zusammenspiel zwischen einer möglichen Fahrzeugarchitektur-Abteilung und technischen Fachbereichen in Abb. 3.3 exemplarisch dargestellt.

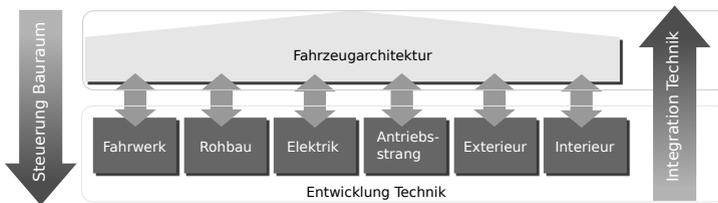


Abb. 3.3: Mögliche Gliederung nach Verantwortlichkeiten der technischen Entwicklung

Auf Basis der formulierten Prämissen und den initialen Vorgaben einer Fahrzeugarchitektur-Abteilung melden die technischen Fachbereiche Informationen über die voraussichtliche Gestalt, Abmessungen sowie den erwarteten Bauraumbedarf an die Fahrzeugarchitektur-Abteilung zurück. Diese versucht unter Berücksichtigung des Eigenschaftsprofils, sowie weiterer technischer Randbedingungen die Daten und Informationen aus den Fachbereichen zu einem funktionsfähigen Ganzen zusammensetzen. Hier liegt eine der wesentlichen Problemstellungen innerhalb der frühen Konzeptphase begründet: Da zu Beginn der Entwicklung, bis auf Übernahmeteile/Übernahmемodule keine vollständig ausdetaillierten 3D-CAD-Daten sowie Funktionsmodelle vorliegen, ist man auf entsprechende Ersatzmodelle angewiesen. Je nach prinzipieller Entwicklungsstrategie im Unternehmen können diese aus den verantwortlichen Fachbereichen stammen, oder werden seitens der Fahrzeugarchitektur-Abteilung selbst im Sinne geometrischer und funktionaler Vorgaben an die jeweiligen Fachbereiche delegiert. Je nach Projektanforderungen werden daher im Falle geometrischer Modelle entweder vereinfachte 3D-Proportionsmodelle, Übernahmeteile/Übernahmемodule (sofern erforderlich), oder einfache 2D-Schnitte für die erste Betrachtung geometrischer Zusammenhänge des Fahrzeugs genutzt. Im Falle funktionaler Vorgaben werden typischerweise empirische Werte oder vereinfachte Berechnungen zur Ableitung von weiteren Zielwerten genutzt.

Eine weitere Säule der Konzeptentwicklung stellt die sogenannte *Konzeptproduktstruktur* dar. Diese beschreibt die erforderlichen Teile und Module des Fahrzeugs. Das hierfür erforderliche Dokument ist üblicherweise entsprechend der fertigungsorientierten Strukturlogik gegliedert. Daher werden die Elemente der Produktstrukturliste entsprechend ihrer Anzahl und fertigungsorientierter Zuordnung im Fahrzeug angeordnet (s. auch Kap. 5.3.3). Bedingt durch die vorwiegend unscharfe Natur der Konzeptphase ist diese hinsichtlich des möglichen Detaillierungsgrades im

Vergleich zur Serienentwicklung deutlich gröber (bis auf Übernahmemodule). So ist es aus konzeptioneller Sicht auf Gesamtfahrzeugebene ausreichend, den Rohbauanteil des Vorderwagens als ein Element in der Konzeptproduktstruktur aufzufassen. Die Konzeptproduktstruktur wird im Laufe des Projektfortschritts sukzessive in ihrem Detailgrad verfeinert und geht mit Ende der Konzeptphase in die Serienproduktstruktur über. Die Konzeptproduktstruktur bildet innerhalb der technischen Entwicklung das Datenfundament für alle Auslegungstätigkeiten, die auf Teile- oder Modulinformationen angewiesen sind, wie beispielsweise das Massenpackage.

Neben der Entstehung von Maßkonzept und 3D-Package entwickelt sich die funktionale Sicht auf das Fahrzeug. Die Funktionsentwicklung verfolgt hierbei zwei Primärziele: Die Ableitung aufbauender technischer Zielwerte für die Entwicklung zu Beginn der frühen Konzeptphase und die virtuelle Absicherung von Fahrzeugfunktionen im Zuge des Entwicklungsfortschritts. Die grundsätzliche Fragestellung in der Zielableitung lautet: Wie müssen die eigentliche Funktion und zugehörige technische Eigenschaftswerte gestaltet sein, um die geforderten Zielwerte grundsätzlich erfüllen zu können. Aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur liegt der Fokus der Funktionsanalyse im Wesentlichen auf der Ableitung von möglichen Abmessungen und Positionierungsvorgaben erforderlicher Komponenten im Fahrzeug. So ist es etwa im Falle der Traktionsbatterie eines elektrischen Antriebskonzeptes hilfreich, auf Basis der geforderten Reichweite sowie gewünschter Speichertechnologie Abschätzungen über die grundsätzlichen Abmessungen des Batterie-Packages abzuleiten, um diese zur Gestaltung eines 3D-Proportionsmodells heranzuziehen.

Die Herausforderung in der frühen Funktionsbetrachtung liegt in der Nutzbarkeit von verfügbaren Simulationsmodellen und der erreichbaren Prognosegüte. Während für etablierte Technologien physisch validierte Simulationsmodelle vorliegen, die auch bei größeren Parameteränderungen eine ausreichend gute Prognosegüte aufweisen, liegen diese im Falle neuer Technologien typischerweise nicht vor. Daher muss man sich in diesem Fall oft mit vereinfachten Berechnungen oder Erfahrungswerten begnügen.

Für die funktionale Bewertung in der frühen Konzeptphase spielt das sog. *Massenpackage* eine zentrale Rolle. Dieses beschreibt die räumliche Verteilung von Masse im Fahrzeug, auf Basis der Positionen und Abmessungen des Grobpackages und der definierten Komponenten in der Produktstrukturliste. Dadurch lassen sich sowohl Schwerpunkt als auch die Hauptmassenträgheitsmomente des Fahrzeugs ermitteln. Diese Größen stellen wesentliche Schlüsselparameter für zentrale Fahrzeugeigenschaften, wie beispielsweise das Lenkverhalten, Achslastverteilung, Steigfähigkeit oder Kippstabilität dar. Je nach Lage des resultierenden Schwerpunktes können auch hier sehr früh Konfliktherde entstehen, die einen Eingriff in das 3D-Package oder das Maßkonzept erfordern, oder Überlegungen hinsichtlich alternativer konstruktiver oder materialtechnischer Änderungen bedingen.

Eine weitere externe Triebfeder für die technische Entwicklung resultiert aus dem parallel entstehenden Fahrzeugdesign. Das Design ist nach wie vor eines der wesentlichen Kaufgründe für ein Fahrzeug und ist in Zeiten hoher technologischer Ähnlichkeit ein wichtiges Differenzierungsmerkmal [39]. Der Designprozess läuft parallel zur technischen Entwicklung des Fahrzeugs, wobei an definierten Meilensteinen ein Abgleich von Design und Technik vorgenommen wird. Dieses Prozessverhalten wird auch als *Design-Technik-Konvergenz* bezeichnet [39]. Dadurch, dass das Design und der Designprozess einer hohen Dynamik unterliegen, ergeben sich vielfältige Heraus-

forderungen für die technische Entwicklung, auf die an dieser Stelle nicht detaillierter eingegangen werden soll.

Die genannten Elemente der frühen Konzeptphase wie Maßkonzept, Produktstrukturliste, 3D-Grobpaketage und Funktionsdarstellung weisen eine hohe Abhängigkeit voneinander auf und beeinflussen sich über weite Strecken der Konzeptentwicklung gegenseitig, wie in Abb. 3.1 dargestellt. Der Charakter dieses Prozessabschnittes ist folglich stets iterativer Natur, da sich einerseits die Randbedingungen rasch ändern können, andererseits steigt durch die zunehmende Produktsubstanz das verfügbare Wissen über das Fahrzeug, wodurch sich neue z. T. gegenläufige Beziehungen im virtuellen Modell ergeben. So können bereits beim Aufbau des 3D-Grobpaketages erste Konflikte mit dem Maßkonzept entstehen, weil die geforderten Maße schon auf grober Detailstufe nicht umsetzbar sind. Selbiges gilt für funktionale Betrachtungen: 3D-Proportionsmodelle auf Basis funktionaler Gegebenheiten und Eigenschaften können schon früh in der Entwicklung eine mögliche Entwurfsvariante eliminieren, da schon die Grobmodelle nicht mit den gestellten Packageanforderungen vereinbar sein können.

Die enge Verflechtung der einzelnen Konzeptbestandteile sowie der iterative Charakter des Prozesses verlangen folglich nach kontinuierlichem Abgleich zwischen den Modellen. Trotz der heute verfügbaren Methoden und Instrumente im Bereich der virtuellen Fahrzeugentwicklung lässt sich das grundlegende Verhalten der Konzeptentwicklung nicht ändern. Virtuelle Auslegungswerkzeuge und Methoden sollten daher stets als bedarfsgerechte Unterstützung in der Entwicklung gesehen werden, die, korrekte Nutzung vorausgesetzt, einen Beitrag zur Reduktion erforderlicher Iterationsschleifen leisten können. Die freiwerdende Zeit kann entweder als Einsparung gesehen werden, oder eröffnet die Möglichkeit in der gleichen Zeit mehr Varianten zu untersuchen, um die nachfolgenden Prozessphasen in der Entwicklung mit den bestmöglichen Informationen zu versorgen.

3.2 Architekturkonzepte in der PKW-Konstruktion

Um die hohe äußere Produktvarianz bei minimaler innerer Varianz technisch und finanziell darstellen zu können, werden verschiedene Ansätze in der Fahrzeugkonzeption verfolgt. Nach Brocke [16] lassen sich im Zusammenhang mit der Entwicklung von Fahrzeugarchitekturen die folgenden Strategien unterscheiden:

1. Gleichteilestrategie
2. Modulstrategie
3. Plattformstrategie
4. Baureihenstrategie
5. Baukastenstrategie

Die *Gleichteilestrategie* verfolgt nach Brocke [16] das Ziel der Mehrfachverwendung von Bauteilen in unterschiedlichen Fahrzeugen. Ein Gleichteil ist dabei nach [31] ein Teil, das mehrfach im selben Produkt verwendet wird, wohingegen das Wiederholteil übergreifend in unterschiedlichen Produkten verbaut werden kann. In der Praxis werden diese Begrifflichkeiten nicht so genau differenziert, oft spricht man auch vom sogenannten Carry Over Part (COP). Durch die Nutzung dieser Strategie soll eine permanente Neuentwicklung von Bauteilen vermieden bzw. reduziert

werden. Dadurch lassen sich Kosten durch Nutzung von Synergien bei der Herstellung mittels höherer Stückzahl der Teile erzielen.

Die *Modulstrategie* ähnelt der Gleichteilestrategie, versucht jedoch Wiederholungseffekte auf Zusammenbauebene zu erzielen. Entsprechend [125] ist ein Modul wie folgt definiert:

„Ein Modul ist ein Zusammenbau von mehreren Teilen, die verschiedene Funktionen beinhalten können. Kennzeichnend sind der physische Zusammenhang und in der Regel die Austauschbarkeit der Einheit. Es ist ein Teil der Ganzen und endet an den Fahrzeuggrenzen.“

So lassen sich nach Brocke etwa Vorteile in der parallelisierbaren Fertigung, geringerem Freigabe- und Prüfaufwand sowie in einer Erhöhung der Teilequalität durch Verlagerung vom Gesamtsystem auf Teileebene erzielen. In diesem Kontext wird der Begriff Carry Over Module (COM) definiert, wenn sich Module übergreifend oder aus Vorgängern nutzen lassen.

Die *Plattformstrategie* wird bereits durch Henry Ford in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts genutzt. Das Fahrzeug gliedert sich dabei in zwei Systeme: *Plattform* und *Hüte* [15]. Die *Plattform* umfasst dabei alle relevanten Komponenten, um ein fahrfähiges Fahrzeug darzustellen, auf der verschiedene Aufbauten, sog. Hüte, montiert werden können (vgl. [16]).

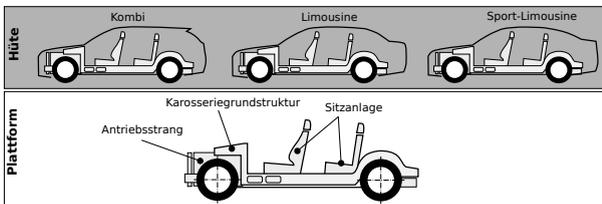


Abb. 3.4: Fiktive Plattform mit verschiedenen Hüten

Je nach Hersteller kann eine *Plattform* aus unterschiedlichen Umfängen bestehen. Wesentlich für die *Plattform* ist eine enge Verbindung mit dem Lebenszyklus der darauf aufbauenden Produkte. Die *Plattformstrategie* ist nur dann wirtschaftlich, wenn diese eine hohe Spreizung an Fahrzeugen und damit Stückzahlen ermöglicht, da der Entwicklungsaufwand im Vergleich zu einer reinen Neuentwicklung sehr hoch ist (vgl. [76] und [86]). Damit ist in der Lebenszyklusplanung einer Plattform die Betrachtung zukünftiger möglicher Hüte zwingend erforderlich.

Die *Baureihe* verfolgt das Ziel allgemeingültige Ordnungsprinzipien und Ähnlichkeitsgesetze zu identifizieren, um dadurch in der Konstruktion und Fertigung Synergieeffekte zu erzielen (vgl. [65]). Der Terminus *Baureihe* ist nach [80] wie folgt definiert:

„Unter einer Baureihe sind technische Gebilde (Maschinen, Baugruppen oder Einzelteile), die dieselbe Funktion mit der gleichen Lösung, in mehreren Größenstufen [Leistungsstufen] und bei möglichst gleicher Fertigung in einem weiten Anwendungsbereich erfüllen, zu verstehen.“



Abb. 3.5: BMW 5er Baureihe [9]

Die *Baukastenstrategie* fußt auf der Idee, modulare sowie skalierbare Bausteine zur Darstellung eines Fahrzeugs zu nutzen. Diese sind dabei entweder funktions- oder fertigungsorientiert [16]. Der Baukasten ermöglicht die technische Darstellung einer höheren Anzahl an unterschiedlichen Fahrzeugen im Gegensatz zur Plattform, bei welcher lediglich der Hutumfang variiert. Abb. 3.6 zeigt hierzu mögliche Synergien sowie die Nutzung von Baukastensystemen in der Volkswagen AG.

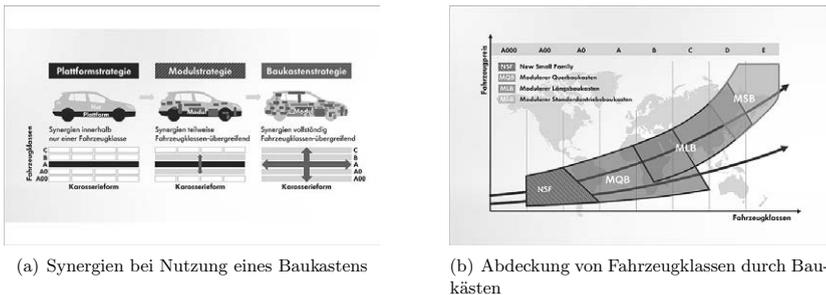


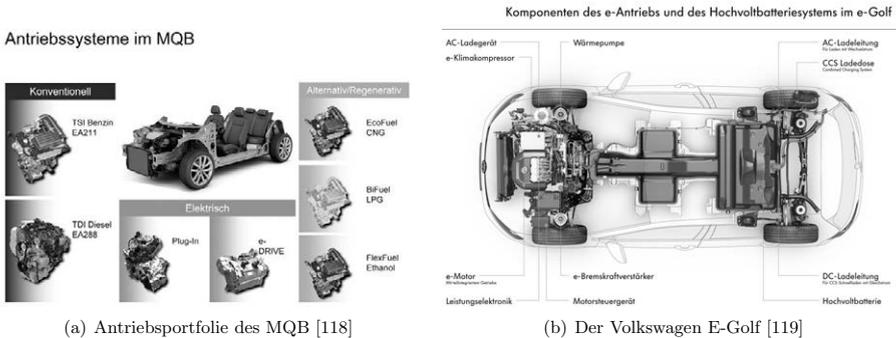
Abb. 3.6: Verschiedene Aspekte der Baukastennutzung [117]

Abb. 3.6 (a) zeigt das fahrzeugklassenübergreifende Synergiepotential verschiedener Architekturkonzepte. Daraus geht hervor, dass die Baukastenstrategie Synergieeffekte quer über alle Fahrzeugsegmente ermöglicht, da entsprechende Komponenten keinem konkreten Fahrzeug zugeordnet sind. Dadurch kann ein Maximum an äußerer Produktvarianz bei minimaler innerer Varianz umgesetzt werden. Abb. 3.6 (b) zeigt die geplante Nutzung über die Fahrzeugsegmente.

Die Nutzung der angeführten Modularisierungskonzepte ist in der Realität dennoch mit vielen technischen, wirtschaftlichen und designtechnischen Herausforderungen verbunden, die sich aus Sicht der Fahrzeugarchitektur eines konkreten Fahrzeugs nicht immer als Vorteil erweisen müssen. Im Kontext der vorliegenden Arbeit sollen daher nachfolgend in diesem Zusammenhang ausgewählte technische und designtechnische Problemfelder anhand des Antriebsstranges diskutiert werden. Eine detaillierter Ausführung zu funktionalen Problemstellungen im Kontext der Fahrzeugarchitektur findet sich in Kap. 3.3.6.

Eine der großen Herausforderungen aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur resultiert u. a. aus dem Umbruch im Bereich der Antriebssysteme. Der Großteil aktueller Fahrzeugarchitekturen basiert nach wie vor auf einer konventionellen verbrennungsmotorischen Antriebsarchitektur. Aufgrund des starken Trends in Richtung alternativer Antriebssysteme sind in deren Integration unterschiedliche Strategien zu beobachten: Einerseits lassen sich Bestrebungen identifizieren, bestehende Fahrzeugarchitekturen um neue Antriebssysteme zu erweitern (s. Abb. 3.7 (a) zum

modularen Querbaukasten (MQB im VW-Konzern), andererseits verfolgen Hersteller in Hinblick auf elektrische Antriebssysteme das Ziel der Schaffung eigenständiger Plattformen, welche die Ausgangsbasis elektrifizierter Fahrzeugfamilien bilden sollen. Die Integration von Antriebssystemen, deren Topologie stark von verbrennungsmotorisch basierten Antriebssträngen abweicht, gestaltet sich aus mehrerlei Hinsicht als schwierig: Im Falle von Otto- wie Dieselmotoren stellt der Kraftstofftank zwar eine Komponente hohen Platzbedarfes dar, die allerdings hinsichtlich ihrer geometrischen Gestalt bestimmte Freiheitsgrade aufweist und daher üblicherweise relativ spät in das Fahrzeug integriert werden muss, da sie die „Leerstellen“ im Package füllen kann. Im Falle elektrischer Antriebssysteme gestaltet sich die Bauraumfindung als schwieriger, da die Traktionsbatterie nach heutigem Stand der Batterietechnik zumeist eine quaderförmige Form aufweist. Neben dem Primärplatzbedarf der Traktionsbatterie, welcher sich aus der geforderten Reichweite ableiten lässt, entstehen weitere Platzbedarfe, welche durch die jeweils gewählte Kühlstrategie sowie den benötigten Crashmaßnahmen zum Schutz der Insassen resultieren. Abb. 3.7 (b) zeigt hierzu die Verteilung von Batteriemodulen im aktuellen Volkswagen E-Golf. Die Batterieanordnung ist hierbei ein Resultat der entstehenden Leerräume durch Entfall der Verbrennungskraftmaschine (VKM) sowie der erforderlichen Peripherie.

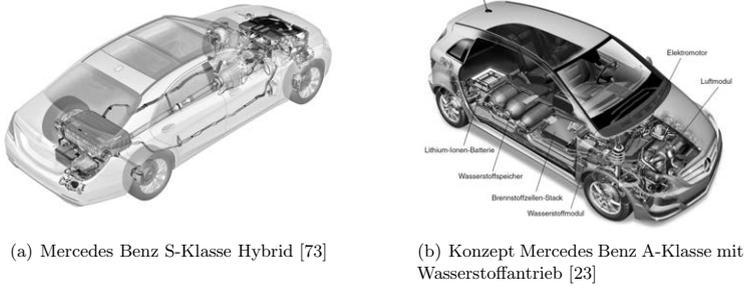


(a) Antriebsportfolie des MQB [118]

(b) Der Volkswagen E-Golf [119]

Abb. 3.7: Integration von Antriebssystemen in bestehende Fahrzeugarchitekturen

Im Falle hybrider Antriebsstränge fallen die Auswirkungen je nach Größe der Batterie sowie der Anordnung der Komponenten aus. So zeigt Abb. 3.8 (a) die Topologie des Antriebsstranges einer Mercedes Benz S-Klasse. Die Positionierung der erforderlichen Hochvolt-Batterie im Ladeboden geht stets mit einer Reduktion des Zuladenvolumens einher. Erdgas- oder wasserstoffbasierte Antriebssysteme führen in vielen Fällen zu Konzepten wie in Abb. 3.8 (b) dargestellt.



(a) Mercedes Benz S-Klasse Hybrid [73]

(b) Konzept Mercedes Benz A-Klasse mit Wasserstoffantrieb [23]

Abb. 3.8: Exemplarische Antriebsstränge alternativer Antriebssysteme

Die erforderlichen Hochdruckspeicher können aufgrund ihrer Größe und zylindrischen Formgebung zumeist nur im Unterboden des Fahrzeugs sinnvoll untergebracht werden. Dies bedingt eine Anhebung der Sitzhöhe im Heckbereich des Fahrzeugs und führt damit in weiterer Konsequenz zu einer Anhebung der Gesamthöhe des Fahrzeugs (s. Abb. 3.8 (b)).

3.3 Bestandteile eines virtuellen Architekturkonzepts

In Kap. 3.1 wurden die grundlegend erforderlichen Bestandteile eines virtuellen Fahrzeugkonzeptes und deren Verknüpfungen untereinander bereits diskutiert. Im vorliegenden Abschnitt sollen diese einer detaillierteren Betrachtung zugeführt werden.

3.3.1 Darstellung von Anforderungen an das Fahrzeugkonzept

Die konsistente Darstellung von technischen Prämissen des Fahrzeugentwurfs ist ein elementarer Baustein in der virtuellen Konzeptentwicklung. Diese müssen jederzeit verfügbar und im Rahmen des Entwicklungsprozesses nachvollziehbar sein, da sich sowohl Anzahl als auch die Inhalte von Randbedingungen im Fahrzeugprojekt ändern können. Tab. 3.1 zeigt einen Auszug an typischen Randbedingungen innerhalb der technischen Entwicklung.

Tab. 3.1: Auswahl typischer Anforderungen in einem Fahrzeugkonzept

Randbedingung	Wert/Beschreibung
Normverbrauch	6ltr./100km Benzin
$t_{0-100 \text{ km/h}}$	< 5s
Maximalgeschwindigkeit	280km/h
Maximale Steigfähigkeit	50%
Einstiegshöhe H5	550mm < H5 < 570mm
Lenkverhalten	Besser als Vorgänger
Vorderachse	McPherson (Fahrzeug xy)
Motor	R4

Betrachtet man Tab. 3.1 aus Datensicht, lassen sich Prämissen wie folgt differenzieren:

- Singuläre Werte (textuell, numerisch ...)
- Numerische Wertebereiche (0–100 ...)
- Diagramme und Verläufe
- Geometrische Vorgaben (Punkte, Schnitte, Flächen ...)
- Bauteil- und Modulvorgaben in Form von CAD-Datensätzen

Die Bereitstellung von Prämissen im Zuge der Entwicklung kann in der Praxis auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen: Deskriptive und einfache numerisch basierte Prämissen werden zumeist in sogenannten *Zielwertkatalogen* zusammengetragen und zentral dem jeweiligen Fahrzeugprojekt bereitgestellt. Spezifische Bauteilziele, wie etwa ein zu erreichendes Gewichtsziel, lassen sich zudem auch in Form von Parametern im jeweiligen Konstruktionsdatensatz hinterlegen. Diese können etwa über Regeln im entsprechenden CAD-Datensatz kontinuierlich überprüft werden und zur strikten Einhaltung der Randbedingungen beitragen. Überschreitet das aktuelle Gewicht des Bauteils den geforderten Zielwert, wird der Konstrukteur bzw. die Konstrukteurin entsprechend informiert.

Prämissen geometrischer Natur, wie etwa Schnitte oder Referenzpunkte, werden üblicherweise in einem separaten Knoten der Fahrzeugproduktstruktur dargestellt, wodurch diese entsprechend versioniert werden können und damit im Kontext der jeweiligen Konzeptdaten reproduzierbar sind. Die CAD-seitige Darstellung der Vorgaben erfolgt grundsätzlich in Form von Teiledatensätzen, um die Versionierungs- und Revisionsfunktionen des Produktdatenmanagements (PDM) zu nutzen (s. Kap. 4.4), um Änderungen an den Vorgaben nachvollziehen zu können. Im Detail hängt die Abbildung von verschiedenen unterschiedlichen Datenanforderungen ab und sollte die folgenden Aspekte berücksichtigen:

- Differenzierbarkeit in geometrischen Betrachtungsprogrammen (Viewer)
- Unterstützung in der automatisierten Kollisionsprüfung

In Hinblick auf die Differenzierbarkeit in der PDM-Welt ist stets zu berücksichtigen, dass PDM-Systeme lediglich Datensätze als Ganzes verwalten und differenzieren können [33]. Der Inhalt selbst kann auf Ebene des PDM daher nicht weiter entkleidet werden, d. h. es können Teilmengen des Datensatzes wie etwa Punkte, Linien oder Hilfsflächen nicht definiert ein-/ausgeblendet werden. Ein einfaches Gedankenspiel soll diesen Sachverhalt am Beispiel gesetzlich vorzuhaltender Bodengrenzbereiche im Fahrzeug erklären: Werden die Flächen in einem zentralen Bauteil abgelegt, kann dieses lediglich gesamtheitlich ein- und ausgeblendet werden (s. Abb. 3.9 (a)). Sollen die Flächen getrennt ein- und ausblendbar sein, sind diese in separaten Datensätzen abzulegen, d. h. jede Fläche wird in einem eigenen Datensatz abgelegt (s. Abb. 3.9 (b)).

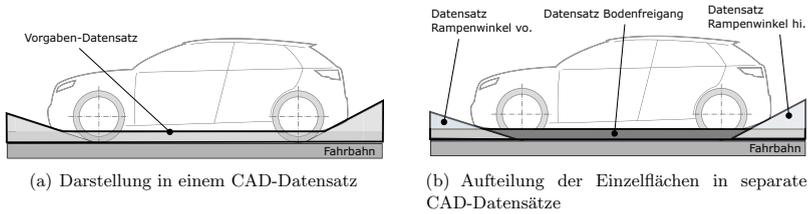


Abb. 3.9: Unterschiede in der Darstellung von geometrischen Vorgaben auf Datensatzebene

Aus der Funktionsperspektive gestalten sich Prämissen entweder in Form numerischer Werte für technische Eigenschaften, oder in Form von qualitativen Aussagen wie „besser als Vorgänger“. Prämissen können für alle Fahrzeuge einer Familie Gültigkeit haben, oder sich auf ein konkretes Fahrzeug beziehen. Dies wird im jeweiligen Zielwertkatalog entsprechend vermerkt.

Aufgrund des hohen Umfangs an Randbedingungen moderner Fahrzeuge ergeben sich zwangsläufig verschiedene Zielkonflikte. Um daher einen geeigneten Kompromiss zu finden ist es wichtig, die jeweiligen Quellen zu kennen um auf die Verbindlichkeit der entsprechenden Anforderung rückschließen zu können. Abb. 3.10 zeigt hierzu mögliche Quellen in der Festlegung von Vorgaben und Zielwerten.

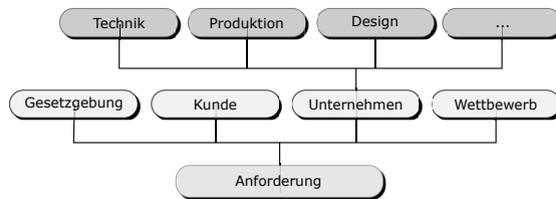


Abb. 3.10: Mögliche Definitionsquellen für technische Anforderungen

So sind gesetzliche Vorschriften für den Hersteller stets zu erfüllen, da diese über die Zulassungsfähigkeit des Fahrzeugs im jeweiligen Staat bzw. der Marktregion entscheiden, während andere Anforderungen, wie beispielsweise „Consumertests“, keiner verpflichtenden Erfüllung obliegen. Aus marketingtechnischen Gründen wird man in der Entwicklung dennoch stets bestrebt sein, auch in solchen Anforderungen höchste Ansprüche zu erfüllen.

3.3.2 Das Fahrzeugmaßkonzept

Das Maßkonzept bildet das geometrische Fundament eines Fahrzeugentwurfs. Es beinhaltet alle wesentlichen konzeptbestimmenden Außen- und Innenabmessungen sowie die wichtigsten Maßketten. Die wesentlichen Fahrzeugabmessungen sind u. a. in der SAE J1100 [92] standardisiert und finden sich etwa im Regelwerk der Global Car Manufacturer Exchange Group (GCIE) [40] zum Austausch und Vergleich von Maßplänen unterschiedlicher Hersteller. Wie in Kap. 3.1 bereits in Grundzügen beschrieben, bilden die Eingangsgrößen für das Maßkonzept die aus den Kundenanforderungen abgeleiteten geometrisch darstellbaren technischen Zielwerte zusammen mit gesetzlichen, ergonomischen sowie weiteren unternehmensspezifischen Anforderungen.

Für die äußere Beschreibung des Fahrzeugs sind aus Sicht des Maßkonzeptes die folgenden Maße von zentraler Bedeutung (s. Abb. 3.11):

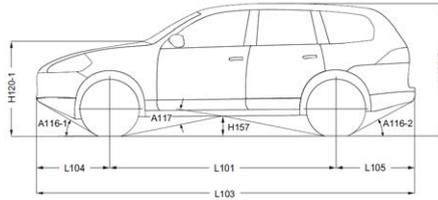


Abb. 3.11: Exemplarisches Exterieurmaßkonzept [15]

In x-Richtung des Fahrzeugs ist die Maßkette der Gesamtfahrzeughöhe über alles (L103) die sich aus der Summe von Überhang vorne (L104), dem Radstand (L101) sowie dem Überhang hinten zusammensetzt ein wichtiges Konzeptkriterium. Dazu addieren sich die homologationsrelevanten Bodenfreigangsgrößen Überhangwinkel vorne (A116-1), der Rampenwinkel (A117), der Überhangwinkel hinten (A116-2) und der Bodenfreigang bei maximaler Zuladung (H157). Entlang der Hochachse des Fahrzeugs sind vor allem die Höhe des Windlaufpunktes bezogen auf die Fahrbahn (H120-1) sowie die Gesamtfahrzeughöhe (H100-B) ausschlaggebend. Im Außenbereich des Fahrzeugs gilt es darüber hinaus die notwendigen Erreichbarkeiten zur Öffnung von Türen und Klappen zu berücksichtigen. Hierbei wird typischerweise die kleinste Perzentil-Frau herangezogen, um etwa die Erreichbarkeit der Heckklappe zu gewährleisten [121].

Neben den Außenabmessungen liegt der zweite Schwerpunkt des Maßkonzeptes in der Darstellung von Interieurmaßen und Technikmaßen sowie deren Abhängigkeiten und Einflüssen auf das Exterieurmaßkonzept. Da Personenkraftwagen primär dem Transport von Personen dienen, ist ein wesentlicher Eckpfeiler eines jeden Maßkonzeptes der sogenannte Sitzreferenzpunkt (s. Abb. 3.12). Im Automobilbau hat sich hierzu die englische Bezeichnung *Seating Reference Point* (SgRP) etabliert. Der Sitzreferenzpunkt im Fahrzeug ist eindeutig und entspricht üblicherweise der Lage jenes Punktes, in dem der H-Punkt eines 95-Perzentil Mannes zu liegen kommt [121]. 95-Perzentil bedeutet, dass 95 % aller Männer kleiner als diese Person sind. Der H-Punkt entspricht geometrisch der Projektion des Oberschenkelgelenkpunktes in die Mittelebene des Manikins. Aufgrund der Bedeutung des Fahrerplatzes in Hinblick auf die Steuerung des Fahrzeugs ist der SgRP des Fahrers ein typischer Ausgangspunkt im Aufbau des Innenraummaßkonzeptes [15]. In der frühen Phase werden hierzu zunächst vereinfachte Menschmodelle in Form von parametrischen 2D-Schablonen auf den SgRP von Fahrer und Fondpassagier positioniert. Zunächst werden für den Fahrer der Lehnenwinkel (A40-1) sowie der Abstand des SgRP zum Fersenreferenzpunkt (FRP) definiert. Dadurch ist die Grundhaltung festgelegt. Die Positionierung über den Boden erfolgt zu Beginn über das Maß H5-1, welches den Abstand von SgRP zur Bodenlinie in der Messlast 1 darstellt. Je nach gewünschter Sitzhaltung ergeben sich daraus die erforderliche Pedal- und Lenkradposition (D-Punkt). Die Positionierung der Fondpassagiere erfolgt unter Berücksichtigung analoger Kriterien. Der Abstand zwischen Fahrer und Fond-Passagier (L50-2) in Längsrichtung des Fahrzeugs ergibt sich aus der geforderten Kniefreiheit (L48-2).

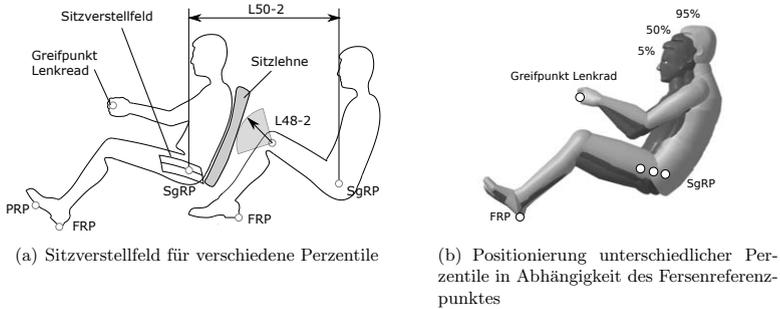


Abb. 3.12: Unterschiedliche Aspekte des Sitzreferenzpunktes

Aufgrund der unterschiedlichen anthropometrischen Beschaffenheit von Menschen ist es erforderlich, für die Einnahme einer optimalen Sitzposition entsprechende Verstellmöglichkeiten für Bedienelemente und Sitze im Fahrzeug vorzusehen (s. Abb. 3.12 (a)). In der Konstruktion wird hierbei zunächst ein theoretisches Sitzverstellfeld definiert, welches alle möglichen H-Punkte möglicher Fahrer und Fahrerinnen beinhaltet. Dieses gilt es durch den Sitzhersteller über eine geeignete Sitzkinematik bestmöglich anzunähern [121]. Üblicherweise finden sich heute zumindest eine Höhen- sowie Längsverstellung des Sitzes für den Fahrzeuglenker. Weitere Verstellfelder können etwa für die Lenkradpositionierung im Falle einer verstellbaren Lenksäule vorhanden sein. Auf Basis der Mensch-Schablonen erfolgt in einem weiteren Schritt die Festlegung der Kopffreiheit in der x-Ebene unter 30° (W27) sowie in z-Richtung (H35), welche damit die Lage des Dachhimmels grob vorgeben (s. Abb. 3.13 (a) und (b)). Die Sitzspur in y-Richtung des Fahrzeugs beschreibt den Abstand zwischen Fahrer-SgRP und Beifahrer-SgRP und resultiert aus der gewünschten Positionierung des Fahrers in y-Richtung (W20-1) ausgehend von der Fahrzeugmitte. Diese wird unter Berücksichtigung des Raumgefühls sowie erforderlicher Bewegungsfreiheit des Fahrers für die Steuerung des Fahrzeugs festgelegt [121]. Des Weiteren wird die Positionierung durch mögliche Störkonturen wie etwa einen möglichen Getriebetunnel beeinflusst.

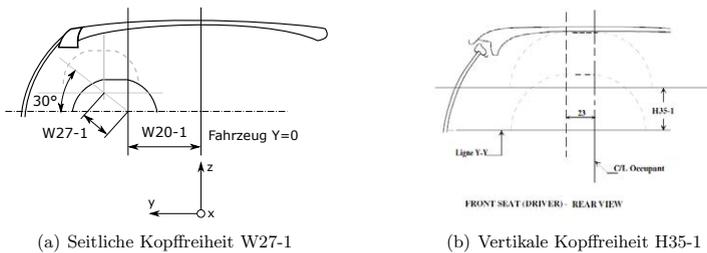


Abb. 3.13: Kopffreiheiten für den Fahrerplatz in Anlehnung an [40]

Über die technischen Maßketten erfolgt der Schluß zum Maßkonzept des Exterieurs. Abb. 3.14 zeigt beispielsweise die wichtigsten Längs-Maßketten für ein Fahrzeug mit quer eingebautem Motor. Entlang der Fahrzeuglängsachse sind die wichtigsten Maßketten jene, welche die Fahrzeuglänge mitbestimmen. Dies umfasst den Abstand von Kühler zu Motor (L_3), Tiefe des

Kühlers entlang der Längsachse (L_2), Abstand der Kühlerstirnfläche zur Frontfläche des Fahrzeugs (L_1), Motor zu Stirnwand und die Positionierung des Pedaleriemoduls, welches wiederum die Einbaulage des Modulquerträgers und damit die Position der I-Tafel definiert (s. Abb. 3.14).

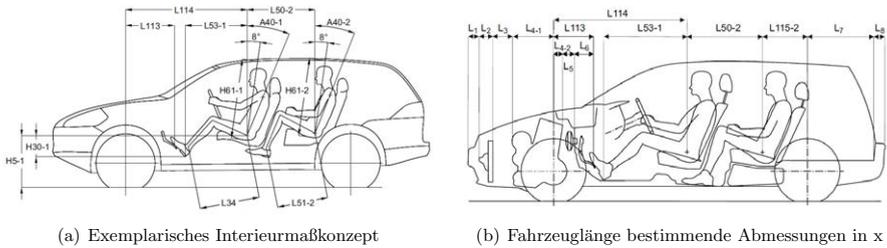


Abb. 3.14: Wesentliche Maßketten x-Richtung [15]

Neben der gezeigten Entwicklungsrichtung, ausgehend vom Fahrerplatz, können Konzepte auch aus anderen Motivationen heraus aufgebaut werden. Soll ein Fahrzeug etwa bestimmte Außenabmessungen aufweisen, wird das Fahrzeug von außen nach innen entwickelt. Diese Vorgehensweise wird z. B. bei kleinen Stadtfahrzeugen angewandt, bei denen etwa die Minimierung der Fahrzeuglänge eine zentrale Motivation darstellt. Die Herausforderung besteht hierbei in der Findung eines geeigneten Kompromisses aus ergonomischen sowie technischen Anforderungen. So bieten sich etwa zur Verkürzung der Fahrzeuglänge verschiedene Stellschrauben an: Eine Verringerung der Techniklänge nach vorne kann etwa durch ein kleineres Aggregat und eine geschickte Package-Anordnung erzielt werden. Die Innenraumlänge wird hauptsächlich durch die Sitzpositionen von Fahrer und Fondpassagieren definiert. Soll das Fahrzeug einen hohen Innenraumkomfort bieten, ergeben sich in diesem Fall nur wenige Stellmöglichkeiten. Sollen etwa vier vollwertige Sitzmöglichkeiten im Fahrzeug vorhanden sein, bleibt nur die Möglichkeit der Reduktion des Platzangebots für die Fondpassagiere. Die Hecklänge des Fahrzeugs wird im wesentlichen durch die gewünschte Zuladekapazität und das in manchen Marktregionen gesetzlich vorgeschriebene Ersatz-/Notlauftrad definiert.

Im Falle von bestehenden Plattformen bei denen die zentralen Interieurmaßketten im Wesentlichen vordefiniert sind, ergeben sich folglich nur sehr wenige gestalterische Freiheitsgrade. Aus dem Blickwinkel der Konstruktion liegt das Maßkonzept heute typischerweise als eigenständiges parametrisch-assoziatives Konstrukt vor, das alle relevanten Maßketten, Bezugspunkte und -flächen beinhaltet.

3.3.3 Das Fahrzeugdesign

Das Design ist eines der wichtigsten Differenzierungsmerkmale eines Fahrzeugs zum Wettbewerb, sowie innerhalb der internen Produktpalette eines Unternehmens und stellt die Schnittstelle zwischen der Technik des Fahrzeugs und dem Kunden dar [15], [64]. Aufgrund der zunehmenden Ähnlichkeit der Fahrzeuge in Hinblick auf die technische Funktion steigt die Bedeutung des Designs [39]. Das Design definiert daher maßgeblich die Gestaltung von Außen- sowie Innenflächen des Fahrzeugs, die im Wahrnehmungsbereich des Kunden liegen. Abb. 3.15 zeigt beispielsweise typische Konfliktbereiche von Design und Technik im Bereich des Vorderwagens.

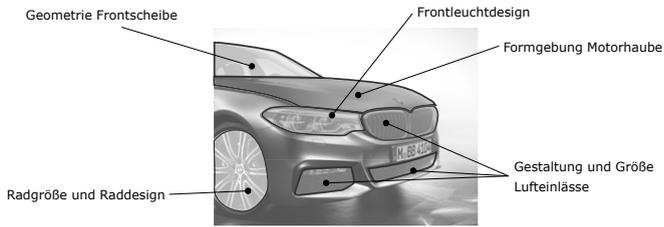


Abb. 3.15: Einflussnahme des Designs auf das Fahrzeug in Anlehnung an [8]

Die Formgebung der Fahrzeugfront hinsichtlich Linienführung und Anspannung der Flächen von Verkleidungsteilen ist wesentlich für den Ausdruck und die Formensprache des Fahrzeugs. Im Falle eines verbrennungsmotorischen Antriebssystems ergeben sich hier zahlreiche Konflikte mit dem darunterliegenden Package und zu erfüllenden gesetzlichen Anforderungen. So sind etwa im Bereich der Motorhaube gesetzlich festgelegte Mindestintrusionswerte für den Kopfaufschlag im Falle eines Crashes einzuhalten. Im Falle von designbedingten Änderungswünschen, wie etwa Absenkungen im Bereich der Motorhaube, ergeben sich dadurch sofort Konsequenzen für den darunterliegenden Bauraum.

Neben der direkten Beeinflussung des Fahrzeugpackage durch das Design ergeben sich weitere Auswirkungen auf wesentliche technische Produktmerkmale des Fahrzeugs, wie etwa den Luftwiderstandsbeiwert c_w oder die Projektionsfläche des Fahrzeugs in Längsrichtung, welche ebenfalls linear in den Luftwiderstand einget.

Die hohe geometrische Wirksamkeit des Designs in Kombination mit dessen hoher Unschärfe in der frühen Konzeptphase führt dazu, dass in Hinblick auf das Fahrzeugpackage in den Grenzbereichen zum Design entsprechende Raum-Puffer zur Kompensation von Designänderungen vorgehalten werden müssen [39].

In der frühen Konzeptphase liegt das Fahrzeugdesign üblicherweise in Form von Skizzen, einfachen Schnitten oder Teilflächen bestimmter Fahrzeugbereiche vor (s. Abb. 3.16). Konkret ausmodellerte 3D-Flächen liegen üblicherweise erst zu späteren Zeitpunkten im Entwicklungsprozess vor.

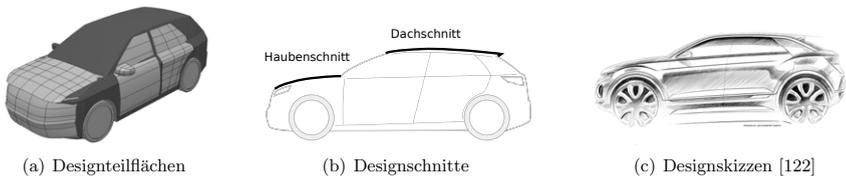


Abb. 3.16: Verwendung von Designdaten in der frühen Fahrzeugauslegung

Die Herausforderung in der Packageentwicklung im Zusammenspiel mit dem Design innerhalb der frühen Konzeptphase liegt daher in dessen Datenverfügbarkeit begründet. Der kontinuierliche Abgleich des Packages mit Entwicklungen im Design ist daher wesentlicher Bestandteil der technischen Entwicklung.

3.3.4 Die Produktstrukturliste

Die Produktstrukturliste umfasst eine hierarchische Gliederung erforderlicher Bauteile sowie Module [64], [33]. Die Organisation auf oberster Ebene erfolgt zumeist entweder entsprechend den jeweiligen technischen Fachbereichen oder den vorhandenen Hauptfunktionsgruppen (s. Kap. 3.3.6.2). Die jeweils untergeordneten Ebenen werden üblicherweise gemäß der sogenannten fertigungsorientierten Strukturlogik (FOL) gegliedert (s. Abb. 3.17 (a)).

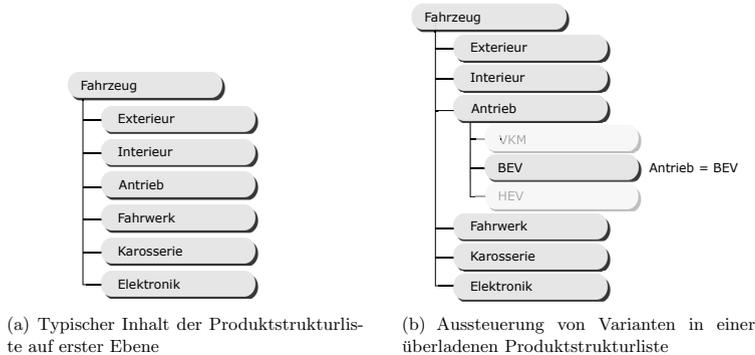


Abb. 3.17: Grundsätzliche Aspekte der Produktstrukturliste

In der ersten Ebene finden sich folglich die Hauptfunktionen wie etwa Fahrwerk, Antrieb, Karosserie, oder funktionale Sammelknoten wie etwa Exterieur, Interieur und Elektronik, denen die weiteren Teile, Module oder Ordnungselemente untergeordnet sind. Im Gegensatz zur klassischen Stückliste sind in der Produktstrukturliste alle Exemplare eines verbauten Elements separat aufgeführt, um exemplarspezifische Informationen wie etwa Position oder Anmerkungen halten zu können. Des Weiteren kann die Produktstrukturliste alle baubaren Varianten des Fahrzeugs beinhalten, die durch entsprechende Variantenregeln angesteuert werden können. In diesem Zusammenhang spricht man auch von einer überladenen Struktur [33]. Abb. 3.17 (b) zeigt hierzu eine Überladung im Knoten Antrieb an. Erst durch Anwendung einer Variantenregel die besagt, welches Antriebssystem für das jeweilige Fahrzeug gültig ist, wird die Struktur eindeutig. Diese Form der Strukturdarstellung hat den Vorteil, dass es nur eine Struktur für alle Fahrzeugderivate gibt. Dadurch werden Änderungen an Informationen von eingepflegten Bauteilen automatisch für alle Derivate und Varianten gültig, die ansonsten mit hohem Aufwand in alle derivatspezifischen Strukturzweige nachgeführt werden müssten. Aufgrund der hohen Variantenvielfalt einzelner Komponenten, wie etwa im Interieur (s. Abb. 3.18 zu Sitzvarianten) kann dieser Aufwand rasch enorme Ausmaße annehmen.

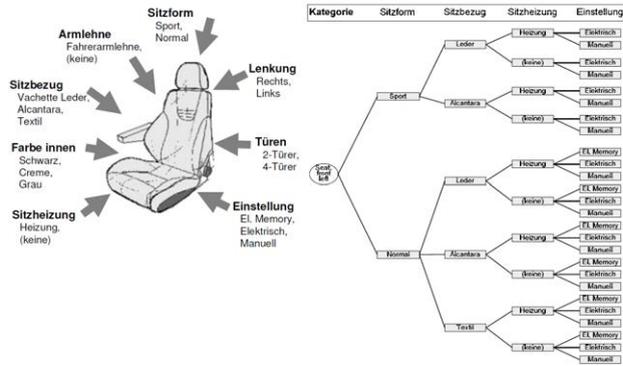


Abb. 3.18: Einflussparameter auf die Variantenstruktur am Beispiel eines Fahrzeugsitzes [128]

Die Produktstrukturliste beinhaltet alle Informationen, die im geometrischen Kontext oder in Form von Metainformationen den jeweiligen Elementen zugeordnet werden können. Dies beinhaltet etwa Benennungen, Kommentare sowie physikalische Informationen, wie beispielsweise Gewichtsdaten. Damit ist die Produktstrukturliste eines der wichtigsten Dokumente für das Massenmanagement (s. Abb. 3.19).

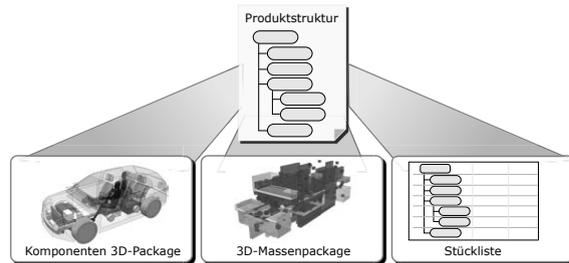


Abb. 3.19: Rolle der Produktstrukturliste in der technischen Entwicklung

Rückschlüsse auf funktionale Zusammenhänge zwischen den einzelnen Fahrzeugkomponenten lassen sich aufgrund der fertigungsorientierten Strukturierungsform nur begrenzt darstellen, da Komponenten aus funktionaler Perspektive multiple Verwendung finden können; des Weiteren kann eine gänzlich andere Strukturierung erforderlich sein. So ist z. B. das Motorsteuergerät typischerweise Teil des Elektrikumfangs eines Fahrzeugs, funktional jedoch dem Antriebssystem zuzuordnen.

Die Produktstrukturliste ist auf erster Ebene üblicherweise keiner hohen Dynamik unterworfen, da sich aus Perspektive der Hauptfahrzeugfunktionen kaum Änderungen ergeben. Die eigentliche Varianz entsteht in den untergeordneten Ebenen. Diese kann sich in mehreren Formen darstellen:

- Zeitliche Varianz in Bezug auf Detaillierung und Umfang der Produktstrukturliste im Rahmen der Entwicklung.
- Varianz aus Derivatsicht, da durch die Produktstrukturliste alle möglichen Fahrzeugderivate angesteuert werden können.

Im Zuge des Entwicklungsfortschritts des Fahrzeugprojektes ändert sich auch die zugehörige Produktstruktur. Während das Dokument zu Beginn der Konzeptphase einen zumeist geringen Detaillierungsgrad infolge der unpräzisen Produktbeschreibung aufweisen kann, werden die einzelnen Bereiche sukzessive im Laufe der Entwicklung verfeinert, bis eine vollständige Beschreibung auf Teileebene vorliegt.

Für viele Unterebenen lassen sich stets vorhandene Strukturen und Elemente identifizieren. Ein verbrennungsmotorischer Antriebsstrang lässt sich beispielsweise aus Datensicht schematisch stets durch die folgenden Komponenten beschreiben:

- Motor (Grundmotor, variable Ladeluftstrecke, Kapselungen ...)
- Kühlsystem (Motor, Getriebe)
- Abgasanlage (Katalysator, Partikelfilter, Schalldämpfer, Rohre ...)
- Antriebswellen
- Kraftstoffsystem (Kraftstoffbehälter, Leitungen, Pumpe, Aktivkohlefilter)
- Getriebe
- Differential (an der(n) angetriebenen Achse(n))

Dadurch können Strukturschemata bereitgestellt werden, die sich in der Entwicklung wiederverwenden lassen.

3.3.5 3D-Grobpaket und DMU-Produktstruktur

3.3.5.1 Randbedingungen für das Package

Auf Basis des Maßkonzeptes, sowie der festgelegten Inhalte in der Produktstrukturliste wird die Planung und der Aufbau des 3D-Grobpaketes vorgenommen. Dieses soll einen ersten Eindruck der Bauraumsituation im Fahrzeug vermitteln. Für die Bauraumplanung in der frühen Konzeptphase sind jene Komponenten von besonderem Interesse, die sich entweder durch einen hohen Platzbedarf und/oder ein hohes Gewicht auszeichnen, da diese zu späteren Zeitpunkten in der Entwicklung nicht mehr ohne Weiteres im Fahrzeug, bedingt durch die vielfältigen Bauraumabhängigkeiten und resultierenden Maßketten, verschoben werden können. Daneben sind noch weitere Aspekte zu berücksichtigen. Die wichtigsten Themenblöcke sind in Abb. 3.20 dargestellt.



Abb. 3.20: Zielkonflikte in der Packageentwicklung von PKWs in Anlehnung an [15]

Die Themenblöcke umfassen die Betrachtung der unterschiedlichen zu integrierenden Technologiekonzepte wie Rohbau, Antriebsstrang oder etwa das Fahrwerkskonzept, aber auch die Betrachtung gesetzlicher Einflüsse, sowie grundlegender Auswirkungen auf technische Eigenschaften. Durch die gegenseitigen und zum Teil gegenläufigen Abhängigkeiten der Themenfelder entsteht ein komplexes Spannungsfeld.

Neben diesen Anforderungen wird der Package-Prozess durch eine Reihe anderer Faktoren beeinflusst, wie etwa Abhängigkeiten innerhalb der eigenen Modellalette sowie wirtschaftliche und ökologische Aspekte, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Der Package-Prozess aus Architektursicht ist daher von Unternehmen zu Unternehmen stark unterschiedlich. Dennoch lassen sich gewisse Muster bzw. Grundsäulen identifizieren, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen. Den Grundstein für das 3D-Package bildet das sogenannte Fahrzeugkoordinatensystem (s. Abb. 3.21), welches rohbaufest definiert wird.

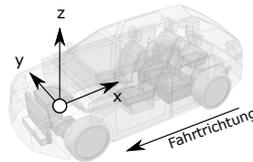


Abb. 3.21: Festlegung des Fahrzeugkoordinatensystems nach ISO [59]

Das Achsensystem ist ein rechtsdrehendes Koordinatensystem. Im Gegensatz zur Definition in der DIN ISO 8855 [28], zeigt die positive x-Achse in Richtung der Fahrzeuglängsachse nach rückwärts, die positive y-Richtung wird meistens entlang der Vorderachse definiert. Die z-Richtung ergibt sich folglich über das Kreuzprodukt der beiden Einheitsvektoren für x-Achse und y-Achse. Dieses Koordinatensystem ist raumfest und rohbaufest und bleibt über das ganze Fahrzeugprojekt hinweg erhalten. Alle Komponenten des Fahrzeugs werden relativ zu diesem System positioniert.

3.3.5.2 Bestandteile des Package

Aus Perspektive der Daten besteht das eigentliche Fahrzeugpackage aus den folgenden Bestandteilen:

- Festlegung von Messlasten und Darstellung fahrbahnabhängiger Vorgaben
- Bauteile, Hüllen, Ersatzdarstellungen sowie Proportionsmodelle
- Darstellung von Funktionsgeometrie

Die Festlegung der Messlasten dient zur Darstellung unterschiedlicher Beladungszustände des Fahrzeugs und der daraus resultierenden unterschiedlichen Fahrbahnniveaus. Geometrisch resultiert die jeweilige Fahrbahnlinie als Tangente an die jeweiligen statischen Radhalbmesser von Vorder- und Hinterachse. Damit sind zur Festlegung einer Fahrbahnlinie die folgenden messlastabhängigen Informationen erforderlich:

- R_{stat} für Vorder- und Hinterachse
- Radzentren für Vorder- und Hinterachse

Eine Messlast kann als Schnitt oder Fläche dargestellt werden. Abb. 3.22 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Messlast.

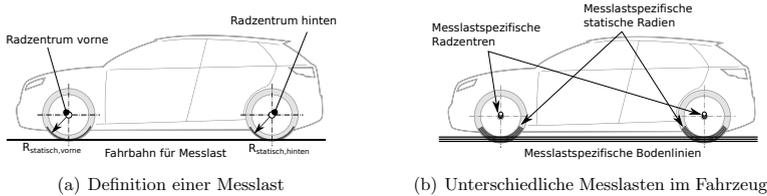


Abb. 3.22: Aufbau und wesentliche Parameter einer Messlast

Ausgehend von den Radzentren erfolgt die Aufspannung der Messlastebene tangential an die statischen Radhalbmesser. Jeder Messlast liegt ein definierter Beladungszustand zugrunde. Tab. 3.2 zeigt einen Auszug an relevanten Messlasten für die Auslegung von Kraftfahrzeugen innerhalb der Europäischen Union. Die jeweiligen Messlasten bilden die Grundlage zur Festlegung der Grenzgeometrie für die fahrbahnspezifischen homologationsrelevanten Vorgaben.

Tab. 3.2: Wichtige Messlasten in der Fahrzeugkonstruktion

Messlast	Beschreibung	Norm/Richtlinie
1	Fahrzeugleergewicht: Inkludiert das Fahrzeug im fahrbereiten Zustand mit kompletter Ausrüstung für den regulären Fahrbetrieb inklusive Kühlmittel, 90% der Tankfüllung, sowie Feuerlöscher, Unterlegekeile und Werkzeugsatz, sowie ein Fahrer mit Gepäck mit 75 kg [41].	DIN 70020-2, EU 92/21
2	Konstruktionsgewicht: Das Gewicht der Messlast 1 ist um die Anzahl an Passagieren in Abhängigkeit von der Sitzzahl erhöht. Für 4- und 5-Sitzer sind z. B. zwei Personen vorne und eine Person auf der zweiten Sitzreihe definiert. Das Gewicht der Passagiere beträgt 68 kg plus 7 kg Gepäck.	
3	Zulässiges Gesamtgewicht unter Ausnutzung der zulässigen Hinterachslast [41].	DIN 70200-2

Durch den starken Einfluss fahrbahnabhängiger Randbedingungen auf die Ausgestaltung des Fahrzeugunterbodens ist die möglichst frühe Kenntnis der Beladungssituation ein wesentlicher Schlüssel in der Package-Entwicklung. Sind zu Beginn der Entwicklung keine exakten Fahrwerksdaten verfügbar, erfolgt deren Definition üblicherweise über geeignete Schätzwerte.

Die Bauteile, Hüllen, Ersatzdarstellungen und Proportionsmodelle dienen der Darstellung des Bauraumbedarfes, der zu verbauenden Teile und sind in weiterer Folge erforderlich, um die geometrische Absicherung über Kollisionen und benötigte Freigänge zwischen den Komponenten vorzunehmen. Des Weiteren wird die räumliche Ausdehnung und Positionierung der Komponenten zur Ableitung der erforderlichen Maße und Maßketten benötigt.

Funktionale Geometrie entsteht etwa durch geometrische Funktionen im Fahrzeuginnenraum. Dies umfasst Hüllgeometrie, die etwa infolge der Verschiebbarkeit des Fahrersitzes, einer umklappbaren Rücksitzbank oder der Aggregatebewegung während dem Fahrbetrieb entstehen. Abb. 3.23 zeigt die typische Gestalt eines Gesamtfahrzeug-DMU in der Konzeptionsphase.

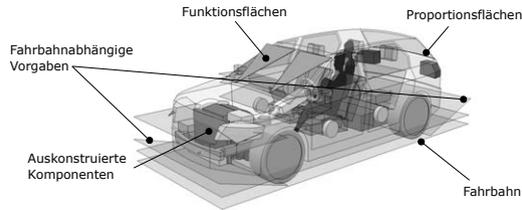


Abb. 3.23: Wesentliche Bestandteile eines Gesamtfahrzeug-DMU

3.3.5.3 Package-Aufbau und Analyse

Die Gestaltung des Fahrzeugpackage fußt auf zwei elementaren Säulen. Das Maßkonzept bildet nach [15] die maßliche Basis. Dazu kommen technologische Randbedingungen, welche über die grundsätzliche Positionierung ortsabhängiger Komponenten, wie etwa des Antriebsstranges und des Fahrwerks, entscheiden. Im Falle der Nutzung von Plattformen bzw. Baukästen ergeben sich zusätzliche Limitierungen, bzw. kann die Positionierung von Komponenten nur noch im Rahmen der Plattform- bzw. Baukastenfreiheitsgrade erfolgen. Der grundsätzliche Package-Prozess ist in Abb. 3.24 dargestellt.

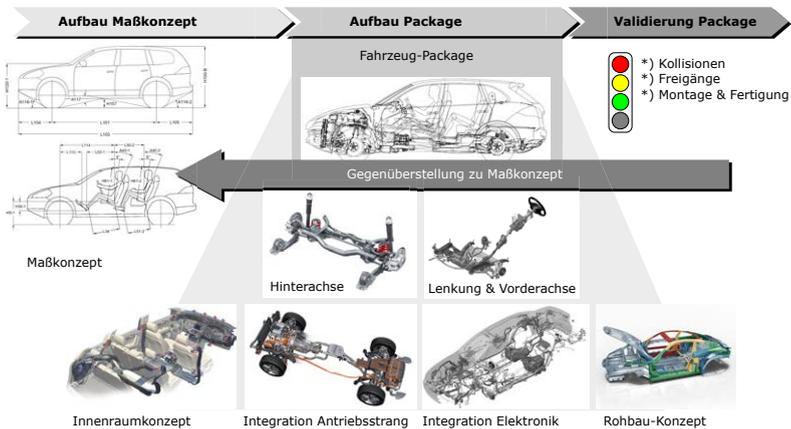


Abb. 3.24: Aufbau und Validierung des Packages in Anlehnung an [15]

Zunächst müssen die erforderlichen Teile und Module bestimmt werden, die in das Fahrzeug verbaut werden sollen. Diese werden durch die Konzeptproduktstruktur definiert. Aus Package-Sicht lassen sich in Hinblick auf die Positionierung von Komponenten zwei Grundtypen differenzieren – ortsabhängige und ortsunabhängige Komponenten. Ortsgebundene Bauteile sind an

eine bestimmte Position und Lage bedingt durch ihre mechanische Funktion oder physikalischen Zusammenhänge gekoppelt. Ortsunabhängige Komponenten können grundsätzlich beliebig, oder in mehreren Positionen im Fahrzeug verbaut werden, wobei etwa für elektronische Komponenten die Einflüsse der Umgebung hinsichtlich Feuchtigkeit und Störeinflüsse auf andere elektronische Elemente zu beachten sind.

Zunächst erfolgt auf Basis des Maßkonzeptes und der gewählten Antriebsystemtopologie die Positionierung aller ortsgebundenen Komponenten wie etwa Motor, Antriebsstrang, Lenkgetriebe etc. Die verbleibenden Lücken können für die Platzierung ortsunabhängiger Komponenten genutzt werden. Die räumliche Positionierung von Komponenten erfolgt grundsätzlich unter Berücksichtigung von Anforderungen aus dem Maßkonzept und technischer bzw. produktions- und fertigungsspezifischer Forderungen. Abb. 3.25 zeigt hierzu einen Auszug an verschiedenen Themenstellungen.

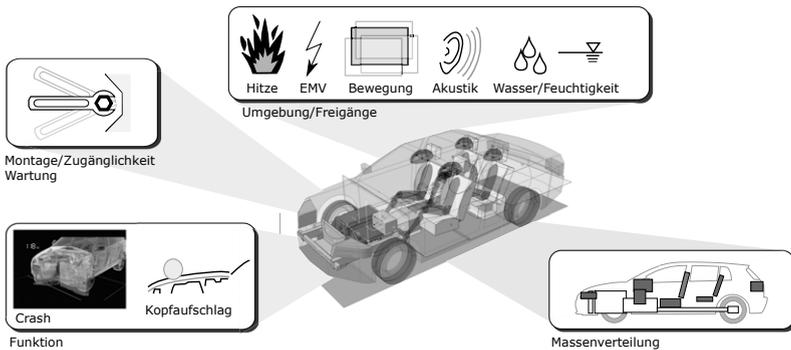


Abb. 3.25: Erweiterte Aspekte in der Bauraumbewertung

Die für das Package erforderlichen Komponenten können verschiedenen Ursprungs sein. Während im Falle der Nutzung von Baukästen oder Plattformen ein Großteil der erforderlichen Bauteile bereits vollständig modelliert zur Verfügung steht, ist dieser Anteil im Falle von Fahrzeugen mit hohem technologischen Neuigkeitsgrad oder Forschungsfahrzeugen eher gering. In diesem Fall ist die Architekturentwicklung folglich auf entsprechende Ersatzrepräsentationen angewiesen, um die erforderlichen Bauräume und Platzbedarfe der Komponenten darstellen zu können. Diese können im Kontext unterschiedlicher Gesichtspunkte gestaltet werden. So kann es in manchen Fällen ausreichend sein, lediglich einen Quader als Platzhalter auszuweisen, während in anderen Fällen diese Detaillierungsebene als eindeutig zu grob einzustufen ist. Als Beispiel sei ein Fahrzeugsitz angeführt. Für erste Maßkettenuntersuchungen ist ein grobes Proportionsmodell wie in Abb. 3.26 ausreichend. Für die Planung des Gurtverlaufs sowie detailliertere Untersuchungen ist jedoch ein detaillierteres Modell erforderlich.

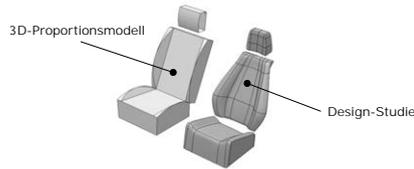


Abb. 3.26: Verschiedene Bauraumdarstellungen für einen Sitz

Die Positionierung der Komponenten kann im Fahrzeug grundsätzlich auf drei verschiedene Arten vorgenommen werden:

- Lagetreue Konstruktion
- Nutzung von Baugruppenbedingungen
- Positionierung über Transformationsmatrizen

Werden hinsichtlich der Konstruktionsmethodik erforderliche Komponenten bereits an der „richtigen“ Stelle im Raum konstruiert, d. h. lagerichtig erstellt, sind im Aufbau des DMU keine weiteren Schritte erforderlich. Sobald die Bauteile geladen werden, befinden sich diese bereits an der richtigen Stelle. Dieser Vorteil geht jedoch mit dem wesentlichen Nachteil einher, dass Bauteile, die auf diese Art und Weise konstruiert werden, nicht an anderer Stelle wiederverwendet werden können. Diese Methodik ist vor allem in der Rohbaukonstruktion etabliert [41].

Die Nutzung von Baugruppenbedingungen ist eine Funktion parametrisch-assoziativer Konstruktionssysteme und ermöglicht es, Bauteile und Zusammenbauten im Raum über Bedingungen analog der Vorgehensweise auf Teileebene zu definieren. Dadurch lassen sich Bauteile und Zusammenbauten parametrisch in Hinblick auf Position, Orientierung und deren Abmessungen teileübergreifend steuern. Dieses Verfahren wird zumeist nur auf Modulebene angewandt, da sich ansonsten Konflikte geometrischer Natur nicht zweckmäßig darstellen lassen. Des Weiteren kann die wahllose Nutzung vieler Bedingungen eine Instabilität des CAD-Modells nach sich ziehen.

Die Methodik zur Positionierung und Orientierung mittels Transformationsmatrizen wurde bereits in Kap. 4 detailliert erläutert. Der Vorteil dieser Methode liegt aus Gesamtfahrzeugsicht darin begründet, dass involvierte Bauteile unabhängig positioniert werden können, ohne die Nachteile der Baugruppenbedingungen wie Instabilität oder schlechte Performanz bei Änderungen in Kauf nehmen zu müssen. Darüber hinaus ist die Methodik auf alle Formen von 3D-Datensätzen anwendbar, wohingegen Baugruppenbedingungen nur zusammen mit der exakten 3D-Repräsentanz nutzbar sind.

Sind alle wesentlichen Komponenten im Fahrzeug enthalten, muss zunächst eine Überprüfung erfolgen, ob die Anforderungen an die Komponenten an den jeweils gewählten Positionen erfüllt werden. Dies umfasst Themen wie etwa Freigänge, Kollisionen zu Teilen in der Umgebung, elektrische Beeinflussung benachbarter Sensoren oder Steuergeräte etc. (s. Abb. 3.25). Dieser Packagezustand wird dem Maßkonzept gegenübergestellt, wodurch die Validierung einzuhaltender oder definierter Maße und Räume erfolgen kann.

3.3.6 Funktionen auf Gesamtfahrzeugebene

Wie bereits im vorangegangenen Kap. 3.3.5 gezeigt, ergeben sich durch die gewünschten Fahrzeugeigenschaften und Funktionen entsprechende Bauraumbedarfe. Zwischen Funktion und Geometrie und deren Integration in das Gesamtfahrzeug ergibt sich daher ein dynamisches Wechselspiel, das in der frühen Konzeptphase zu einer Vielzahl an Prozessiterationen führen kann. Daher ist man in der frühen Konzeptphase bestrebt, virtuelle Ersatzmodelle zur initialen Abschätzung erforderlicher Bauräume aus funktionaler Sicht einzusetzen. Im Folgenden sollen daher die wesentlichen Einflüsse von Funktionen auf die geometrische Beschaffenheit sowie daraus resultierende virtuelle Modelle diskutiert werden.

3.3.6.1 Einfluss von Funktionen auf die Fahrzeugarchitektur

Bevor auf die Zusammenhänge von Funktion und Geometrie auf Gesamtfahrzeugebene eingegangen wird, soll der Funktionsbegriff selbst definiert werden: Die VDI-Richtlinie 2221 [115] definiert Funktion als „lösungsneutral beschriebene Beziehungen zwischen Eingangs-, Ausgangs-, und Zustandsgrößen eines Systems.“ Pahl und Beitz [80] definieren zudem die Begriffe Gesamtfunktion („Funktion, die die Teilaufgabe in ihrer Gesamtheit erfasst“), Teilfunktion („Funktion, die eine Teilaufgabe erfasst“), Hauptfunktion („Teilfunktion, die unmittelbar der Gesamtfunktion dient“) und Nebenfunktion („Teilfunktion, die die Hauptfunktion unterstützt und daher nur unmittelbar der Gesamtfunktion dient.“).

Die eigentliche Funktionsentwicklung fällt typischerweise nicht in den Verantwortungsbereich einer Fahrzeugarchitekturabteilung. Da diese jedoch das Gesamtfahrzeug im Sinne eines funktionsfähigen Ganzen verantwortet, müssen zunehmend, neben der eigentlichen Hauptverantwortung der geometrischen Integration, funktionale Betrachtungen auf Ebene des Gesamtfahrzeugs vorgenommen werden. Dies ist u. a. auf die nach wie vor steigende Funktionsdichte im Fahrzeug zurückzuführen, die trotz des Trends steigender Außenabmessungen zu einer kontinuierlichen Bauraumverdichtung/Bauraumverknappung führt. In Kap. 3.2 wird hierzu der Einfluss verschiedener Antriebssysteme auf das Gesamtfahrzeug gezeigt.

Als Beispiel sei eine Traktionsbatterie eines Elektrofahrzeugs betrachtet. Die Reichweite eines Elektrofahrzeugs wird wesentlich durch die verfügbare Kapazität der Traktionsbatterie bestimmt. Diese ist von mehreren Faktoren abhängig wie z. B. verwendete Zelltechnologie, Anzahl der Zellen, Kühlkonzept und entsprechender Schutzmaßnahmen im Falle eines Unfalls. Kraftstoffbehälter von verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen werden erst relativ spät in der Entwicklung in das Fahrzeug integriert. Dies ist deshalb möglich, da es sich bei Kraftstofftanks typischerweise um Kunststoffteile handelt, die eine relativ freie Formgebung erlauben, und dadurch Lücken und Freiräume im Package ausfüllen und ausnützen können. Des Weiteren sind bis auf Gleitschienen und Tankspannbänder keinerlei Sicherheitsmaßnahmen erforderlich. Im Gegensatz dazu gestaltet sich die Integration einer Traktionsbatterie wesentlich komplexer. Aufgrund der erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen in Form von Panzerungen oder umschließenden Rahmenstrukturen und dem prinzipbedingten geringeren Freiheitsgrad in der geometrischen Formgebung, muss eine Traktionsbatterie bereits im initialen Gesamtkonzept von Beginn an mit betrachtet werden (s. Abb. 3.27).

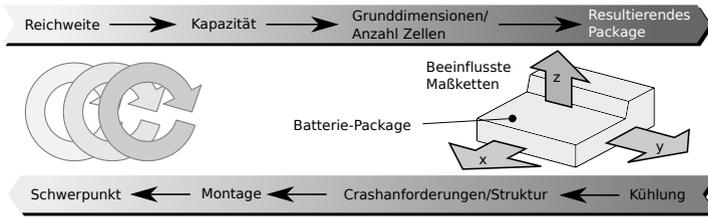


Abb. 3.27: Exemplarische Wirkkette in der geometrischen Auslegung einer Traktionsbatterie

Auf Basis der geforderten Reichweite resultiert auf Basis der zur Verfügung stehenden Batterietechnologie ein Basisplatzbedarf. Dieser wird durch das erforderliche Kühlkonzept und strukturelle Maßnahmen zum Schutz der Batterie erhöht. Der entstehende Platzbedarf muss anschließend den maßlichen Anforderungen seitens der Fahrzeugarchitektur gegenübergestellt werden, des Weiteren müssen gewichtstechnische Aspekte und produktionstechnische Belange bewertet werden. Dadurch ergibt sich wiederum ein iterativer Prozess, der durch eine Fahrzeugarchitekturabteilung geführt werden muss.

Dieses Beispiel zeigt, dass es innerhalb des Systems „Fahrzeug“ stets zu Überschneidungen von Bauraumanforderungen sowie Rückkoppelungen auf die Positionierung von Komponenten aus Funktionssicht kommt. Je höher der Neuigkeitsgrad an Funktionen und damit erforderlichen Komponenten ist, desto größer können diese Effekte ausfallen.

3.3.6.2 Hauptfunktionsgruppen auf Gesamtfahrzeugebene

Auf Ebene des Gesamtfahrzeugs sind gemäß den Ausführungen im vorangegangenen Abschnitt grundsätzlich alle Funktionen von Interesse, die eine hohe Auswirkung auf die Physis und geometrischen Eigenschaften des Fahrzeugs besitzen und bei denen eine nachträgliche Änderung in der Positionierung mit hohen bautechnischen Aufwänden einhergeht. In der frühen Konzeptphase betrifft dies im Speziellen jene Komponentengruppen, die entweder durch ihre funktional bedingte geometrische Ausdehnung im Fahrzeug oder durch andere sensitive physikalische Eigenschaften, wie etwa deren Masse, möglichst früh im Konzept dargestellt und bewertet werden müssen. Aufgrund der Fokussierung der vorliegenden Arbeit auf die frühe Konzeptphase des Automobilbaus sollen im Folgenden jene Funktionsgruppen näher betrachtet werden, welche aus heutiger Sicht in der frühen Phase von wesentlicher Bedeutung sind. Diese werden in weiterer Folge als *Hauptfunktionsgruppen* bezeichnet (s. Abb. 3.28).

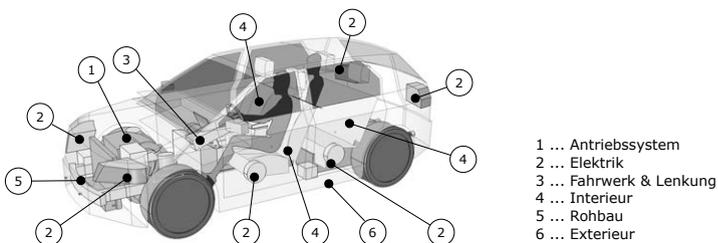


Abb. 3.28: Hauptfunktionsgruppen aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur

Das Antriebssystem eines Fahrzeugs geht stets mit einer hohen Bauraumanforderung einher, gleich welcher Typus im Fahrzeug integriert werden soll. Dies resultiert zum einen aus der geforderten Bereitstellung der mechanischen Antriebsenergie an den Rädern. Je nach Antriebssystem sind hierzu entsprechende Sekundärsysteme erforderlich, wie etwa ein komplexer Ansaugluftpfad, eine Kühlung oder eine Abgasanlage im Falle verbrennungsmotorischer Antriebssysteme. Zum anderen entsteht der hohe Bauraumbedarf durch das Mitführen der erforderlichen Energie, die als Basis für die Umwandlung in mechanische Energie benötigt wird.

Der Umfang an Elektrik und Elektronik nimmt durch die zunehmende Implementierung von Assistenzsystemen, sowie der steigenden Integration von Unterhaltungs- und Komfortelektronik zu. Wesentliche Bauraumanforderungen entstehen hierbei durch die erforderliche Verkabelung, Steuergeräte und Sensoren sowie erforderliche Halterkonzepte zur korrekten Positionierung im Fahrzeug. Im Bereich der Unterhaltungs- und Komfortelektronik addieren sich Displays, Lautsprecher sowie erforderliche physische Schnittstellen zu Multimedia-Geräten. Im Falle der Elektronik ergeben sich durch die mögliche elektromagnetische Beeinflussung der beteiligten Komponenten untereinander weitere Bauraumanforderungen, die etwa in einzuhaltenen Freigängen und Mindestabständen münden (s. Abb. 3.25).

Das Fahrwerk und das zugehörige Lenksystem stellen Bauraumbedarfe in Form der Radgröße (Raddurchmesser und Radbreite) und der Radbewegungen während des Fahrbetriebs infolge des Lenkens und des Ein- und Ausfederns. Des Weiteren sind die Platzbedarfe der beweglichen Fahrwerks- und Lenkungskomponenten zu berücksichtigen.

Das Interieur beeinflusst die Architektur des Fahrzeugs durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Funktionen. Wesentliche Bauraumbedarfe entstehen prinzipbedingt durch die Anzahl an zu transportierenden Personen und den damit einhergehenden erforderlichen Sitzen, die Steuerung des Fahrzeugs in Form eines Lenkrades, der Instrumententafel und der Mittelkonsole, sowie dem gewünschten Stauraumkonzept.

Der Rohbau beeinflusst die Fahrzeugarchitektur aus funktionaler Sicht vor allem durch die erforderlichen Steifigkeitswerte und die Erfüllung von definierten Crashlastfällen und der daraus resultierenden Gestaltung und Dimensionierung der Struktur. Des Weiteren beeinflusst die gewählte Bauweise und das Material die Gestalt des Rohbaus.

Das Exterieur ist zu einem großen Teil durch die gewünschte Formsprache bestimmt, weist jedoch auch viele funktionale Aspekte auf, wie etwa die Aerodynamik des Fahrzeugs, Luftführung für die Motor-, und Bremsenkühlung oder crashteknische Aspekte, wie etwa den Fußgängerschutz.

Die beschriebenen Hauptfunktionsgruppen bilden die Grundlage für die im Rahmen des vorliegenden Ansatzes festgelegte Konzeptproduktstruktur (s. Kap. 5.3.3) und definieren deren Gliederung auf erster Ebene.

3.3.6.3 Funktionsmodelle auf Gesamtfahrzeugebene

Aufgrund des bereits diskutierten Umstands, dass ein Großteil der Fahrzeugfunktionen zu Beginn eines Konzeptes nicht vollständig definiert ist und damit die Auswirkungen auf die Teilgeometrie nicht exakt dargestellt werden können, ist man auch im Bereich der Funktionen auf entsprechende Vereinfachungen und Hilfsmodelle in der virtuellen Entwicklung angewiesen.

Viele der angeführten Funktionen, wie etwa jene des Antriebs, weisen einen hohen Bauraumbedarf bzw. eine Bauraumsensitivität auf. Bedingt durch den wachsenden Bauraummangel im Fahrzeug kommt es daher zwangsläufig zu Überschneidungen zwischen den Bauräumen und damit zwischen den verantwortlichen Fachbereichen. Aus der Rolle der Bauraumverwaltung ist es auf Ebene der Fahrzeugarchitektur folglich zunehmend von Bedeutung, Funktionen und deren Einflüsse auf die Formgebung sowie Dimensionierung von Komponenten erfassen und virtuell abbilden zu können. Im Falle neuer Technologien ist dies mit einer enormen Herausforderung verknüpft, da oft keine detaillierten und vor allem physisch validierten Simulationsmodelle vorliegen. Daher ist man auch hier, analog zur geometrischen Welt, auf den Einsatz von empirischen oder vereinfachten Modellen bzw. Erfahrungswerten angewiesen.

Die Funktionsbetrachtung auf Gesamtfahrzeugebene soll damit zwei wesentliche Aspekte in der Entwicklung unterstützen: Die systematische Ableitung von Anhalts- bzw. Zielwerten für die Erstellung von Geometriemodellen und die grundsätzliche Prognose gewünschter Gesamtfahrzeugeigenschaften. Dazu dienen umfangreiche Forschungstätigkeiten im Bereich des Systems-Engineering (SE) zur Beschreibung der Verknüpfungen zwischen den unterschiedlichen Fahrzeugeigenschaften und Funktionen wie beispielsweise [56] und [93].

Als Beispiel auf Gesamtfahrzeugebene sei der Wendekreis angeführt. Der Wendekreis beschreibt eine zylindrische Einhüllende, die ihren Mittelpunkt im Momentanpol hat und deren Mantelfläche die Fahrzeugaußenfläche tangiert (s. Abb. 3.29).

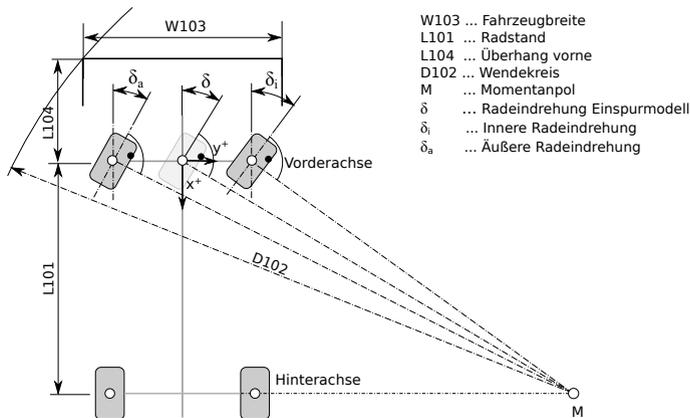


Abb. 3.29: Approximation des Wendekreises

Für die virtuelle korrekte Abbildung des Wendekreises ist daher einerseits ein entsprechendes Fahrwerksmodell erforderlich, andererseits entsprechende 3D-Design-Daten. Beides ist in der frühen Phase oft nicht, oder nicht in der ausreichenden Qualität vorhanden. Da der Wendekreis eine wichtige Konzeptgröße darstellt, muss an dieser Stelle zur Bewertung auf ein Näherungsmodell zurückgegriffen werden, wie etwa in Abb. 3.29 gezeigt. Auf Basis des Wendekreismodells lassen sich bei gegebenem Radstand aus dem Maßkonzept und bei gefordertem Wendekreis erforderliche Zielwerte für die Radeindrehung ableiten. Diese Werte sind wichtig, da sie auf das zur Verfügung stehende Platzangebot im Vorderwagen über die Gestaltung der Radlaufschalen einen hohen Einfluss ausüben.

Ein komplexeres Themengebiet mit Auswirkungen auf multiple Fahrzeugeigenschaften ist die Fahrzeugmasse. Die Fahrzeugmasse beeinflusst sowohl durch ihren Betrag als auch durch ihre räumliche Verteilung den Massenschwerpunkt und die Massenträgheitsmomente und damit wesentliche Fahrzeugeigenschaften, wie etwa erforderliche Antriebsleistung, Achslastverteilung oder das Lenkverhalten (s. Abb. 3.30).

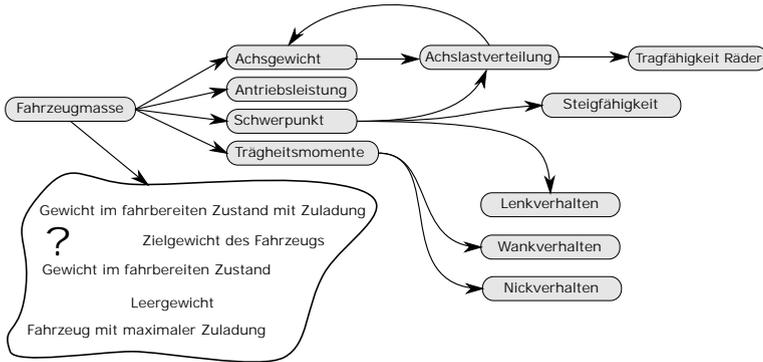


Abb. 3.30: Einfluss der Fahrzeugmasse auf Produktmerkmale im Gesamtfahrzeugkontext

Des Weiteren ist die Abbildung der Fahrzeugmasse bzw. die Masse des Gesamtsystems oft in unterschiedlichen Beladungszuständen erforderlich, wodurch die Handhabung der Größen komplexer wird. Hierbei wird die Herausforderung deutlich: Durch die hohe Beeinflussung dieser Eigenschaften ergeben sich mannigfaltige Rückkopplungen zum Fahrzeugpackage und damit auf die Gestalt der Fahrzeugarchitektur.

4

Stand der Technik

Die primäre Arbeitsdomäne einer Fahrzeugarchitektur-Abteilung stellt das 3D-CAD bzw. das DMU dar (s. Kap. 4.2). Aufgrund der wachsenden Bauraumanspannung infolge steigender Funktionsdichte moderner Automobile, sowie der Forderung nach verstärktem Frontloading in der frühen Konzeptphase wird es aus Architektursicht immer wichtiger, zusätzlich funktionale Aspekte von Beginn an in die Bauraumplanung einfließen zu lassen. Dies erfordert die gezielte Nutzung weiterer Modellierungsdomänen, da sich in der Domäne des CAD Funktionen im allgemeinen nicht oder nur in sehr begrenzter und vereinfachter Form darstellen lassen. Daher sollen die nachstehenden virtuellen Technologien vor dem Hintergrund eines zu entwickelnden ganzheitlichen Konzeptionsansatzes analysiert werden:

- Computergestützte Geometriemodellierung
- Digital Mock Up in der Fahrzeugarchitektur
- Das integrierte Produktmodell
- Wissensbasierte Entwicklung
- Datenmanagement in der Fahrzeugentwicklung
- Informationsaustausch entlang der Datenprozesskette
- Spezielle Ansätze zur Unterstützung der Fahrzeugkonzeption in der frühen Phase

4.1 Computergestützte Geometriemodellierung (CAD)

4.1.1 Allgemeines zur rechnergestützten Modellierung

Einen zentralen Baustein in der virtuellen Produktentwicklung stellt die computergestützte Geometriemodellierung (CAD) dar, insbesondere die dreidimensionale Modellierung. Im Gegensatz zu anderen geometrischen Formgebungsverfahren verfolgt das CAD die Darstellung von Geometrie, die herstellbar ist [44]. Das CAD ist damit eng mit dem Computer Aided Manufacturing (CAM) verknüpft, das auf Basis von CAD-Daten entsprechende Werkzeuge und Fertigungsoperationen ableitet. Moderne 3D-CAD-Systeme ermöglichen hierbei die Integration von maßlichen Informationen wie Bemaßungen, Toleranzen, Oberflächenangaben, sowie die Hinterlegung von speziellen Ansichten in den 3D-CAD-Datensatz. Die auskonstruierten 3D-Daten bilden die Datenbasis für die Bauraumbewertung mittels DMU (s. auch Kap. 4.2). Durch den gestiegenen Informationsgehalt von 3D-CAD-Datensätzen kann heute in der Automobilentwicklung in vielen Bereichen auf die Nutzung von 2D-Zeichnungsdokumenten verzichtet werden, bzw. es

reduziert sich deren Erstellung auf finale Übergabe- und Fertigungsdokumente. Im Speziellen haben 3D-Schnitte in Verbindung mit 3D-Bemaßungen die „klassische“ Zeichnung fast vollständig aus dem Konstruktionsalltag verdrängt. Dies hat mehrere Gründe: 2D-Zeichnungen erfordern grundsätzlich die Nutzung exakter Geometrie (s. Kap. 4.1.3) zur Ableitung von Maßen. Zwar besteht bei vielen kommerziellen System mittlerweile die Möglichkeit der Verwendung von tessellierter Geometrie (s. Kap. 4.1.3), allerdings sind abgeleitete Maße damit an die Tessellierungs- und Darstellungsgenauigkeit gekoppelt, womit diese für technische Zwecke unbrauchbar sind. Im Gegensatz zur Nutzung tessellierter Darstellungsformen, wie etwa im DMU, bedingt die Nutzung der exakten Geometrie das vollständige Laden der Teiledokumente in den Arbeitsspeicher. Damit ist zur Ableitung von Zeichnungen auf Basis exakter Daten großer Baugruppen ein entsprechend großer Arbeitsspeicher erforderlich. Durch die hohe Anzahl an Freiformflächen und die heute dreidimensionale Package-Gestaltung ist zudem der Informationsgehalt zweidimensionaler Schnitte gering. Für Dokumentationszwecke, wie etwa beim Sitzplan (s. Kap. 3.3.2) werden diese jedoch nach wie vor genutzt. Als weiterer Vorteil beim Verzicht auf 2D-Zeichnungen ist der verringerte Administrationsaufwand zu nennen, da bei Modifikation eines Bauteils stets eine Aktualisierung aller abhängigen Zeichnungsdokumente erforderlich ist. Zusätzlich wird die Datenkonsistenz erhöht, da sich alle erforderlichen geometrischen Informationen zum Bauteil stets im 3D-Datensatz befinden.

Neben der eigentlichen Kernaufgabe, der geometrischen Modellierung, ermöglichen moderne 3D-CAD-Programmpakete des Weiteren die Ableitung geometrieaffiner Größen, wie etwa Schwerpunkt oder Massenträgheitsmomente, und die Integration von Zusatzinformationen – sog. Meta-informationen – wie etwa Kommentare oder Verknüpfungen von Dokumenten oder Webinhalten [43]. Diese lassen sich in aufbauenden Prozessen, wie etwa Berechnungen oder Simulationen, weiterverarbeiten. In diesem Zusammenhang spricht man von der sog. *Datenlieferkette*. Das 3D-CAD wird damit zur zentralen Versorgung von geometrischen und geometrieaffinen Daten für die Berechnung und Simulation über den gesamten Entwicklungsprozess (s. Abb. 4.1). So wird beispielsweise die Semantik von genutzten Features in der Geometriemodellierung zur Ableitung von Bearbeitungsoperationen im CAM genutzt.

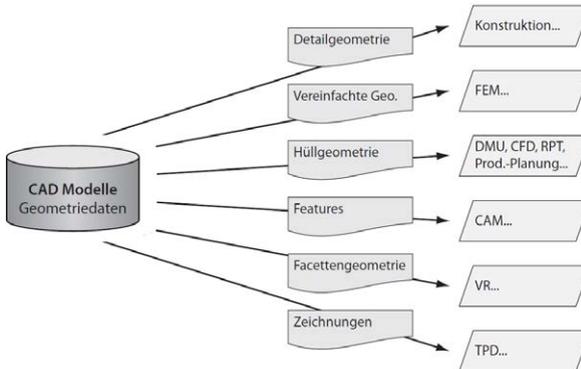


Abb. 4.1: CAD-Daten im Entwicklungsprozess [94]

4.1.2 Modellierungsverfahren in der Automobilentwicklung

Aufgrund der erforderlichen komplexen Formgebung heutiger Bauteile sowie der steigenden verfügbaren Rechnerleistung hat sich die 3D-CAD-Modellierung in praktisch allen Bereichen der Konstruktion durchgesetzt [113]. Moderne 3D-CAD-Systeme ermöglichen dem Konstrukteur heute zwischen unterschiedlichen Modellierungsverfahren zu wählen, die es bedarfs- und situationsgerecht einzusetzen gilt. Im Automobilbau haben sich die nachstehenden Verfahren durchgesetzt:

- Subdivision-Modellierung
- Explizite Modellierung
- Parametrisch-assoziative Modellierung

4.1.2.1 Subdivisionsmodellierung

In der Subdivisions-Modellierung wird die gewünschte Geometrie durch sukzessive „Teilung“, d. h. Subdivision, eines Ausgangselementes und Anwendung von speziellen Operationen, wie etwa ziehen, stauchen oder affine Abbildungen, gewonnen. Die entstehenden Segmente können scharfkantig abgegrenzt oder stetig verbunden sein. Dieses Verfahren wird vor allem in der konzeptionellen und prototypischen Betrachtung von Flächen genutzt, an die hohe optische und formalästhetische Ansprüche gestellt werden, wie etwa im Interieur des Fahrzeugs. So lassen sich mit dieser Methode sehr rasch komplexe Flächen modellieren, wie beispielsweise Fahrzeugsitze. Abb. 4.2 zeigt hierzu beispielhaft eine mögliche Abfolge von Modellierungsschritten in der Gestaltung einer bombierten Fläche.

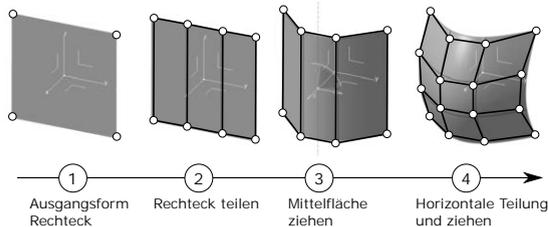


Abb. 4.2: Konstruktion einer Fläche mittels Subdivisionsverfahren

Als Ausgangselement wird hier beispielhaft ein planares Flächenelement gewählt. Dieses wird in drei Segmente aufgeteilt. Die entstehenden Teilflächen können nun durch Modifikation der resultierenden Kontrollpunkte und Kontrollsegmente modifiziert werden. Das mittlere Segment der Kontrollpunkte wird im dritten Schritt entlang der Grundflächennormale gezogen, wodurch die Fläche ihre erste Wölbung erhält. Um die gewünschte sekundäre Wölbung zu erhalten, muss die Fläche in einem weiteren Schritt geteilt und wieder gezogen werden. Analog zur expliziten Modellierung (s. Kap. 4.1.2.2), existieren hier keine Abhängigkeiten zwischen den erfolgten Modellierungsschritten, d. h. es fehlt die Konstruktionshistorie wodurch eine Nachvollziehbarkeit der Konstruktion selbst unmöglich ist. Des Weiteren fehlen jegliche Assoziationen oder Parametrik, weshalb bei Änderungen von Teilflächen Folgeänderungen manuell nachgeführt werden müssen.

4.1.2.2 Explizite und dynamische Modellierung

Die sogenannte explizite Modellierung ist ein Verfahren, das aus der volumetrischen Modellierung stammt. Der Modellierungsprozess erfolgt über die sukzessive Anwendung spezieller Transformationsoperationen, wie etwa stauchen, ziehen oder drücken [37] (s. Abb. 4.3), auf die jeweiligen Teilflächen der Geometrie.

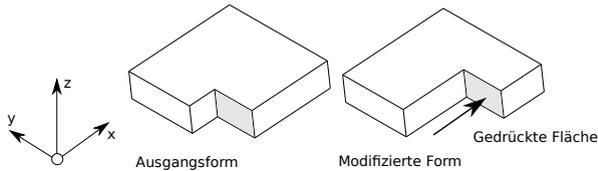


Abb. 4.3: Anpassung einer Geometrie durch explizite Modellierung

Die modifizierte Geometrie bewahrt ihre geometrischen Flächeneigenschaften im Gegensatz zur Subdivisions-Modellierung, die stets bei Änderungen an einem Flächenelement benachbarte Teilflächen beeinflusst. Im Gegensatz zur parametrisch-assoziativen Modellierungssystematik (s. Kap. 4.1.2.3) werden hier geometrische Elemente direkt durch den jeweiligen Anwender und nicht über Parameter und Bedingungen modifiziert [113]. Der dynamischen Modellierung fehlen daher, wie dem Subdivision-Modelling, die Konstruktionshistorie und steuernde Parameter. Dadurch, dass keine Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Modellierungssequenzen vorhanden sind, fallen keine Planungstätigkeiten wie im Falle der parametrisch-assoziativen Modellierungstechnik an (s. Kap. 4.1.2.3). Dadurch lassen sich sehr rasch komplexe Geometrien erstellen; zudem können bestehende Datensätze rasch modifiziert werden. Dies ist in stark heterogenen CAD-Landschaften von Vorteil, da man vom jeweiligen Autorensystem unabhängig ist. Zudem lassen sich bereits vorhandene Datensätze älterer nicht mehr unterstützter CAD-Systeme weiter nutzen und modifizieren. Dieser Vorteil kann aufgrund der fehlenden Parametrik auch zum Nachteil werden, wenn eine Rückführung von Berechnungs- oder Simulationsergebnissen in Form von Parameterwerten im Entwicklungsprozess erforderlich ist (vgl. [37]). Dieses Verfahren findet daher vor allem im Bereich Prototyping breite Anwendung, sowie im Falle von Industriebereichen, die eine lange Vorhaltdauer der CAD-Daten vorschreiben.

4.1.2.3 Parametrisch-assoziative Modellierung

Die parametrisch-assoziative Konstruktionsmethodik ist ein Modellierungsverfahren, das in sogenannten feature-basierten CAD-Systemen zum Einsatz kommt. Die VDI 2218 [114] charakterisiert hierzu die feature-basierte Modellierung als das Modellieren eines Produktes mit Hilfe von bereitgestellten Elementen (Features). Features stellen hierbei spezielle Modellierungsobjekte dar [72]. Diese können entweder eine geometrische Operation darstellen, wie etwa Extrusion, Bohrung oder Rotation in der volumetrischen Modellierung, oder können ein einzelnes geometrisches Objekt wie etwa einen Punkt, eine Achse oder eine Ebene in der flächenbasierten Modellierung beschreiben (vgl. [64]). Mendgen [72] nimmt an dieser Stelle eine andere Klassifikation vor: Er unterteilt Features in solche, die einen Beitrag zur Produktgestalt leisten (Fase, Bohrung, Schnitt, Rundung, etc.) und solche die lediglich als Hilfsmittel genutzt werden wie etwa Punkte, Ebenen, Achsen, etc. Des Weiteren verfügen Features über zusätzliche beschreibende Metainformation

und können eine spezielle anwendungsorientierte sowie fertigungstechnische Semantik aufweisen (vgl. Bossmann [12]) wie in Abb. 4.4 (a) dargestellt. So wird das Feature *Bohrung* durch eine geometrische Gestalt repräsentiert, die sich auf Basis der Bohrungsparameter, wie etwa Durchmesser und Typ ergibt. Wird der Typ geändert, wird auch die Gestalt modifiziert. Daneben beinhaltet ein solches Feature weitere Informationen zur Gewindedefinition, Tolerierung und weiterer erforderlicher Informationen (s. Abb. 4.4 (b)).

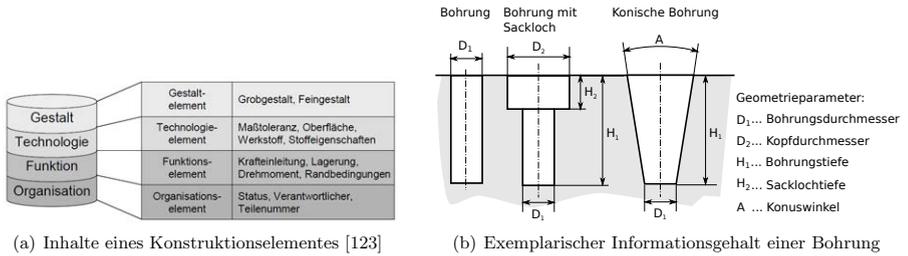


Abb. 4.4: Mögliche Informationsgehalte von Features

Die Modellierung erfolgt in featurebasierten CAD-Systemen stets durch eine sukzessive Nutzung geeigneter Features. Durch die Verknüpfungen der einzelnen Features entstehen Eltern-Kind-Beziehungen wodurch die Struktur eines parametrischen Bauteils die Form eines Graphen annimmt [72]. Die chronologische Abfolge der verwendeten Features wird in der sogenannten *Konstruktionshistorie* des Modells gespeichert. Dadurch lässt sich die Modellentstehung zu jedem Zeitpunkt eindeutig reproduzieren (s. Abb. 4.5).

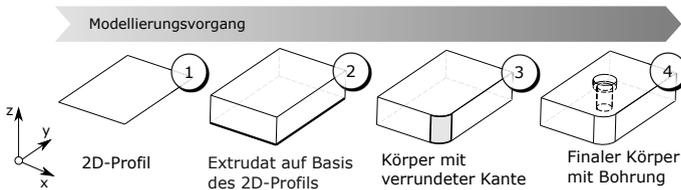


Abb. 4.5: Beispielhafte Konstruktionshistorie in einem featurebasierten Konstruktionssystem

Durch die jeweilige Semantik der Features lassen sich diese bei Bedarf eindeutig korrespondierenden Fertigungsoperationen im CAM zuordnen, wodurch diese nach VDI 2218 [114] auch als *Fertigungsfeatures* bezeichnet werden. Feature-basierte Konstruktionssysteme ermöglichen daher die vollständige digitale Abbildung der erforderlichen mechanischen Fertigungsoperationen.

Die parametrisch-assoziative Konstruktionsmethodik bezieht sich auf die Fähigkeit solcher Konstruktionssysteme, die verwendeten Features gezielt durch Parameter in ihrer geometrischen Ausprägung zu steuern (Parametrik) und entstehende Teilgeometrie untereinander durch geometrische Bedingungen zu verknüpfen (Assoziativität). Daher wirken sich Änderungen eines Features oder Parameterwertes stets auf alle verknüpften Modellbereiche automatisch aus. Durch die Modifikation der zugrundeliegenden Parameter lassen sich die Abmessungen des Modells exakt steuern. Abb. 4.6 (a) zeigt hierzu exemplarisch ein parametrisch-assoziativ konstruiertes Rechteck.

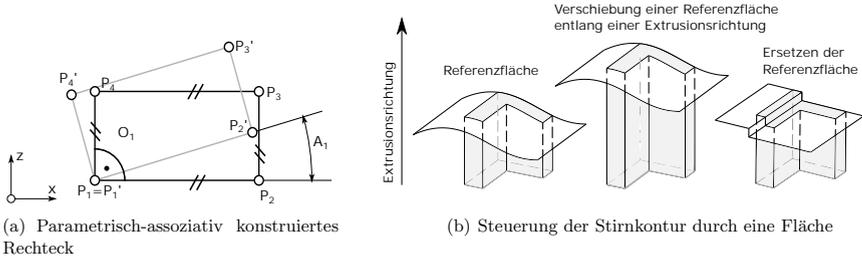


Abb. 4.6: Unterschiedliche Aspekte von Assoziativität

Die gezeigte Geometrie besteht aus je vier Punkten und vier Strecken, deren Lage über eine Orthogonalitätsbedingung und zwei Parallelitäten eindeutig definiert ist. In diesem Fall bleiben sowohl die Orthogonalität als auch die Parallelität bei Drehung um den Winkel A_1 um den Punkt P_1 erhalten. Durch das Prinzip der Assoziativität lassen sich des Weiteren Eingangselemente innerhalb einer Konstruktionsabfolge austauschen. So entsteht durch das Auswechseln der Begrenzungsfläche in Abb. 4.6 (b) automatisch eine neue Deckfläche des Bauteils.

Nach Troll [108] kann grundsätzlich zwischen geometrischen Parametern und prozessbezogenen Parametern unterschieden werden. Geometrische Parameter repräsentieren typischerweise Bemaßungen oder Sachmerkmale nach DIN 4000 [26]. Physikalische Parameter umfassen etwa Material, Gewicht oder andere prozessuale Informationen [108]. Assoziationen umfassen alle Arten von mathematischen Relationen und geometrischen Verknüpfungen im Modell. Die Anwendung der parametrisch-assoziativen Modellierungsstrategie bringt mehrere Vorteile mit sich:

- Einfache und rasche Modellanpassung durch Änderung entsprechender Parameter
- Schnelle Durchführung von Variantenstudien
- Rückführung von Berechnungsergebnissen in das Modell in Form geänderter Parameter
- Integration von Logiken und Regeln zur Unterstützung wissensbasierter Auslegung (s. auch Kap. 4.1.5) und Steuerung von Abläufen im CAD-Modell

Voraussetzung für einen effizienten Einsatz parametrisch-assoziativer Konstruktionsmethodik ist eine konsequente und zielgerichtete Planung der CAD-Modelle [13], [69], [113]. Die Planung bezieht sich dabei sowohl auf die Strukturierung von Informationen innerhalb des Modells, als auch auf Überlegungen hinsichtlich möglicher Modifikationsvarianten. Insbesondere die regellose Erstellung von geometrischen Bedingungen ist strikt zu vermeiden. So kann ein intransparenter Modellaufbau die Folge sein, der zu unvorhersehbaren und damit unerwünschten Effekten in der Aktualisierungskaskade führen kann. Dadurch können geometrische Instabilitäten auftreten, die eine korrekte Aktualisierung des Modells verhindern. Auch in der Wahl der gewünschten geometrischen Referenzen, wie etwa Modellteilflächen (s. Abb. 4.10), ist stets besondere Umsicht erforderlich, da bedingt durch das jeweils genutzte interne Geometriedatenmodell die Möglichkeit besteht, dass Teilflächen der Konstruktion „verschwinden“. Darauf aufbauende Beziehungen könnten daher in nachfolgenden Aktualisierungszyklen kollabieren [13]. Abb. 4.7 zeigt hierzu ein einfaches Beispiel.

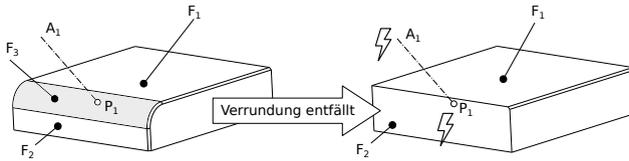


Abb. 4.7: Verschwindende Teilfläche in einem 3D-CAD-Modell

Es sei ein Quader mit einer verrundeten Kante gegeben. Die Stirn- und Deckfläche sind über die Teilfläche F_3 verbunden. Auf dieser Teilfläche wird nun ein Punkt konstruiert, der den Fußpunkt der Achse A_1 bildet. Der Richtungsvektor der Achse A_1 sei in Richtung des Normalvektors von F_3 in P_1 mit Orientierung aus dem Modell heraus definiert. Wird die Verrundung der Kante entfernt, so wird auch die Flächenreferenz des Punktes gelöscht – das Modell kann ab diesem Objekt nicht mehr aktualisiert werden und verlangt nach einem Eingreifen des Anwenders/der Anwenderin.

Ein weiterer Aspekt in der Nutzung der parametrisch-assoziativen Konstruktion ist die Wartbarkeit erstellter CAD-Modelle, wenn diese im Sinne eines Auslegungswerkzeugs genutzt werden. Kap. 4.6 geht hierbei im Detail auf die Erfordernisse ein. Grundsätzlich sind in diesem Zusammenhang in der Planung von parametrisch-assoziativen CAD-Modellen die selben Regeln, analog zur methodischen Konzeption von Computerprogrammen anzuwenden. So sind etwa zukünftige Erweiterungen bedingt durch neue Anforderungen oder die Integration neuer Varianten zu berücksichtigen. Ein regelloser Modellaufbau verhindert eine effektive Wartung und ist daher auch aus diesem Aspekt strikt zu unterbinden.

Eine weiteres wesentliches Merkmal in der Betrachtung parametrisch-assoziativer Modelle ist deren Performanz. Die mathematische Beschreibung von parametrischen Modellen erfolgt auf Basis arithmetischer Gleichungen [72]. Aufgrund der Konsistenzbedingung in einem parametrischen Teil müssen bei Änderung eines Parameters, einer Beziehung oder eines Features innerhalb der Konstruktionshistorie alle erforderlichen Gleichungssysteme neu gelöst werden. Eine hohe Anzahl an Gleichungen führt daher konsequenterweise zu einer Verlangsamung der Modellaktualisierung und ist unter dem Blickwinkel der Performanz in die Planung miteinzubeziehen. Im Sinne durchgängiger Datenqualität, hoher Performanz und minimaler Datengröße haben sich daher im Automotive-Bereich Methoden und Standardisierungen in der Modellerstellung etabliert. Diese reichen von einfachen Startmodellen [43] bis hin zu komplexen automationsgestützten Workflows.

Neben den bereits genannten Vorteilen liegt ein wesentlicher Mehrwert der parametrisch-assoziativen Konstruktionsmethodik in der Wiederverwendung von Bauteilen, bzw. Teilen der Konstruktionsabfolge begründet. Die theoretischen Einsparungen sind in Abb. 4.8 dargestellt.

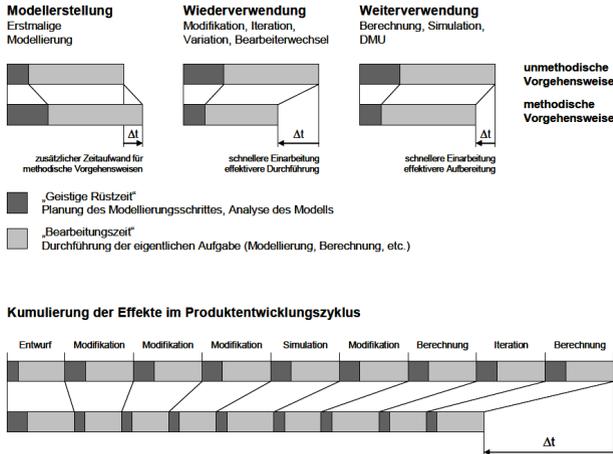


Abb. 4.8: Mögliche Einsparung im Entwicklungsprozess mittels parametrisch-assoziativer Modellierung [72]

Voraussetzung hierfür ist jedoch ein entsprechend hoher Anteil an Wiederholoperationen, da ansonsten der Mehraufwand hinsichtlich Planung und Gestaltung die gewonnenen Vorteile eliminieren kann.

Die Eigenschaften Assoziativität und Parametrik sind in parametrisch-assoziativen Konstruktionsystemen auf allen Ebenen der Modellierung wirksam. Daher lassen sich die beschriebenen Methoden sowohl auf Teile- als auch auf übergeordneter Zusammenbauebene nutzen. Dadurch lässt sich Geometrie und Metainformationen in Form von Parametern o. Ä. beliebig auf Zusammenbauebene wiederverwenden. Zudem lassen sich komplexe Konstruktionen zentral über die Baugruppe steuern (s. Abb. 4.9).

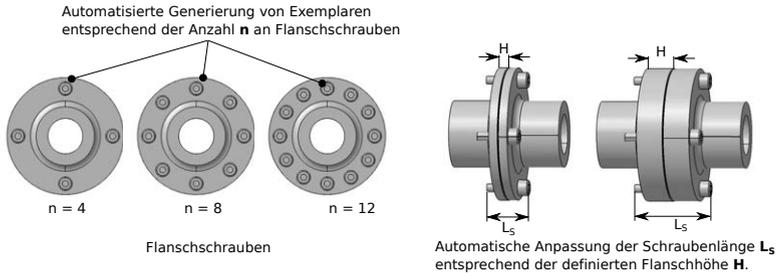


Abb. 4.9: Parametrisch-assoziative Baugruppensteuerung

4.1.3 Repräsentationsformen von Geometrie

In der rechnergestützten Darstellung von Geometrie wird grundsätzlich zwischen exakter und tessellierter Darstellung differenziert. Die exakte Darstellung versucht eine Form mathematisch exakt darzustellen. Das Ziel ist daher eine formal exakte Beschreibung der Geometrie, um diese etwa zur Ableitung von Produktionsinformationen oder Werkzeugen zu nutzen. Da sich komplexe Flächen, wie sie etwa bei Bauteilen in der Automobilindustrie auftreten, nicht durchgängig mathematisch exakt beschreiben lassen, wird die Gesamtgeometrie in geeignete Teilflächen aufgespalten, die ihrerseits mathematisch exakt dargestellt werden können (vgl. [64] und [38]). Dieses Verfahren wird auch als Boundary Representation (BREP) bezeichnet. Abb. 4.10 zeigt hierzu einen Quader, dessen vorderste Kante mit einer Rundung versehen ist. Dementsprechend besteht die Gesamtgeometrie aus sieben Teilflächen.

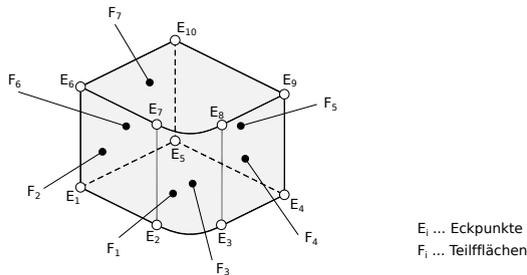


Abb. 4.10: Elemente einer exakten Darstellung

Neben der heute im CAD üblichen BREP-Variante entwickelt sich gerade eine neue Beschreibungsmethode, die als Isogeometrische Analyse (IGA) bezeichnet wird. Diese Beschreibungsmethode soll die Integration von FEM-Geometrie⁵ in konventionelle NURBS-basierte⁶ CAD-Geometrie ermöglichen. Diese Technologie wurde 2009 durch Thomas Hughes vorgestellt und ist Gegenstand einer Vielzahl an aktuellen Forschungsaktivitäten, z. B. [5], [106], [62], [78], [19].

Die Tessellation stellt ein mathematisches Verfahren zur Approximation gekrümmter Flächen dar. Diese werden dabei in mathematisch einfachere Geometrie, wie etwa Dreiecke oder Rechtecke zerlegt [64]. Abb. 4.11 zeigt hierzu den Unterschied zwischen exakter und tessellierter Geometrie.

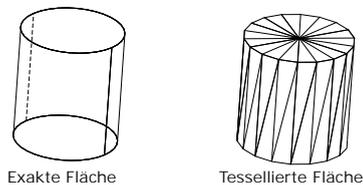


Abb. 4.11: Unterschied zwischen exakter und tessellierter Geometrie

Die Reduktion exakter Flächen auf mathematisch einfachere Geometrieelemente, wie z. B. Dreiecke, ermöglicht eine erhebliche Beschleunigung der Berechnungszeit bei minimaler Datengröße.

⁵Finite Elemente Methode (FEM)

⁶Non Uniform Rational B-Spline (NURBS)

Daher hat sich diese Form in der Darstellung von Baugruppen mit hohem Teileumfang wie etwa dem Fahrzeug-DMU zur Visualisierung durchgesetzt. Um die Performanz bei großen Teileumfängen weiter zu steigern, wird die Tessellation oft dynamisch vorgenommen, was als Level of Detail (LOD) bezeichnet wird. Für das LOD sind verschiedene Verfahren bekannt, die entweder in Abhängigkeit der Entfernung zum Betrachter oder in Form der Größe des Teils eine entsprechende Tessellation vornehmen. Dadurch kann der Berechnungsaufwand etwa für Bauteile die nicht im Sichtfeld, bzw. in fernem Abstand auftreten erheblich reduziert werden.

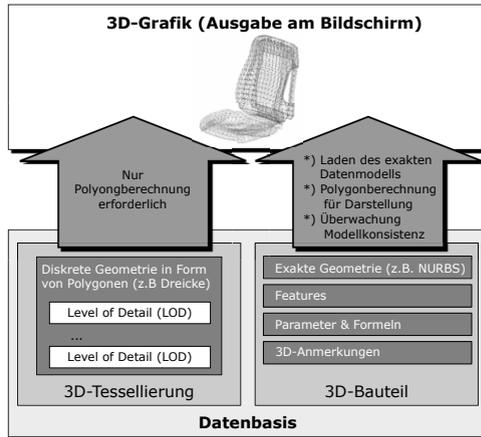


Abb. 4.12: Visualisierungsprozess von CAD-Daten

4.1.4 CAD-Datentypen

Moderne 3D-CAD-Programme bieten eine Fülle an Funktionen zur virtuellen Unterstützung von Konstruktionsaufgaben. Um Konstruktionsdaten auf Dateiebene differenzieren zu können sind die folgenden CAD-Datentypen definiert.

- 3D-Bauteile (Exakte Geometrie)
- 3D-Geometrie (Nur Darstellung)
- 3D-Zusammenbau
- 2D-Zeichnung

3D-Bauteile dienen primär der dreidimensionalen Repräsentation eines physisch oder virtuell existenten Bauteils. Daher beinhaltet das 3D-Bauteil alle Informationen, die das Bauteil geometrisch vollständig definieren. Das 3D-Bauteil wird typischerweise durch eine exakte 3D-Repräsentation dargestellt⁷, da auf Basis der Teilegeometrie die Ableitung erforderlicher Fertigungsschritte und Werkzeuge erfolgt.

Ein Zusammenbau dient der Organisation mehrere Bauteile oder Zusammenbauten in einem logisch strukturierten Verbund, der sich typischerweise an der fertigungsorientierten Strukturierungslogik orientiert. Zusammenbauten entsprechen aus Datensicht folglich Container, welche

⁷Im Falle systemfremder Dateien können auch tessellierte Repräsentationen auftreten.

die Verweise zu verbauten Bauteilen beinhalten. Durch diese Verknüpfungslogik ist es möglich, dass alle Änderungen, die an Bauteilen vorgenommen werden, sich auf alle verbauten Exemplare auswirken (s. Abb. 4.13). Damit entspricht eine solche Struktur einem gerichteten Graphen, oder auch Digraph genannt [69].

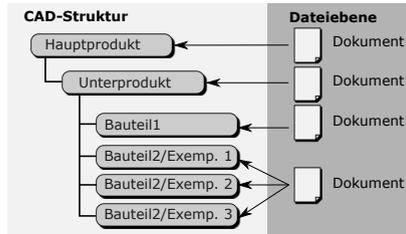


Abb. 4.13: Aufbau eines Zusammenbaus aus Datensicht

Innerhalb einer Struktur sind Bauteile stets eindeutig über Teilenummern zu identifizieren. Diese Bedingung resultiert aus der Forderung des fertigungsorientierten Strukturierungsverständnisses, dass die Produktstruktur einen baubaren Zustand eines Produktes wiedergibt. Die geometrische Repräsentation resultiert aus den aggregierten Repräsentationen der untergeordneten Bauteile und Zusammenbauten. Der Zusammenbau verfügt daher typischerweise über keine eigenständige geometrische Repräsentanz⁸.

3D-Geometrie umfasst die Gruppe an 3D-Datensätzen, die lediglich tessellierte Informationen beherbergen. Diese sind für vielfältige Zwecke im Fahrzeug erforderlich:

- Performante Darstellung hoher Teileumfänge im DMU
- Repräsentation von Geometrie aus artfremden Systemen (z. B. Radhüllen aus der MKS⁹)
- Visualisierung von 3D-Scan-Daten

In der Nutzung von 3D-Geometrie in Zusammenbauten ist stets die zugrundeliegende Generierungsmethode zu berücksichtigen. So werden Radhüllen üblicherweise auf Basis von MKS-Modellen erzeugt, weshalb diese bereits räumlich korrekt positioniert und orientiert sind d. h. es ist im Zusammenbau keine weitere Positionierung erforderlich. Bei Änderungen am Fahrwerk bzw. an der Radgeometrie muss die Hülle erneut generiert und rückversorgt werden. Einige Grafikformate, wie etwa JT (s. Kap. 4.5.2), ermöglichen zusätzlich zur Speicherung der grafischen Repräsentanz die Integration von Meta-Informationen wie etwa Dichte, Volumen oder Masse. Damit können auch auf Basis grafischer Datensätze Produkteigenschaften, wie beispielsweise das aktuelle Gewicht, berechnet werden. Im Zusammenhang mit vereinfachten und exakten Daten hat sich bei den kommerziellen 3D-CAD-Systemen, wie sie im Automobilbau Anwendung finden, daher eine sequentielle Arbeitsweise etabliert: Für einen Zusammenbau hat der Anwender bzw. die Anwenderin die Möglichkeit, entweder eine exakte Darstellung zu laden, oder eine vereinfachte Repräsentanz in Form tessellierter Geometrie.

⁸Manche kommerzielle CAD-Systeme wie etwa Siemens NX [100] ermöglichen grundsätzlich die Ablage von Geometrie auf Zusammenbauebene. Dies ist jedoch dem Umstand geschuldet, dass NX auf Dateiebene nicht zwischen Zusammenbau und Bauteil unterscheidet.

⁹Mehrkörpersimulation (MKS)

Die 2D-Zeichnung steht für eine Dokumentklasse mit ausschließlich zweidimensionalem Inhalt und beinhaltet üblicherweise Schnitte sowie projizierte Ansichten oder Schnitte von 3D-Bauteilen. Trotz des starken Trends in Richtung 3D-Konstruktion über alle Phasen der Produktentwicklung ist die 2D-Zeichnung nach wie vor ein wichtiges Element in der Kommunikation zur Fertigung, sowie als Vereinbarungsdokument zwischen OEM und Zulieferer. In der Automobilindustrie sind aktuell starke Bestrebungen zu beobachten, 2D-Zeichnungen nach Möglichkeit zu reduzieren und fertigungsrelevante Informationen direkt in das 3D-Bauteil zu integrieren. Dadurch sollen sowohl der Datenwartungsaufwand reduziert werden, als auch mögliche Redundanzen in der Informationsabbildung vermieden werden.

4.1.5 Wissensbasiertes CAD und Automation

Moderne CAD-Programme, wie sie im Automobilbau genutzt werden, erweitern die Fähigkeiten des traditionellen parametrisch-assoziativen Konstruierens um die Implementierung von Regeln, Formeln und Algorithmen (vgl. [43]). Dadurch lässt sich in CAD-Datensätze Wissen in Form formal mathematischer Abhängigkeiten implementieren. Neben rein geometrischen, geometriefinen und fertigungsrelevanten Daten beinhaltet der CAD-Datensatz somit auch die Regeln zur Erstellung und Kontrolle der Geometrie [113].

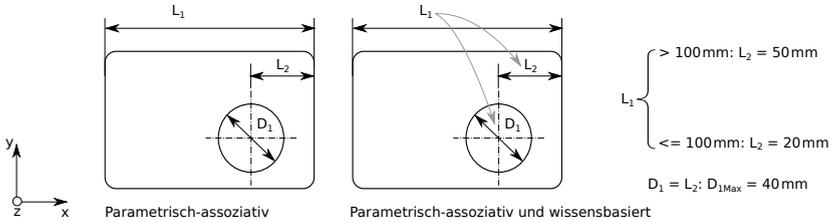


Abb. 4.14: Exemplarische Beziehungen eines Bauteils in wissensbasierten CAD-Systemen

Während im konventionellen parametrisch-assoziativen Modell die gezeigten Abmessungen über die zugeordneten Parameter (L_1, L_2, D_1) gesteuert werden können, ist das wissensbasierte Pendant um zusätzliche Formalismen erweitert, die im vorliegenden Fall die Werte von L_2 in Abhängigkeit von L_1 steuern. Einen Überblick über typische Funktionalitäten im wissensbasierten CAD gibt Abb. 4.15 [43].

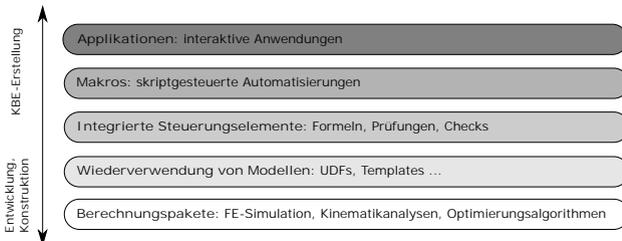


Abb. 4.15: Funktionen innerhalb von wissensbasiertem CAD [43]

Neben den „klassischen“ Geometriefunktionalitäten ermöglichen moderne wissensbasierte CAD-Systeme die Implementierung von Berechnungsumgebungen, um Konstruktionen bereits in der Konzeptionsphase grundlegend prüfen zu können, sowie die Möglichkeit, Konstruktionsschritte in Form von Vorlagen abzulegen, um diese bei Bedarf in anderen Konstruktionen wiederverwenden zu können [43]. Des Weiteren lassen sich Trends von wissensbasierten CAD-Systemen zur vollständigen Eingliederung aller erforderlichen virtuellen Auslegungsinstrumente beobachten. Die dadurch entstehenden Entwicklungsplattformen bieten damit eine durchgängige Werkzeugpalette für die virtuelle Produktentwicklung aus einem Guss (vgl. [43]).

Eine weitere wesentliche Eigenschaft wissensbasierter CAD-Systeme ist deren Fähigkeit zur Automation. Hierfür stellt das sog. Automation Program Interface, kurz API, Funktionen und Methoden des CAD-Programmpaketes zur Nutzung in Programmiersprachen bereit. Damit lassen sich Konstruktionsschritte und wiederkehrende Abfolgen im CAD-System in Form von Skripten automatisieren, sowie die originäre CAD-Software um neue oder benutzerspezifische Softwarefunktionen in Form von eigenständigen Applikationen erweitern (s. Kap. 4.6). Hierbei lassen sich auch grafische Bedienoberflächen implementieren, die eine benutzerfreundliche Anwendung gestatten. Die Automation bringt damit wesentliche Vorteile für den Konstruktionsprozess. So lässt sich beispielsweise durch die automationsgestützte Nutzung von Konstruktionsschritten einerseits die erforderliche Modellierungszeit verkürzen, andererseits kann damit die Einhaltung von Modellierungsstandards sichergestellt werden. Dies bildet die Grundlage für die Sicherstellung der Weiterverarbeitung erstellter Daten im Entwicklungsprozess (vgl. [43]).

4.2 Das DMU (Digital Mock Up)

Das Akronym DMU steht für Digital Mock-Up und bedeutet übersetzt digitale Attrappe. Das DMU bildet damit das virtuelle Gegenstück zum physical Mock-Up (PMU), dem physischen Prototypen. Physische Prototypen werden heute genutzt, um die Baubarkeit sowie technischen Eigenschaften des Fahrzeugs abzusichern. Aufgrund der hohen Kosten physischer Prototypen ist jedoch ein starker Trend in Richtung deren Reduktion zu beobachten und diese erst sehr spät nach Bedarf einzusetzen. Daher wird heute das Ziel verfolgt, möglichst viele Themen am DMU darzustellen und zu bewerten [33]. In der Literatur finden sich zur Definition eines DMU unterschiedliche Beschreibungen. So wird in der DIN 199 [24] ein DMU als ein mit Hilfe eines CAD-Systems erzeugter virtueller Zusammenbau von Baugruppen verstanden, mit der Zielsetzung diesen zu Funktions- und Einbauuntersuchungen zu nutzen. Eigner [33] ergänzt diese Definition um die Konfigurierbarkeit der Produktstruktur. Alternative Definitionen interpretieren den DMU mehr als Methode als virtuelles Modell, wie etwa [80] oder [101]. Für alle weiterführenden Betrachtungen soll die Definition nach Eigner verwendet werden. Demnach besteht das DMU aus Datensicht aus einem Körpermodell zur geometrischen Darstellung der involvierten Bauteile, der zugehörigen Produktstruktur und Produktkonfiguration. Auf Ebene des Gesamtfahrzeugs umfasst das DMU heute die vollständige geometrische Beschreibung des Fahrzeugs (s. Abb. 4.16).

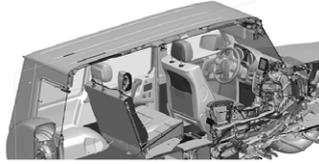


Abb. 4.16: Y0-Schnitt durch das DMU eines Mercedes G in Anlehnung an [74]

Als Datengrundlage nutzt das DMU vereinfachte geometrische Repräsentanzen, die auf Basis der exakten CAD-Geometrie mittels Tessellierungsverfahren berechnet werden (vgl. [64]). Das DMU entspricht daher aus Datensicht einem klassischen CAD-Zusammenbau mit grafischen 3D-Darstellungen anstatt der regulären exakten Darstellungen. Die Reduktion der exakten Geometrie auf tessellierte grafische Repräsentanzen ist dem hohen Teileumfang im Automobilbau, bzw. in anderen Industriesparten mit hoher Teileanzahl im Gesamtprodukt, geschuldet, um diese auf Rechnern performant darstellen zu können. Des Weiteren ist auf DMU-Ebene eine Modifikation von Bauteilen typischerweise nicht erforderlich, weshalb diese Darstellungsform auf Gesamtfahrzeugebene ausreichend ist. Eine Vereinfachung der Geometrie selbst hinsichtlich Details und Topologie ist aufgrund der heute verfügbaren Grafikkartenleistung nicht mehr erforderlich. Diese wird nur in speziellen Fällen vorgenommen.

Im DMU, wie er im modernen Automobilbau genutzt wird, treten zwei verschiedene Typen von Geometrie auf – statische und dynamische. Statische Komponenten sind jene, die im Fahrbetrieb keine signifikanten Bewegungen vollführen, wie etwa Rohbauteile, Interieurelemente oder Dämmungskomponenten und daher statisch im Raum positioniert werden. Dynamische Komponenten sind jene, die im Fahrbetrieb Bewegungen vollführen und daher eine rein statische Betrachtung für die geometrische Absicherung nicht zulässig ist, wie etwa Fahrwerksteile, Motoraufhängung oder der Schaltpilz (s. Abb. 4.17).

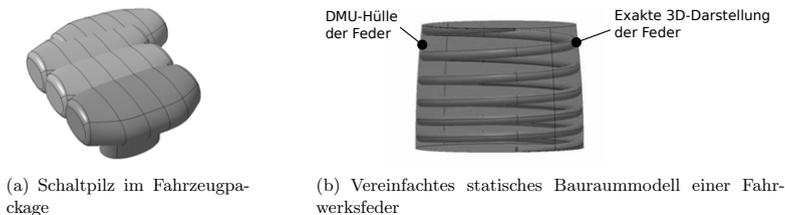


Abb. 4.17: Exemplarische DMU-Repräsentationen

Des Weiteren beinhalten dynamische Komponenten Bewegungshüllen der Sitzanlage und aller Klappmechanismen im Fahrzeug, wie etwa Sonnenblende, Hutablage oder das Handschuhfach. Mit diesen Daten lassen sich geometrische Untersuchungen im DMU durchführen. Diese umfassen typischerweise die Einhaltung erforderlicher Freigänge, mögliche Kollisionen im Fahrbetrieb, der Montage oder aufgrund ungeeigneter Abmessungen oder Positionierung von Komponenten, und die Bewertung der Erreichbarkeit von Bedien- und Kontrollelementen am Fahrerplatz sowie der Passagiere.

Die Positionierung von Bauteilen erfolgt im DMU über die Nutzung von Transformationsmatrizen statt der üblicherweise in parametrisch-assoziativen CAD-Systemen verwendeten Baugruppenassoziationen. Die Transformationsmatrix beinhaltet die relative Verschiebung (x, y, z) und Orientierung $(\vec{e}_i \vec{e}_j')$ zum Elternprodukt (vgl. [33] und [64]).

$$\begin{pmatrix} \vec{e}_x \vec{e}_x' & \vec{e}_x \vec{e}_y' & \vec{e}_x \vec{e}_z' & 0 \\ \vec{e}_y \vec{e}_x' & \vec{e}_y \vec{e}_y' & \vec{e}_y \vec{e}_z' & 0 \\ \vec{e}_z \vec{e}_x' & \vec{e}_z \vec{e}_y' & \vec{e}_z \vec{e}_z' & 0 \\ x & y & z & 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Dieses Vorgehen hat zwei Gründe: Erstens wäre aufgrund des hohen Teileumfangs eine enorm hohe Anzahl an Bedingungen erforderlich, die mit einem hohen Berechnungsaufwand verbunden ist. Zudem werden große Zusammenbauten bei hoher Anzahl an Bedingungen rasch instabil. Drittens sind Assoziationen nur auf exakte Konstruktionsgeometrie anwendbar, wodurch die Verwendung auf DMU-Ebene, bedingt durch die Nutzung tessellierter Repräsentanzen, nicht möglich ist. Viertens ergeben sich durch die Nutzung von Assoziationen Schwierigkeiten im Zusammenspiel mit Datenmanagementsystemen. Abb. 4.18 veranschaulicht das grundsätzliche Positionierungskonzept im DMU. Jede Komponente ist durch ihre jeweilige Transformationsmatrix an ihre Elternkomponente gebunden. Um die absolute Orientierung zu erhalten, werden die Matrizen entlang des Strukturpfades multipliziert. Die Absolutverschiebungen ergeben sich durch Summierung der transformierten Positionen, d. h. dass die Position im nachfolgenden System in das Elternsystem transformiert werden muss, da die Verschiebung eine andere Orientierung aufweist.

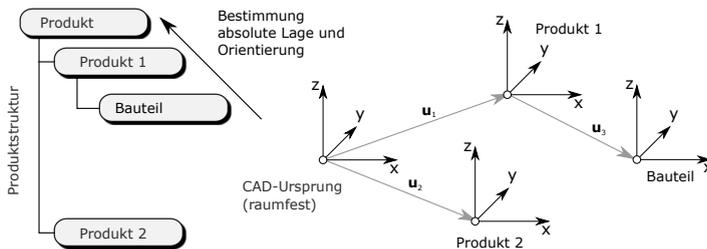


Abb. 4.18: Positionierung von Bauteilen/Baugruppen im DMU

Ist die absolute Lage eines Bauteils im Raum gesucht, muss diese bei Verwendung der relativen Transformationsmatrizen über den gesamten Elternpfad berechnet werden. Als Beispiel sei ein Bauteil betrachtet, das um 100 mm in Richtung der x-Koordinate verschoben wird, sowie mit einer positiven Drehung um die z-Achse um den Winkel R_z behaftet ist. Die Transformationsmatrix ergibt sich daher zu:

$$\begin{pmatrix} \cos(R_z) & -\sin(R_z) & 0 & 0 \\ \sin(R_z) & \cos(R_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 100 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Ist das Bauteil in einem Zusammenbau verortet, der seinerseits um 50 mm verschoben ist, ergibt sich die Gesamttransformationsmatrix für das Bauteil zu:

$$\begin{pmatrix} \cos(R_z) & -\sin(R_z) & 0 & 0 \\ \sin(R_z) & \cos(R_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 100 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 50 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \cos(R_z) & -\sin(R_z) & 0 & 0 \\ \sin(R_z) & \cos(R_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 150 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Die Drehung bleibt damit erhalten und es ergibt sich eine Gesamtverschiebung von 150 mm. Im Falle der Nutzung von Hüllgeometrien im DMU ist zu berücksichtigen, dass diese bereits räumlich korrekt positioniert sein können, wie etwa im Falle von Radhüllen auf Basis von MKS-Modellen. Diese können damit nicht ohne weiteres in verschobenen Produktknoten abgelegt werden; entweder müssen die Schiebung und Verdrehung mit einer entsprechenden Transformationsmatrix kompensiert werden, oder die Hüllen müssen in einem separaten unverschobenen Knoten abgelegt werden. Ansonsten ist die Hülle überbestimmt positioniert und daher falsch im Fahrzeug angeordnet.

Eine Alternative zur Angabe von Transformationsmatrizen stellen die sogenannten Eulerwinkel dar, aus denen sich wieder eine Transformationsmatrix berechnen lässt. Da die Drehung im Raum über Winkel keine eindeutige Zuordnung darstellt, muss stets die Drehreihenfolge bekannt sein. Im Automobilbau hat sich die $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ Konvention etabliert, d. h. es erfolgt zunächst eine Drehung um die absolute x-Achse (R_x), dann um die y-Achse (R_y) und abschließend um die z-Achse (R_z). Die Basis für die Drehung ist die Einheitsmatrix. Die entsprechenden Berechnungsschritte finden sich im Anhang (s. Kap. A.3).

4.3 Das integrierte Produktmodell

Ein virtuelles Produkt ist nach Lossack [70] als ein der Möglichkeit nach existierendes Produkt definiert. Folglich ist ein entsprechendes Modell erforderlich, das dessen Eigenschaften sowie deren zugrundeliegenden technischen Abhängigkeiten untereinander und Funktionen beschreiben kann. Da heute keine durchgängig formale mathematische Beschreibung der Realität sowie der darin eingebetteten Effekte und Phänomene verfügbar ist, werden entsprechende Produktmerkmale und Funktionen über geeignete Teilmodelle dargestellt. Diese werden in der Literatur auch als *Partialmodell* bezeichnet (s. [70] und [6]). Partialmodelle stellen stets exakt abgegrenzte und definierte Teilmengen der Realität dar und sind daher mit entsprechenden Randbedingungen sowie vorgenommenen Abstraktionen und Vereinfachungen verbunden. So lassen sich etwa geometrische Eigenschaften wie Abmessungen, Maßketten oder Kollisionen, sofern diese statischer bzw. quasistatischer Natur sind, innerhalb eines CAD-Modells untersuchen. Sollen dynamische Aspekte in die Analyse einfließen, wie etwa aufgrund auftretender schwingungsinduzierter Bewegungen im Fahrbetrieb, wird dies in einem konventionellen Geometriemodell schwierig, da diesem typischerweise Algorithmen zur Berechnung von Deformationen fehlen. Um mögliche Verschiebungen zu implementieren ist ein zweites Modell erforderlich – ein Verformungsmodell. Verschiebungen werden heute üblicherweise in der Domäne FEM modelliert. In diesem Modell werden die auftretenden Verformungen ermittelt. Um den Berechnungsaufwand in Grenzen zu halten, erfolgt zumeist eine Reduktion des originären Datensatzes auf relevante Details. Um die Bauraumsituation im CAD-Modell bewerten zu können, erfolgt auf Basis der vorgenommenen

Berechnungen die Erstellung eines gemorphten Netzes, das alle möglichen Verformungen widerspiegelt. Dieses kann in das CAD-Modell in Form triangulierter Geometrie integriert werden. Die benötigten Modelle können daher unterschiedliche Abstraktionsgrade und Vereinfachungen aufweisen, was zu hohen Herausforderungen in deren Verknüpfung im Kontext des Gesamtprodukts führen kann. Um folglich ein virtuelles Gesamtmodell zu erhalten, müssen die unterschiedlichen Partialmodelle miteinander konsistent verknüpft werden können. In diesem Zusammenhang findet sich die Begrifflichkeit des *integrierten Produktmodells*. So definiert etwa Pätzold (1991) das integrierte Produktmodell wie folgt:

„Ein integriertes Produktmodell basiert auf der Abbildung aller relevanten Produktmerkmale, die in den einzelnen Produktlebensphasen entstehen, mittels kohärenter Partialmodelle unter der Beschreibung der zugehörigen anwendungsorientierten Semantik der Produktmerkmale in Form von Produktmodellsichten.“

Um anwendungsabhängige Sachverhalte darzustellen müssen innerhalb eines integrierten Produktmodells sogenannte Produktmodellsichten festgelegt werden. Diese werden nach Lossack [70] wie folgt definiert:

*„Eine **Produktmodellsicht** definiert ein anwendungsorientiertes Informationsmodell unter Einbeziehung aller Produktmerkmale der relevanten Partialmodelle des integrierten Produktmodells. Die Objektmenge E der Produktmodellsichten PS sind konjunkt, d. h. die Durchschnittsmenge zweier Produktmodellsichten darf nicht leer sein.“*

$$E(PS_i) \cap E(PS_j) \neq \{\} \text{ für alle } i = 1 \dots n, j = 1 \dots m \quad (4.4)$$

Der Aufbau eines integrierten Produktmodells ist nach Anderl (1989) und Seiler (1985) an die folgenden vier Prinzipien gekoppelt:

1. Prinzip der Modellkohärenz
2. Prinzip der Datenakkumulation
3. Prinzip der Assoziation
4. Prinzip der Integration

Das *Prinzip der Modellkohärenz* besagt, dass die Fortschreibung des Produktmodellinhalts ohne Modelltransformation erfolgen muss, weil Modelltransformationen grundsätzlich verlustbehaftet sind. Das *Prinzip der Datenakkumulation* fordert die explizite Abbildung aller für ein Produkt relevanten Informationen, die sich nicht aus anderen Informationselementen ableiten lassen und bedingt daher in weiterer Konsequenz die Redundanzfreiheit involvierter Partialmodelle. Das *Prinzip der Assoziation* bezeichnet die Ableitbarkeit von Informationselementen durch Inferenzregeln, die auch Bestandteil des Produktmodells sind. Das *Integrationsprinzip* fordert die Berücksichtigung semantisch plausibler, d. h. tätigkeits- und phasenübergreifender Zusammenhänge der Informationsobjekte in einem Produktmodell [70].

Diese Definition wird von Polly (1996) dahingehend kritisiert, dass das Konzept des integrierten Produktmodells auf Basis der Überlegungen von Seiler (1985) und Pätzold (1991) die unterschiedlichen Abstraktionsebenen der Teilmodelle sowie die Modellierungstechnik nicht berücksichtigen. Polly (1996) erweitert den Gedanken des integrierten Produktmodells um eine über

alle Produktlebensphasen übergreifende und redundanzfreie Datengrundstruktur [70]. Partialmodelle repräsentieren in diesem Ansatz spezialisierte Formen der Grundstruktur. Diese sind hierbei semantisch disjunkt, wodurch ein integriertes Produktmodell als frameworkbasierter¹⁰ Ansatz aufgefasst werden kann [70].

Abb. 4.19 skizziert die Koppelung von Phasenmodellen (M) durch Modelltransformationen (T) sowie die Implementierung von Partialmodellen mittels Modellkohärenz [70]. Die Rückstransformationen (\bar{T}) sind stets mit Informationsverlusten behaftet wodurch eine effektive Nutzung im stets iterativen Konstruktionsprozess erschwert wird. Die führt nach Lossack [70] zu dem Schluss, dass ein integriertes Produktmodell einem phasenorientierten, gekoppelten Produktmodell konzeptionell überlegen ist (Polly, 1996).

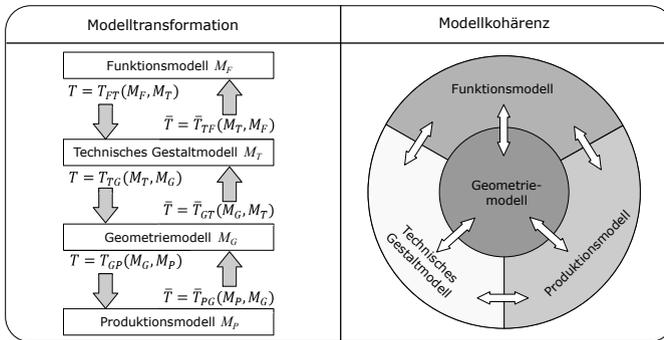


Abb. 4.19: Transformationswege zwischen Partialmodellen des integrierten Produktmodells [70]

Eine mögliche technische Implementierung eines integrierten Produktmodells stellt das Datenmodell STEP dar, das in Kap. 4.5.2.3 erläutert wird.

4.4 Produktdatenmanagement in der Fahrzeugentwicklung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits auf die unterschiedlichen Anforderungen an die Entwicklung im Gesamtfahrzeugkontext eingegangen. Die heute hohe Derivatanzahl und die damit verbundene Variantenvielfalt in der technischen Lösungsfindung führen zu einer ebenso hohen Komplexität in der Datenwelt, die es entsprechend zu beherrschen und zu verwalten gilt. Das Produktdatenmanagement, kurz PDM, ist daher heute eines der zentralen Bausteine einer effizienten virtuellen Produktentwicklung. Eigner definiert PDM wie folgt:

„PDM ist das Management des Produkt- und Prozessmodells mit der Zielsetzung, eindeutige und reproduzierbare Produktkonfigurationen zu erzeugen.“ [33]

Ein wesentlicher Aspekt in der Nutzung von PDM ist folglich die Konfiguration von Produkt bzw. Produktdaten. Eine Produktkonfiguration stellt hierbei einen eindeutigen Datenzustand dar und repräsentiert das Produkt zu einem bestimmten Zeitpunkt und/oder in einem speziellen

¹⁰Ein Framework stellt ein Gerüst dar, welches Komponenten mit definierten Schnittstellen bereitstellt, die Methoden und Funktionen besitzen. Es repräsentiert ein methodisches Konzept aus der objektorientierten Programmierung. Elemente eines Frameworks können wiederverwendet und zu einem Programm zusammengesetzt werden.

Entwicklungskontext (z. B. Fahrzeug zu einem konkreten Entwicklungsmeilenstein). Abb. 4.20 skizziert die grundlegenden Aspekte im Konfigurationsmanagement.

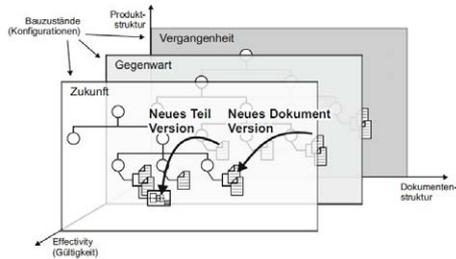


Abb. 4.20: Konfigurationsmanagement im PDM [33]

Theoretisch ist die Nutzbarkeit eines PDM-Systems über den gesamten Produktentwicklungsprozess hinweg gegeben. In der Praxis konzentriert sich der Einsatz von PDM-Systemen vor allem auf die Phase der Serienentwicklung (s. Abb. 4.21). Dies hat vielerlei Gründe, auf die an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen werden soll. Für die frühe Konzeptphase ist das Konzept PDM aufgrund stark dynamischer Produktstrukturumfänge sowie Detailgrade schwer handhabbar und wird nur eingeschränkt, etwa zum Bezug von COPs oder COMs (s. auch Kap. 3.2), genutzt.

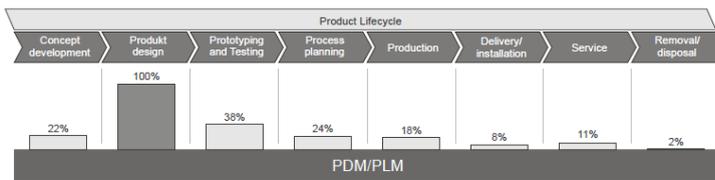


Abb. 4.21: Einsatz PDM im Produktentstehungsprozess [33]

Die typischen Hauptaufgaben eines PDM-Systems im Rahmen der technischen Entwicklung gestalten sich heute wie folgt:

- Bereitstellung und Verwaltung von Geometriedaten und zugehörigen Metadaten
- Verwaltung von erforderlichen Produktkonfigurationen
- Versorgung von Prozessen mit Geometrie und geometriearaffinen Daten

Die Informationsstrukturierung in PDM-Systemen folgt im Automobilbau typischerweise der fertigungsorientierten Strukturlogik und stellt damit die informationstechnologische Grundlage für das DMU dar. Grundsätzlich unterstützen moderne PDM-Systeme auch die Bereitstellung und Verwaltung von Berechnungs- und Simulationsdaten, wovon in der automobilen Entwicklungsrealität im Moment noch wenig Gebrauch gemacht wird. Hierzu finden sich unterschiedliche Gründe: Im Gegensatz zu CAD-Daten, die aus Informationssicht wenig Varianz aufweisen, ergibt sich im Falle von Simulationsdaten ein breites Spektrum an unterschiedlichen Datentypen und Datenformaten. Dies resultiert aus der Vielzahl an erforderlichen Simulationsdomänen und

damit einhergehender Softwareprodukte (s. auch Kap. 4.6). Des Weiteren erfolgt die primäre Strukturierung von Informationen im PDM gemäß der fertigungsorientierten Strukturlogik, wie bereits in Kap. 4.2 beschrieben. Die unterschiedlichen Abstraktionsgrade der jeweiligen Simulationsmodelle sind bezogen auf das Gesamtfahrzeug oft schwer mit den fertigungsorientierten Produktstrukturen der geometrischen Auslegung vereinbar, da diese eine andere „Sicht“ auf das Produkt erfordern. Daher beschränkt sich das Produktdatenmanagement heute zumeist auf die Verwaltung geometrischer Informationen. Damit wird das PDM zur zentralen Verwaltungsstelle für Geometriedaten und geometrienahen Informationen, sowie rückfließender Informationen aus den versorgten Prozessen.



Abb. 4.22: Rolle des PDM in der Fahrzeugentwicklung

Weiteres wesentliches Merkmal von PDM-Systemen ist das Rollen- und Sichtenkonzept [69]. Rollen stellen Klassifikationen von Nutzern dar, die ein definiertes Aufgabenprofil im PDM-System besitzen. So kann etwa eine Rolle „Konstrukteur“ Daten empfangen und Daten betrachten, während etwa die Rolle eines „Berechners“ lediglich (CAD-)Daten lesen aber nicht manipulieren kann. Sichten legen entsprechend festgelegter Konfigurationen fest, welcher Nutzer welche Inhalte wie dargestellt bekommt [69].

4.5 Informationsaustausch entlang der Datenprozesskette

4.5.1 Grundsätzliche Herausforderungen

In der Automobilentwicklung sind zur Modellierung der verschiedenen technischen Aspekte des Fahrzeugs verschiedene Domänen, wie in Kap. 4.3 beschrieben, erforderlich. Da diese Domänen unterschiedliche Datenmodelle als Grundlage nutzen, sind entsprechende Konvertierungen in Hinblick auf Kommunikation und Datenaustausch erforderlich. Abb. 4.23 zeigt hierzu die prinzipiellen Austauschrichtungen innerhalb der virtuellen Entwicklung.

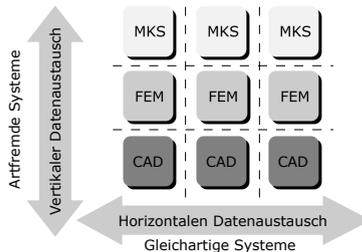


Abb. 4.23: Horizontale und vertikale Datenaustauschrichtung

Hiernach lässt sich zwischen einem Austausch gleichartiger oder artfremder Systeme unterscheiden. Einen Austausch zwischen gleichartigen Systemen stellen etwa Übertragungen zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen dar. So kann es etwa erforderlich sein, Daten eines CAD-Systems A für ein CAD-System B umzuwandeln, da der Zulieferer eine andere Software als der OEM verwendet. Einen Austausch zwischen artfremden Systemen stellt etwa die Vernetzung eines CAD-Teils dar. Hier wird die exakte geometrische Darstellung des CAD-Teils entsprechend der Erfordernisse der Berechnung in polygonale Geometrie überführt.

Umwandlungen sind stets verlustbehaftet (s. Kap. 4.3). Als Beispiel soll die Umwandlung eines CAD-Formats A in das Format B dienen. Ein parametrisch-assoziatives Bauteil verfügt nach Kap. 4.1 über die folgenden Inhalte:

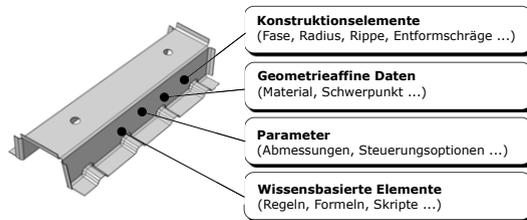


Abb. 4.24: Informationen eines 3D-CAD-Datensatzes

Im Falle des Austausches zwischen gleichartigen Systemen ist der Umfang an austauschbaren Informationen davon abhängig, ob das native Format im Zielsystem unterstützt wird, oder ob entsprechende neutrale Standards für den Austausch genutzt werden müssen [108]. Im Falle der Nutzung von neutralen Standards wird die Menge und Art der transportierten Informationen überdies durch deren Implementierung im System festgelegt (s. Abb. 4.25). Ein vollständiger Datenaustausch über neutrale Standards auf Basis proprietärer Formate ist damit nicht möglich [108].

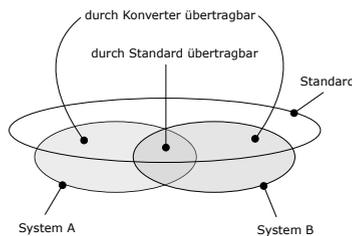


Abb. 4.25: Reduktion der übertragbaren Informationen bei autorensystemunabhängigen Standardformaten [108]

Heute werden mittels standardisierter neutraler Datenformate vornehmlich repräsentierende Informationen in Form der geometrischen Gestalt und visueller Attribute, wie etwa Farbgebung sowie Produktionsinformationen ausgetauscht. Eine Überführung der Konstruktionshistorie sowie komplexer wissensbasierter Funktionalitäten, wie etwa Formeln oder Regeln, ist heute nach wie vor nicht möglich. Die mit der Nutzung von neutralen Standards einhergehende Reduktion an Information ist jedoch nicht ausschließlich negativ behaftet. So lässt sich nach [108] durch die

Nutzung von neutralen Austauschformaten sehr einfach das firmenspezifische Knowhow schützen, da die dem Bauteil hinterlegte „Intelligenz“ und das Wissen nicht Inhalt des Konvertats sind.

Im Falle artfremder Umwandlungen gestaltet sich die Transformation als schwieriger, da mit dieser auch eine Abstraktion vorgenommen wird. Als Beispiel soll die Vernetzung eines Bauteils dienen:

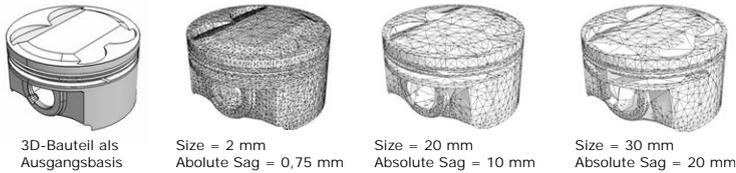


Abb. 4.26: Unterschiedliche Aspekte in der Vernetzung eines Bauteils

Das gedachte Bauteil sei ein Kolben eines Verbrennungskraftmotors. Damit die Geometrie in einem FE-Programm genutzt werden kann, muss diese in ein Netz überführt werden. Dieses Netz besteht aus diskreten Elementen wie etwa Tetraeder oder Oktaeder. Je nachdem welcher Elementtyp und welche Diskretisierung gewählt wird, resultiert ein unterschiedliches Netz. Der damit einhergehende Informationsverlust ist in Abb. 4.26 dargestellt. Deutlich zu sehen ist der steigende Detailverlust mit zunehmender Elementgröße. Die Herausforderung hierbei ist eine Netzgenauigkeit zu finden, die einen optimalen Kompromiss aus erforderlicher Berechnungszeit und akzeptabler Abstraktion darstellt.

Eine weitere Herausforderung in der vertikalen Datenaustauschrichtung ist die Rücktransformation in das Quellsystem. Berechnungsergebnisse in Form eines deformierten Netzes lassen sich zwar grundsätzlich in CAD-Systeme rückführen, jedoch können diese Netze nicht direkt vom Konstrukteur oder der Konstrukteurin weiterverarbeitet werden.

4.5.2 Neutrale Datenformate

Im Datenaustausch zwischen CAx-Systemen haben sich in der Automobilindustrie spezielle Datenformate etabliert. Im Folgenden sollen jene Datenformate eine genauere Betrachtung erfahren, die im Kontext der Gesamtfahrzeugentwicklung und der Fahrzeugarchitektur genutzt werden. Dazu sollen deren jeweilige Eigenschaften und Inhalte beleuchtet werden. Auf Ebene der Gesamtfahrzeugentwicklung sind vor allem Datenformate relevant, die Geometrie- und Strukturinformationen sowie entsprechende Metainformationen abbilden und aufnehmen können. Es sollen die folgenden Formate betrachtet werden:

- JT
- IGES
- STL
- STEP
- VRML

4.5.2.1 JT (Jupiter Tessellation)

JT steht für die Abkürzung Jupiter Tessellation und beschreibt ein Format, das ursprünglich durch das Unternehmen Unigraphics entwickelt wurde. JT ist ein standardisiertes Format und in der ISO 14306 [60] spezifiziert und wird durch die gemeinnützige Gruppe JTOpen weiterentwickelt [108]. Das JT-Format kann sowohl exakte Geometrie als auch tessellierte Visualisierung in unterschiedlichen LODs (s. Kap. 4.1.3) beinhalten. Neben der geometrischen Information lassen sich auch Produktions- und Fertigungsinformationen in Form von 3D-Anmerkungen hinterlegen. Durch die geringe Datengröße hat es sich in der Zwischenzeit bei einer Vielzahl an OEMs etabliert. JT wird heute praktisch durch alle kommerziellen CAD-Programme nativ oder über entsprechende Konverter unterstützt. Des Weiteren sind für JT kostenfreie Viewer¹¹ verfügbar. Dadurch können die Informationen auch ohne Verfügbarkeit eines CAD-Programmes betrachtet werden.

4.5.2.2 IGES (Initial Graphics Specification)

Das Format IGES (Initial Graphics Specification) dient dem Austausch exakter Geometrieinformationen und wurde durch die U. S. Product Data Association entwickelt. Ursprünglich konnte mittels IGES lediglich Draht- und Flächeninformation ausgetauscht werden; in der aktuellen Version sind Bézier-Kurven, NURBS-Flächen¹² sowie die Darstellung von Festkörpern implementiert, wodurch sich das Format zum Austausch von CAD-Daten eignet [108]. IGES kann keine tessellierte Geometrie speichern, womit das Format für Visualisierungen nicht geeignet ist. Die Geometrieinformationen werden in sogenannten Listen gespeichert. Im Automobilbau wird IGES hauptsächlich im Karosseriebau zum Austausch von Flächendaten verwendet. Der vormals durch den Verband der Automobilindustrie (VDA) definierte Standard VDA-FS ging im Zuge der technischen Weiterentwicklung von IGES in diesem auf [108].

4.5.2.3 STEP (Standard for the Exchange of Product Data)

STEP (Standard for the Exchange of Product Data) ist ein in der ISO 10303 standardisiertes Datenformat und stellt ein Framework für ein integriertes Produktmodell dar (s. auch Kap. 4.3). Mit STEP wird nach [2] das Ziel verfolgt, eine eindeutige, durch Rechner interpretierbare Darstellung aller Daten des Produktlebenszyklus eines Produkts zu ermöglichen. Für STEP existieren industriespezifische Arbeitsprotokolle (AP), welche die Definitionen der Datenmodelle für die jeweiligen erforderlichen Partialmodelle beinhaltet [42]. In der Automobilindustrie existieren die AP214 bzw. die aktuelle AP242 [102], welche sich aus der für die Luftfahrt gültige AP203 der genannten AP214 zusammensetzt. Ein Auszug des Informationsumfangs von STEP wird in Abb. 4.27 dargestellt.

¹¹Viewer sind Betrachtungsprogramme, die singular (stand-alone) oder etwa in Kombination mit einem PDM-System zur Betrachtung von 3D-Geometrie sowie darin enthaltener Informationen genutzt werden können.

¹²NURBS = Non-uniform rational b-spline: Mathematische Beschreibungsmöglichkeit für Freiformflächen [50].

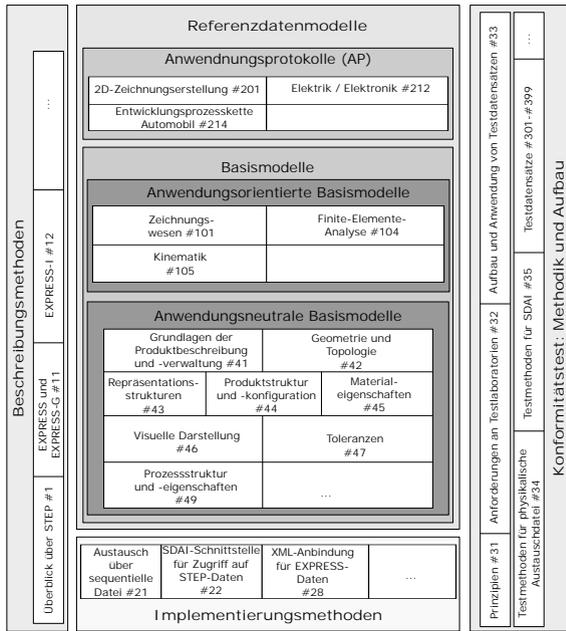


Abb. 4.27: Bestandteile von STEP mit ihren zugehörigen Nummern der ISO 10303 [29]

Ziel ist die konsistente Ablage aller relevanten Produktinformationen, wie etwa geometrischer Repräsentanz, 3D-Fertigungsinformationen, kinematischer Beschreibung etc. Die Nutzung von STEP im automobilen Entwicklungsprozess ist Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten [61], [29].

4.5.2.4 STL (Surface Tessellation Language)

Das Akronym STL steht für Standard Tessellation Language. Es stammt aus dem Bereich des Rapid Prototyping und wurde 1987 durch das Unternehmen 3D Systems entwickelt. STL beinhaltet lediglich tessellierte Information in Form von Dreiecksflächen [108]. Abb. 4.28 zeigt hierzu exemplarisch einen Würfel und dessen geometrischen Bestandteile eines STL-Datensatzes.

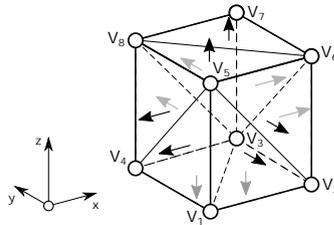


Abb. 4.28: Beschreibung eines Würfels in STL

Die Quaderflächen werden hierbei in jeweils zwei Dreiecke aufgespaltet. Die STL-Datei beinhaltet die Koordinaten der Dreieckseckpunkte sowie den zugehörigen Normalvektor eines Dreiecks, wodurch STL in der Lage ist Körper darzustellen. Das Einsatzgebiet von STL liegt entwicklungsbedingt in der Bedienung von Fertigungsmaschinen, aber auch Simulationsprogramme verfügen vielfach über eine STL-Implementierung.

4.5.2.5 VRML (Virtual Reality Modelling Language)

VRML steht für Virtual Reality Modelling Language und ist ein knotenbasiertes Datenformat zur Darstellung von 3D-Szenen [127], [108]; die aktuelle Fassung VRML97 ist in der ISO 14772-1:1997 spezifiziert. Ein VRML-File definiert eine 3D-Szene, die sich aus Geometrie, Umgebung sowie Beleuchtung und Texturen zusammensetzen kann und darüber hinaus die Nutzung unterschiedlicher LODs ermöglicht. Ferner unterstützt VRML die Kollisionsdetektion, um etwa nicht durch Wände zu gehen. In Hinblick auf die Geometrie kann VRML polygonale Elemente darstellen sowie exakte Geometrie auf Basis von CSG¹³ [108]. Typische im CAD gebräuchliche Beschreibungsformen wie etwa NURBS oder Bézier-Kurven [44] können nicht dargestellt werden. Eine Fläche lässt sich etwa durch ein sog. *geometry IndexedFaceSet* darstellen. Dieses beinhaltet die Festlegung der Koordinaten der Eckpunkte (Vertices) sowie die Durchgangsreihenfolge für das Zeichnen der Fläche im Feld *coordindex* (s. Abb. 4.29).

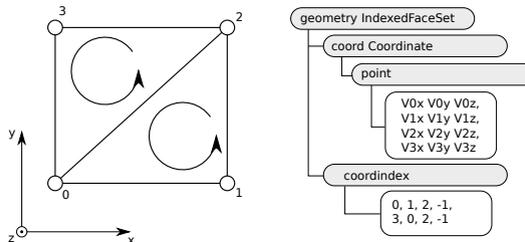


Abb. 4.29: Beschreibung eines Rechtecks in VRML

Das VRML-Format ist dimensionslos, d. h. es sind beim Import von VRML-Daten in eine CAD-Umgebung stets eine entsprechende Einheit sowie Maßstab bzw. Skalierungsfaktor anzugeben. Die Weiterentwicklung von VRML stellt das Format X3D dar. Im Austausch von CAD-Daten spielt VRML praktisch keine Rolle aufgrund der fehlenden exakten Geometriebeschreibung sowie der numerischen Ungenauigkeit in der Formbeschreibung [44]. VRML wird heute in der Echtzeitanimation sowie der Darstellung virtueller Realitäten verwendet [108].

¹³Constructive Solid Geometry (CSG). Ein Modellierungsverfahren, das Geometrie über die sequentielle Nutzung bool'scher Operationen erzeugt [50].

4.6 CAD-basierte Expertensysteme in der virtuellen Fahrzeugentwicklung

4.6.1 Definition und Einsatz von Expertensystemen

Ein Expertenwerkzeug lässt sich nach Kurbel [68] wie folgt definieren:

„Ein Expertensystem ist ein Programm, das in einem eng abgegrenzten Anwendungsbereich die spezifischen Problemlösungsfähigkeiten eines menschlichen Experten annähernd erreicht oder übertrifft.“

Ein Expertensystem ist somit stets an eine konkrete Aufgabenstellung gekoppelt, sowie an einen definierten Nutzerkreis gerichtet. Ein Expertensystem kann grundsätzlich in jeder virtuellen Domäne realisiert werden, welche Funktionen zur wissensbasierten Entwicklung bereitstellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll die Betrachtung auf CAD-basierte Expertensysteme fokussiert werden, da in diesem Fall der interne Aufbau und die Strukturierungslogik für die konsistente Integration in ein übergeordnetes integriertes Konzeptmodell von zentraler Bedeutung ist.

Im Falle von CAD-basierten Expertensystemen ist deren Fundament stets ein wissensbasiertes CAD-Modell. Wie bereits in Kap. 4.1.5 beschrieben, lassen sich in wissensbasierten CAD-Systemen parametrisch-assoziative Modelle um Formeln, Regeln und Kontrollalgorithmen erweitern. In Kombination mit deren Fähigkeit zur Automation bieten diese ideale Voraussetzungen für die Schaffung von Expertensystem zur Lösung konstruktiver Aufgabenstellungen. Nach Kurbel [68] lassen sich die folgenden allgemeinen Merkmale von Problemstellungen identifizieren, die Expertensystemen zugrundeliegenden:

- Komplexe, schlecht strukturierte Probleme
- „Intelligentes“ Verhalten erforderlich
- Viele unterschiedliche Wissenseinheiten
- Interpretation auf unterschiedliche Weise
- Keine Patentrezepte

Strukturiertheit bezieht sich auf die Darstellbarkeit eines Problems, sprich ob es sich durch nachvollziehbare Strukturen und Muster lösen lässt. Unstrukturierte Probleme, wie sie etwa im Gesamtfahrzeugkontext auftreten, äußern sich folglich dadurch, dass sich für deren Bearbeitung keine eindeutigen Lösungswege identifizieren lassen. Sviokla [103] beschreibt nach [68] den Anspruch an ein Expertensystem daher wie folgt: Wenn die Repräsentation durch die Software wenigstens einige schlecht strukturierte Teile des Problems einfängt, dann kann es sich um ein Expertensystem handeln. Ein wichtiger Aspekt eines Expertensystems ist damit dessen Fähigkeit das jeweilige Problem möglichst gut zu approximieren [68].

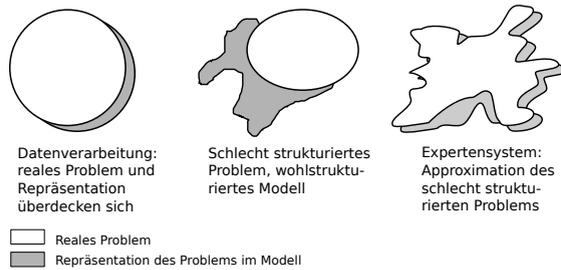


Abb. 4.30: Strukturiertheit von Problemen in Anlehnung an [103]

Die Treiber in der Schaffung von Expertenwerkzeugen sind in der Automobilentwicklung unterschiedlicher Natur. Grundsätzlich wird bereits durch die Nutzung von wissensbasierten CAD-Systemen die Möglichkeit geschaffen, das entsprechende Auslegungswissen in Form mathematischer, geometrischer und textueller Information im CAD-Modell abzulegen [43]. Durch die große Anzahl an Funktionalitäten, die moderne wissensbasierte CAD-Systeme bereitstellen, können diese Anwendungen jedoch rasch einen hohen Komplexitätsgrad erreichen. Damit stellt die benutzergerechte Aufbereitung und Bereitstellung der im CAD-Modell hinterlegten Informationen einen zentralen Schlüssel in der effizienten Nutzung wissensbasierter CAD-Systeme dar [43]. Zwar bieten praktisch alle kommerziell verfügbaren CAD-Systeme bereits implementierte Werkzeuge zur modellweiten Betrachtung von Relationen und deren Auswirkungen im CAD-Modell. Diese verlangen jedoch ein hohes Maß an Erfahrung in der Nutzung. Expertensysteme schaffen daher eine Möglichkeit, bestehende Methoden und bestehendes Wissen miteinander zu verknüpfen und dem jeweiligen Anwender effizient bereitzustellen, um sie auf diese Weise in der Lösung komplexer Aufgabenstellungen zu unterstützen.

4.6.2 Aufbau von CAD-basierten Expertenwerkzeugen aus Datensicht

Expertenwerkzeuge können hinsichtlich ihrer Daten- und Dokumentenstruktur sowie möglichen Verknüpfungen verschiedene Komplexitätsstufen je nach zugrundeliegender Aufgabenstellung erreichen. Bezogen auf CAD-basierte Expertenwerkzeuge kann dies von singulären Teiledokumenten bis hin zu hochkomplexen Verbänden aus mehreren Bauteilen sowie Zusammenbauten und der Kopplungen mit Simulations- oder Berechnungsmodellen reichen (s. Abb. 4.31). Die Komplexität ist ferner davon abhängig, wie und welche Art von Wissen im jeweiligen CAD-Programm dargestellt werden kann [43] und welche Art von Wissen in den verknüpften Bestandteilen enthalten ist.

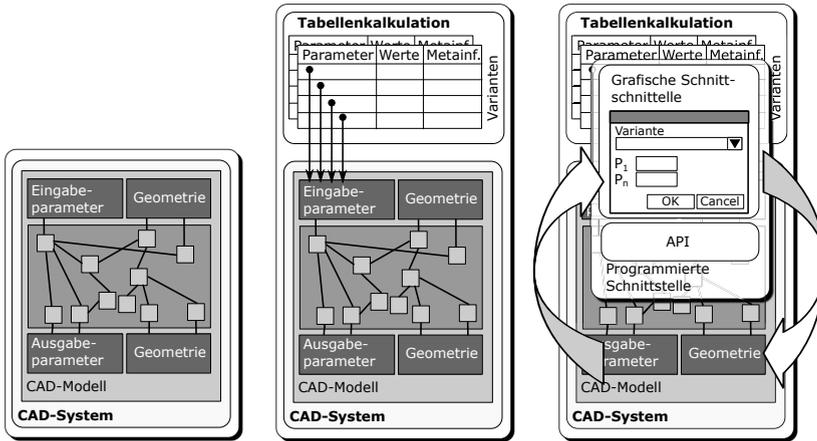


Abb. 4.31: Schematische Topologien von Expertenwerkzeugen

Den Kern CAD-basierter Expertensysteme bilden stets parametrisch-assoziative Modelle, wie sie in Kap. 4 gezeigt werden. Diese können vor dem Hintergrund eines Expertensystems als Gebilde nach dem EVA-Prinzip¹⁴ aufgefasst werden [43]. Abb. 4.32 zeigt hierzu ein abstrahiertes parametrisch-assoziatives System.

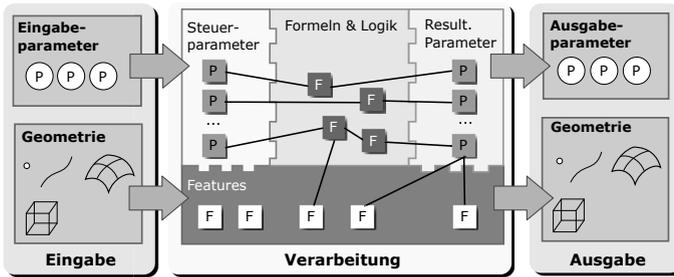


Abb. 4.32: Grundlegende Datenflüsse in der Nutzung parametrisch-assoziativer CAD-Modelle

Als Eingabe können externe Parameter sowie Geometrie genutzt werden. Diese Informationen werden über die im Modell hinterlegte Konstruktionshistorie sowie den implementierten Formelapparat und den Algorithmen entsprechend verarbeitet und generieren eine definierte Ausgabe, die in Form von Parametern bzw. Geometrie bereitgestellt werden kann. Dieses Schema ist sowohl auf Bauteilebene als auch auf Zusammenbauebene gültig.

Da sich die Verwaltung von Eingabeparametern sowie die Implementierung komplexerer Berechnungen in parametrisch-assoziativen Datensätzen als ungeeignet erweist, werden vor dem Hintergrund von Expertensystemen oft Schnittstellen zu entsprechenden Simulations- oder Tabellenkalkulationsprogrammen genutzt. Damit lassen sich Information austauschen und komplexere Berechnungen in prädestinierte Systeme auslagern.

¹⁴Eingabe Verarbeitung Ausgabe (EVA)

Nach den Ausführungen in Kap. 4.6.1 handelt es sich bei CAD-basierten Expertensystemen um keine trivialen Automatismen (Makros), sondern um interaktive Applikationen, die ein wiederkehrendes Eingreifen eines Anwenders verlangen. Daher müssen diese eine entsprechende Schnittstelle zum Anwender aufweisen, die eine geeignete Kommunikation und Steuerung mit dem Expertensystem ermöglicht. Diese kann in folgenden Formen bereitgestellt werden:

- Strukturierte Eingabeparameter und Geometrie im Modell
- Tabellarische Eingabe über ein externes Tabellenkalkulationsprogramm
- Programmierte grafische Schnittstelle

Im ersten Fall können die bereits im jeweiligen CAD-Programmpaket implementierten Strukturierungsfunktionalitäten für parametrische Information genutzt werden. Hierbei kann eine Strukturierung und Klassifikation entsprechender Informationen vorgenommen werden.

Im Falle komplexerer Berechnungen der Eingangsgrößen, die sich im CAD-Programm über die bereitgestellten mathematischen Funktionalitäten nicht oder nur schwer abbilden lassen, ist die Eingabe und Steuerung über Tabellenkalkulationsprogramme effizienter. Zudem ergibt sich der Vorteil, dass verschiedene Varianten und Konfigurationen als separate Blätter abgespeichert werden können und sich dadurch getätigte Analysen einfach reproduzieren lassen. Tabellenblatt bzw. -dokument und CAD-Datensatz sind daher immer einander zugehörig, d. h. eine Analyse erfolgt auf Basis Tabelle xy und CAD-Datensatz xy.

Die effizientesten und flexibelsten Benutzerschnittstellen stellen grafische Schnittstellen dar. Diese ermöglichen die benutzergerechte Aufbereitung komplexer Modellinhalte und die Abbildung von Workflows zur Abarbeitung einer Problemstellung. Darüber hinaus lassen sich bei grafischen Benutzeroberflächen unterschiedliche Detailstufen sowie Sichten umsetzen. Entsprechend der VDI 2249 [116] repräsentieren grafische Benutzerschnittstellen eine Form der Mensch-Maschine-Interaktion und verlangen daher die Berücksichtigung entsprechender Kriterien in der Ausgestaltung. Hierzu finden sich unterschiedliche Richtlinien, wie etwa die VDI 5005 [130] oder die DIN EN ISO 9241-10 [27].

4.6.3 Planung von Expertenwerkzeugen

Je nach zugrundeliegender Aufgabenstellung können CAD-basierte Expertensysteme rasch eine hohe Komplexität erreichen. Hinzu kommt der rasche Fortschritt im Bereich der Informationstechnologie und steigende Rechenkapazitäten. Daher ist in der Entwicklung von Expertensystemen hohe Sorgfalt in der Planung des zugrundeliegenden Datenmodells, möglicher Schnittstellen sowie der Wartbarkeit zu legen. Des Weiteren ist stets vor der Entwicklung eines Expertensystems abzuklären, ob die resultierenden Aufwände den zu erwartenden Nutzen rechtfertigen (vgl. [43]).

In der Entwicklung von Expertensystemen sind grundsätzlich alle Gestaltungsrichtlinien, Vorgaben und Standards einzuhalten, die für den Entwurf von Computerprogrammen definiert sind. Der Software-Entwicklungsprozess wird typischerweise im sog. V-Modell dargestellt, das etwa im V-Modell XT standardisiert ist [124]. Dieses Modell umfasst beispielsweise die Festlegung von Software-Anforderungen [57], die Planung der Software-Architektur [58], die Betrachtung des Software-Lebenszyklus [57], das Nutzungskonzept, die Beleuchtung von Software-Sicherheitsaspekten, sowie die Einbeziehung von Tests zur Absicherung. Andere Formen des

V-Modells werden etwa in der VDI 2206 [112] zur Entwicklung mechatronischer Systeme genutzt. Dazu addieren sich weitere spezifische Aspekte für Expertenwerkzeuge, die in Abb. 4.33 dargestellt.

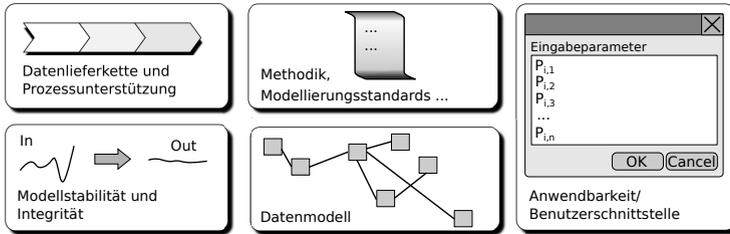


Abb. 4.33: Aspekte in der Planung von Expertenwerkzeugen

Der Aspekt der Datenlieferkette sowie Prozessintegration umfasst die Betrachtung der informationstechnischen und prozessualen Umgebung, in der das Expertensystem angewandt und eingebettet werden soll. Aufgrund der heute starken Vernetzung von Auslegungstätigkeiten ist es zielführend, Ergebnisse die auf Basis von Expertensystemen entstehen, wie etwa CAD-Modelle oder andere Daten, entsprechend in den Folgeprozessen weiterverarbeiten zu können. Daher ist im Vorfeld eine genaue Kenntnis der Datenlieferanten und Datenabnehmer notwendig.

Mit dem Aspekt der Datenlieferkette sowie Prozessintegration ist die Forderung nach Einhaltung von im Unternehmen gültigen Modellierungsstandards bzw. allgemeinen Methodenvorgaben eng verknüpft, da nur so die notwendige Konsistenz zur effizienten Weiterverarbeitbarkeit im Prozess gegeben ist.

Das Datenmodell bildet die informationstechnische Grundlage eines wissensbasierten CAD-Werkzeugs. Dieses wird typischerweise nach objektorientierten Anforderungen aufgebaut und ist durch die Implementierung von Methoden, Klassen, Vererbungsmechanismen und Assoziationen zwischen Objekten gekennzeichnet [69]. Demnach muss das dem Werkzeug zugrundeliegende Problem zunächst in ein geeignetes rechnerverarbeitbares Modell überführt werden. Danach erfolgt die Zergliederung der Modellbestandteile in entsprechende Klassen sowie mögliche Beziehungen zwischen Objekten und Zustände des Gesamtmodells. Hierzu können die Prozesse zur Modellbildung genutzt werden, die in [69] detailliert beschrieben werden.

Auf der Grundlage des Datenmodells und der darin enthaltenen Informationen ist die Benutzerschnittstelle auszugestalten. Hierbei können statische oder variable Konzepte genutzt werden. Variable Benutzerschnittstellen ermöglichen dabei die Anpassung an unterschiedliche Nutzergruppen, sowie die Anzeige und Konfiguration von Informationen in unterschiedlichen Detailgraden.

4.7 Spezielle Ansätze zur Unterstützung der Fahrzeugkonzeption

4.7.1 Forschungsthemen auf Ebene der Fahrzeugarchitektur

Die virtuelle Auslegung von Fahrzeugkonzepten stellt kein eigenständiges und abgegrenztes Forschungsgebiet dar, sondern gestaltet sich als Aggregation vieler unterschiedlicher Themenbereiche im Umfeld der virtuellen Entwicklung. Wie bereits in Kap. 3 beschrieben, gestaltet sich das Entwerfen auf Ebene der Fahrzeugarchitektur vornehmlich in der Form von Vergabe und Verwaltung von Bauräumen, sowie der Integration erforderlicher Technologie in das Fahrzeugkonzept unter Wahrung der gesetzten technologischen, gesetzlichen sowie unternehmerischen Prämissen. Im vorliegenden Kapitel sollen Ansätze aus der Forschung im Bereich der virtuellen Produktentwicklung sowie damit verbundene Themenkomplexe diskutiert werden, die auf Ebene des Gesamtfahrzeugs eine hohe Sensitivität aufweisen oder der Lösungen von technologischen Fragestellungen im Gesamtfahrzeugkontext dienen. In Abb. 4.34 findet sich eine grundsätzliche Erfassung der hier behandelten Themenbereiche.

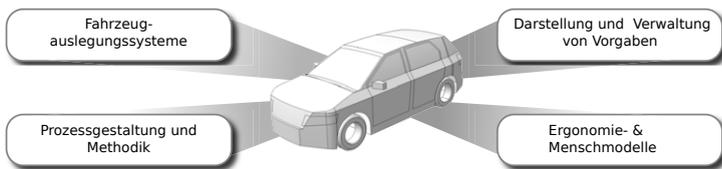


Abb. 4.34: Ausgewählte Themenfelder in der Gesamtfahrzeugentwicklung aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur

4.7.2 Darstellung und Verwaltung von Vorgaben

In der Auslegung und Planung einer Fahrzeugarchitektur ist ein zentrales Element die Berücksichtigung entsprechender geometrischer und funktionaler Randbedingungen (s. auch Kap. 3). Solche Prämissen können etwa Bereiche darstellen, auf die in der Entwicklung besonderes Augenmerk gelegt werden muss, wie etwa bestimmte Abstände, Freigänge etc., oder etwa Räume, in die nicht eingedrungen werden darf, wie beispielsweise ein Bodenfreigang oder eine Wasserlinie. Einen Ansatz hierzu beschreibt Kramer bereits 1994 im Rahmen virtueller Designräume [66]. Ein virtueller Designraum entspricht einer geometrischen Darstellung funktional-technologischer Produkteigenschaften und erweitert nach Gessner [39] den Anteil der rechnerintern repräsentierbaren, produktbezogenen Informationen im zugrundeliegenden Produktmodell. Ein virtueller Raum stellt dabei die Anforderungen von Teilbereichen eines Produktes an seine Umgebung dar, die erforderlich sind, um die funktional-technologischen Eigenschaften zu erfüllen (s. Abb. 4.35). Dieser Ansatz ist heute Stand der Technik in der Fahrzeugentwicklung und findet in vielerlei unterschiedlicher Ausprägung Anwendung. Virtuelle Räume sind entweder Bestandteil eines Bauteils, etwa in Form erforderlicher Montagefreigänge, oder funktionaler Elemente wie etwa Achsen oder Wälzkreise im Getriebe. Auf Gesamtfahrzeugebene wird dieser Ansatz u. a. dazu genutzt, Vorgaben und Richtlinien darzustellen (s. auch Abb. 3.23).

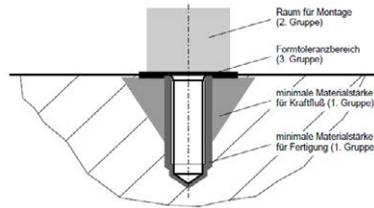


Abb. 4.35: Virtuelle Räume am Beispiel einer Sacklochbohrung mit Gewinde [66]

Dadurch ergeben sich vielerlei Vorteile: Die Nutzung von Flächen ermöglicht eine eindeutige visuelle Abgrenzung von „realen“ virtuellen Bauteilen zu Funktionsgeometrie. Des Weiteren obliegen Flächen, anders als Volumenkörper, nicht der geometrischen Schließbedingung, d. h. diese dürfen offen sein. Dadurch sind diese bei Parametervariationen Volumenkörpern hinsichtlich ihrer geometrischen Stabilität überlegen, wodurch Flächen das ideale Instrument zur Repräsentanz von Funktionsraumgrenzen darstellen. In der Forschung finden sich hierzu eine Reihe von an die Bedürfnisse der Automobilentwicklung angepassten Ansätzen: So stellen etwa Potthoff [82] sowie Hirz et. al [51] einen Ansatz vor, um mittels Designräumen gesetzliche Vorgaben von Beginn an in die Konzeption einfließen zu lassen, um die Homologationsfähigkeit¹⁵ des Fahrzeugs schon in frühen Phasen der Produktentwicklung darstellen zu können (s. Abb. 4.36).

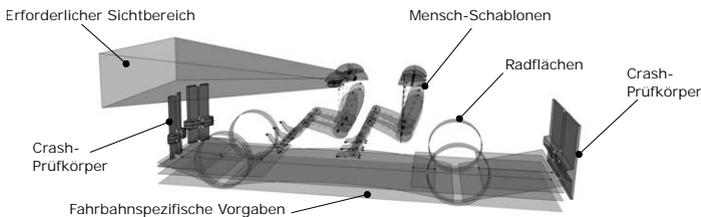


Abb. 4.36: Exemplarische Darstellung gesetzlicher Vorgaben im CAD

Die Vorgaben werden dabei als draht- oder flächenartige Geometrie dem Konstrukteur in einem 3D-CAD-Modell bereitgestellt. Diese lassen sich nutzen, um den „erlaubten“ Lösungsraum darzustellen, oder bestehende Konzepte auf die Überschreitung definierter Grenzen geometrisch zu validieren. An die jeweilige Vorgabe lassen sich Bedingungen knüpfen, die über deren Einhaltung entscheiden. Diese Flächen lassen sich etwa über Startmodelle effizient in den Entwicklungsprozess integrieren. Durch die Aufteilung der einzelnen Funktionsraumflächen in einzelne Teiledatensätze können diese im jeweils genutzten PDM-System differenziert betrachtet werden (s. Kap. 3). Dadurch, dass die Funktionsräume als separate Datensätze vorliegen, lassen sich diese in der Datenprozesskette separat verarbeiten und stehen damit als Informationsmedium für die Entwicklung zur Verfügung [39].

¹⁵Homologation = Sicherstellung der gesetzlichen Konformität

4.7.3 Fahrzeugkonzeptionssysteme im Gesamtfahrzeugumfeld

In der Fahrzeugarchitektur gilt es ein stimmiges Gesamtfahrzeug-Package zu entwickeln, das den besten Kompromiss aus maßlichen, geometrischen und funktionalen Anforderungen sowie technischer Umsetzbarkeit darstellt. Zur Gestaltung von Fahrzeugkonzepten finden sich in der wissenschaftlichen Literatur vielfältige Ansätze. Deren Ausgestaltung ist jedoch zum einen stark von der jeweiligen Perspektive auf das Gesamtfahrzeug geprägt, zum anderen wird das Gesamtfahrzeug bzw. dessen Inhalt unterschiedlich definiert und interpretiert. Daher sollen im Folgenden jene Ansätze genauer betrachtet werden, welche die Fahrzeugarchitektur sowie die Beschreibung parametrischer Abhängigkeiten in einem Entwurf zum Ziel haben.

4.7.3.1 Gesamtfahrzeugauslegungssysteme

Die Gruppe der Gesamtfahrzeugauslegungssysteme umfasst alle Arten von Ansätzen, welche die Ableitung eines Fahrzeugentwurfs zum Ziel haben. Da es in der Literatur keine exakte Definition des Terminus „Gesamtfahrzeug“ gibt, legen die jeweiligen Ansätze unterschiedliche Schwerpunkte und Aspekte. Grundsätzlich lassen sich diese Ansätze unter den Gesichtspunkten Inhalt und prozessuale Gestalt klassifizieren. Inhaltlich gesehen lassen sich drei verschiedene Grundtypen von Ansätzen identifizieren:

- Rein parametrische Entwurfssysteme
- Geometrische Auslegungssysteme
- Geometrisch-funktionale Konzeptionssysteme

Vom prozessualen Standpunkt aus lassen sich geführte Systeme und rein berechnende Systeme unterscheiden.

Ein rein parametrisches Entwurfssystem stellt etwa der Ansatz nach Prinz [83] dar. Ihm dient ein mathematisch abstraktes Fahrzeugmodell als Grundlage für die Betrachtung und Darstellung unterschiedlicher Wirkmechanismen, sowie der Durchführung von Parametervariationen zur Optimierung geforderter Fahrzeugeigenschaften. Dadurch lassen sich mögliche Stellhebel identifizieren, um zielgerichtet eine konkrete technische Eigenschaft zu beeinflussen. Das Modell ist modular entsprechend unterschiedlicher Fahrzeugfunktionen gegliedert. Abb. 4.37 zeigt hierzu einen Auszug aus dem Modul Aerodynamik.

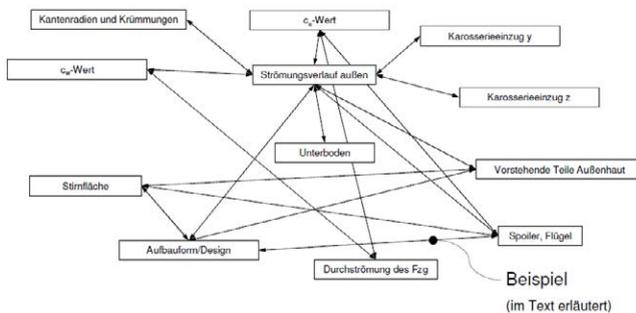


Abb. 4.37: Inhalte eines Konzeptmoduls Aerodynamik nach [83]

Das Modul stellte eine formale Verknüpfung verschiedener Eigenschaften wie etwa den c_w -Wert, der Stirnfläche in Fahrzeuginnenrichtung oder Gruppen wie beispielsweise „Aufbauform/Design“ oder „Vorstehende Teile Außenhaut“ dar. Dadurch kann eine ganzheitlich formale Betrachtung von Themenkomplexen erzielt werden, was die Ableitung erforderlicher Parameter im Gesamtfahrzeugkontext unterstützt, sowie deren grundlegende Reproduzierbarkeit zu späteren Zeitpunkten ermöglicht.

Geometrische Auslegungssysteme fokussieren sich auf die rasche Darstellung geometrischer Konzeptbelange wie etwa Komponenten, Package oder Maßkonzept. So werden bereits in den frühen achtziger und neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts Methoden zu parametergesteuerten Entwurfswerkzeugen untersucht [79], [85]. Das Ziel dieser Ansätze war es, aufgrund der damals fehlenden kommerziell verfügbaren parametrisch-assoziativen CAD-Systeme, rasch formbestimmende Komponenten auf Basis von Fahrzeugparametern generieren zu können. Abb. 4.38 zeigt hierzu etwa das Ablaufmodell des Ansatzes nach Rasenack.

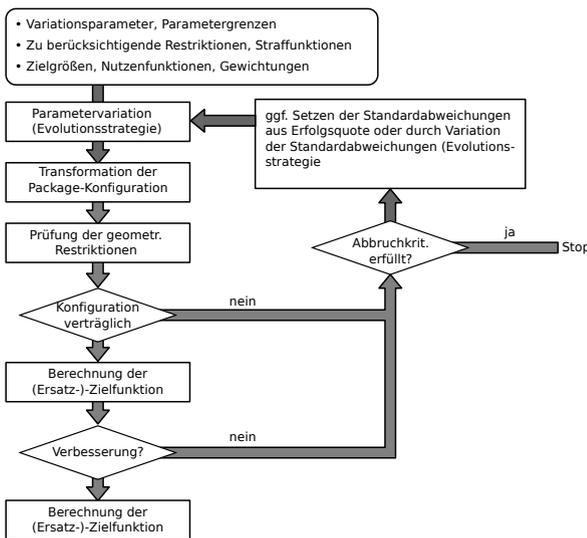


Abb. 4.38: Ablaufmodell eines Fahrzeugentwurfs nach Rasenack [85]

Auf Basis von Parametern und definierten Restriktionen sowie Gewichtungen werden entsprechende Parametervariationen vorgenommen. Durch eine Kaskade von Prüfalgorithmen erfolgt eine automatisierte Bewertung des Entwurfs sowie eine anschließende Optimierung entsprechend definierter Kriterien.

Andere Ansätze betrachten das Gesamtfahrzeug aus einer speziellen Perspektive, wie etwa dem Fahrzeugdesign. Hierzu stellt etwa Gessner [39] im Bereich der Design-Technik-Konvergenz einen Ansatz vor, um in der Konzeptphase 3D-Packagemodelle als Kommunikationsinstrument zum Fahrzeugdesign zu nutzen. Dadurch soll die Abstimmung zwischen Design und Technik bereits von Beginn an durchgängig und effizient unterstützt werden. Gessner formuliert hierzu spezielle geometrische Package-Features (s. Abb. 4.39 (b)), die zum Aufbau des Packages genutzt werden und mit einer speziellen Semantik versehen sind. Daher kann neben der geometrischen Dimension

auch die Bedeutung von z. B. Motor oder Rad etc., und die Priorität des Features kommuniziert werden.

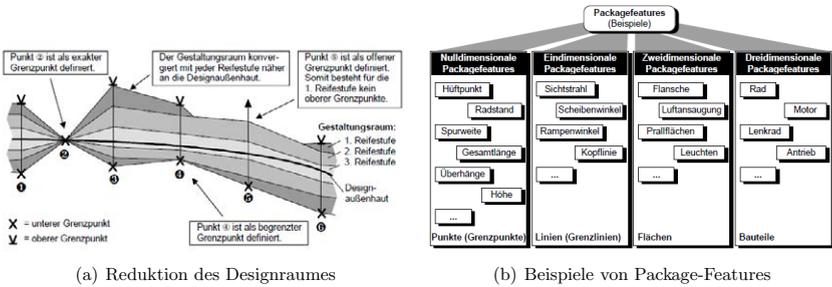


Abb. 4.39: Geometrische Kategorisierung von Package-Features nach Gessner [39]

Dieser Ansatz bietet mehrerlei interessante Aspekte: Zum einen ermöglicht er eine Klassifikation unterschiedlicher Package-Features und bildet damit die Grundlage für ein entsprechendes Objektmodell. Zum anderen ermöglicht das vorgestellte Reifestufenkonzept eine sukzessive und vor allem systematische Reduktion des möglichen Lösungsraumes für das Design, und ermöglicht dadurch eine straffe und raschere Konvergenz von Design und Technik (s. Abb. 4.39 (a)). Geometrisch-funktionale Fahrzeugauslegungssysteme erweitern geometrische Ansätze um die funktionale Dimension des Fahrzeugs. Eines der ersten detaillierten Auslegungssysteme hierzu ist der Ansatz nach Braess [14].

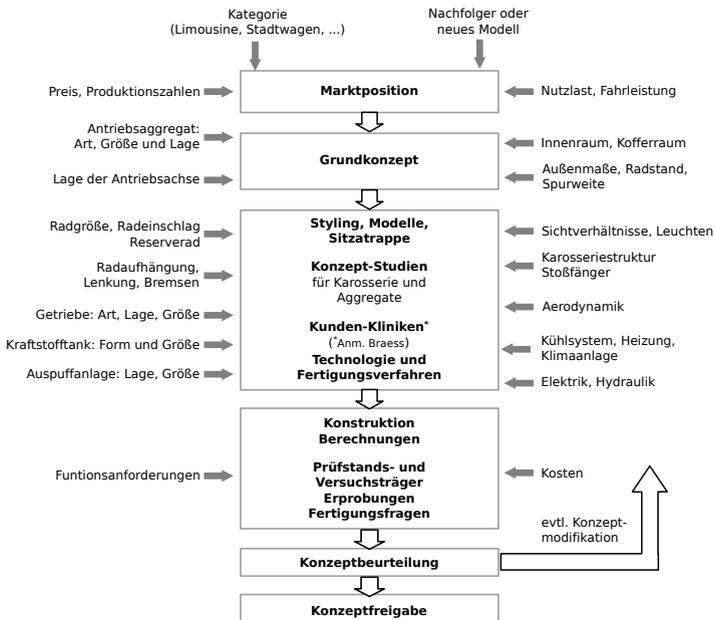


Abb. 4.40: Vorgehensmodell der Fahrzeugkonzeptentwicklung nach Braess [14]

Der gezeigte Ansatz ist nicht auf die Konzeptionsphase beschränkt, sondern umfasst alle Abschnitte der Entwicklung. Auf Basis von Maßen, Maßketten und linearisierten Gleichungssystemen werden die unterschiedlichen Fahrzeugfunktionen gesamtheitlich erfasst. Auf Basis des Grundkonzeptes werden analog den gezeigten geometrischen Ansätzen Optimierungsalgorithmen angewandt, die unter Berücksichtigung definierter Zielkriterien das Optimum suchen. Nach Kuchenbuch [67] lässt sich ein solcher Ansatz jedoch nicht für breite Parametervariationen nutzen, da die vereinfachten linearisierten Abhängigkeiten dabei ihre Gültigkeit verlieren.

Weitere ähnliche Ansätze in diese Richtung stellen etwa Sander [93], Böhme [7] oder Kuchenbuch [67] vor. Sander stellt einen Ansatz zur gesamtheitlichen Fahrzeugentwicklung in der frühen Konzeptphase auf Basis des Systems Engineering (SE) vor. Hierbei werden funktionale Zusammenhänge auf Basis eines objektorientierten Datenmodells modelliert. Im Gegensatz zum vorliegenden Ansatz eines integrierten Konzeptmodells stellt die Idee nach Sander ein abgeschlossenes Entwurfssystem dar. Die darin generierten Informationen können jedoch nicht parametrisch in verwendeten CAD-Systemen in der Prozesskette weiterverwendet werden.

Böhme beschreibt ein hierarchisches Entwurfsmodell, das modular strukturiert ist und verschiedene Detailstufen aufweist. Das Modell nutzt über alle Detailstufen hinweg eine gemeinsame Parameterbasis, weshalb ein wesentlicher Mehrwert dieses Ansatzes in der Fähigkeit der Kopplung externer Simulationsumgebungen begründet ist.

Kuchenbuch [67] stellt in seiner Arbeit einen Ansatz zur Ableitung neuer Fahrzeugarchitekturen für batteriebetriebene Automobile vor. Das Ziel ist die Identifikation neuer Anordnungsvarianten für modular strukturierte Traktionsbatteriesysteme. Kuchenbuch nutzt hierzu als Ausgangsbasis ein vereinfachtes parametrisches CAD-Modell, das die geometrischen Rahmenbedingungen für den Entwurf darstellt. Auf Basis dieses Modells erfolgt unter Nutzung eines externen Optimierers die Variation von entsprechenden Parametern zur Package-Optimierung.

Heinke [45] koppelt in seinem Entwurfskonzept ein auf den Erkenntnissen von Braess erweitertes Parametermodell mit dem CAD-Strukturauslegungswerkzeug AURORA (Automobiltechnisches, anwendungsorientiertes Entwurfssystem zur Optimierung der rechnergestützten Auslegung). Auf Basis eines Grobkonzeptes können so Eigenschaftsparameter anhand von Struktureigenschaften evaluiert werden.

4.7.3.2 Auslegungssysteme im Gesamtfahrzeugkontext

Neben der Zielsetzung das Gesamtfahrzeug virtuell zu erfassen, finden sich in der wissenschaftlichen Literatur weitere Ansätze zur effizienten Geometriegerierung in der frühen Konzeptphase. So stellte Hänshcke [52] 1990 einen Ansatz zur raschen Generierung von Tragstrukturen im Automobilbau vor, deren Erkenntnisse zur Entwicklung kommerzieller CAD-Werkzeuge wie SFE-CONCEPT oder Fast Concept Modeller führten [67]. Darin werden die verschiedenen Tragstrukturen durch Schnitte und Übergangselemente erzeugt und verbunden.



Abb. 4.41: Rohbaumodell eines PKW in SFE-CONCEPT [97]

Im Bereich des Fahrzeugdesigns und des Maßkonzepts finden sich etwa Ansätze von Klug [64], Raabe [84] oder Müller [77]. Nach wie vor nutzt das Design im Automobilbau Feststoffmodelle, um Formen und Proportionen zu entwickeln. Diese werden mithilfe von 3D-Scannern in Punktwolken übergeführt. Auf deren Basis werden am Rechner 3D-Flächen erzeugt. Dieser Prozess ist sehr umfangreich und durch einen hohen manuellen Aufwand charakterisiert. Klug stellt in seinem Ansatz eine Möglichkeit vor, automatisiert auf Basis von Punktwolken Flächen zu generieren, die mit einem parametrischen Modell zu dessen Kontrolle verknüpft sind. Dadurch ist man in der Lage, rasch Form- und Proportionsstudien durchzuführen.

Raabe stellt einen Ansatz zur Unterstützung in der Generierung konsistenter Maßkonzepte vor. Hierzu nutzt er ein parametrisches Modell um Maßketten, deren Wirkzusammenhänge sowie Designvorgaben darstellen zu können. Des Weiteren wird eine Strategie zur Verwaltung von Maßkonzeptdaten vorgestellt.

Müller stellt analog Raabe einen ergonomie-zentrierten Ansatz zur Ableitung von Fahrzeugaußen- und -innenabmessungen vor. Die Fahrzeugnutzer werden dabei in den Mittelpunkt aller Auslegungstätigkeiten gestellt. Des Weiteren erfolgt eine Klassifikation der Maße und Maßketten im Kontext der Transportaufgabe, um systematisch die jeweiligen Maßwerte entwickeln zu können.

4.7.4 Ergonomie- und Menschmodelle

Da Fahrzeuge trotz Trends wie etwa dem autonomen oder assistierten Fahren auch in näherer Zukunft zumindest teilweise durch Menschen bedient und gesteuert werden müssen, ist die Einbeziehung anthropometrischer und ergonomischer Gesichtspunkte ein zentraler Baustein der Gesamtfahrzeugentwicklung [121]. Wie in Kap. 3.3.2 bereits gezeigt wurde, werden viele Eigenschaften und Zielmaße im Innen- und Außenbereich des Fahrzeugs durch anthropometrische und ergonomische Anforderungen definiert, da diese durch den Kunden entweder unmittelbar oder direkt wahrgenommen werden können. Da Aspekte wie beispielsweise Ein-/Ausstieg, Bedienbarkeit und Erreichbarkeit der Instrumentierung, sowie das subjektive „Wohlfühlen“ u. a. wesentliche Kaufanreize darstellen können, ist die frühe Bewertung und Darstellung ergonomischer Aspekte im Fahrzeug eine der zentralen Aufgabenstellungen in der Entwicklung einer Fahrzeugarchitektur. Hierbei spielen die in Abb. 4.42 angeführten Aspekte eine zentrale Rolle, da sie mit wesentlichen Maßketten im Fahrzeug verknüpft sind.

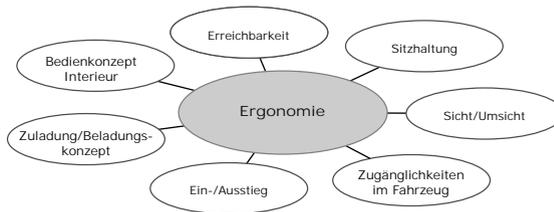


Abb. 4.42: Einflüsse der Ergonomie auf die Fahrzeugarchitektur

In der virtuellen Welt stehen hierzu verschiedene kommerzielle Programme wie wissenschaftliche Ansätze zur Verfügung. Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist vor dem Hintergrund einer konsistenten Einbindung bestehender Ansätze und Methoden in ein virtuelles Fahrzeugarchitekturmodell deren grundlegender Modellaufbau von Interesse, sowie der abgebildete Umfang ergonomischer Aspekte.

2D-Schablonen stellen ein einfaches Hilfsmittel zur initialen virtuellen Einbeziehung anthropometrischer sowie ergonomischer Aspekte im Fahrzeug dar (s. Abb. 3.12 (a)) [121]. Die Schablonen können statischer Natur sein, etwa in Form eines Schnittes oder einer Drahtgeometrie, oder über parametrisch-assoziative Modelle dargestellt werden, die eine Variation gewisser Parameter wie etwa Beinlänge, Lehnenwinkel oder die Anstellung des Fußes der Schablone erlauben. Die Grundform solcher Schablonen basiert weitgehend auf der sog. Kiehler Puppe (s. Abb. 4.43). Diese Schablonen dienen primär der Erstausslegung des Fahrerplatzes sowie der grundsätzlichen Betrachtung von Platzverhältnissen der Passagiere.

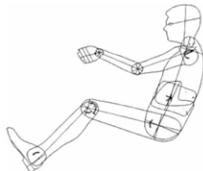


Abb. 4.43: Kiehler Puppe nach DIN 33408 [25]

Zur Lösung komplexerer Fragestellungen werden heute 3D-Menschmodelle angewandt. Im Automobilbereich ist das kommerzielle CAx-Werkzeug RAMSIS weit verbreitet, das am Lehrstuhl für Ergonomie der TU-München entwickelt wurde. Dieses fußt auf einer anthropometrischen Datenbank, die alle relevanten populationspezifischen Körperabmessungen beinhaltet. Mithilfe von 3D-Menschmodellen lassen sich etwa erforderliche Greifräume (vgl. [48], [18] und [47]), Ein-/Ausstiegsuntersuchungen, Haltungsbewertungen sowie Komfortanalysen vornehmen (s. Abb. 4.44).

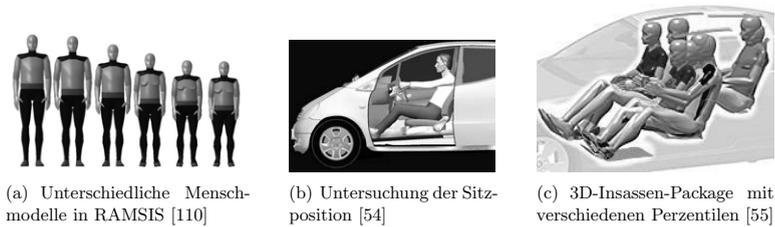


Abb. 4.44: Nutzung von 3D-Mensch-Modellen in der Fahrzeugentwicklung

Alternativen stellen etwa die kommerziellen Menschmodelle MADYMO [104], DYNAMICUS [109], JACK [99] oder AnyBody [3] dar. Zusätzlich finden sich alternative Forschungsansätze wie etwa [63]. Des Weiteren verfügen alle in der Automobilentwicklung angewandten kommerziellen CAD-Systeme wie CATIA V5, NX und CREO über entsprechende virtuelle Menschmodelle [121]. Neben ergonomischen Aspekten werden 3D-Menschmodelle auch zur Analyse anderer Fragestellungen im Fahrzeug verwendet. So werden etwa im Bereich der Fahrzeugsicherheit hochdetaillierte Menschmodelle mit modellierten Muskeln und Knochen zur Untersuchung von Auswirkungen auf den menschlichen Körper im Zuge eines Unfallhergangs (s. Abb. 4.45) genutzt, oder in der Bewertung der Um- und Aussicht aus dem Fahrzeug [56].

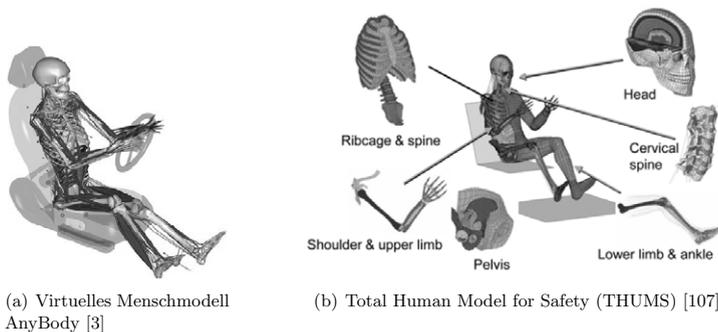


Abb. 4.45: Erweiterte virtuelle Menschmodelle zur Analyse von Verletzungen

4.8 Fazit

Im Kontext der Gesamtfahrzeugarchitektur werden zum Stand der Technik unterschiedliche Facetten der virtuellen Entwicklung betrachtet. Diese reichen von allgemeinen Methoden und Vorgehensweisen im Bereich der virtuellen Produktentwicklung bis hin zu konkreten Forschungsansätzen zur Lösung spezieller Problemstellungen auf Ebene des Gesamtfahrzeugs. Es zeigt sich, dass nach wie vor ein konkreter Forschungsbedarf im Bereich der Gesamtfahrzeugarchitektur besteht. Die Ursachen hierfür liegen u. a. in der steigenden Produktkomplexität, der Forderung nach Verkürzung der benötigten Entwicklungszeit und der immer rascheren Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich der Informationstechnologie und affiner Themenkomplexe. Des Weiteren

entstehen durch technologische Innovationen sowie der verstärkten Einflussnahme durch den Gesetzgeber kontinuierlich neue Herausforderungen für die Automobilentwicklung. In diesem Kontext müssen bestehende Methoden, Prozesse und Strategien kontinuierlich evaluiert und weiterentwickelt werden. Aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur ergibt sich in diesem Zusammenhang das folgende Bild: Viele Themen, die Auswirkung auf die Gestaltung des Gesamtfahrzeugs aufweisen, werden in den verantwortlichen Fachbereichen über sog. Expertenwerkzeuge abgebildet. Diese Modelle und Werkzeuge spiegeln stets die Sichtweise der jeweiligen Nutzer wider und sind in den seltensten Fällen untereinander vernetzt. Da sich eine Fahrzeugarchitekturabteilung neben „klassischen“ geometrisch-integrativen Fragestellungen zunehmend mit funktionalen Fragestellungen auseinandersetzen muss, lassen sich in diesem Zusammenhang verschiedene Lücken identifizieren (s. Abb. 4.46).

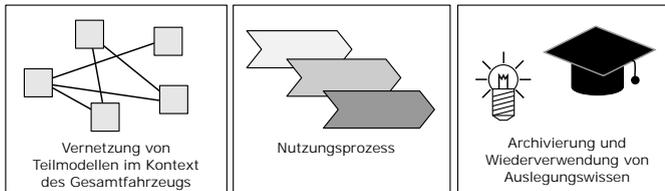


Abb. 4.46: Lücken in der virtuellen Entwicklung auf Ebene des Gesamtfahrzeugs aus dem Blickwinkel der Fahrzeugarchitektur

Einerseits können ohne die Betrachtung von Funktionen grundlegende Konzepteigenschaften nicht zielführend untersucht werden und es können erforderliche Vorgabebauräume nicht in der geforderten Qualität durch die Fahrzeugarchitekturabteilung an die Fachabteilungen verteilt werden. Andererseits ist für die Nutzung von Expertenwerkzeugen zur funktionalen Grobauslegung dennoch ein spezifisches Fachwissen erforderlich. Aus dem Blickwinkel einer Fahrzeugarchitekturabteilung besteht daher ein hoher Bedarf in der Schaffung neuer Methoden und Modelle zur raschen und effizienten Prognose geometrischer und funktionaler Produktmerkmale und der konsistenten Vernetzung bestehender Werkzeuge in unterschiedlichen Domänen der virtuellen Entwicklung in der frühen Konzeptphase. Dadurch soll die Qualität von Konzepten in der frühen Entwicklungsphase gesteigert werden und gleichzeitig soll die Komplexität in der virtuellen Entwicklung beherrschbar bleiben. In der vorliegenden Arbeit werden in diesem Zusammenhang die folgenden Teilgebiete behandelt:

- Methoden im Bereich der parametrisch-assoziativen Konstruktion
- Integrierte Produktmodelle
- Strategien im Gesamtfahrzeug-DMU
- Methoden im Bereich der Datenverwaltung
- Expertenwerkzeuge und Kopplung von Simulationswerkzeugen
- Forschungsansätze im Umfeld des Gesamtfahrzeugs

Obwohl die parametrisch-assoziative Konstruktion mittlerweile ein Standardinstrument in der rechnergestützten Entwicklung darstellt, lassen sich die Vorteile auf Gesamtfahrzeugebene nur in begrenztem Umfang nutzen – insbesondere in der frühen Konzeptphase. Die Gründe hierfür

sind vielfältig: Parametrisch-assoziative Modelle verlangen eine sorgfältige Planung sowie einen sorgsamten Aufbau, um möglichst effizient zur Lösung der jeweiligen Aufgabenstellung eingesetzt werden zu können und um parallel einen möglichst hohen Wiederverwendungsgrad aufweisen. Die hierfür erforderliche Erstellungszeit steht vielfach aufgrund des hohen zeitlichen Drucks in Unternehmen nicht zur Verfügung. Des Weiteren führen die oft nur vage formulierten Randbedingungen zu einem hochkomplexen Lösungsraum, wodurch eine zielgerichtete Modellplanung stark erschwert wird. Darüber hinaus verhindert die gezeigte Entwicklungsstrategie auf Gesamtfahrzeugebene die Nutzung von Parametrik über die Bauteil- und Komponentengrenzen hinweg [13], da Kollisionen zwischen Bauräumen und Bauteilen bewusst aufgezeigt werden sollen, wodurch die Parametrik zumeist auf Bauteilebene beschränkt bleibt.

Die diskutierten Strategien und Methoden im Bereich der integrierten Produktmodelle und des Gesamtfahrzeug-DMU sind für die Belange der Konzeptentwicklung vielfach zu träge oder bieten nicht die geforderte Flexibilität, da sie aus der Perspektive und auf der Basis von Anforderungen aus der Serienentwicklung heraus definiert sind. So ist etwa das typische Positionierungskonzept des DMU mittels Transformationsmatrizen in Kombination mit parametrisch-assoziativen Methoden eine große Herausforderung und birgt bei mangelnder Planung mehr Risiko als Erfolgchancen, da selbst kleine Unachtsamkeiten in der Produktstrukturierung und Referenzierung zu gravierende Auswirkungen führen können.

In Hinblick auf die allgemeine Entwicklungsmethodik im Bereich der Gesamtfahrzeugarchitektur zeigt sich, dass die Einbindung funktionaler Betrachtungen aus dem Blickwinkel einer Fahrzeugarchitekturabteilung sehr schwierig ist. Dies liegt einerseits an der Verfügbarkeit entsprechender Modelle, welche in der frühen Konzeptphase angewandt werden können, andererseits ist – auch im Falle entsprechender Abstraktionen – spezifisches Fachwissen erforderlich, um aussagekräftige Prognosen vornehmen zu können.

Expertenwerkzeuge sind heute ein wesentlicher Bestandteil in der modernen Automobilentwicklung. Diese hochspezialisierten Werkzeuge können komplexe Problemstellungen abbilden und unterstützen die Entwickler in ihrer Arbeit. Dennoch ergeben sich aufgrund der Forderung nach verstärkter Vernetzung zahlreiche Herausforderungen. Die jeweiligen Datenstrukturen spiegeln zumeist ausschließlich die Anforderungen und Sichtweisen der involvierten Fachbereiche wider, gleichzeitig werden die zugehörigen rechnergestützten Werkzeuge oft durch die Fachbereiche selbst entwickelt und unterliegen keinerlei definiertem Wartungsprozess, was eine durchgängige Vernetzung im Gesamtfahrzeugkontext erheblich erschwert.

Aus Perspektive der Datenverwaltung ergeben sich für die Gesamtfahrzeugarchitektur viele Herausforderungen in Hinblick auf die Weiterverarbeitbarkeit der entstehenden CAX-Daten im Entwicklungsprozess. Aufgrund der teils hohen Abstraktion von Bauteilen oder Fahrzeugbereichen können sowohl Produktstruktur oder CAD-Daten nicht immer effizient in die nachfolgenden Entwicklungsschritte übernommen werden.

Im Bereich der Forschungsansätze auf Gesamtfahrzeugebene ergibt sich ein breites Bild: Aufgrund der hohen Themenschnittmenge finden sich vielerlei unterschiedliche Ansätze für spezifische Themen in der Gesamtfahrzeugentwicklung. Eine durchgehende Erfassung des Fahrzeugs in seiner Gesamtheit inklusiver prozessualer Betrachtungen fehlt vielfach jedoch. Eine mögliche Lösung zur Schließung der genannten Lücken und zur raschen wie effizienten Prognose und Bearbeitung von geometrischen und funktionalen Fahrzeugeigenschaften kann hierzu das in Kap. 5 vorgestellte integrierte Konzeptmodell darstellen. Dieses soll die Vernetzung geometrischer und

funktionaler Modelle im Kontext der Gesamtfahrzeugarchitektur unterstützen und eine konsistente virtuelle Darstellung eines Konzeptes in der frühen Entwurfsphase ermöglichen. Weitere wichtige Elemente sollen u. a. die Archivierung und Bereitstellung des im Zuge des jeweiligen Konzeptes entstehenden Auslegungswissens sein, sowie die Bereitstellung einer vereinheitlichten Bewertungssystematik für technische Produktmerkmale des Konzeptes.

5

Integriertes CAD-Konzeptmodell für die frühe Entwurfsphase

In den vergangenen Kapiteln wurden die Gegebenheiten in der frühen Konzeptphase beleuchtet sowie der Stand der Technik in Hinblick auf die virtuelle Entwicklung im Gesamtfahrzeugkontext diskutiert. Die Forderung nach Beschleunigung der erforderlichen Entwicklungszeit, sowie die immer rascheren Innovationen und Weiterentwicklungen im technischen Umfeld des Automobils erfordern die Darstellung und Bewertung geometrischer und funktionaler Eigenschaften bereits in frühen Phasen der Entwicklung. Hierfür ist typischerweise eine Fahrzeugarchitekturabteilung verantwortlich. In Kap. 3 und 4 wurde hierzu gezeigt, dass zur Lösung von Fragestellungen in der Konzeptphase vielfach sog. „Expertenwerkzeuge“ eingesetzt werden. Aus dem Blickwinkel einer Fahrzeugarchitekturabteilung ist hierbei eine mangelnde Durchgängigkeit sowohl in der Anwendung als auch in den zugrundeliegenden Datenmodellen und Anforderungen zu erkennen, da Expertenwerkzeuge vielfach lediglich die Sicht der jeweiligen Nutzer reflektieren. Dies führt zu einem Bedarf an neuen Ansätzen und Strategien im Kontext der Fahrzeugarchitektur, um vorhandene CAx-Modelle und Methoden durchgängig und konsistent zu vernetzen und damit im Kontext des Gesamtfahrzeugs effizient nutzbar zu machen. Ein weiterer Aspekt in der virtuellen Entwicklung ist die erforderliche Archivierung des bestehenden Auslegungswissens und dessen Wiederverwendung im Entwicklungsprozess. Hierzu stellt das vorliegende Kapitel einen neuen Ansatz zu einem integrierten CAD-Konzeptmodell für die frühe Entwurfsphase der Automobilentwicklung vor. Dies umfasst eine Darstellung der erforderlichen Teilmodelle, der benötigten Informationsbausteine, deren kontextuelle Vernetzung und der sich daraus ergebenden Datenströme und Workflows.

5.1 Anforderungen und Ziele der integrierten Konzeptarbeit

Das primäre Ziel des vorliegenden Ansatzes ist es, dass ein Fahrzeugarchitekt, neben der rein geometrischen Betrachtung eines Fahrzeugentwurfes, funktionale Produktmerkmale in die Überlegungen miteinbeziehen kann. Dadurch sollen Bauräume und maßliche Belange einer grundsätzlichen funktionalen Validierung zugeführt werden, um die involvierten technischen Fachbereiche mit höherwertigeren Bauraumdaten versorgen zu können. Dies soll in weiterer Folge eine effizientere Kommunikation mit den technischen Fachbereichen im Prozess etablieren. Hierzu ist es erforderlich, jene CAx-Modelle, die im Kontext des Gesamtfahrzeugs genutzt werden, aus dem Blickwinkel der Fahrzeugarchitektur konsistent zu verknüpfen und nutzen zu können. Der Begriff Nutzung umfasst hierbei die tatsächliche Anwendung von CAx-Modellen durch einen Fahrzeugarchitekten im Rahmen eines integrierten Konzeptmodells und zugleich die Formulierung erforderlicher Toolketten und Workflows für die prozessgesteuerte Anwendung von CAx-Modellen im

Kontext der integrierten Konzeptarbeit, um deren konsistente Datenversorgung sicherzustellen. Dadurch sollen sich die zentralen Entwurfsaspekte entsprechend Abb. 5.1 durchgängig darstellen lassen.

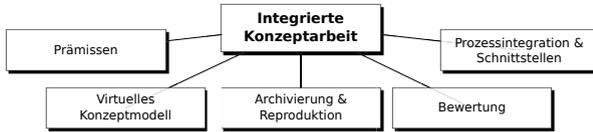


Abb. 5.1: Zentrale Aspekte der integrierten Konzeptarbeit aus dem Blickwinkel der technischen Entwicklung

Die Prämissen stellen das Fundament eines jeden Fahrzeugentwurfs dar. Diese umfassen alle relevanten technischen Vorgaben und Randbedingungen für die Entwicklung des Konzeptes. Für eine durchgängige und konsistente Entwurfsgestaltung ist es erforderlich, dass stets alle Vorgaben und Richtlinien, innerhalb deren sich der Konzeptlösungsraum aufspannen soll, verfügbar sind. Im Kontext des vorliegenden Ansatzes soll unter den Prämissen jegliche geometrische Vorgabe oder jeglicher funktionaler Zielwert verstanden werden. Neben der eigentlichen Darstellung der jeweiligen Vorgabe oder des Zielwertes ist auch die Kenntnis über deren Ursprung von wesentlichem Interesse.

Das virtuelle Konzeptmodell stellt eine technische Basis zur rechnergestützten Darstellung eines Entwurfs dar. Dieser muss die geometrischen und funktionalen Produktmerkmale sowie entsprechende Beziehungen zwischen den jeweiligen Fahrzeugparametern repräsentieren. Aufgrund der eingenommenen Perspektive des Gesamtfahrzeugs soll ein parametrisch-assoziatives Produktmodell das Fundament des vorgestellten Ansatzes darstellen. Dieses soll als Führungsmodell gestaltet werden, das als zentrales Bindeglied zwischen den einzelnen untergeordneten geometrischen und funktionalen Konzeptteilmodellen fungieren soll. Folgende Anforderungen werden dabei an das technische Konzeptmodell formuliert:

- Autarke und flexible Parametrik
- Konsistente Nutzung vorhandener rechnergestützter Modelle
- Parametrische Baugruppensteuerung zur Ermöglichung von automationsgestützten Variantenuntersuchungen

In Hinblick auf die Beschaffenheit der dem Modell zugrundeliegenden Parametrik soll diese grundsätzlich autark sein und zugleich eine prinzipielle Flexibilität aufweisen. Mit autark ist an dieser Stelle die Unabhängigkeit des Aufbaus der Modellparametrik vom jeweiligen Strukturierungsverständnis der Anwender gemeint, d. h. der Entwickler soll von der Erstellung und Verwaltung parametrischer Beziehungen ausgenommen werden. Diese Prozesse sollen ausschließlich über geeignete Methoden erfolgen, um die konsistente Parametrik zu jedem Zeitpunkt sicherstellen zu können. Flexibilität bezieht sich auf den Umstand, dass bisherige Lösungsansätze vielfach keine Umgestaltung von mathematischen Beziehungen erlauben. So ergibt sich etwa die Fahrzeuglänge aus der Summe von Radstand, Überhang vorne und Überhang hinten. Ein nachträgliches umformen nach einer anderen Größe ist nicht mehr möglich. Da in der frühen Fahrzeugkonzeption gerade das Spiel mit den Maßketten zur Betrachtung unterschiedlicher Varianten erforderlich ist, muss die Parametrik eine Umformung von Maßketten unterstützen.

Die konsistente Einbindung von CAD- sowie Simulationsmodellen soll über das zentrale Führungsmodell erfolgen. CAD-Daten sollen dabei gemäß den jeweiligen Fähigkeiten des genutzten CAD-Systems direkt in das Führungsmodell integriert werden, Simulationen müssen aufgrund der Domänenüberschreitung durch entsprechende Schnittstellen angebunden werden.

Die parametrische Baugruppensteuerung soll im Modell die Möglichkeit schaffen, skriptbasierte Variantenstudien zu ermöglichen. Aufgrund der hohen Datenmenge im DMU auf Gesamtfahrzeugebene wäre im Regelfall eine Positionierungsstrategie gemäß Kap. 4.2 angebracht. Die Nutzung von Transformationsmatrizen wird in diesem Fall jedoch nicht als zielführend angesehen, da die einzelnen Vektorkomponenten einer Transformationsmatrix typischerweise nicht als Parameter veräußert werden. Dadurch kann eine konsistente Lageänderung von CAD-Komponenten ausschließlich über die Automationschnittstelle des jeweiligen CAD-Programms vorgenommen werden. Dies birgt insbesondere im Falle hoher Parametervariationen ein erhebliches Fehlerpotential, wodurch die parametrische Konsistenz bei unbeabsichtigten Eingreifen eines Nutzers verletzt werden kann.

Die nächste tragende Säule des integrierten Konzeptmodells soll eine durchgängige Bewertungssystematik darstellen. Auf Basis einer festgelegten Taxonomie (vgl. [69]), soll in Kombination mit Mitteln der Deduktion die durchgängige Reproduzierbarkeit getroffener Entscheidungen auf Basis des technischen Konzeptmodells ermöglicht werden. Eine Bewertung soll damit stets an einen definierten Konzeptstand gekoppelt sein. Neben der eigentlichen Bewertung ist die Zuordnung abgeleiteter Maßnahmen erforderlich, die sich aus einer Bewertung ergeben können.

Ein weiteres Element des integrierten Konzeptmodells soll eine entsprechende Archivierungsstrategie darstellen. Neben der eingeführten Bewertungssystematik ist für die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen die geeignete Archivierung von Konzeptinformationen erforderlich. Das vorgestellte Archivierungskonzept soll die derzeit vorwiegend dokumentbasierten Sicherungsstrategien genutzter PDM-Systeme um die Dimension der Parametrik erweitern. Ein Archivierungszustand repräsentiert daher einen vollständigen Systemzustand zu einem dezidierten Zeitpunkt.

Die letzte Säule bildet die Festlegung von Schnittstellen und der erforderlichen Prozessintegration. Wie in Kap. 4.6 dargelegt, ist in der Nutzung von Expertensystemen die Weiterverarbeitbarkeit der entstehenden Informationen ein wesentlicher Schlüssel in der Integration in bestehende Prozesslandschaften. Dementsprechend sollen an die, durch das zentrale Führungsmodell, generierten Strukturen entsprechende Ordnungsvorgaben gestellt werden, welche eine Nutzung abnehmender wie aufbauender Prozesse ermöglichen. Diese Vorgaben sind auch in Hinblick auf die Strukturierungsbedarfe von PDM-Systemen zu wählen. Wie in Kap. 4.4 gezeigt, bestimmt die Informationsstrukturierung im CAD die Möglichkeiten der Differenzierbarkeit im PDM-System. Werden etwa Grenzflächen in einem Teiledatensatz gesammelt abgelegt, können diese auf Strukturebene im PDM nicht mehr differenziert werden, womit eine Zuordnung zu Strukturvarianten, etwa zur Informationsfilterung, nicht mehr möglich ist. Des Weiteren sollen Schnittstellen vorgesehen werden, die in der Lage sind Informationsbestandteile aus dem integrierten Konzeptmodell strukturiert zu veräußern, um diese Daten in anderen Systemen verarbeiten zu können.

Die gestellten Anforderungen und Ziele sollen jedoch nicht zu der Schlussfolgerung verleiten, dass das integrierte Konzeptmodell ein „Fahrzeug auf Knopfdruck“ repräsentieren kann. Dies wird dezidiert nicht angestrebt. Vielmehr soll das integrierte Konzeptmodell einen permanenten Begleiter entlang der gesamten technischen Entwurfsphase darstellen. Automatismen sollen nur

dort genutzt werden, wo diese auch sinnvoll sind und technische Zusammenhänge im Konzept transparent und nachvollziehbar bleiben.

5.2 Architektur und Komponenten des integrierten Konzeptmodells

Den Kern des vorgestellten Ansatzes bilden vier Basiskomponenten, die in Abb. 5.2 (a) dargestellt sind. Diese Basiskomponenten werden durch das sog. *Konzept-Framework* konsistent miteinander zu einer logischen Einheit verbunden.

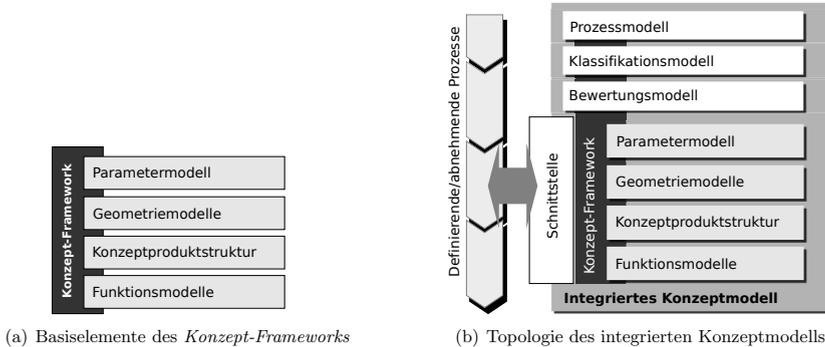


Abb. 5.2: Komponenten des integrierten Konzeptmodells

Das *Parametermodell* beinhaltet die formale Beschreibung der Konzeptgrößen (Parameter), deren Attribute, sowie mögliche Verknüpfungen auf Parameterebene. Unter Parametern werden im vorliegenden Ansatz technische Fahrzeugeigenschaften wie beispielsweise Maße, Volumina oder Massen verstanden, aber auch modelleigene Parameter wie etwa Optionen zur Variantensteuerung oder Sichtbarkeitsverwaltung. Dabei kann es sich zum Beispiel um die Anzahl an Türen oder Sitzen handeln, oder ob das Modell ein links- oder rechtslenkendes Fahrzeug repräsentiert. Des Weiteren umfasst das Parametermodell Berechnungen, die der Darstellung einfacher mathematischer Beziehungen in einem übergeordneten Kontext, wie etwa durch Gleichungen oder lineare Gleichungssysteme, dienen (s. Kap. 5.3.1).

Geometriemodelle bilden alle geometrischen Zusammenhänge im Rahmen eines Konzeptes ab. Hierzu zählen alle Varianten von Geometriemodellen, angefangen von einfachen 2D-Schnitten bis hin zu komplexen parametrisch-assoziativen 3D-CAD-Modellen. Die primäre Nutzung von Geometriemodellen aus Gesamtfahrzeugsicht ist die Bauraumfestlegung und die Absicherung resultierender Bauräume. Zweiter zentraler Aspekt der Geometriemodelle ist die Darstellung von funktionalen Perspektiven auf die Fahrzeuggeometrie, wie etwa durch spezielle Proportionsmodelle zur Abschätzung von Schwerpunktlage und Trägheitsmomenten (s. Kap. 5.4.2).

Funktionsmodelle sind erforderlich, um Funktionen auf Ebene des Gesamtfahrzeugs darstellen und davon abgeleitete Produktmerkmale analysieren und bewerten zu können. Diese sollen dem Fahrzeugarchitekten primär zur ersten funktionalen Validierung definierter Bauräume und Proportionen dienen. Detailfunktionen, welche nicht auf die Gesamtfahrzeugebene durchschlagen, d. h. auf den verantwortlichen Fachbereich begrenzt sind, sollen im Rahmen des vorliegenden

Ansatzes keine Betrachtung finden, da sie damit nicht in den Verantwortungsbereich der Fahrzeugarchitektur fallen. Aus Datensicht sollen Funktionen durch sowohl geometrische als auch verschiedene Arten von Berechnungs- und Simulationsmodellen dargestellt werden können (s. Kap. 5.4.3).

Die *Konzeptproduktstruktur* dient der Beschreibung und Strukturierung erforderlicher Komponenten eines Konzeptes. Diese umfasst neben typischen Umfängen wie etwa Bauteilen, Modulen oder Organisationselementen wie Zusammenbauten, funktional orientierte Inhalte wie etwa die Beschreibung unterschiedlicher Beladungszustände des Fahrzeugs. Die *Konzeptproduktstruktur* wird in Kap. 5.3.3 detailliert vorgestellt.

Eine konsistente Vernetzung der einzelnen Komponenten untereinander soll das sogenannte *Konzept-Framework* herstellen. Es bildet somit die zentrale Klammerfunktion im integrierten Konzeptmodell (s. Kap. 5.4). Dieses soll bei etwaigen Parameteränderungen oder geometrischen Modifikationen die Konsistenz im Gesamtmodell sicherstellen und betroffene Modellbereiche automatisch aktualisieren, bzw. erforderliche Maßnahmen zur Sicherstellung der Konsistenz initiieren.

Diese Grundelemente sind gemäß den Ausführungen in Kap. 5.1 nicht ausreichend, um die Aufgabenstellungen auf Gesamtfahrzeugebene hinreichend zu unterstützen. Daher soll das in Abb. 5.2 (a) dargestellte Grundkonstrukt um die in Abb. 5.2 (b) dargestellten Bausteine komplettiert werden.

Im sogenannten *Bewertungsmodell* werden alle Informationsbausteine definiert, welche für die strukturierte Darstellung von getätigten Bewertungen im Kontext des Konzeptes erforderlich sind. Neben der reinen Datenbeschreibung soll das *Bewertungsmodell* um eine semantische Ebene erweitert werden, die entsprechend der Forderung nach Reproduzierbarkeit von Bewertungen eine spezielle Bewertungssprache definiert, die sich an Regeln der logischen Deduktion orientiert und damit ein *Regelwerk zur Gestaltung von Bewertungsätzen* bereitstellt.

Ein wichtiger Aspekt in der Entwicklung technischer Produkte stellt aus Datensicht die Fähigkeit der Datenklassifikation dar, d. h. die Kontextualisierung von Informationen. Darunter soll im Rahmen des vorliegenden Ansatzes die Möglichkeit verstanden werden, Bestandteile des Konzeptmodells entweder entsprechend ihrer Archetypen, wie etwa Parameter, Funktion oder Geometrie, zu strukturieren, oder anhand definierter semantischer oder technischer Kriterien zu klassifizieren. Das *Klassifikationsmodell* beschreibt hierzu die erforderliche Gruppierung und Organisation von Daten entsprechend prozessualer oder inhaltlicher Erfordernisse.

Das *Prozessmodell* soll der Einordnung von Objekten des Konzeptmodells in einen übergeordneten prozessualen Kontext dienen. Dadurch wird die Grundlage geschaffen, um im Rahmen des integrierten Konzeptmodells Workflows zu modellieren. Dadurch lassen sich etwa erforderliche Arbeitsschritte zur Festlegung von geometrischen Eckpfeilern eines Konzeptes, wie etwa des Sitzreferenzpunktes (s. Kap. 3.3.2), darstellen und nachvollziehen.

Die letzte Komponente des integrierten Konzeptmodells stellt das *Schnittstellenmodul* dar. Schnittstellen werden aus zwei wesentlichen Gründen benötigt: Einerseits müssen Informationen aus vorangehenden Schritten im Entwicklungsprozess, oder im Sinne einer Initialbedatung, strukturiert übernommen werden können (z. B. Zielwerte), andererseits müssen Daten und Informationen die im Rahmen der Konzeptentwicklung entstehen an abnehmende Prozessschritte ausgeleitet werden können, um eine nahtlose und durchgängige Datenprozesskette zu unterstützen.

Einen Überblick über die grundlegenden Verknüpfungen im Kontext des integrierten Konzeptmodells gibt Abb. 5.3. Auf die detaillierten Gegebenheiten der einzelnen Submodelle soll in den folgenden Unterkapiteln eingegangen werden.

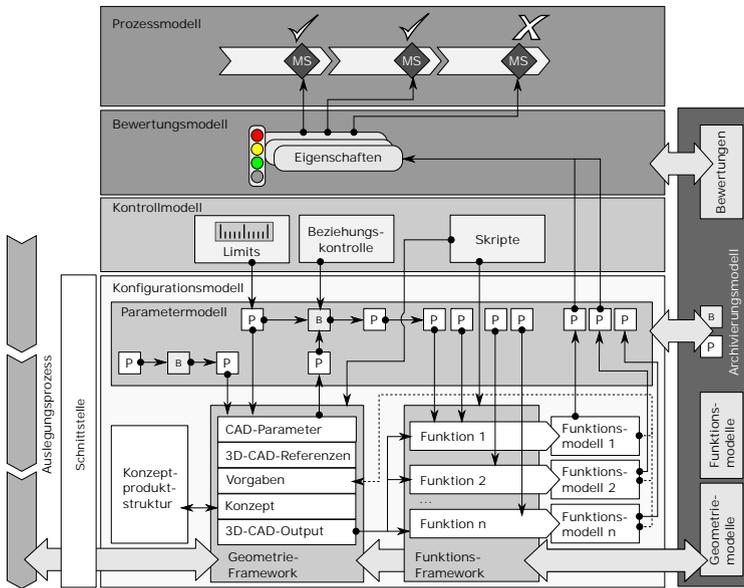


Abb. 5.3: Übersicht der Workflows im integrierten Konzeptmodell

Den zentralen Dreh- und Angelpunkt des integrierten Konzeptmodells stellt das Parametermodell dar. Dieses ist nach unten bidirektional mit den technischen Geometrie- und Funktionsmodellen verbunden und bildet mit ihnen zusammen das technische Fahrzeugkonzept. Nach oben hin werden die Parameter des integrierten Konzeptmodells in den Bewertungen genutzt, um Aussagen zu technischen Eigenschaften des Modells tätigen zu können und diese eindeutig nachzuvollziehen. Diese Eigenschaften können in weiterer Folge zur Steuerung im Prozessmodell genutzt werden, um die Erfüllung und Qualität geforderter Eigenschaften im Kontext des Prozesses einzufordern.

Aus der Prozesssicht ist ein wesentliches Merkmal des integrierten Konzeptmodells die Informationsgliederung in Ziel-Zustand und Ist-Zustand (s. Abb. 5.4).

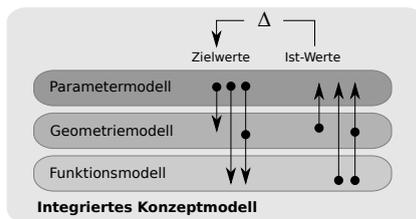


Abb. 5.4: Zustandsschema von Konzeptinformationen im integrierten Konzeptmodell

Der Ziel-Zustand setzt sich aus den technischen und formalästhetischen Fahrzeuganforderungen und den Bauraumvorgaben seitens der Fahrzeugarchitekturabteilung zusammen. Demgegenüber steht der Ist-Zustand des Konzeptes, der aus den aktuellen Package-Gegebenheiten sowie darauf aufbauender funktionaler Produktmerkmale entsteht. Damit wird der typische Arbeitsablauf aus Perspektive des Fahrzeugarchitekten wiedergegeben: Auf Basis der definierten Vorgaben entstehen Bauräume, welche mit der erforderlichen Technik belegt werden. Diese werden durch die Fahrzeugarchitekturabteilung auf ihre geometrische und funktionale Stimmigkeit hin überprüft und mit den geforderten Vorgaben verglichen.

5.3 Komponenten des integrierten Konzeptmodells

5.3.1 Das Parametermodell

Das Parametermodell des integrierten Konzeptmodells setzt sich entsprechend Abb. 5.5 aus zwei Grundobjekten zusammen: dem Parameterobjekt und dem Berechnungsobjekt. Parameter sind wertbehaftete Objekte, die etwa eine geometrische oder funktionale Eigenschaft repräsentieren. Berechnungsobjekte sollen der Darstellung mathematischer Abhängigkeiten zwischen Parametern dienen und können prinzipiell eine rein unidirektionale Berechnung aufweisen, oder ein bidirektionales Berechnungsverhalten besitzen.

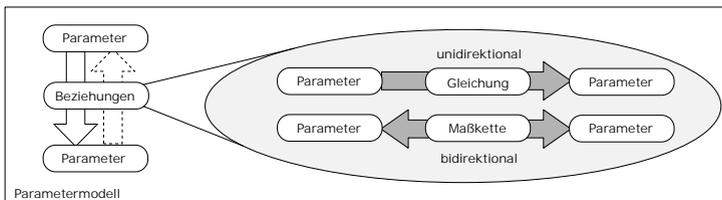


Abb. 5.5: Überblick über das Parametermodell

Parameter können im Rahmen des Ansatzes sowohl zur Beschreibung einer technischen Eigenschaft, wie etwa einer Länge, als auch zur Darstellung von Modelloptionen, etwa zur Steuerung von vorhandenen Varianten genutzt werden. Parameter werden daher durch entsprechende Objekte repräsentiert, die primär der Aufnahme eines Wertes, dem Parameterwert, und zusätzlichen beschreibenden Metainformationen dienen. Das Parametermodell dient folglich der strukturierten Beschreibung erforderlicher parametrischer Informationen im Kontext eines Fahrzeugkonzeptes. Aus Perspektive des Wertes kann ein Parameter die folgenden Formen annehmen:

- Singulärer Wert (numerisch, textuell, boole)
- Wertefeld (numerisch, textuell, boole)
- Verweis auf einen externen Datensatz (z. B. Kennfeld)

Neben dem eigentlichen Wert sind viele weitere Eigenschaften erforderlich, um eine zielgerichtete Nutzung von Parametern im Gesamtfahrzeugkontext zu unterstützen. Diese sind in Abb. 5.6 dargestellt. Demnach setzt sich ein Parameter aus den folgenden vier Kerninformationsobjekten zusammen:

1. Definition
2. Information
3. Werte
4. CAx-Abbildung

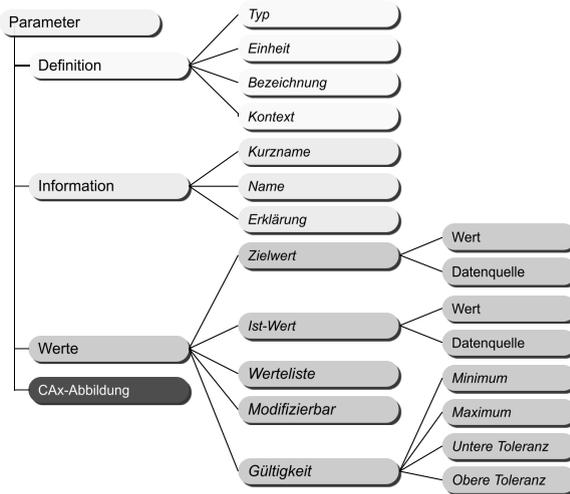


Abb. 5.6: Aufbau eines Parameterobjektes

Das Objekt *Definition* beinhaltet alle Attribute, welche die eigentliche Spezifikation des Parameters beinhalten. Dies umfasst den *Typ*, eine optionale *Einheit* im Falle dimensionsbehafteter Größen, die *Bezeichnung* des Parameters, sowie den *Kontext* im Rahmen des integrierten Konzeptmodells. Das Attribut *Typ* beinhaltet die eigentliche Festlegung der Beschaffenheit des Parameters, d. h. dessen Archetyp. Das Attribut *Einheit* ermöglicht das Mitführen des Einheitenkürzels im Falle dimensionsbehafteter Größen, wie etwa einer Länge oder eines Winkels. Das Attribut *Bezeichnung* hält die textuelle Bezeichnung des Objektes. Diese ist im gesamten Datenmodell eindeutig, wodurch eine eindeutige Identifikation des betreffenden Parameterobjektes innerhalb des Datenmodells ermöglicht wird. So könnten theoretisch mehrere Parameter mit dem *Kurznamen* L103 existieren, ein Parameter mit der Bezeichnung *FAHRZEUGLAENGE* kann jedoch genau einmal existieren, da ansonsten eine Mehrdeutigkeit im Parametersystem entsteht. Die Attribute, welche dem Grundobjekt *Definition* untergeordnet sind, dürfen nach initialer Festlegung aus Gründen der Integrität nicht mehr geändert werden, da ansonsten Aussagen, welche auf einem bestimmten Modellstand fußen, nicht mehr nachvollziehbar sind. Aus dem Blickwinkel der physikalischen Integrität darf sich daher nicht der *Typ*, wohl aber die *Einheit* ändern, da beispielsweise aus einem Längenmaß kein Winkelmaß entstehen kann.

Das Objekt *Information* inkludiert deskriptive Attribute, welche nähere Beschreibungen zu dem Parameter liefern und daher ausschließlich der weiterführenden Information dienen. Dazu zählen *Kurzname*, *Name* und optional das Attribut *Erklärung*. Der *Kurzname* entspricht einer Kurzform oder einem Kürzel des Attributes *Name*. Der *Kurzname* ist insbesondere für die Suche nach Parametern, aber auch für die Anzeige und Benennung von technischen Bemaßungen ein

wichtiges Instrument, das dem klassischen Maschinenbau entstammt. Das Attribut *Erklärung* ermöglicht die Anführung von Erläuterungen zum jeweiligen Parameter.

Das dritte Grundobjekt *Werte* beherbergt alle weiteren Datenobjekte, die dem Mitführen von erforderlichen Werten dienen. Diese sind entsprechend prozessualen Anforderungen gestaltet und umfassen in der ersten Unterebene die folgenden Objekte:

- Ziel-Wert
- Ist-Wert
- Werteliste
- Modifikationsstatus
- Gültigkeit

Die beiden zentralen Informationsbausteine stellen hier das Objekt *Ziel-* und *Ist-Wert* dar. Der *Zielwert* entspricht dem Sollwert im Sinne einer technischen Vorgabe. Im Zusammenspiel mit dem Objekt *Gültigkeit* lässt sich somit ein gültiger Zielbereich definieren. Der Zielwert ist jedoch prinzipbedingt optional und kann daher leer sein. Dem Zielwert gegenüber steht der *Ist-Wert*, der sich aus den aktuellen Konzeptkonstellationen ergibt. Sowohl *Ziel-* als auch *Ist-Wert* repräsentieren eine Instanz des Werteobjektes. Beide verfügen über jeweils ein Attribut für die Aufnahme des eigentlichen Wertes, sowie ein weiteres Attribut zur Speicherung der *Datenquelle*, d. h. den Ursprung des Wertes. Da insbesondere bei Zielwerten viele unterschiedliche Bereiche und Abteilungen in einem Unternehmen bei der Zielwertdefinition involviert sind, ist es im Sinne der Nachvollziehbarkeit von zentraler Bedeutung, über die Herkunft des Wertes Bescheid zu wissen.

Die *Werteliste* ist ein Speicher für mögliche Werte des Parameters. Für einen Parameter kann daher im Zusammenspiel mit dem Attribut *Nur Werteliste nutzen* die Wertebelegung gesteuert werden. Ist diese Option aktiv, sind andere Werte als die im Wertespeicher nicht zulässig, während im inaktiven Fall die Werte zwar genutzt werden können, aber nicht müssen.

Das Attribut *Modifizierbar* ermöglicht die Steuerung der Bearbeitbarkeit eines Parameters. Zielwerte, die als Eckpfeiler eines Konzeptes fungieren, können so zielgerichtet „festgehalten“ werden und die Freiheitsgrade des Konzeptlösungsraums lassen sich zielgerichtet einschränken. Das Objekt *Gültigkeit* beinhaltet Grenzen für Parameter dimensionsbehalteter oder numerischer Art, innerhalb derer der Wert Gültigkeit besitzt. Die Attribute *Minimum* und *Maximum* definieren hierbei jeweils die untere und obere maximale Schranke des Wertes, welche weder unter- noch überschritten werden kann und der Plausibilisierung von Werten dienen soll. Die Attribute *Untere Toleranz* und *Obere Toleranz* stellen ebenfalls Gültigkeitsbereiche dar, die jedoch keine Zwangsbedingung darstellen (s. Abb. 5.7). So lässt sich etwa in einem Fahrzeugprojekt für die Fahrzeughöhe ein generelles Minimum von 1000 mm und ein Maximum von 2000 mm definieren. Diese Zahlenwerte können stellvertretend für Grenzwerte stehen, die in jedem Fall eingehalten werden müssen. Eine optimale Fahrzeughöhe aus Ergonomiesicht würde sich in einem Bereich von 1450 mm und 1510 mm bewegen, weswegen diese Werte für den Toleranzbereich festgelegt werden können.

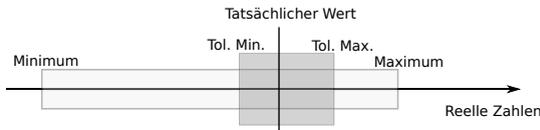


Abb. 5.7: Gültigkeitskriterien eines singulären numerischen Parameterwertes

Im Zusammenspiel mit dem *Konzept-Framework* (s. Kap. 5.4) lässt sich dadurch für alle Parameterobjekte, im Falle von Werteänderungen, die Einhaltung festgelegter Grenzwerte sicherstellen, bzw. lassen sich Konflikte zur bestehenden Anforderungssituation transparent aufzeigen.

Das Attribut *CAX-Abbildung* definiert eine Zuordnung des Parameters zu seinem äquivalenten Automationsobjekt im jeweils genutzten Autorensystem. Im Falle eines CAD-Systems wäre dies z. B. ein CAD-Parameterobjekt. Dieses Attribut ist aus praktischen Implementierungsgründen erforderlich: Im vorgestellten Ansatz kann der bestehende Parameterumfang beliebig erweitert werden. Wie in Kap. 5.4.2 gezeigt wird, werden die Parameterobjekte im *Geometrie-Framework* in Form von CAD-Parametern abgebildet. Da sich in der Praxis zeigt, dass die Performanz von parametrisch-assoziativen Modellen bei hoher Anzahl an Parametern und Beziehungen merkbar abnimmt, ermöglicht das Attribut *CAX-Abbildung* eine bewusste Steuerung der Erzeugung von CAD-Parametern im jeweiligen CAD-Modell. Damit sollen nur diejenigen Parameter im Modell verfügbar sein, die tatsächlich in den jeweils gekoppelten Modulen benötigt werden. Sind weitere Parameter erforderlich, werden diese bedarfsgerecht über das *Konzept-Framework* automationsgestützt generiert.

Neben den eigentlichen Parameterobjekten umfasst das Parametermodell sogenannte *Berechnungsobjekte*. Den grundsätzlichen Aufbau zeigt Abb. 5.8:

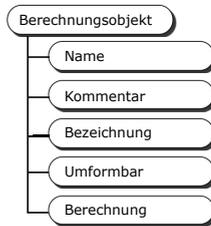


Abb. 5.8: Aufbau des Berechnungsobjektes

Diese dienen der Darstellung einfacher mathematischer Gegebenheiten im Rahmen des Gesamtfahrzeugs, wie beispielsweise Maßketten. Dies ist aus Sicht der inhaltlichen Reproduzierbarkeit erforderlich, da sich maßliche Zusammenhänge auf Gesamtfahrzeugebene durchaus in ihrer Festlegung sowie Evaluierungsrichtung ändern können. Dies soll am Beispiel der SgRP-Festlegung erläutert werden: Typischerweise wird zum Beginn eines Fahrzeugprojektes der Sitzreferenzpunkt über den vertikalen Abstand von der Fahrbahn (H5-1) und den horizontalen Abstand zur Vorderachse (L114) festgelegt (s. Abb. 5.9). Dadurch sind dessen absolute Koordinaten in der Y-Ebene des Fahrzeugs automatisch definiert (L31-1, H70-1). Zu späteren Zeitpunkten wird der Punkt jedoch üblicherweise über dessen räumliche Koordinaten modifiziert, wodurch die beiden

Maße L31-1 und H70-1 zu steuernden Maßen werden und die ursprünglich steuernden Maße H5-1 und L114 zu errechneten Referenzmaßen werden.

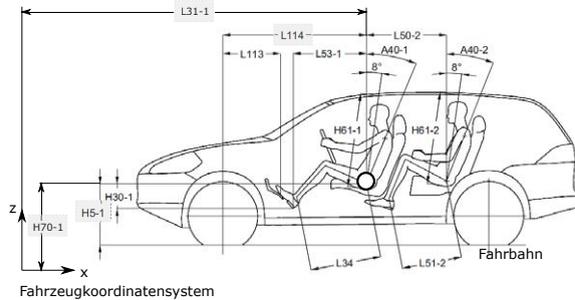


Abb. 5.9: Steuerungsmöglichkeiten des SgRP im Fahrzeug in Anlehnung an [15]

Im vorliegenden Ansatz soll daher zwischen nicht-transformierbaren und transformierbaren Berechnungsobjekten unterschieden werden. Nicht-transformierbare Berechnungsobjekte können grundsätzlich jeglichen mathematischen Formalismus darstellen während für transformierbare Berechnungsobjekte lediglich lineare Gleichungen zulässig sind. Abb. 5.10 zeigt hierzu die grundlegenden Zusammenhänge zwischen den Parametern und den jeweiligen Berechnungsobjekten auf.

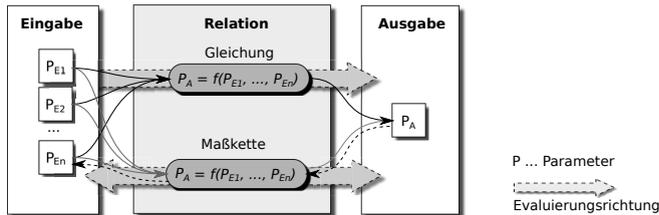


Abb. 5.10: Verknüpfung von Parametern und Beziehungen im Parametermodell

Parameterobjekte (P) können grundsätzlich über eine mathematische Relation andere Parameterwerte bestimmen. Nicht-transformierbare Relationen lassen sich nach einmaliger Erstellung in ihrer Grundaussprägung nicht mehr ändern und entsprechen damit klassischen Gleichungen, wie sie heute in nahezu allen kommerziellen parametrisch-assoziativen CAD-Werkzeugen bereitgestellt werden. So lässt sich etwa der Radstand (L101) eines Fahrzeugs über die Differenz der x-Radkoordinaten in der Messlast 1 errechnen:

$$L101 = x_{hi,1} - x_{vo,1} \tag{5.1}$$

Hierbei repräsentieren $x_{vo,1}$ und $x_{hi,1}$ die Vorderrad- sowie die Hinterradkoordinate in x-Richtung in der Messlast 1. Ein gedankliches „Festhalten“ des Radstandes zur Berechnung einer der anderen Variablen ist daher in diesem Fall nicht möglich. Für viele Fälle der Nutzung parametrisch-assoziativer CAD-Modelle ist eine solche Relation ausreichend. Aus Sicht der Konzeptentwicklung gehen jedoch starre Relationen mit vielen Nachteilen einher. Viele Fragestellungen im Kontext der Konzeptentwicklung auf Gesamtfahrzeugebene verlangen nach der Darstellung unter-

schiedlicher Parametrierungsszenarien (s. Kap. 5.4.5). Daher wird im vorliegenden Ansatz zusätzlich die Definition von transformierbaren Relationen ermöglicht, die primär der Abbildung von Maßketten dienen soll. Hierbei kann jeder beteiligte Parameter sowohl als Eingabe- als auch als Ausgabeparameter fungieren.

5.3.2 Geometriemodelle

Geometriemodelle stellen heute den zentralen Eckpfeiler für die Architekturentwicklung dar. Innerhalb der frühen Konzeptphase treten diese in unterschiedlicher Form auf. Der Bogen spannt sich von verschiedenen Typen von CAD-Datensätzen wie etwa Zeichnung, 3D-Bauteil oder Zusammenbau bis hin zu unterschiedlicher Semantik und Verbindlichkeit. Im Kontext des vorliegenden Ansatzes stellen Geometriemodelle keine eigenen Datenmodelle dar, sondern obliegen den jeweiligen Fähigkeiten genutzter CAD-Systeme. Im Sinne einer durchgängigen Integration von Geometriemodellen innerhalb eines integrierten Konzeptmodells sollen die in Abb. 5.11 dargestellten Eigenschaften näher betrachtet werden:

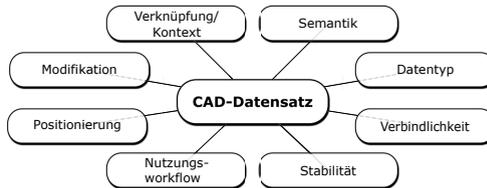


Abb. 5.11: Themenfelder in der Integration von CAD-Datensätzen im Gesamtfahrzeugkontext

5.3.2.1 CAD-Datentypen

Aus Perspektive des Datentyps sollen vor dem Hintergrund eines virtuellen Gesamtfahrzeugs alle CAD-Datenformen nutzbar sein, wie sie bereits in Kap. 4.1.4 beschrieben wurden. Dies umfasst folglich die nachstehenden Typen:

- Parametrisch-assoziative 3D-Modelle (Zusammenbauten und Bauteile)
- Assoziative 2D-Zeichnungsdokumente
- Grafische 3D-Modelle (Hüllen, Scan-Daten ...)

Wie an späterer Stelle noch gezeigt wird, ist der geometrische Kern des integrierten Konzeptmodells ein parametrisch-assoziatives Führungsmodell in Form eines logisch gegliederten Zusammenbaus. CAD-Daten in dreidimensionaler Form lassen sich daher grundsätzlich über die Zusammenbaufunktionalitäten einfügen. Im Falle parametrisch-assoziativer Teile/Zusammenbauten ist zusätzlich eine parametrische Verknüpfung zum Führungsmodell erforderlich; diese wird in Kap. 5.4.2 näher beschrieben.

Bei der Integration von Zeichnungsdokumenten sind deren Modifikations- und Verknüpfungsvarianten zu berücksichtigen:

- Isoliertes Zeichnungsdokument
- Assoziatives Zeichnungsdokument

Isolierte Zeichnungsdokumente können wie statische 3D-Geometrie gesehen werden, da sich keine Einflüsse oder Rückkoppelungen aus dem Führungsmodell ergeben. Bei der Integration von assoziativen Zeichnungsdokumenten ist darauf zu achten, ob das Dokument ausschließlich ableitende Informationen beinhaltet, oder auch eine steuernde Funktion assoziierter 3D-Dokumente besitzt. Da alle im Automobilbau verwendeten kommerziellen CAD-Systeme eine bidirektionale Parametrik zwischen Zeichnung und definierender 3D-Geometrie erlauben muss sichergestellt werden, dass durch die Nutzung im Kontext des integrierten Konzeptmodells keinerlei Zirkelbezüge entstehen, die zu einer unkontrollierbaren Inkonsistenz führen können.

5.3.2.2 Semantik von CAD-Modellen

Die *Semantik* bezieht sich auf die inhaltliche Bedeutung von CAD-Daten. So kann etwa ein 3D-CAD-Datensatz neben dem primär angedachten Zweck zur Darstellung eines physischen Bauteils oder eines Zusammenbaus zur Nutzung alternativer Aufgaben verwendet werden. Abb. 5.12 zeigt mögliche Bedeutungen von 3D-CAD-Datensätzen.

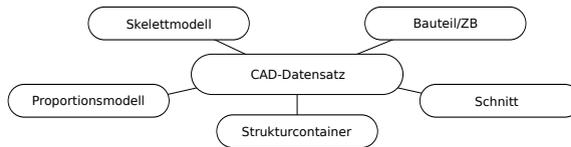


Abb. 5.12: Unterschiedliche Semantik von CAD-Datensätzen im Gesamtfahrzeugkontext

Skelettmodelle sind üblicherweise 3D-Teiledatensätze, welche zur globalen Steuerung komplexer Baugruppen dienen. Diese beinhalten sämtliche geometrischen Referenzen, die über geeignete Assoziationen mit untergeordneten Bauteilen/Baugruppen verbunden sind. *Proportionsmodelle* wurden bereits in Kap. 3 diskutiert. Diese dienen der Analyse von Bauraumproblemen und sind im Regelfall so modelliert, dass die wesentlichen Bauraumverhältnisse dargestellt und damit bewertet werden können ohne eine aufwändige ausdetaillierte 3D-Konstruktion durchführen zu müssen. Ein *Schnitt* stellt eine 2D-Geometrie innerhalb eines 3D-Datensatzes dar. Dieser kann entweder auf Basis vorhandener 3D-Geometrie erstellt werden, oder stellt einen sogenannten Vorgabe- oder Prinzipschnitt dar. *Strukturcontainer* sind Baugruppen, deren Struktur nicht der üblichen Teilegruppierung im Sinne eines physischen Zusammenbaus dient, sondern eine definierte Datenstruktur repräsentiert, wie sie auch in dem vorliegenden Ansatz genutzt wird (s. Kap. 5.3.3).

5.3.2.3 Modifikation von CAD-Datensätzen

Eine weitere Dimension in der Betrachtung von CAD-Datensätzen ist deren *Modifizierbarkeit* (s. Abb. 5.13). Hiermit ist die bewusste Modifikation im Rahmen eines Fahrzeugprojektes gemeint. Im Kontext des vorliegenden Ansatzes soll daher zwischen statischer und bearbeitbarer Geometrie unterschieden werden: Statische 3D-Geometrie umfasst hierbei sämtliche Daten, die nicht im Rahmen eines parametrisch-assoziativen CAD-Programms mittels Änderung von Parametern oder Assoziationen modifiziert werden können. Dies schließt alle Arten von Hüllen, 2D-Schnitten,

Norm- und Übernahmeteile sowie neutrale CAD-Daten ein¹⁶. Parametrisch-assoziative Datensätze repräsentieren CAD-Modelle, die sich im originären CAD-Programm durch die jeweiligen Modellparameter oder entsprechende Geometrieadjustierungen modifizieren lassen.

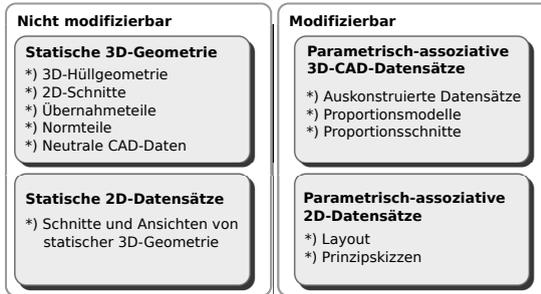


Abb. 5.13: Modifikation von CAD-Datensätzen im Gesamtfahrzeugkontext

5.3.2.4 Positionierung von CAD-Datensätzen

Neben den bereits genannten Herausforderungen ergeben sich weitere Anforderungen in Hinblick auf die Positionierung im Fahrzeug. Im Falle von Übernahmeteilen spielt die zugrundeliegende Konstruktionsmethodik und Erstellungsgeschichte eine große Rolle. Für die Positionierung von Bauteilen und Baugruppen finden im Wesentlichen drei Verfahren Anwendung, wie in Kap. 4 ausgeführt: Die Positionierung über geometrische Bedingungen, die Nutzung von Transformationsmatrizen und das Konstruieren von Bauteilen in Einbaulage (s. Abb. 5.14).

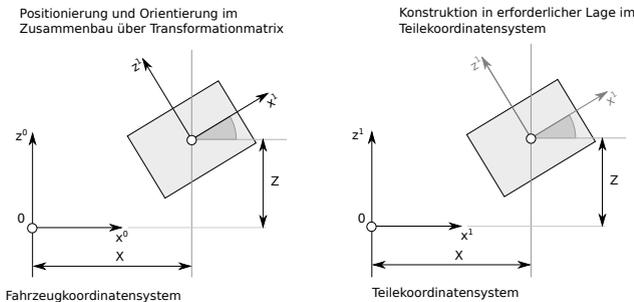


Abb. 5.14: Unterschiedliche Positionierungsverfahren in der 3D-Konstruktion

Für konventionelle Bauteile mag dies auf den ersten Blick keine besondere Relevanz aufweisen, sehr wohl für alle positionsbasierten grafikorientierten Bauteile wie etwa Hüllen. Als Beispiel sei etwa die Nutzung VRML-basierter Geometrie angeführt. Wie in Kap. 4 beschrieben, ist VRML eine Möglichkeit einer neutralen Geometriebeschreibung. Diese wird u. a. etwa in FEM-Systemen genutzt. In Abb. 5.15 werden beispielsweise vorhandene VRML-Daten genutzt, um einen

¹⁶Anmerkung: Eine Änderung solcher Geometrie ist selbstverständlich über verschiedene Morphing-Funktionen (s. auch Kap. 4.1.2.2 und 4.1.2.1) möglich. Da solche Modifikationen jedoch im vorliegenden Ansatz nicht parametrisch erfassbar sind, sollen diese Funktionalitäten von weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden. Werden gemorphte Datensätze genutzt, so ist dies in der Anmerkung des Datensatzes anzuführen (s. Kap. 6).

Bauraum zu analysieren. Im vorliegenden Fall sind die VRML-Daten bereits positioniert erstellt worden, d. h. diese weisen beim Import in das jeweilige CAD-System bereits die richtige Lage und Orientierung auf.



Abb. 5.15: Vorpositionierte CAD-Daten auf Basis VRML-Import

Im CAD-System sind die Teile an der richtigen Stelle, eine Positionsinformation in Form einer Positionsmatrix ist jedoch nicht mehr vorhanden. Daher können Positionierungen nur noch relativ erfolgen. Um eine konsistente Verschiebung durchzuführen, müssen an die jeweiligen Originalpositionen entsprechende Referenzstrukturen platziert werden (s. Kap. 5.3.3). In diese werden ein leeres Bauteil als Referenzadapter, sowie die eigentliche importierte VRML-Geometrie platziert. Durch geeignete Positionierung des Lageteils kann der gesamte Container nun konsistent lagerichtig im Raum positioniert werden.

5.3.2.5 Verbindlichkeit von CAD-Daten

Den letzten Aspekt stellt die *Verbindlichkeit* dar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist mit Verbindlichkeit die technisch inhaltliche *Härte* der geometrischen Darstellung gemeint. Im Gegensatz zur Modifizierbarkeit von CAD-Daten, die nur eine Aussage darüber trifft, ob Daten grundsätzlich modifiziert werden können oder nicht, legt die Verbindlichkeit fest, ob Änderungen in einem konkreten Fahrzeugprojekt an einem Teil zulässig sind oder nicht. So kann ein parametrisch-assoziativ aufgebautes Normteil grundsätzlich über seine Parameter modifiziert werden. Wird dieses aber in einem Fahrzeug verbaut, dürfen sich dessen Parameter und Gestalt nicht ändern. Ebenso müssen COPs im Falle von Abänderungen einer speziellen Kennzeichnung unterliegen. Im vorliegenden Ansatz sollen daher sämtliche genutzte CAD-Dokumente um ein spezifisches Modifikationsattribut erweitert werden. Die Verwendung dieses Attributes im Kontext des integrierten Konzeptmodells wird in Kap. 5.4.2 erläutert.

5.3.2.6 Kontext und Verknüpfung von CAD-Datensätzen

In der Diskussion des Standes der Technik in Kap. 4 werden die wesentlichen Eigenschaften parametrisch-assoziativer CAD-Systeme behandelt. Diese ermöglichen die Erzeugung von Verknüpfungen sowohl innerhalb eines Datensatzes als auch über dessen Grenzen hinweg. Aus Datensicht lassen sich grundsätzlich persistente Verknüpfungen zwischen Dokumenten und sog. kontextuelle Verknüpfungen identifizieren. Persistente Verknüpfungen zwischen Dokumenten sind stets gültig, während kontextuelle Verknüpfungen lediglich im Kontext des jeweiligen Zusammenbaus existieren. Als Beispiel sei ein einfacher Punkt eines Skelettmodells betrachtet.

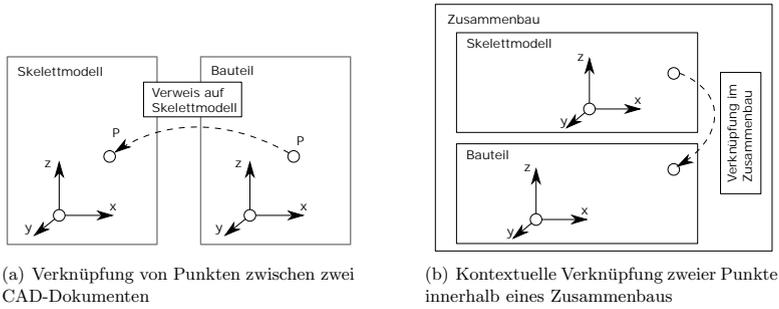


Abb. 5.16: Unterschiedliche Verknüpfungsformen zwischen CAD-Datensätzen in parametrisch-assoziativen CAD-Systemen

In Abb. 5.16 (a) verweist der Punkt aus dem Bauteil auf den Punkt im Skelettmodell. Jegliche Modifikation im Skelettmodell führt zu einer Änderung im verknüpften Bauteil. In Abb. 5.16 (b) ist der Punkt im Bauteil an den entsprechenden Skelettpunkt über eine kontextuelle Verbindung gekoppelt. Diese Verbindung existiert nur dann, wenn beide Datensätze im Zusammenbau, in dem die Verbindung definiert ist, geöffnet sind. Werden die beiden Datensätze unabhängig voneinander geöffnet, weisen die Elemente keinerlei Verbindung auf und können unabhängig voneinander bewegt werden.

5.3.2.7 Geometrische Modellstabilität

Ein zentrales Merkmal in der Einbindung von parametrisch-assoziativen 3D-CAD-Datensätzen in das integrierte Konzeptmodell stellt deren geometrische Stabilität infolge von Änderungen von Steuerungsgrößen, wie Parametern oder verknüpften geometrischen Elementen aus anderen CAD-Datensätzen, dar. Ein wesentlicher Faktor besteht daher in der sorgfältigen Planung des Modellaufbaus, sowie der Berücksichtigung möglicher Modellvarianten und -erweiterungen in Hinblick auf zukünftige Applikationsszenarien. Die geometrische Modellstabilität ist von hoher Bedeutung, da eines der wesentlichen Ziele des integrierten Konzeptmodells die autonome Parametrierung der genutzten geometrischen Konzeptmodelle darstellt. Diese kann nur gewährleistet werden, wenn die im Kontext des integrierten Konzeptmodells genutzten Modelle innerhalb technisch sinnvoller Parametergrenzen stabil bleiben und nicht nach einem Eingriff durch einen Anwender verlangen. Die geometrische Modellstabilität wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Abb. 5.17 stellt hierzu die wichtigsten Kriterien im Kontext des integrierten Konzeptmodells dar. Gestaltungsrichtlinien für die Einbindung neuer Geometriemodelle in das integrierte Konzeptmodell werden in Kap. 5.4.2.7 diskutiert.

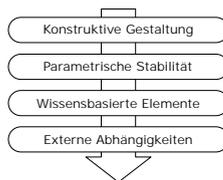


Abb. 5.17: Kriterien geometrischer Stabilität von CAD-Modellen

Die gewählte Modellierungsstrategie eines CAD-Modells legt den Grundstein für dessen Stabilitätsverhalten. Gemäß den Ausführungen in Kap. 4.1.2.3 ist in der Modellierung darauf zu achten, dass keine Features und Konstruktionsabfolgen verwendet werden, die bereits von Natur aus Instabilitäten in das Modell tragen können (s. Abb. 5.18).

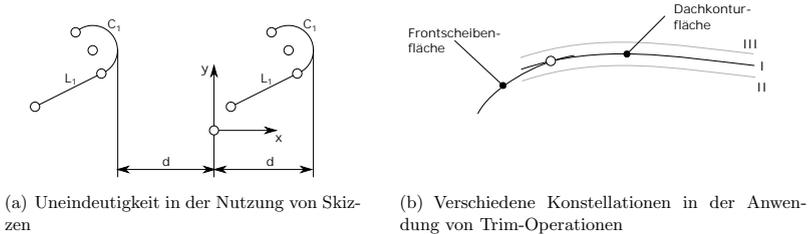


Abb. 5.18: Beispiele für geometrische Instabilität

So ist etwa im Falle der Nutzung von Skizzen eine hohe Sorgfalt in deren Aufbau geboten [13]. Skizzen verwenden Bedingungen, wie beispielsweise Maße und geometrische Restriktionen, um die Geometrie zu steuern, zu positionieren und zu referenzieren. Diese repräsentieren Gleichungssysteme, die bei jeder Änderung involvierter Modellbereiche neu gelöst werden müssen. Hierbei kann es in bestimmten Fällen zu geometrischen Uneindeutigkeiten kommen, da z. B. Maße keine definierte Orientierung in einer Skizze aufweisen. Wie in Abb. 5.18 (a) dargestellt, sind beide Bemäßigungsvarianten aus dem Blickwinkel des CAD-Systems „richtig“, obwohl eigentlich die rechte Variante gewünscht ist. Eine weitere Herausforderung stellen etwa Flächenkonstruktionen dar. Wie später noch in Kap. 6.3.2 gezeigt wird, werden zur Darstellung räumlicher Verhältnisse oft Flächenmodelle genutzt. So entsteht etwa das Exterieur-Proportionsmodell, das in der praktischen Evaluierung des vorliegenden Ansatzes genutzt wird, aus einer Vielzahl an sogenannten Trim-Operationen. Dabei werden zwei oder mehrere Fläche miteinander verbunden; die Flächen müssen sich hierbei überschneiden. Abb. 5.18 (b) zeigt eine Trim-Operation um einen Teil des Greenhouse¹⁷ zu erstellen. Hierzu werden zwei gekrümmte Flächen getrimmt. Dabei kann es zu mehreren Fehlern kommen: Ist die Fläche in ihrer z-Position zu hoch (Fall III) oder zu niedrig (Fall I), existiert keine Verschneidung mit der Frontscheibenfläche und die Operation führt zu einem Fehler im CAD-System. In solchen Fällen ist in der Ausführung der Konstruktion darauf zu achten, dass die Flächen entweder im gültigen Parameterraum stets zu einer Lösung im gültigen Parameterraum führen, oder die Aktualisierung an dieser Stelle unterbrochen und nachfolgende Features inaktiviert werden. Ein Beispiel dazu wird in Kap. 5.4.5 diskutiert.

Ein weiteres Hilfsmittel in der Beeinflussung der Stabilität stellen wissensbasierte Elemente dar (s. Kap. 4.1.5). So lassen sich etwa Regeln und automatisierte Abläufe in ein Bauteil oder Produkt hinterlegen, welche eine automatische Prüfung der Konstruktion im Falle einer Modelländerung vornehmen und bei Bedarf entsprechende Korrektur- bzw. Steuerungsmaßnahmen einleiten können. Hierfür verantwortlich ist die Fähigkeit moderner CAD-Systeme, Elemente aus der objektorientierten und ereignisbasierten Programmierung zu nutzen (s. Abb. 5.19). Jedes Feature kann je nach Implementierung im CAD-System definierte Ereignisse erzeugen. Dies kann etwa eine Aktualisierung, eine Änderung eines Parameterwertes oder eine Änderung in der Konstruktionshistorie sein. Wird eine Aktualisierung eines Features vorgenommen, so wird

¹⁷Das Greenhouse bezeichnet den Fahrzeugbereich oberhalb der Brüstungslinie.

typischerweise das Ereignis „Update“ ausgelöst. Auf diese Ereignisse kann über die Bereitstellung von wissensbasierten Elementen im CAD-System eine adäquate Reaktion erfolgen. Diese Reaktion kann beispielsweise im Ausführen eines Skriptes, oder einer einfachen Deaktivierung von definierten Features bestehen.

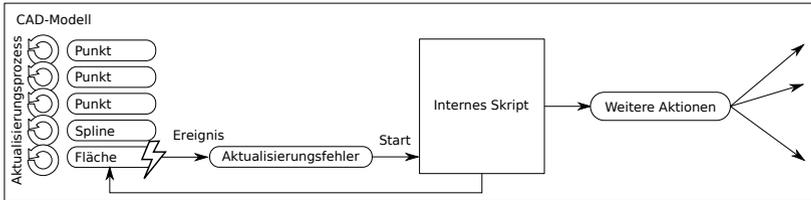


Abb. 5.19: Ausführung von ereignisgesteuerten Aktionen in einem CAD-Datensatz

Im Beispiel in Abb. 5.19 wird etwa eine Fläche auf Basis eines Splines extrudiert, der über drei Punkte im Raum definiert wird. Es können nun geometrische Konstellationen auftreten, welche die Erzeugung einer Extrusionsfläche verhindern, wie z. B. eine Singularität. Dies führt im Falle einer Aktualisierung zu einem Fehler im CAD-System, da die Fläche nicht berechnet werden kann und darauf aufbauende Konstruktionsschritte nicht aktualisiert werden können. Dies löst in weiterer Folge ein Fehler-Ereignis aus, auf das mit einem implementierten internen Skript reagiert wird. Dieses deaktiviert das fehlerhafte Feature (in diesem Fall die Extrusionsfläche) sowie alle abhängigen nicht aktualisierbaren Features, wodurch der Aktualisierungszyklus des Modells nicht unterbrochen wird. Des Weiteren lassen sich weitere Modellereignisse initiieren, wodurch sich komplexe Steuerungsmöglichkeiten und Varianten im Modell realisieren lassen können.

Alle im Automobilbau eingesetzten kommerziellen CAD-Systeme ermöglichen gemäß Kap. 4.1.2.3 die Assoziation von geometrischen Features über die Bauteilgrenzen hinweg. Hierbei ist darauf zu achten, dass alle topologischen Varianten entsprechend im Modell verarbeitet werden können. Im Falle der Einbindung bestehender Modelle ist deren nachträgliche Restrukturierung sowie die Implementierung entsprechender Kontrollstrategien oft mit einem zu hohen Arbeitsaufwand verbunden. Diese Modelle sollen im vorliegenden Ansatz daher ausschließlich über das Kontrollmodell in ihrer Ausprägung gesteuert werden.

5.3.3 Die Konzeptproduktstruktur

Die Konzeptproduktstruktur dient grundsätzlich der Festlegung erforderlicher Bauteile und Komponenten für das Fahrzeugkonzept sowie deren bautechnischer und funktionaler Gliederung. Des Weiteren soll die Konzeptproduktstruktur als Informationsbasis für alle produktstrukturaffinen Themen, wie etwa dem Massenmanagement, festgelegt werden. Es bietet sich daher an, die den jeweiligen Elementen der Konzeptproduktstruktur zugeordneten Metainformationen ebenfalls dort zentral zu verwalten. In den nachstehenden Abschnitten sollen der erforderliche Inhalt sowie die Abbildung der Konzeptproduktstruktur im CAD beschrieben werden.

5.3.3.1 Grundsätzliche Gliederung der Konzeptproduktstruktur

Die grundsätzliche Gliederung der Konzeptproduktstruktur entspricht der einer typischen CAD-Produktstruktur, wie sie in Kap. 4.1.4 beschrieben wird. Elemente können darin über eine eindeutige Teilenummer identifiziert werden; konkrete Exemplare eines Elementes werden über eine zusätzliche Exemplarbezeichnung differenziert. Aus semantischer Perspektive gliedert sich die Konzeptproduktstruktur in zwei zentrale Ebenen – die des Fahrzeugs selbst und die der Beladung (s. Abb. 5.20).

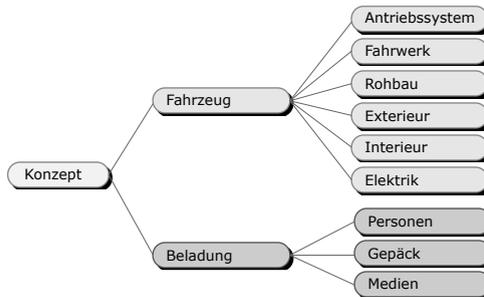


Abb. 5.20: Grundelemente der Konzeptproduktstruktur

Der Knoten *Fahrzeug* repräsentiert dabei das technische Gebilde des Fahrzeugs selbst, d. h. die Aggregation aller erforderlichen physischen Komponenten. Der Knoten orientiert sich auf erster Ebene an einer funktionsorientierten Fahrzeugsicht, welche im Regelfall die Fachbereichsstruktur der technischen Entwicklung widerspiegelt (s. Abb. 5.20). Die darunterliegenden Elemente können frei entsprechend den jeweiligen Fahrzeugprojektanforderungen erweitert werden.

Der Knoten *Beladung* beinhaltet die Definition aller möglichen Beladungselemente, wie etwa Personen, Gepäck und verschiedene Medien, deren Menge nicht zwingend vorgegeben ist, wie beispielsweise der Kraftstoff. Medien, wie etwa Schmierstoffe des Motors, die bereits ab Werk befüllt werden und für den ordnungsgemäßen Betrieb zwingend erforderlich sind, werden in diesem Knoten nicht angeführt. Typischerweise wird die Beladung nicht in der Produktstruktur abgebildet, da sie keine montierbaren Bauteile oder Bestandteile des Fahrzeugs widerspiegelt. Im Kontext des vorgestellten Ansatzes ist dies jedoch notwendig, um die verschiedenen Beladungszustände konsistent im Kontext des jeweiligen Fahrzeugkonzeptes darstellen zu können.

5.3.3.2 Erforderliche Basis-Attribute der Konzeptproduktstruktur

Neben der Strukturierung der involvierten Komponenten ist die zweite zentrale Aufgabe der Konzeptproduktstruktur die Organisation und Verwaltung der den Komponenten zugeordneten Meta-Informationen. Die wichtigsten Attributeklassen sind in Abb. 5.21 dargestellt.

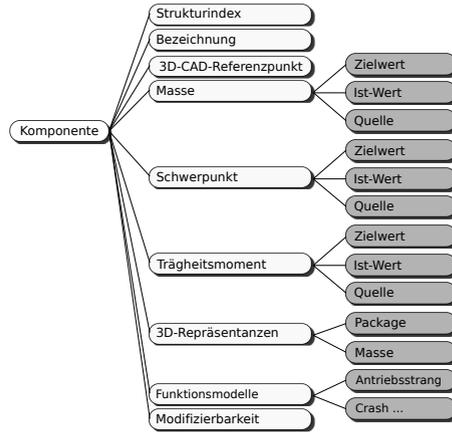


Abb. 5.21: Überblick über die Haupt-Attribute der Konzeptproduktstruktur

Der *Strukturindex* definiert mittels eines numerischen Wertes die Anordnung der jeweiligen Komponente innerhalb der Strukturebene. Die *Beschreibung* ermöglicht die Festlegung eines erklärenden Textes. Das Attribut *3D-CAD-Referenzpunkt* beinhaltet die Identifikationsnummer jenes *3D-CAD-Referenzpunktes*, der die Position und Orientierung für die betreffende Komponente im CAD steuern soll. Die Attributcontainer *Masse*, *Schwerpunkt* sowie *Trägheitsmoment* beinhalten die Masse und masseaffinen Eigenschaften der Komponente. Auf deren konkrete Nutzung und entsprechende Workflows wird in Kap. 6 eingegangen. Die *3D-Repräsentationen* beinhalten die dem Knoten zugeordneten 3D-CAD-Datensätze für das Package und die Masse. Diese Differenzierung ist erforderlich, da für die reine Package-Untersuchung auch Hüllen, wie etwa die eines Aggregates, zulässig sind. Da diese nicht notwendigerweise die Fähigkeit besitzen, physikalische Eigenschaften aufzunehmen, wird eine zusätzliche Repräsentanz benötigt, um diese Informationen im CAD zu halten. Durch diese Aufspaltung lassen sich zudem verschiedene Detaillierungsgrade in der Betrachtung realisieren.

Funktionsmodelle beinhaltet die dem jeweiligen Knoten zugeordneten Funktionsmodelle oder Teilen davon. Die Zuordnung erfolgt dabei aus der Sicht einer bestimmten Funktion. Wird etwa eine detaillierte Längsdynamiksimulation vorgenommen, so sind entsprechende Modelle der involvierten Komponenten des Antriebsstranges, wie beispielsweise Motor oder Getriebe, erforderlich. Sämtliche Eingabedaten die übergeordneter Natur sind, daher Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug ausüben, sind über das integrierte Konzeptmodell, genauer gesagt über die Konzeptproduktstruktur zu transportieren. Einem Motor ist daher neben seiner Aggregatehülle auch ein entsprechendes Simulationsmodell zuzuordnen. Dies muss je nach Detailgrad nicht notwendigerweise auf der selben Ebene geschehen. *Modifizierbarkeit* steuert, ob das jeweilige CAD-Modell im Kontext des Gesamtfahrzeugs gesteuert/modifiziert werden darf oder nicht.

5.3.3.3 Abbildung der Konzeptproduktstruktur im CAD

Um die zuvor definierte Konzeptproduktstruktur im CAD verfügbar zu machen, muss zunächst eine entsprechende Zuordnung der hinterlegten Informationen im CAD erfolgen. Abb. 5.22 zeigt

hierzu die festgelegte CAD-Zuordnungsvorschrift für Komponenten. Wie in Kap. 4.1.4 gezeigt wird, finden im Gesamtfahrzeug vielfach sog. Hüllendatensätze Verwendung. Da diese eine rein grafische CAD-Repräsentation darstellen, besitzen sie im Allgemeinen keine für ein CAD-System nutzbare Referenzierungselemente, wie etwa Achsensysteme. Daher werden alle Repräsentanzen über die in Abb. 5.22 skizzierte Containerstruktur im DMU verbaut.

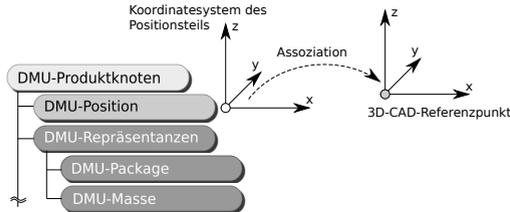


Abb. 5.22: Schema der assoziativen DMU-Referenzstruktur

Diese besteht aus einem ZB-Datensatz, der einen Teiledatensatz für die Positionierung nutzt. Durch die Anordnung der eigentlichen Teilegeometrie in dem Hilfscontainer *DMU-Repräsentanzen* kann durch Referenzierung des Teils *DMU-Position* der gesamte Container parametrisch-assoziativ im Raum positioniert werden. Die Container-Struktur umfasst grundsätzlich eine Darstellung in Hinblick auf das Fahrzeug-Package und eine Darstellung bezüglich der Masse (s. Kap. 5.4.2.5). Durch die gewählte Container-Struktur lassen sich die Repräsentanzen bei Bedarf flexibel erweitern.

5.3.3.4 Massenmanagement auf Basis der Konzeptproduktstruktur

Eine der zentralen Eigenschaften eines Fahrzeugkonzeptes stellt dessen Masse und deren räumliche Verteilung im Fahrzeug dar. Diese beeinflussen die Lage des Massenschwerpunktes sowie die resultierenden Massenträgheitsmomente, die wiederum wesentliche Eigenschaften, wie die Achslastverteilung, das Achsgewicht oder die Kipstabilität beeinflussen (s. Abb. 3.30). Aufgrund der Signifikanz der Positionierung von Komponenten im Fahrzeug ist es von wesentlichem Vorteil so früh wie möglich Informationen zu den Einzelmassen und deren räumliche Verteilung im Fahrzeug verfügbar zu haben. Zunächst sollen daher die erforderlichen Informationen beleuchtet werden und im Anschluss die Berechnungen und grundlegenden Prozesse.

Die Grundlage für die Betrachtung von Masse-Eigenschaften bildet im vorliegenden Ansatz die Konzeptproduktstruktur. Diese definiert, wie in Kap. 5.3.3 beschrieben, die vorhandenen Produktumfänge im Fahrzeug sowie die Zuladungssituation in den jeweiligen Beladungszuständen. Die Konzeptproduktstruktur wird hierzu um die in Tab. 5.1 angeführten masserelevanten Attribute erweitert.

Tab. 5.1: Gewichtsrelevante Attribute in der Konzeptproduktstruktur

Attribut	Erläuterung
Ziel-Gewicht	Gewünschtes Ziel-Gewicht einer Komponente, eines Bauteils oder einer Zone.
Ist-Gewicht	Tatsächliches Gewicht der Komponente, des Bauteils oder der Zone.
Gewichtsquelle	Angabe der Quelle des aktuellen Ist-Gewichts.
Schätzwert	Gewichtswert auf Basis einer Schätzung.
Gewogenes Gewicht	Gewogenes Gewicht mittels Wiegesystem.
CAD-Gewicht	Gewichtswert aus dem CAD-System.
CAE-Gewicht	Gewichtswert aus CAE-System.
Gewicht lt. Datenblatt	Gewichtswert entsprechend Datenblatt (für Normbauteile).
Kalkulatorische Gewicht	Summe der Ist-Gewichte untergeordneter Komponenten.
Ist-Gewicht-Risiko	Gewichtsrisiko z. B. auf Basis von Erfahrungswerten.
Ist-Gewicht-Potential	Gewichtspotential durch alternative Werkstoffe oder konstruktive Maßnahmen.
Ist-Gewicht-Prognose	Summe aus Ist-Gewicht und Ist-Gewicht-Risiko abzüglich Ist-Gewicht-Potential.

Mit diesen Informationen lassen sich in Kombination mit der bereits gezeigten Differenzierung in Fahrzeug und Zuladung aus Kap. 5.3.3.1 innerhalb der Konzeptproduktstruktur alle erforderlichen Massezustände berechnen. Hierzu wird das in Abb. 5.23 gezeigte Berechnungs- und Verwaltungsschema genutzt. Grundsätzlich wird im Massenmanagement, im Einklang mit der bereits gezeigten Parametersystematik, zwischen dem *Ziel-Gewicht* und dem *Ist-Gewicht* unterschieden. Das *Ziel-Gewicht* entspricht dem gewünschten Soll für einen Bereich des Fahrzeugs, bzw. für eine spezifische Komponente. Das *Ist-Gewicht* ist jenes, das entweder aus den tatsächlichen Gegebenheiten im Konzept resultiert, oder im Falle von Übernahmeteilen real gemessen oder im CAD ermittelt wurde. Dementsprechend wird im ersten Berechnungsstrang das jeweilige Ziel-Gewicht einer Baugruppe oder eines Moduls im Top-Down-Verfahren auf dessen untergeordnete Elemente aufgeteilt (s. Abb. 5.23 (1)). Der zweite Berechnungsstrang aggregiert die *Ist-Gewichte* in entgegengesetzter Richtung der *Ziel-Gewichte* von unten nach oben im Bottom-Up-Verfahren (s. Abb. 5.23 (2)).

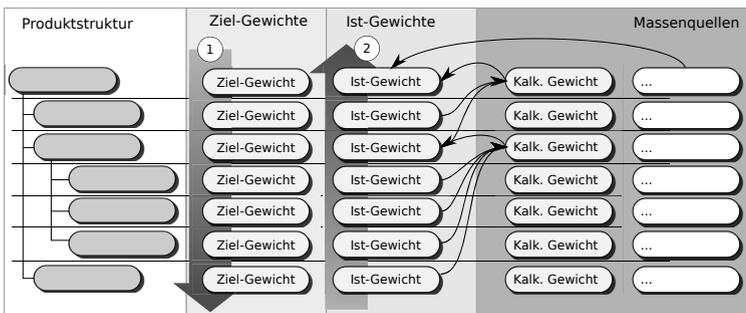


Abb. 5.23: Schema der Gewichtsermittlung auf Basis der Konzeptproduktstruktur

Der konkrete Wert eines *Ist-Gewichtes* wird im vorliegenden Ansatz durch die *Massenquelle* festgelegt. Jedem Modul ist ein definiertes Set an *Massenquellen* zugeordnet (s. Abb. 5.24).

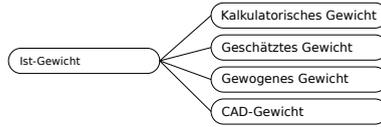


Abb. 5.24: Massequellen der Konzeptproduktstruktur

Das *kalkulatorische Gewicht* $M_{kalk.}$ entspricht der Summe der *Ist-Gewichte* untergeordneter Module $m_{i,Ist}$ und berechnet sich entsprechend Gl. 5.2:

$$M_{kalk.} = \sum_{i=1}^n m_{i,Ist} \tag{5.2}$$

Da nicht alle Komponenten gewichtsrelevant sein müssen welche in der Konzeptproduktstruktur definiert sind, ermöglicht das Berechnungsschema die bewusste Ausklammerung von Komponenten vom Berechnungsprozess (s. Abb. 5.25).

	Gewichts-relevant	Ist-Masse	Ist-Masse-Kalk.	Massen-Quelle
Fahrzeug				
Modul	x	370	370	Kalkulatorisch
Komponente	x	20		
Komponente	x	230		
Komponente		100		
Komponente	x	120		

Abb. 5.25: Aussteuerung der Gewichtsrelevanz in der Gewichtsstruktur

Das geschätzte Gewicht entspricht einem Schätzwert im Falle des Fehlens eines tatsächlichen Ist-Wertes. Dieser Wert repräsentiert typischerweise Werte aufgrund von Erfahrungen in Vorgängerfahrzeugen. Das gewogene Gewicht entspricht dem realen Gewicht einer Komponente. Das *CAD-Gewicht* repräsentiert den Gewichtswert, der auf Basis der idealisierten 3D-Geometrie im CAD bestimmt werden kann. Welches Gewicht für das *Ist-Gewicht* verwendet wird obliegt dem jeweiligen Nutzer und wird durch das Attribut *Massenquelle* definiert. So lassen sich die verschiedenen Informationsquellen und damit verbundenen Reifegrade effizient steuern und im Zuge des Entwicklungsfortschritts eindeutig nachvollziehen. Das Zuordnungsschema von Gewichtswerten wird in Abb. 5.26 dargestellt.

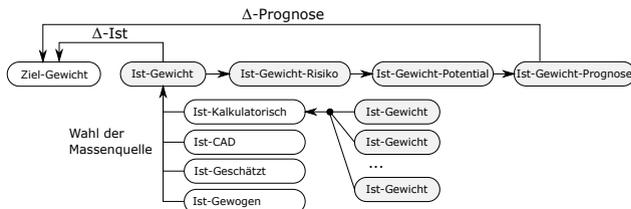


Abb. 5.26: Grundlegendes Schema der Gewichtsabschätzung für eine Komponente

Für die Berechnung von Massenschwerpunkten und Massenträgheitsmomenten sind weitere Attribute erforderlich, die in Tab. 5.2 angeführt sind. Das Berechnungsschema gleicht dem gezeigten Schema für das Gewicht.

Tab. 5.2: Weitere gewichtsrelevante Attribute in der Konzeptproduktstruktur

Attribut	Inhalt	Einheit	Erläuterung
Ist-Schwerpunktkoordinaten	x, y, z	mm	Absolute Schwerpunktkoordinaten der jeweiligen Komponenten/Bauteile/Zonen.
Schwerpunktquelle	Quelle	-	Quelle des Schwerpunktes.
Geschätzter Schwerpunkt	x, y, z	mm	Schwerpunkt durch Nutzer geschätzt.
CAD-Schwerpunkt	x, y, z	mm	Schwerpunkt aus dem CAD-Modell.
Ist-Massenträgheitsmoment	$\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$	kg m ²	Ist-Wert des Massenträgheitsmomentes.
Massenträgheitsmomentquelle	Quelle	-	Quelle des Massenträgheitsmomentes.
Geschätztes Massenträgheitsmoment	$\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$	kg m ²	Massenträgheitsmoment durch Nutzer geschätzt.
CAD-Massenträgheitsmoment	$\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$	kg m ²	Wert des Massenträgheitsmomentes auf Basis eines CAD-Modells.
Kalkulatorisches Massenträgheitsmoment	$\Theta_x, \Theta_y, \Theta_z$	kg m ²	Aggregiertes Massenträgheitsmoment der untergeordneten Bauteile/Komponenten/Zonen.

Da der Massenschwerpunkt und das Massenträgheitsmoment von der geometrischen Beschaffenheit und der Positionierung einer Komponente im Fahrzeug abhängig sind, ist eine rein tabellarische Behandlung dieses Themas in der frühen Konzeptphase schwierig. Einerseits sind Komponenten vielfach nicht bekannt, oder befinden sich in einem sehr frühen Gestaltungsstadium, andererseits fehlen in einer rein tabellarischen Sicht wichtige Konzeptgrößen aus dem CAD, wie etwa die absolute Lage im Raum von Vorder- und Hinterachse zur gedanklichen Orientierung im Fahrzeug. Daher wird in Hinblick auf den Massenschwerpunkt und das Massenträgheitsmoment die Konzeptproduktstruktur zusammen mit dem *Geometrie-Framework* angewandt (s. Kap. 5.4). Um den Massenschwerpunkt und das Massenträgheitsmoment von Komponenten rasch und effizient abschätzen zu können, sollen im CAD entsprechende Ersatzkörper genutzt werden. Die grundlegende Idee hierzu ist in Abb. 5.27 dargestellt.

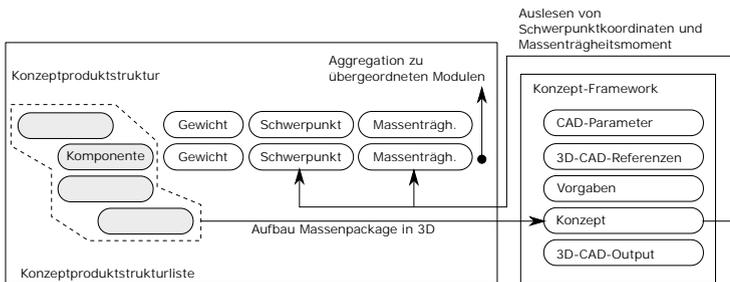


Abb. 5.27: Aspekte des Massenmanagements im integrierten Konzeptmodell

Die Konzeptproduktstruktur definiert die Produktumfänge für den *Konzept-DMU* und das *Konzept-Beladungsmodell* im *Geometrie-Framework*. Auf Basis dieser Struktur erfolgt die räumliche Positionierung der Ersatzkörper für die Massenbeschreibung (s. Kap. 5.4.2.5). Auf Basis

dieser Ersatzmodelle erfolgt die Bestimmung des Massenschwerpunktes und der zugehörigen Massenträgheitsmomente. Das CAD fungiert damit als Datenlieferant für alle geometrieabhängigen Informationen. Nachdem die benötigten Informationen aus dem CAD in der Konzeptproduktstruktur vorliegen, kann der Ist-Berechnungsprozess gestartet werden. Dieser aggregiert analog dem Gewichtsprozess alle *Ist-Schwerpunkte* (S_{Ist}) und *Ist-Massenträgheitsmomente* (Θ_{Ist}) von unten nach oben in die jeweiligen Kalkulationsgrößen. Der *Ist-Schwerpunkt* eines Moduls ergibt sich aus den Untermodulen gemäß Gl. (5.3). Der Term $\Delta m \cdot x_{S_{\Delta m}}$ bezieht sich auf Massenwerte, deren Schwerpunktkoordinaten noch unbekannt sind, oder von der Schwerpunktberechnung bewusst ausgeklammert werden sollen.

$$x_{S,M} = \frac{\sum_{r=1}^r m_r \cdot x_{S,r} + \Delta m \cdot x_{S_{\Delta m}}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad r \leq i \quad (5.3)$$

Da sich die Gesamtmasse des Moduls nicht ändert, muss für jene Komponenten, welche über keine Schwerpunktinformationen verfügen, ein Ersatzschwerpunkt definiert werden. Im vorliegenden Ansatz soll hierzu der Betrag dieser Massen Δm in den resultierenden Schwerpunkt jener Massen mit Schwerpunktinformationen „verschmiert“ werden, d. h. der Schwerpunkt von Δm ist identisch dem Schwerpunkt der Massen mit Schwerpunktinformationen.

$$x_{S,M} = \frac{\sum_{r=1}^r m_r \cdot x_{S,r} + \Delta m \cdot \frac{\sum_{r=1}^r m_r \cdot x_{S,r}}{\sum_{r=1}^r m_r}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad r \leq i \quad (5.4)$$

In Hinblick auf den Gesamtsystemsschwerpunkt besteht im vorliegenden Ansatz durch die Nutzung des Beladungsmodells die Möglichkeit, unterschiedliche messlastabhängige Schwerpunkte darzustellen. Typischerweise werden für ein Fahrzeug die folgenden Schwerpunkte abgebildet:

- Schwerpunkt des Fahrzeugs ohne Zuladung
- Schwerpunkt des Fahrzeugs in Messlast 1 (Fahrbereiter Zustand)
- Schwerpunkt des Fahrzeugs in Messlast 2 (Konstruktionslage)
- Schwerpunkt des Fahrzeugs in Messlast 3 (Maximal zulässige Zuladung)

Daraus resultieren Koordinaten für die einzelnen Schwerpunkte in Bezug auf das raumfeste absolute Fahrzeugkoordinatensystem. Diese Werte sind jedoch ohne geometrischen Kontext wenig anschaulich. Daher werden unter Nutzung des CAD-Modells die verschiedenen Schwerpunktniveaus über der jeweiligen Messlast ermittelt (s. Abb. 5.28).

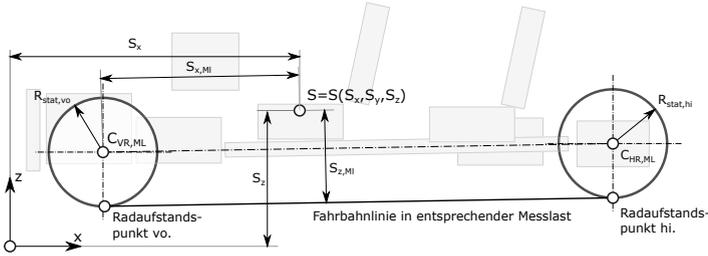


Abb. 5.28: Bestimmung der Schwerpunktkoordinaten für eine Messlast

Neben dem Massenschwerpunkt stellt die zweite zentrale Größe im Zusammenhang mit der Fahrzeugmasse das Massenträgheitsmoment dar. Das Massenträgheitsmoment stellt bei einer rotatorischen Bewegung das Äquivalent zur Masse in der translatorischen Bewegung dar. Da bereits in der frühen Konzeptphase die Ausprägung der Hauptmassenträgheitsmomente im Gesamtfahrzeug von Interesse sind, muss für alle Einzelkomponenten und Module stets das parallel um die jeweilige Hauptträgheitsachse verschobene Massenträgheitsmoment für die Berechnung herangezogen werden. Die mathematische Beschreibung erfolgt durch den Satz von Steiner (s. Gl. 5.5). Darin entspricht der erste Term dem körpereigenen Massenträgheitsmoment bezogen auf eine Achse durch den Körperschwerpunkt. Der zweite Term stellt eine Parallelverschiebung des Hauptmassenträgheitsmomentes des ersten Terms um eine parallele Achse im Abstand d dar.

$$\Theta = \oint r^2 \cdot dm + d^2 \cdot m \quad (5.5)$$

Wie bereits erwähnt, fehlen in der frühen Konzeptphase vielfach geometrische Beschreibungen der erforderlichen Bauteile in Form von Proportionsmodellen oder Detailkonstruktionen. Dadurch wird eine detaillierte Betrachtung des Massenträgheitsmomentes erschwert. Da in der frühen Konzeptphase jedoch lediglich Tendenzen prognostiziert werden sollen, wird im Bezug auf das Massenträgheitsmoment folgende Vereinfachung vorgenommen. Alle Komponenten deren Distanz zum Gesamtfahrzeugschwerpunkt ihre geometrische Ausdehnung überschreiten, werden in Punktmassen reduziert, wodurch lediglich der Term $d^2 \cdot m$ für die jeweilige Komponente zu bestimmen ist. Für Komponenten deren Abstand zum Fahrzeugschwerpunkt zu gering ist, um diese Abstraktion vorzunehmen, ist eine entsprechende Ersatzmodellierung in Form der bereits gezeigten Massenkörper durchzuführen. Hierbei müssen Vollkörper und schalenartige Körper differenziert werden, da bei ausschließlicher Nutzung von Vollkörpern der Fehler für stark heterogene Bauteile zu groß ist. Der Beweis hierzu findet sich im Anhang (s. Kap. A.2). Das Ist-Massenträgheitsmoment eines Moduls Θ_M ergibt sich für die jeweilige Achse damit zu:

$$\Theta_M = \sum_{i=1}^n \oint r_i^2 \cdot dm_i + d_i^2 \cdot m_i \quad (5.6)$$

5.3.4 Funktionsmodelle

Wie in Kap. 3 erläutert, ist die virtuelle Darstellung von Funktionen auf Gesamtfahrzeugebene in der frühen Konzeptphase mit vielen Herausforderungen verbunden. Während man sich in der Betrachtung geometrischer Eigenschaften stets in der selben Domäne – dem CAD – bewegt, müssen für die Darstellung funktionaler Produktmerkmale vielfach Domänengrenzen überschritten werden. Als weitere Herausforderung addieren sich unterschiedliche Abstraktion sowie Detaillierung der Funktionsmodelle im Kontext des virtuellen Gesamtfahrzeugs. Im folgenden Abschnitt sollen daher unterschiedliche Funktionsbeschreibungen und deren Nutzbarkeit im Rahmen eines integrierten Konzeptmodells aus Sicht der Fahrzeugarchitektur diskutiert werden.

5.3.4.1 Funktion im Kontext der Fahrzeugarchitektur

Moderne Fahrzeuge bieten heute eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen. Die Primärfunktionen eines Automobils stellen nach wie vor die Antriebs- sowie die damit einhergehenden Steuerungsfunktionen dar. Daneben entstehen kontinuierlich neue Funktionen, wie etwa im Bereich des automatisierten und unterstützten Fahrens, Kommunikation sowie Integration von Unterhaltungselektronik. Aus dem Blickwinkel der Fahrzeugarchitektur sind jedoch nur jene Funktionen relevant, welche eine Sensitivität bezüglich der geometrischen Ausprägung des Fahrzeugs aufweisen. Demnach sollen reine Softwarefunktionen in der vorliegenden Arbeit von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden. Bauräume, welche durch die Bereitstellung von softwarebasierten Funktionen indirekt eingefordert werden, müssen jedoch sehr wohl in die Betrachtungen mit aufgenommen werden, wie z. B. Sensoren, Verkabelungen, Halterungen sowie physische Datenträger etc.

Aus dem Blickwinkel der physischen Gesamtfahrzeugarchitektur ist die Darstellung einer Funktion in einem solchen Umfang erforderlich, dass Rückschlüsse auf den erforderlichen Bauraum möglich sind. Das gewählte Modell bzw. der formal mathematische Ansatz selbst zur Funktionsbeschreibung sind für die Architektur von untergeordnetem Interesse. Die Einbindung von Funktionen kann daher stets in Form einer Blackbox geschehen. Das bedeutet, dass, global gesehen, die genaue Kenntnis der genutzten Eingangsdaten und Randbedingungen für die jeweiligen Funktionsmodelle als hinreichend für die Belange der Fahrzeugarchitektur angesehen wird. Aus Sicht der physischen Fahrzeugarchitektur sind die folgenden Aspekte von primärem Interesse:

- Welche Aussage kann in Bezug auf das Gesamtfahrzeug getroffen werden und welche Genauigkeit besitzt die Prognose?
- Wie wirken sich Unsicherheiten in den Prämissen sowie gewählten Parametern auf das Prognoseergebnis aus?
- IT-spezifische Aspekte wie Modelltyp, Aufbau und mögliche Integration etc.

Aussagen zu funktionalen Produktmerkmalen sind in der frühen Konzeptphase stets mit Unsicherheiten behaftet. Die Gründe hierfür wurden in Kap. 3 behandelt. Wichtig ist daher im Sinne der Nachvollziehbarkeit, wie eine Aussage über ein funktionales Produktmerkmal entsteht, d. h. welche Eingangsgrößen und Randbedingungen werden verwendet und welche Art von Modell wurde genutzt? Damit ist auch die Frage nach dem Einfluss der Eingangsparameter und Randbedingungen auf die Qualität und Genauigkeit der Aussage verknüpft. Zielwerte sowie allgemeine Prämissen können in der frühen Konzeptphase mit einer hohen Unschärfe behaftet sein.

Selbst wenn ein hochwertiges Simulationsmodell zur Prognose verwendet wird, kann die Ergebnisqualität dennoch inakzeptabel sein, da die notwendige Schärfe der Eingabeparameter nicht gegeben ist und fehlende Informationen durch grobe Schätzungen ergänzt werden.

IT-spezifische Aspekte sind in der praktischen Umsetzung stets zu berücksichtigen, da die Nutzung in einem übergeordneten Kontext gewisse Voraussetzungen seitens der genutzten Software und IT-Umgebung verlangt. So müssen die Programme entsprechende Schnittstellen aufweisen, die entweder über Automationsmechanismen, wie etwa Skriptsprachen nutzbar sind, oder bereits als geeignete Software-Funktionen implementiert sind.

5.3.4.2 Allgemeine Gestalt von Funktionsmodellen im Kontext des Gesamtfahrzeugs

Während sich im Falle der Integration von geometrischen Modellen aus Datensicht ähnliche Strukturen identifizieren lassen und keine Änderung der Modellierungsdomäne auftritt, gestaltet sich die Situation in Hinblick auf die Funktionsmodellierung deutlich schwieriger: Unterschiedliche Abstraktionsgrade, gegenseitige und teils gegenläufige Abhängigkeiten und die Nutzung unterschiedlicher Datenmodelle erschweren eine durchgängige Einbindung im Kontext des Gesamtfahrzeugs. Um daher bestehende Funktionsmodelle auf Ebene des Gesamtfahrzeugs nutzen, sowie neue implementieren zu können, müssen zunächst Überlegungen hinsichtlich der typischen Beschaffenheit angestellt, sowie geeignete Rahmenbedingungen formuliert werden. Dazu soll im ersten Schritt ein Blick auf die grundlegende Gestalt einer virtuellen Funktionsdarstellung geworfen werden (s. Abb. 5.29).

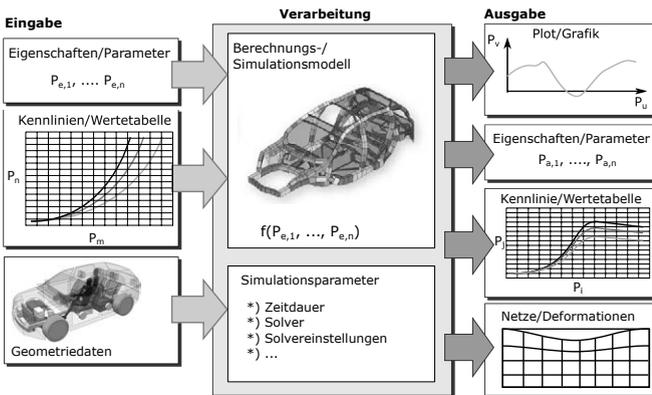


Abb. 5.29: Datentechnische Sicht auf eine Funktion im Kontext des integrierten Konzeptmodells

Jede Funktion, die nach heutigem Stand der Technik virtuell dargestellt werden kann, lässt sich als System entsprechend dem in Abb. 5.29 gezeigten Schema verstehen. Eine Funktion kann daher grundsätzlich als die Zuordnungsvorschrift von geeigneten Eingangs- und Ausgangsgrößen aufgefasst werden. Hinzu kommen erforderliche Preprocessing-Schritte, um die erforderlichen Eingangsdaten zur Nutzung in Berechnungen und Simulationen aufbereiten zu können, bzw. entsprechende Postprocessing-Schritte um Ergebnisse nutzbar zu machen.

5.3.4.3 Klassifikation von Funktionsmodellen im Kontext des Gesamtfahrzeugs

Die grundsätzlichen Herausforderungen in der virtuellen funktionalen Produktbeschreibung wurden bereits eingehend behandelt. Im Folgenden soll daher eine detaillierte Betrachtung unterschiedlicher Modelltopologien erfolgen, wie sie im Gesamtfahrzeugumfeld in Erscheinung treten. Deren Einbindung in ein integriertes Konzeptmodell wird in Kap. 5.4.3 behandelt.

Wie in Kap. 3 bereits beschrieben, finden sich in der frühen Konzeptphase verschiedene Ansätze zur Beschreibung und Modellierung funktionaler Eigenschaften. Im Kontext des vorgestellten Ansatzes lassen sich hierbei drei verschiedene Formen der funktionalen Beschreibung identifizieren:

- Empirische Ansätze
- Tabellarische Ansätze
- Simulationsmodelle

Die *empirische* Beschreibung von funktionalen Größen in Form von Gleichungen oder simplen Formeln stellt die einfachste Variante dar. Diese lassen sich grundsätzlich direkt in parametrisch-assoziative CAD-Modelle implementieren und bedürfen folglich keiner Änderung der Modellierungsdomäne. Geometrieaffine Größen lassen sich basierend auf vorhandenen CAD-Geometrieinformationen ableiten und können über Formeln mit anderen physikalischen Größen in empirischen Ansätzen genutzt werden.

Die nächste Stufe stellen *tabellarische Berechnungen* dar. Diese fassen typischerweise mehrere Berechnungsschritte in einer Tabelle oder einem Verbund aus Tabellen zusammen und können auch Datenbanken zur Parametergewinnung nutzen (s. Abb. 5.30). Mittels tabellarischer Berechnungen lassen sich auch komplexere Berechnungen realisieren.

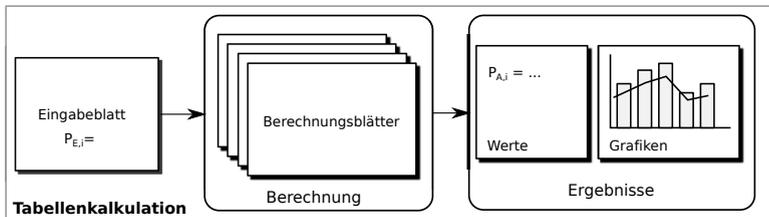


Abb. 5.30: Aufbau einer typischen Tabellenkalkulation

Die dritte Stufe stellen *Simulationsmodelle* dar, die stets in speziellen Programmen bzw. Softwareumgebungen modelliert und ausgeführt werden. Der grundlegende Aufbau einer Simulation wird in Abb. 5.29 dargestellt. Die Simulation stellt stets eine formale Abstraktion der Realität dar, indem Effekte und Wirkmechanismen virtuell innerhalb der gewählten Modellgrenzen untersucht werden können. Im vorliegenden Ansatz soll grundsätzlich zwischen rein formal-mathematischen Simulationen und geometriebasierten Simulationen unterschieden werden. Im ersten Fall sind für deren Bedatung lediglich parametrische Informationen erforderlich, im zweiten Fall muss zudem Geometrie in diskreter Form übergeben werden. Die typische Gestalt einer numerischen Simulation ist in Abb. 5.31 dargestellt.

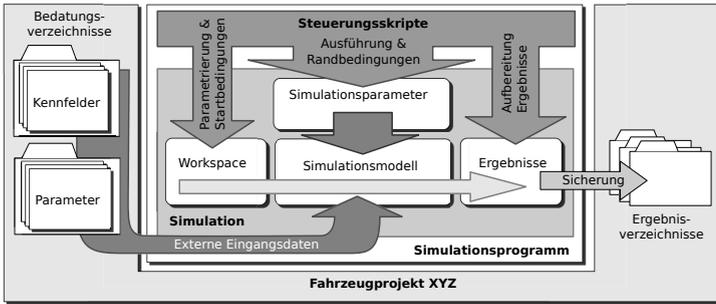


Abb. 5.31: Aufbau einer typischen Simulation

Die Werte für Variablen werden typischerweise in einem definierten Arbeitsbereich, dem sog. *Workspace* abgelegt und stehen dem Modell jederzeit intern zur Verfügung. Neben dem *Workspace* können Werte sowie Kennfelder aus externen Daten gelesen werden. Diese Informationen dienen der Simulation als Bedatungsgrundlage. Die Durchführung der Simulation unter gewählten Simulationsrandbedingungen, wie etwa Zeitdauer, Zeitschritt oder Solver zur Lösung der jeweiligen Differentialgleichungen, erfolgt automationsgestützt oder ist dem Modell bereits in Form spezifischer Einstellungen hinterlegt. Nach erfolgreichem Durchlaufen der Simulation werden die errechneten Ergebnisse entweder direkt in den zugehörigen Ergebnisordnern abgelegt, oder müssen über geeignete Skripte aufbereitet werden.

Im Falle geometrisch basierter Simulationen erhöht sich die Komplexität um die Ebene der geometrischen Informationen in Form von Flächen, Volumina. Diese können in exakter oder diskretisierter Form wie etwa Netzen übergeben werden. Aufgrund unterschiedlicher Abstraktionsanforderungen im Kontext des Gesamtfahrzeugs verlangen geometrisch basierte Simulationen zumeist nach gesonderten Aufbereitungsprozessen, welche die benötigten Eingabedaten in entsprechender Qualität und Umfang bereitstellen.

5.4 Das Konzept-Framework

5.4.1 Allgemeine Eigenschaften des Konzept-Frameworks

Das *Konzept-Framework* repräsentiert das informationstechnische Rahmengerüst des integrierten Konzeptmodells und ist für die kohärente Vernetzung der erforderlichen Partialmodelle verantwortlich. Eine schematische Darstellung der Kernkomponenten des *Konzept-Frameworks* wird in Abb. 5.32 gezeigt:

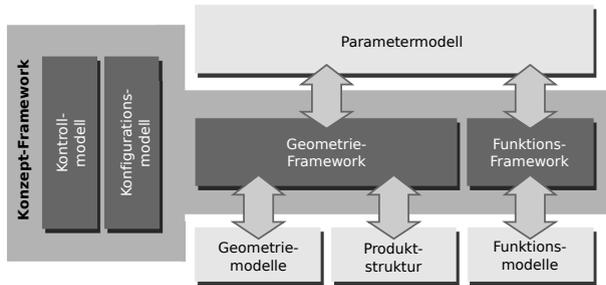


Abb. 5.32: Schematische Darstellung der Kernkomponenten des *Konzept-Frameworks*

Das *Konzept-Framework* besteht damit aus den vier grundlegenden Bausteinen:

1. Geometrie-Framework
2. Funktions-Framework
3. Konfigurationsmodell
4. Kontrollmodell

Das *Geometrie-Framework* sowie das *Funktions-Framework* dienen einer strukturierten und systematischen Einbindung von Teilmodellen und ermöglichen die zentrale Steuerung und Verwaltung. Das übergeordnete *Konfigurationsmodell* stellt die inhaltliche Kohärenz des Gesamtmodells sicher, indem über die jeweiligen Mastermodelle die korrekten zum jeweiligen Datenstand zugehörigen Informationen bestimmt werden. Das *Kontrollmodell* dient übergeordnet der Sicherstellung der modellweiten Kohärenz im Falle von Änderungen an Modellgrößen. Durch die bidirektionale Verknüpfung der Teilmodelle untereinander wirken sich Änderungen daher sofort modellweit aus. Im Folgenden sollen die verschiedenen Sub-Frameworks einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

5.4.2 Das Geometrie-Framework

Das *Geometrie-Framework* dient der konsistenten Einbindung und Nutzung von CAD-Datensätzen im Gesamtfahrzeugkontext, die bereits im vorangegangenen Abschnitt diskutiert wurden. Es repräsentiert daher die geometrische Sicht auf das Gesamtfahrzeug im Rahmen des integrierten Konzeptmodells. Hierbei spielt die Sicherstellung einer durchgängigen Parametrierung, Positionierung, Steuerung und Semantik der Datensätze eine zentrale Rolle. Dies kann nur durch vollständige Entkoppelung des Entwicklers bzw. der Entwicklerin von systemseitigen Aufgaben, wie beispielsweise die genannte Parametrierung oder Datenstrukturierung, gewährleistet werden.

5.4.2.1 Struktur und Übersicht des Geometrie-Frameworks

Das *Geometrie-Framework* stellt die zentrale Gliederungsstruktur zur Steuerung und Verwaltung der unterschiedlichen CAD-Daten im Gesamtfahrzeugkontext dar. Aus Datensicht entspricht das *Geometrie-Framework* einem CAD-Zusammenbaudokument, das entsprechend dem in Abb. 5.33 gezeigten Schema aufgebaut ist:

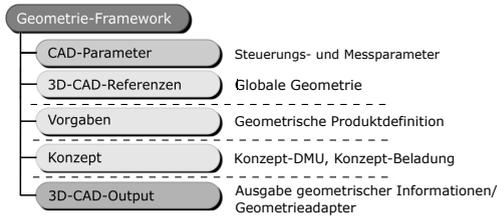


Abb. 5.33: Grundstruktur des *Geometrie-Frameworks*

Der Knoten *CAD-Parameter* beinhaltet im Modell alle Parameter und Beziehungen, die auf Ebene des geometrischen Gesamtfahrzeugs wirksam sind. Der Knoten *3D-CAD-Referenzen* fasst alle im Konzept definierten zentral gesteuerten Geometrielemente zusammen (s. Kap. 5.4.2.3) und dient damit der übergeordneten geometrischen Steuerung gekoppelter CAD-Module. Der Knoten *Vorgaben* gruppiert alle Datensätze, die im Sinne einer Vorgabe an das Konzept genutzt werden sollen. Dazu zählen Schnitte, Grenzflächen und andere einzuhaltende Grenzzäume geometrischer Natur. Der Knoten *Fahrzeuglayout* beinhaltet die für das angedachte Konzept wesentlichen Eckpfeiler, wie etwa Sitzreferenzpunkt, Lenkradpositionierung oder messlastabhängige Geometrie wie etwa die Fahrbahn. Die Darstellung dieser Geometrie erfolgt in Form von Ebenen, Punkten sowie Linien oder 2D-Schnitten zur Repräsentation von Design-Konturen o.ä. Der Knoten *Konzept* beinhaltet die CAD-Repräsentation der Konzeptproduktstruktur und gliedert sich entsprechend in die beiden Hauptknoten *Konzept-DMU* sowie *Konzept-Beladung*. Der Knoten *3D-CAD-Output* stellt eine Sammlung an geometrischen Elementen und Strukturen dar, welche für externe Prozesse erforderlich sind. Im Folgenden sollen die einzelnen Bestandteile und deren Vernetzung im Kontext des *Geometrie-Frameworks* detailliert betrachtet werden.

5.4.2.2 CAD-Parameter

Eine der wesentlichen Funktionen des *Geometrie-Frameworks* ist die zentralisierte Bereitstellung aller geometrischen sowie parametrischen Referenzen unter Nutzung eines globalen Führungsmodells. Dadurch können zu jeder Zeit alle involvierten Konzeptmodule konsistent mit geometrischen und parametrischen Informationen versorgt werden. Das grundsätzliche parametrische CAD-Steuerungskonzept ist in Abb. 5.34 dargestellt.

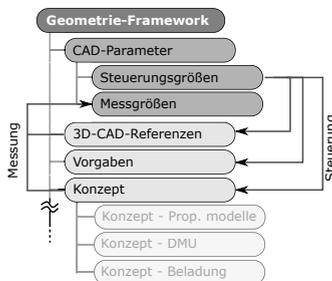


Abb. 5.34: Parametrische Steuerung innerhalb des *Geometrie-Frameworks*

Zur Erlangung informationstechnischer Konsistenz ist eine gezielte Kombination aus Steuerung und Messung von geometrischen Konzeptgrößen erforderlich. Im Gesamtfahrzeug sind entsprechend den Ausführungen in Kap. 3 viele Maßketten im Fahrzeug redundant, so auch beispielsweise die Festlegung des Sitzreferenzpunktes im Fahrzeug (s. Abb. 5.9). Dieser kann in der Y0-Ebene über das Maßpaar L114 (Abstand Radzentrum zu SgRP entlang Messlastebene 1) und H5-1 (Normalabstand zur Messlast 1) erfolgen oder rohbaufest über L31-1 (x-Koordinate des SgRP) und H70-1 (z-Koordinate des SgRP). Da im Maßkonzept stets alle dieser Maße anzugeben sind, muss in solchen Fällen ein Maßpaar steuernd sein, das andere evaluierend – sprich resultierend aus den aktuellen geometrischen Gegebenheiten. Die Steuerung von Parametern erfolgt in typischer Top-Down-Weise, d. h. die erforderlichen Informationen werden von oberster Ebene in Richtung der genutzten Module verteilt. Die Ermittlung von kontextuellen Größen erfolgt von unten nach oben, d. h. in Bottom-Up-Weise. Sowohl die gesteuerten als auch die gemessenen Parameterwerte sind auf die Ist-Werte der jeweiligen Parameterobjekte verknüpft.

5.4.2.3 3D-CAD-Referenzen

Das *3D-CAD-Referenzmodell* dient der zentralen Bereitstellung global relevanter Bezugs- und Steuerungsgeometrie. Dadurch können diese von allen involvierten Geometriemodulen gleichermaßen genutzt werden, wodurch Redundanzen im Aufbau vermieden werden und die erforderliche geometrische Konsistenz jederzeit sichergestellt werden kann. Die Strukturierung erfolgt primär entsprechend des geometrischen Phänotyps (s. Abb. 5.35). Jedes der Hauptstrukturierungselemente gliedert sich seinerseits in zwei weitere Strukturzweige – *Messlastunabhängig* und *Messlastabhängig*.

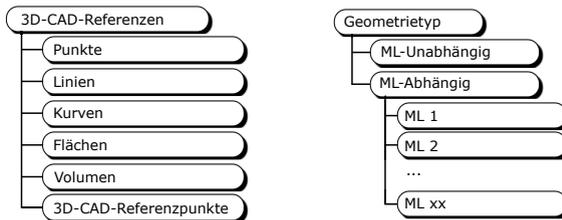


Abb. 5.35: Grundsätzliche Strukturierung der 3D-CAD-Referenzen

Messlastunabhängige Geometrie schließt hierbei all jene Elemente ein, welche im Kontext des aufbauersten CAD-0-Koordinatensystems des Fahrzeugs definiert sind und damit keine Abhängigkeiten von den spezifischen Einfederungszuständen des Fahrzeugs aufweisen. Hierzu zählen etwa alle relevanten Interieurabmessungen oder wichtige Positionen im Vorderwagen wie etwa die Motoranbindungspunkte. Die messlastspezifischen Geometrieelemente werden bezüglich des jeweiligen Beladungszustandes des Fahrzeugs definiert. Für jede Messlast existiert daher ein separater Strukturzweig, welcher die entsprechenden Elemente beinhaltet (s. Abb. 5.35). Abb. 5.36 zeigt einen Auszug an globalen Konzeptreferenzen.

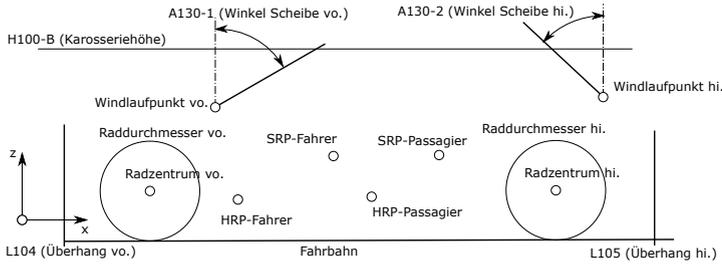


Abb. 5.36: Auszug an Inhalten des 3D-CAD-Referenzmodells

Daneben beherbergt das Modul spezielle Punkte, genannt *3D-CAD-Referenzpunkte*, welche als übergeordnete Positionierungsreferenzen u. a. für den *Konzept-DMU* fungieren. Der grundsätzliche Aufbau wird in Abb. 5.37 dargestellt.

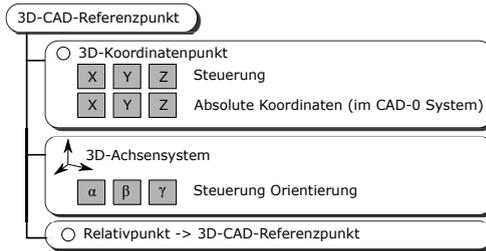


Abb. 5.37: Parameter eines *3D-CAD-Referenzpunktes*

Jeder *3D-CAD-Referenzpunkt* besteht aus einem 3D-Koordinatenpunkt und einem zugehörigen Koordinatensystem. Demnach lässt sich ein *3D-CAD-Referenzpunkt* über dessen x-, y- und z-Koordinate sowie durch Assoziation zu einem vorhandenen *3D-CAD-Referenzpunkt* positionieren und steuern. Die absolute räumliche Lage wird in einem zweiten Koordinaten-Tupel mitgeführt. Das zugehörige Achsenystem kann über drei Winkel (R_x, R_y, R_z) in seiner Orientierung modifiziert werden (s. Abb. 5.38). Zur Herstellung der Eindeutigkeit der Drehungen wird die Definition nach DIN 8855 [28] angewandt, die in Abb. 5.38 (b) dargestellt ist.

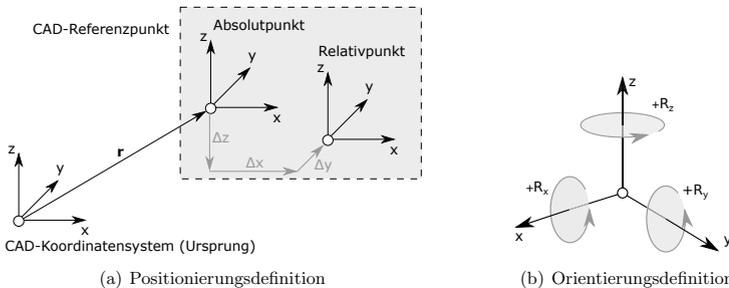


Abb. 5.38: Geometrische Zusammenhänge eines *3D-CAD-Referenzpunktes*

Diese Punkte können von Komponenten des *Konzept-DMUs* als Verknüpfungsreferenz verwendet werden, wodurch die assoziative Verschiebung von Modulen im Kontext von Parametervariationen wie etwa einer Radstandsverlängerung ermöglicht wird oder als Schnittstelle für CAE-Systeme fungiert (s. Kap. 5.3.3.3 und Kap. 6.4.6).

5.4.2.4 Vorgaben

Das Vorgabemodell dient der strukturierten Ablage geometrischer Prämissen. Die Darstellung der Vorgaben erfolgt in Form von Punkten, Kurven oder Flächen. Das Vorgabemodell wird im *Geometrie-Framework* über die Ziel-Werte der erforderliche CAD-Parameter und globale *3D-CAD-Referenzen* eingebunden (s. Abb. 5.39). Damit repräsentiert das Vorgabemodell stets einen Ziel-Zustand.

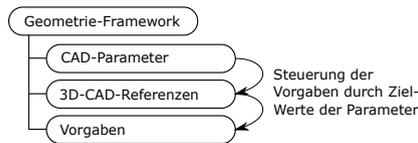


Abb. 5.39: Einbindung des Vorgabemodells in das *Geometrie-Framework*

Die Strukturierung der Vorgaben erfolgt in mehrere Ebenen. Auf der ersten Ebene erfolgt eine rein thematisch/funktionale Gliederung, etwa nach crashrelevanten, fahrbahnspezifischen oder etwa ergonomischen Vorgaben (s. Abb. 5.40).

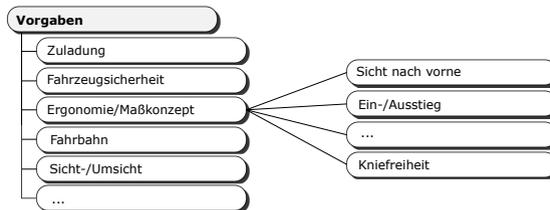


Abb. 5.40: Primäre Strukturierung des Vorgabemodells

Jede dieser Vorgaben kann eine weitere Kontextualisierung über das Klassifikationsmodell erfahren (s. auch Kap. 5.5). So kann etwa eine fahrbahnspezifische Vorgabe im Unternehmen von der Definitionsseite her zugleich eine gesetzliche Vorgabe darstellen.

Im Sinne der PDM-Konformität müssen alle Vorgaben, die später auch im PDM-System über die Produktstruktur eindeutig differenzierbar sein sollen, als separate Datensätze vorliegen. So kann etwa im Falle gesetzlicher Vorgaben aus reiner CAD-Sicht eine Abbildung in einem zentralen Datensatz erfolgen, oder als Produktstruktur dargestellt werden (s. auch Kap. 3).

Die parametrische Steuerung der Vorgabegeometrie erfolgt über die Zielwerte der jeweiligen Parameter. Ist die jeweilige Vorgabe als separater Datensatz veräußert, können im Falle von Flächen sowie Volumina typische DMU-Funktionalitäten zur automatisierten Überprüfung genutzt werden. Die praktische Nutzung des Vorgabemodells wird im Kap. 6 detailliert diskutiert.

Das Vorgabemodell stellt damit die erste Eingrenzung des Konzeptlösungsraumes dar. Einen Auszug an fahrbahnspezifischen Vorgaben zeigt hierzu Abb. 5.41.

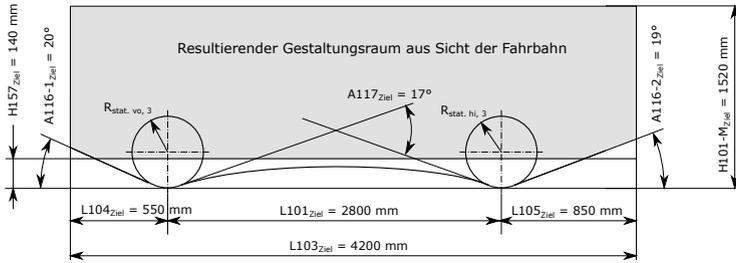


Abb. 5.41: Einbindung des Vorgabemodells in das *Geometrie-Framework*

Die fahrbahnspezifischen Grenzwinkel sowie der einzuhaltende Bodenfreigang werden auf die Fahrbahn bei maximaler Zuladung (ML3) bezogen. Durch die resultierende Grenzkontur aus vorderem und hinterem Überhangwinkel (A116-1, A116-2) sowie dem Rampenwinkel (A117) und dem Bodenfreigang (H157) wird das Konzept zur Fahrbahn hin limitiert. Die hierdurch entstehenden Grenzen werden im Verlauf der Konzeptentwicklung kontinuierlich dem eigentlichen Konzept gegenübergestellt, um einerseits die Einhaltung der festgelegten Vorgaben sicherzustellen, andererseits sollen so Konflikte möglichst rasch erkannt und geeignete Lösungskonzepte erarbeitet werden können.

5.4.2.5 Das Konzept

Der Knoten *Konzept* beinhaltet den eigentlichen technisch-geometrischen Entwurf des zukünftigen Fahrzeugs. Dies kann auskonstruierte Detaildaten, Proportionsmodelle sowie Übernahmeteile umfassen. Die Gliederung des Knotens spiegelt im Wesentlichen die Anordnung und Bauglogik der Konzeptproduktstruktur wider. Der Knoten *Konzept* umfasst stets die folgenden Grundelemente:

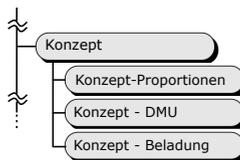


Abb. 5.42: Aufbau des Konzeptknotens im CAD-Führungsmodell

Im Zweig *Konzept-Proportionen* befinden sich die Hauptproportionsmodelle des Konzeptes. Diese werden in Kap. 6 vorgestellt. Dieser Knoten wird im Gegensatz zu den Knoten *Konzept-DMU* und *Konzept-Beladung* nicht in der Konzeptproduktstruktur abgebildet, da die Proportionsmodelle über keinerlei relevante Produktstrukturinformation verfügen und lediglich der Visualisierung von Bauraumverhältnissen dienen.

Im Knoten *Konzept-DMU* wird das eigentliche technische Konzept des Fahrzeugs abgebildet. Dieses beinhaltet dazu die typischen auf DMU-Ebene genutzten geometrischen Darstellungsformen, wie etwa 3D-Proportionsmodelle, 3D-Hüllen oder auskonstruierte 3D-CAD-Bauteile. Aufgrund der Forderung nach Ableitung von Masse und Masse-Eigenschaften sind die zuvor erwähnten Darstellungsformen als nicht ausreichend anzusehen, da z. B. rein grafisch basierte CAD-Repräsentationsformen nicht notwendigerweise geschlossen sein müssen, wodurch die Ableitung eines Volumens zur Massenberechnung nicht möglich ist. Daher wird die geometrische Darstellung um eine massenspezifische Darstellungsform erweitert, um die Masse, den Schwerpunkt und das Massenträgheitsmoment ableiten zu können. Die hierfür erforderliche Struktur zeigt Abb. 5.43. Die Grundelemente werden bereits in Kap. 5.3.3.3 erläutert (s. Abb. 5.22).

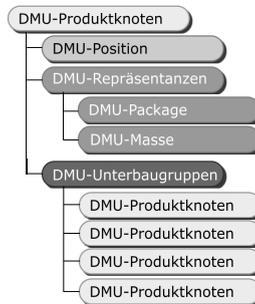


Abb. 5.43: Struktur des *Konzept-DMU*

Der zentrale Unterschied im Gegensatz zu gebräuchlichen DMU-Strukturvarianten ist die Einführung eines separaten Positionsbauteils *DMU-Position* und eines Repräsentationsknotens, der alle dem jeweiligen Bauteil oder der Baugruppe zugeordneten Repräsentanzen beinhaltet. Durch diese Strukturierungslogik lassen sich bei Bedarf weitere Repräsentationsformen hinzufügen.

Im Knoten *Konzept-Beladung* wird das Beladungsmodell des Fahrzeugs abgebildet mit identischer Gliederungslogik des Knotens *Konzept-DMU*. Der Knoten *Konzept-Beladung* umfasst die Knoten *Passagiere* sowie die den jeweiligen Messlasten zugeordneten zusätzlichen Gewichte für das Gepäck und die Zuladung. Dadurch lassen sich die verschiedenen Beladungszustände im Fahrzeug darstellen. Diese können in Kombination mit der Konzeptproduktstruktur dokumentiert werden.

In Hinblick auf die Massenrepräsentanz handelt es sich um eine Darstellung jener Proportionen der Komponente oder des Fahrzeugbereiches, welche signifikanten Einfluss auf die Lage von Schwerpunkt und Massenträgheitsmoment ausüben. Der primäre Zweck liegt in der effizienten Ableitung von Masse und Masse-Eigenschaften zur Versorgung der Konzeptproduktstruktur mit entsprechenden Masse-Informationen. Die rein tabellarische Sicht in Form der Konzeptproduktstruktur erweist sich für die initiale Ableitung von Schwerpunkten und Massenträgheitsmomenten als eher ungeeignet, aufgrund des Fehlens der 3D-Visualisierung und wichtiger Fahrzeugbezugspunkte, wie etwa das Referenzkoordinatensystem oder Vorder- und Hinterachse. Die grundsätzliche Darstellung einer Massenrepräsentanz zeigt Abb. 5.44.

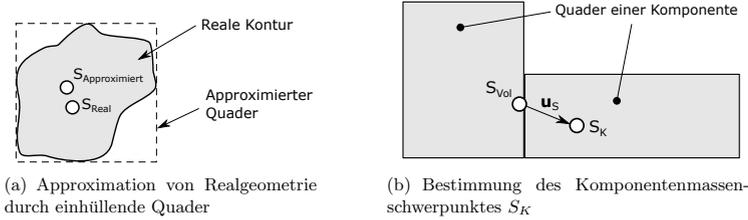


Abb. 5.44: Bestimmung des Komponentenmassenschwerpunktes

Auf Basis des genutzten Quader wird zunächst der Volumenschwerpunkt erzeugt. Dieser kann zusätzlich um den Vektor \vec{u}_S verschoben werden, um topologische oder materialbedingte Inhomogenitäten darzustellen. Mittels dieser Quader lassen sich so alle wesentlichen Bereiche des Fahrzeugs nachbilden. Für den Massenschwerpunkt sind im Falle der Nutzung von Proportionsmodellen diese so zu wählen, dass die prinzipielle Tendenz der Geometrie wiedergespiegelt wird. Für die Vordersitze ist etwa ein abstrahiertes L in dieser Phase als völlig ausreichend zu erachten. Im Falle komplexerer Körper können mehrere Quader genutzt werden. Abb. 5.44 (b) zeigt hierzu die Beschreibung mittels zweier zusammengesetzter Körper. Je nach Topologie der Komponente können somit ein oder mehrere Ersatzkörper verwendet werden. Abb. 5.45 zeigt hierzu die exemplarische Beschreibung eines Fahrzeugsitzes.

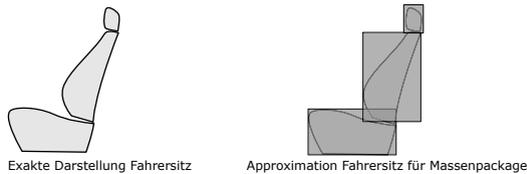


Abb. 5.45: Unterschiedliche Repräsentanzen im *Konzept-DMU*

Hierbei werden für den Sitz, die Rückenlehne sowie die Kopfstütze jeweils ein separater Körper erstellt die zusammen einen volumetrischen Schwerpunkt definieren. Für erste Untersuchungen in Hinblick auf die Massenverteilung entlang der x-Achse des Fahrzeugs können Inhomogenitäten infolge des Sitzaufbaus vernachlässigt werden. Die so ermittelten Koordinaten für den Schwerpunkt können, wie in Abb. 5.46 skizziert, an die Konzeptproduktstruktur zur weiteren Verarbeitung ausgeleitet werden.

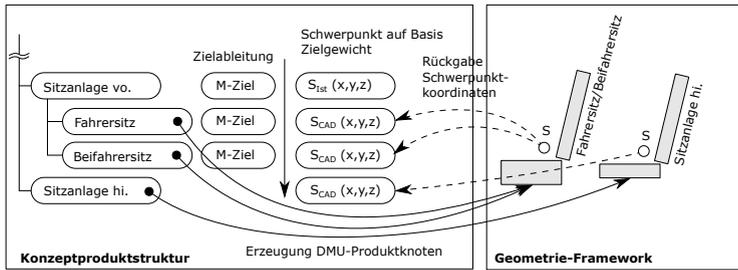
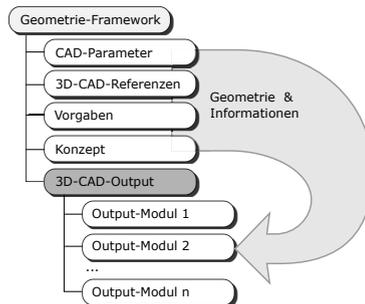


Abb. 5.46: Nutzung von Proportionsmodellen zur Schwerpunktsabschätzung

Die Inhalte des Konzept-Knotens werden auf Basis der Konzeptproduktstruktur definiert. Alle darin enthaltenen und als CAD-relevant indizierten Elemente werden im *Konzept-DMU* sowie im Knoten *Konzept-Beladung* erzeugt. In einem nächsten Schritt müssen im CAD die entsprechenden Ersatzkörper, sofern keine tatsächliche CAD-Geometrie vorliegt, modelliert werden. Die so resultierenden Schwerpunktkoordinaten der idealisierten Sitze können an die Konzeptproduktstruktur transferiert werden. Dort können diese zusammen mit weiteren Schwerpunktinformationen anderer Komponenten zur Berechnung von Modulschwerpunkten und in weiterer Folge zur Ermittlung des Gesamtfahrzeugschwerpunktes genutzt werden. Die praktische Nutzung der Konzeptproduktstruktur im Zusammenspiel mit dem Massenmanagement zeigt Kap. 6.4.1.

5.4.2.6 3D-CAD-Output

In diesem Knoten finden sich Strukturen und geometrische Elemente, die externen Prozessen bereitgestellt werden sollen. Abb. 5.47 zeigt die grundsätzliche Strukturierung. Hiermit können sämtliche Informationen, welche im 3D-CAD-Konzeptmodell vorliegen, allen möglichen Datenabnehmern bereitgestellt werden.

Abb. 5.47: Grundsätzliche Struktur des Knotens *3D-CAD-Output*

Der Knoten *3D-CAD-Output* umfasst zwei Standardknoten – das Fahrzeuglayout und das Hardpoint-Modell für die Kommunikation zur Design-Entwicklung, die in Kap. 6 näher beschrieben werden.

5.4.2.7 Einbindung von CAD-Modellen in das Geometrie-Framework

Im Abschnitt über erforderliche Komponenten des integrierten Konzeptmodells werden die vielfältigen Formen an CAD-Datentypen und deren unterschiedliche Ausprägungen im Kontext des Gesamtfahrzeugs vorgestellt. Im Wesentlichen werden hierbei zwei Grundtypen identifiziert: Nicht-modifizierbare und modifizierbare Datensätze. Für die Gruppe an nicht-modifizierbaren Datensätzen reduziert sich die Variationsmöglichkeit im integrierten Konzeptmodell lediglich auf die korrekte räumliche Positionierung. Durch die Einbindung der Geometrie in die Konzept-DMU-Struktur kann dies zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden. In Hinblick auf modifizierbare Datensätze ist neben der Positionierung die Parametrierung, Nutzung möglicher externer Referenzgeometrie sowie der jeweilige Datentyp (3D/2D) zu betrachten. 3D-Datensätze können grundsätzlich im Rahmen des parametrisch-assoziativen Führungsmodells eingegliedert werden. In Hinblick auf die Parametrik müssen stets die Steuerlogik und die Verknüpfungslogik des Bauteils bzw. der Baugruppe analysiert werden. Da für die Einbindung stets die erforderlichen Funktionen des jeweiligen CAD-Systems genutzt werden sollen, ist sicherzustellen, dass sich keine Zirkelbezüge oder Konsistenzkonflikte ergeben.

Vorhandene parametrisch-assoziative Datensätze weisen grundsätzlich die bereits in Kap. 4.6 gezeigte Struktur auf. Solche Modelle werden daher über entsprechende Parameter und Geometrie gesteuert. Im Falle der Parameter können diese auch aus einer externen Quelle stammen. Hierzu wird im *Konzept-Framework* der in Abb. 5.48 gezeigte Prozess ausgeführt:

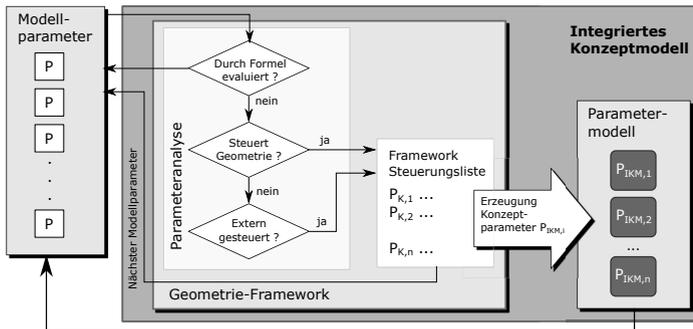


Abb. 5.48: Parameterintegration über das *Konzept-Framework*

Zunächst werden alle Parameter eines Modells in Hinblick auf ihre Definition im Modellkontext definiert. Parameter, die im Modell keine steuernden oder evaluierenden Funktionen haben, werden nicht weiter im Analyseprozess berücksichtigt. Parameter mit steuernder Funktion werden in einer eigenen Liste gespeichert, auf Basis jener Werte, die als äquivalente Parameter des Konzeptmodells generiert werden. Im Falle von Parametern, die von externen Quellen gesteuert werden, muss im Vorfeld geklärt werden, ob die verwendete Systematik mit den Konsistenzkriterien des integrierten Konzeptmodells harmoniert oder nicht. Im Falle komplexerer externer Quellen, wie etwa umfangreicher Tabellenkalkulationen, wird eine Überführung aller Berechnungen in das integrierte Konzeptmodell nur bei sehr einfachen und einer geringen Anzahl an Berechnungen sinnvoll sein. Komplexe Berechnungsblätter werden daher über die Funktionsschnittstelle eingebunden (s. Kap. 5.4.3). Im Falle der Nutzung externer Geometrie ist zu klären, ob diese aus Perspektive der Konsistenz in das Führungsmodell verbaut werden muss.

Für neue Module sollte ein Aufbau gemäß Abb. 5.49 angestrebt werden. Dieser ermöglicht eine strukturierte Ablage der Informationen sowie eine effiziente Kontrolle über die jeweilige Automationsschnittstelle.

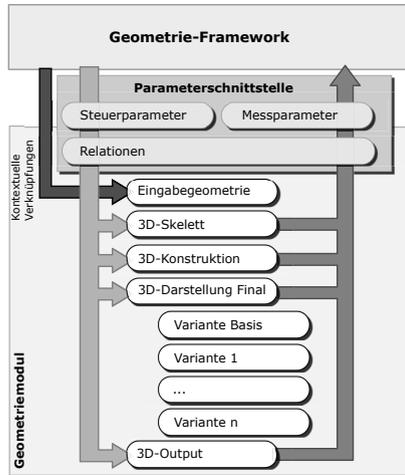


Abb. 5.49: Aufbau und Komponenten eines generischen Geometriemoduls

Die in Abb. 5.49 gezeigte Struktur ähnelt jener von Harrich [43] gewählten Gliederungssystematik, wobei diese um die Variantenabbildung und die Parametrischnittstelle erweitert wird. Das Modell fußt auf einem geometrischen Drahtmodellskelett, das allgemeine geometrische Referenzen beinhaltet. Die eigentliche Form wird in der *3D-Konstruktion* erstellt, wobei die finale sichtbare Darstellung unter *3D-Darstellung Final* abgelegt wird. Diese ist entsprechend der visuellen Optionen im Kontext des Gesamtmodells (z. B. Karosserieoptionen, Sitzplatzoptionen ...) in Variantenknoten strukturiert, wodurch über die entsprechenden Visualisierungsparameter die jeweilige Sichtbarkeitskonfiguration eingestellt werden kann. Um eine einheitliche Struktur zu gewährleisten ist die Variante *Basis* stets vorhanden. Weitere Varianten können bei Bedarf hinzugefügt werden.

Die Steuerung der Geometrie kann bei Bedarf über das integrierte Konzeptmodell erfolgen. Hierzu werden alle erforderlichen Steuerungsparameter als CAD-Parameter, gemäß den Ausführungen in Kap. 5.4.2.2, abgebildet und mit den entsprechenden Features verknüpft. Werden die Modellparameter entsprechend dem Parameterbenennungsschema des integrierten Konzeptmodells benannt, kann eine Zuweisung von Steuerungs- und Messparametern aus dem übergeordneten *Geometrie-Framework* Konzeptmodell automatisiert erfolgen. Selbiges gilt für Parameter, welche Modellgrößen messen.

Aus dem Blickwinkel der geometrischen Stabilität ist auf eine robuste Modellgestaltung gemäß den Ausführungen in Kap. 4.1 zu achten. Aufgrund der angestrebten Entkoppelung des Entwicklers von direktem Zugriff auf die Modellparametrik, muss diese besonderen Stabilitätsanforderungen genügen. Dabei soll bewusst nicht das Ziel verfolgt werden, alle denkbaren Parameterkonstellationen abzudecken, sondern im Falle einer auftretenden Instabilität eine gezielte Deaktivierung betroffener Modellbereiche herbeiführen zu können (s. auch Kap. 5.4.5).

5.4.3 Das Funktions-Framework

5.4.3.1 Aufbau und Struktur des Funktions-Frameworks

Der Zweck des *Funktions-Frameworks* ist die konsistente Integration von Funktionsmodellen und Berechnungen in das integrierte Konzeptmodell. Das Ziel ist, auf Basis aktueller Geometrieminformation sowie Parameterdaten funktionale Produktmerkmale darzustellen und reproduzierbar bewerten zu können. Analog dem *Geometrie-Framework* wird ein *Funktions-Framework* definiert, das die Schnittstelle in die Funktionswelt darstellt. Einen Überblick über die Grundgestalt des *Funktions-Frameworks* gibt Abb. 5.50:

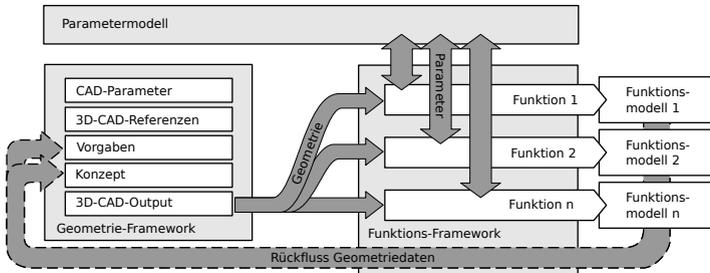


Abb. 5.50: Überblick über das *Funktions-Framework*

Die informationstechnische Konsistenz für im *Funktions-Framework* definierte Funktionen wird dadurch erreicht, dass alle für das jeweilige Funktionsmodell erforderlichen Eingabeinformationen über ein zugehöriges *Funktionsobjekt* bereitgestellt werden. Berechnete Daten in Form von Parametern werden in das Parametermodell übergeben; Geometrie in Form von Meshes oder neutraler Geometrie kann je nach Kontext im Sinne einer Vorgabe auf Basis funktionaler Gegebenheiten interpretiert werden (Ablage im Knoten *Vorgaben* des *Geometrie-Frameworks*) oder kann einem geometrischen Ist-Zustand entsprechend und damit im Knoten *Konzept* des *Geometrie-Frameworks* abgelegt werden. Gemäß Abb. 5.31 können Simulationen aus der Ergebnisperspektive neben Parametern und Geometrie zudem grafische Ausgaben in Form von Plots oder tabellarische Ausgaben generieren. Diese Informationen können nicht direkt auf Objekte des integrierten Konzeptmodells zugeordnet werden. Sie werden daher indirekt in Form von Parametern abgelegt, welche die Pfade zu den jeweiligen Ergebnisdateien beinhalten.

Die Beschreibung einer Funktion besteht im vorliegenden Ansatz aus dem *Funktionsobjekt* und dem eigentlichen Funktionsmodell selbst. Das *Funktionsobjekt* dient der eindeutigen Zuordnung erforderlicher Ein- und Ausgabedaten innerhalb des *Funktions-Frameworks*. Die Ausgabedaten einer Berechnung bzw. Simulation sollen aus Sicht des integrierten Konzeptmodells als Ergebnisdaten aufgefasst werden. Die grundsätzliche Beschreibung eines Funktionsobjektes zeigt Abb. 5.51.

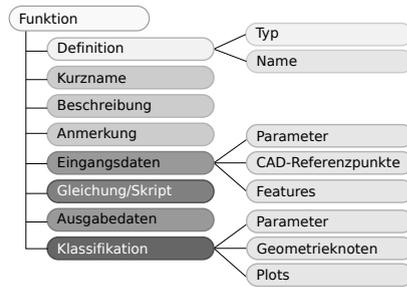


Abb. 5.51: Aufbau eines Funktionsobjektes

Das Attribut *Definition* besteht aus den beiden Sub-Attributen *Typ* und *Name*. *Typ* legt dabei analog zum äquivalenten Attribut eines Parameters die grundlegende Art der Beziehung fest. Dieses kann die folgenden Werte annehmen:

- Mathematischer Ausdruck
- Maßkette
- Ausführungsskript einer Berechnung/Simulation/Tabellenkalkulation

Die Attribute *Kurzname*, *Beschreibung* sowie *Anmerkung* sind identisch mit ihren Pendanten des Parameter-Objektes (s. Kap. 5.3.1). Das Attribut *Eingangsdaten* umfasst die erforderlichen Eingangsparameter, *3D-CAD-Referenzpunkte* sowie *Features* des veröffentlichten CAD-Modells. Das Attribut *Gleichung/Skript* beinhaltet im Falle mathematischer Beschreibungen den jeweiligen formalen Zusammenhang in textueller Form oder den Pfad zu einem entsprechenden Berechnungs-/Simulationsskript. Das Attribut *Ausgabedaten* beinhaltet die Ergebnisse der jeweiligen Berechnung/Simulation. Dies können Parameter, Geometrieknoten oder Plots sein. Im Falle von Parametern werden die jeweiligen IDs auf die Ist-Werte des Parameters geschrieben. Das Sub-Attribut *Geometrieknoten* speichert den Strukturpfad im Führungsmodell in dem Netze oder anderer geometrischer Output abgelegt werden. Das Sub-Attribut *Plots* beinhaltet den Speicherpfad zu allfälligen Ergebnisplots einer Simulation. Das Attribut *Klassifikation* beinhaltet analog zu den Parametern die jeweils zugeordnete Klassifikation.

5.4.3.2 Workflows im Funktions-Framework

Die Funktionsobjekte schaffen die Grundlage zur automationsgestützten Durchführung von Berechnungen und Simulationen im Gesamtfahrzeugkontext. Im Folgenden sollen nun die grundlegenden Workflows und Datenflüsse im *Konzept-Framework* betrachtet werden.

Die Integritätsforderung verlangt, dass im Falle einer Änderung eines Modellparameters, der funktionale Wirksamkeit besitzt, eine entsprechende Reaktion des Gesamtsystems erfolgt. Diese kann darin bestehen, dass die beeinflussten Funktionen automatisch neu simuliert werden, oder das System eine Warnung liefert, dass eine erneute Berechnungsschleife erforderlich ist. Aus diesem Grund erfolgt die Ausführung von Berechnungen bzw. Simulationen, die nicht direkt über die CAD-Logik im Geometriemodell automatisch ausgeführt werden, über die Nutzung entsprechender Skripte. Das Ablaufschema ist in Abb. 5.52 dargestellt.

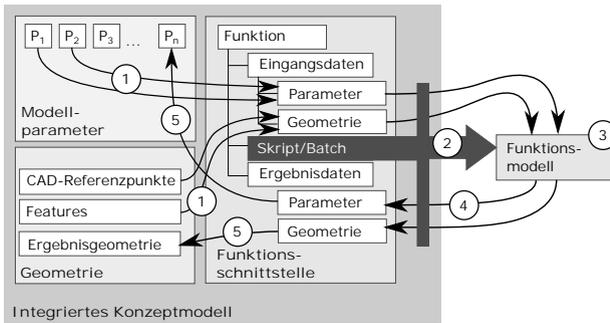


Abb. 5.52: Grundlegende Datenflüsse im *Funktions-Framework*

Die erforderliche Berechnung/Simulation ist gemäß dem gezeigten Objektmodell aus Abb. 5.51 im Attribut *Gleichung/Skript* abgelegt. Jeder Funktion, die im Kontext des integrierten Konzeptmodells definiert wird, ist ein entsprechendes Funktionsobjekt zugeordnet. Die Ausführung einer jeden Funktion erfordert zunächst das Auslesen der aktuellen Werte von Parametern, bzw. der geometrischen Gestalt der jeweiligen Features. Diese Informationen werden durch das jeweilige Skript bei Bedarf einer erforderlichen Aufbereitung zugeführt. Diese kann bei Parametern in einer Konvertierung in andere Einheitensysteme sowie erforderlicher Skalierung bestehen. Im Falle von Geometrie kann diese üblicherweise in geometriearaffinen Domänen nicht direkt genutzt werden, sondern muss zunächst in ein geeignetes Netz übergeführt werden. Im Falle der Anbindung von *3D-CAD-Referenzpunkten* werden diese entweder in textueller Form an das jeweilige Zielsystem übergeben oder als neutraler CAD-Datensatz bereitgestellt. Neben diesen Informationen sind zur Durchführung einer Berechnung oder Simulation entsprechende Berechnungs- sowie Umgebungsdaten erforderlich. Diese umfassen etwa den gewählten Solver oder den zu nutzenden Zeitschritt. Die Umgebungsdaten schließen physikalische Randbedingungen wie Druck, Temperatur oder ähnliche Größen ein.

Liegen alle Eingangsdaten in der geforderten Form vor, kann die Berechnung bzw. Simulation entsprechend der gewählten Randbedingungen durchgeführt werden. Gestartet wird die Simulation ebenfalls durch das Skript. Ist die Simulation beendet, werden durch das jeweilige Skript die erforderlichen Aufbereitungsmechanismen angestoßen. Diese können in der Erstellung von Plots oder geometrischen Ergebnissen, wie etwa Netzen, bestehen. Die ermittelten Informationen können, wie bereits eingangs in Kap. 5.4.3.1 erwähnt, auf mehrere Arten im integrierten Konzeptmodell wie im *Geometrie-Framework* genutzt werden:

- Ableitung weiterer technischer Zielwerte auf Basis definierter Prämissen
- Berechnung von Eigenschaften und deren Gegenüberstellung zu formulierten Zielwerten
- Einbindung geometrischer Ergebnisse in Form von funktional-geometrischen Vorgaben im Knoten *Vorgaben* des *Konzept-Frameworks*
- Einbindung geometrischer Ergebnisse in den *Knoten* Konzept des *Konzept-Frameworks*

Dies entspricht der typischen Entwicklungssicht einer Architekturabteilung, welche die geometrischen Gegebenheiten im Konzept als Ausgangsbasis für funktionale Untersuchungen nutzt.

5.4.4 Das Konfigurationsmodell

Ein wesentliches Merkmal des Produktdatenmanagements ist dessen Fähigkeit Produktkonfigurationen darzustellen [33] (s. Kap. 4.4), um damit einen eindeutigen Produktdatenzustand zu beschreiben. Dieses Merkmal soll auch das vorgestellte integrierte Konzeptmodell besitzen. Die grundlegenden Elemente einer Konfiguration werden in Abb. 5.53 dargestellt. Dementsprechend sind die zu einem Konzept gehörenden Parameter, die Geometrie- und Funktionsmodelle sowie die Konzeptproduktstruktur Teile einer Konfiguration.

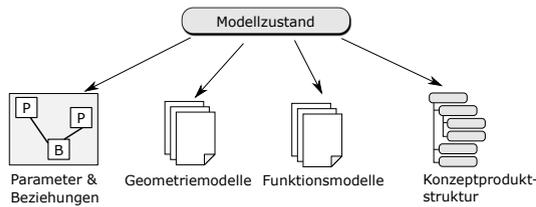


Abb. 5.53: Grundlegende Elemente des Konfigurationsmodells

Das hierfür verantwortliche *Konfigurationsmodell* des vorliegenden Ansatzes soll neben typischer Inhalte um spezifische Objekte des integrierten Konzeptmodells, wie etwa Parameter oder *3D-CAD-Referenzpunkte*, erweitert werden. Einen grundlegenden Überblick über das Konfigurationsmodell gibt Abb. 5.54.

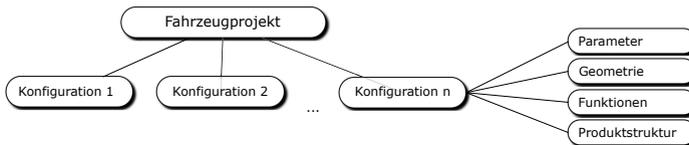


Abb. 5.54: Grundlegende Gestalt des Konfigurationsmodells

Den grundsätzlichen Kontext für Informationen bildet stets ein Fahrzeugprojekt, für das ein neues Konzept erstellt werden soll. Für das Fahrzeugprojekt können unterschiedliche Konfigurationen definiert werden, welche einen eindeutigen Zustand des Gesamtmodells repräsentieren. Eine Konfiguration soll daher alle erforderlichen Elemente des Konzeptmodells wie Parameter, Geometrie, Funktionen sowie Produktstruktur beinhalten können. Neben der Aussteuerung von Produktkonfigurationen soll das Konfigurationsmodell um deskriptive Meta-Informationen, wie beispielsweise Karosserievarianten oder Anzahl der Sitzplätze, erweitert werden. Dementsprechend muss das Objektmodell flexibel gestaltet werden.

Den grundlegenden Informationsbaustein stellt folglich das *Fahrzeugprojekt* dar. Dieses beinhaltet alle dem jeweiligen Fahrzeugprojekt zugeordneten Informationen (s. Abb. 5.55).

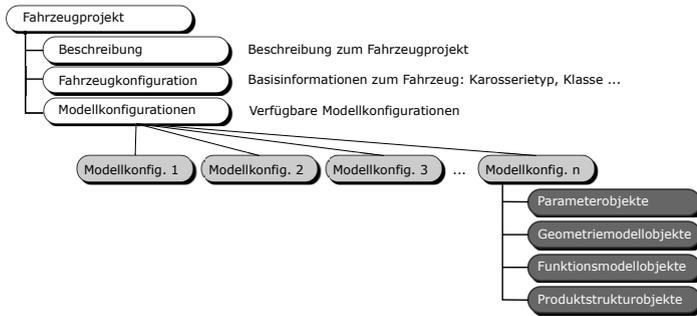


Abb. 5.55: Hauptobjekte des Konfigurationsmodells

Auf erster Ebene finden sich das Attribut *Beschreibung* und die Objekte *Fahrzeugkonfiguration* sowie *Modellkonfigurationen*. Dem Objekt *Modellkonfigurationen* sind dabei alle definierten Modellkonfigurationen untergeordnet. Die *Beschreibung* beinhaltet allgemeine Informationen zu dem aktuellen Fahrzeugprojekt in textueller Form. Das Objekt *Modellkonfiguration* beinhaltet klassifizierende Informationen des Fahrzeugs wie etwa die Karosserievariante, Anzahl Sitzplätze, Antriebsart und Antriebssystem (s. Abb. 5.56). Die *Fahrzeugkonfiguration* beinhaltet damit Informationen die nach initialer Festlegung im Allgemeinen nicht mehr geändert werden.

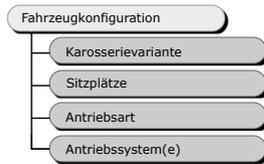


Abb. 5.56: Inhalte des Objektes Fahrzeugkonfiguration

Eine Modellkonfiguration beinhaltet dabei den vollständigen parametrischen und datentechnischen Zustand des Fahrzeugs zur eindeutigen Rekonstruktion. Diese Konfiguration umfasst die Pfade zu genutzten Datensätzen, parametrische Konfiguration sowie die Aktivitätsstatus von *3D-CAD-Referenzpunkten*.

5.4.5 Das Kontrollmodell

Das Kontrollmodell ist innerhalb des *Konzept-Frameworks* für die informationstechnische Konsistenz verantwortlich. Es umfasst die Kontrolle der Modellparameter, der Beziehungen zu den im Führungsmodell verknüpften CAD-Modelle, die Feature-Aktivität auf CAD-Modellebene und die Aktivität der Funktionsschnittstellen. Das Kontrollmodell wacht daher zu jedem Zeitpunkt über das integrierte Konzeptmodell. Hierzu sind seitens des Kontrollmodells zwei Hauptfunktionen erforderlich. Erstens muss im Falle einer Parameteränderung die Konsistenzkontrolle aktiviert werden, die in Abb. 5.57 dargestellt ist. Die grundsätzliche Funktion wird in [89] beschrieben.

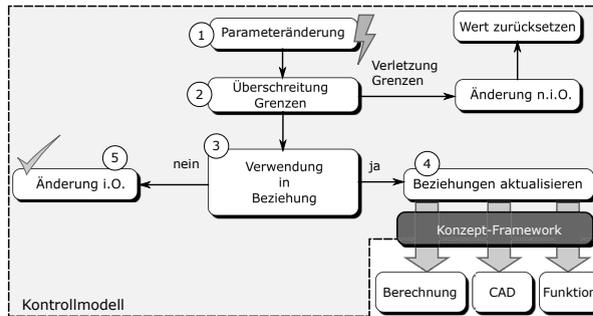


Abb. 5.57: Kaskadierender Prozess bei Änderung eines Parameters

Findet eine Änderung eines Parameterwertes statt, ist zunächst die Kontrolle der festgelegten Grenzen erforderlich. Befindet sich der Wert außerhalb des festgelegten Bereiches, erfolgt eine automatische Korrektur auf den ursprünglichen Wert. Im Falle der Über-/Unterschreitung des Toleranzbereiches kann der Wert grundsätzlich genutzt werden, allerdings muss die Ausgabe eines entsprechenden Warnhinweises erfolgen. Werden die formulierten Grenzbereiche erfüllt, erfolgt der nächste Schritt in der Konsistenzprüfung. Diese prüft, ob der betreffende Parameter in einer Beziehung auftritt. Dies umfasst alle Bedingungen angefangen von Formeln bis hin zur Nutzung in geometrischen Modellen sowie Funktionsmodellen. Im Falle der Nutzung in Formeln erfolgt die Evaluierung bei mathematischen Beziehungen, die im Parametermodell definiert sind, sowie jener Parameter in eingebundenen CAD-Systemen automatisch. Im Falle von Berechnungen und Simulationen muss die Prüfung per Skript durch das System angestoßen werden, oder eine entsprechende Konsistenzwarnung ausgegeben werden. Parallel dazu müssen die CAD-Modelle, die parametrisch im Führungsmodell vernetzt sind, aktualisiert werden. Hierbei besteht grundsätzlich stets die Möglichkeit, dass Modelle ob ihrer Komplexität in instabile Zustände gebracht werden können. So können etwa Geometrie-Features degenerieren oder ungeeignete Formen annehmen. Deshalb wird die Modellaktualisierung durch das integrierte Konzeptmodell selbst durchgeführt. Den schematischen Prozess zeigt hierzu Abb. 5.58.

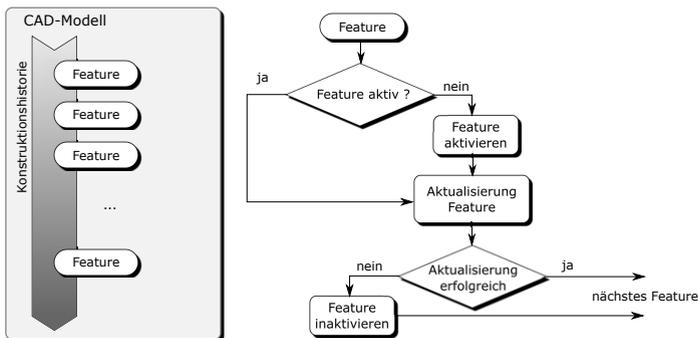


Abb. 5.58: Workflow zur Aktualisierung eines CAD-Features

Für CAD-Modelle parametrisch-assoziativer Natur können die vielfältigsten Parameterkonstellationen auftreten. In Abb. 5.59 ist beispielhaft das im Zuge der prototypischen Umsetzung ge-

nutzte Exterieur-Proportionsmodell gezeigt. Im CAD-Modell selbst sind keinerlei Konsistenzprüfungen implementiert. Daher kann grundsätzlich jede beliebige Parameterkonstellation realisiert werden, solange sie in einem stabilen Zustand des Modells mündet. Wird wie im vorliegenden Beispiel die Karosseriebreite zu stark verringert, kommt es aufgrund der genutzten Flächenkonstruktion zu Fehlern bzw. zur vollständigen Degeneration. Da parametrisch-assoziative Konstruktionssysteme keine inkonsistenten Zustände zulassen dürfen [69], würde das betreffende CAD-System jede weitere Aktion unterbinden. Um die Stabilität der Modelle zu gewährleisten erfolgt die Modellaktualisierung durch das integrierte Konzeptmodell selbst. Alle Features werden skriptbasiert sukzessive einer elementbasierten Aktualisierung unterzogen. Kann ein Element nicht aktualisiert werden, wird dieses automatisch inaktiviert. Im Falle des Zurücksetzens in den letzten stabilen Zustand muss die gesamte Änderungskaskade rückgängig gemacht werden. Durch diese Vorgehensweise ergeben sich die folgenden Vorteile:

- Unabhängigkeit der Parameterwerte von den geometrischen Eigenschaften genutzter Proportionsmodelle
- Nutzung automatischer Korrekturfunktionen
- Automationsgestützte De-/Aktivierung von Modellbereichen der Proportionsmodelle



Abb. 5.59: Mögliche Degeneration von CAD-Modellen infolge Parameterkonstellationen

Im Gegensatz zur Vorgehensweise von Niemierski [79], bei der die Flächen erst nach manueller Sichtkontrolle in einem weiteren Schritt generiert werden, ist durch die vorgestellte Vorgehensweise ein solcher Schritt obsolet. Aufgrund der Differenzierung von Skelett und darauf aufbauenden Flächen ist die visuelle Kontrolle zu jedem Zeitpunkt gegeben.

Neben der Parameterkontrolle ist es die Verantwortung des Kontrollmodells, die Editierkonsistenz im Falle von Maßketten und umformbaren Beziehungen sicher zu stellen. Als Beispiel sollen die Maßketten aus Abb. 5.60 dienen:

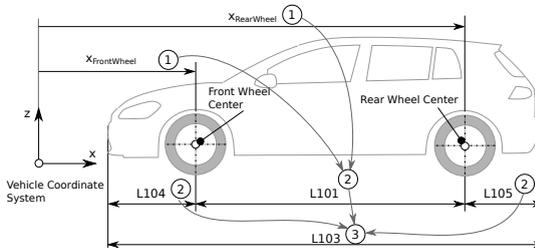


Abb. 5.60: Maßkettensteuerung im Exterieur

Die Fahrzeuglänge (L103) ergibt sich aus dem nachstehenden Maßkettensystem:

$$L103 = L104 + L101 + L105 \quad (5.7)$$

$$L101 = x_{hi,1} - x_{vo,1} \quad (5.8)$$

Die Gesamtlänge resultiert damit aus der Summe aus Überhang vorne (L104), Radstand (L101) und Überhang hinten (L105), der Radstand resultiert aus der Differenz der x-Koordinaten der Radzentren. L103 ist damit die Resultierende des Maßkettensystems (s. Abb. 5.61). Es kann erforderlich sein, dass diese Beziehung umgeformt werden muss, weil ein Fahrzeug mit einer vorgegebenen Länge entwickelt werden soll. Daher muss der Parameter L103 zu einer Eingangsgröße werden, da das Maßkettensystem ansonsten überbestimmt ist. Da das Maßkettensystem nur in Richtung L103 eindeutig ist, muss an dieser Stelle die Festlegung des freien Parameters durch den Anwender erfolgen. Im vorliegenden Beispiel wird L104 als freier Parameter definiert und kann daher nicht mehr interaktiv gesteuert werden.

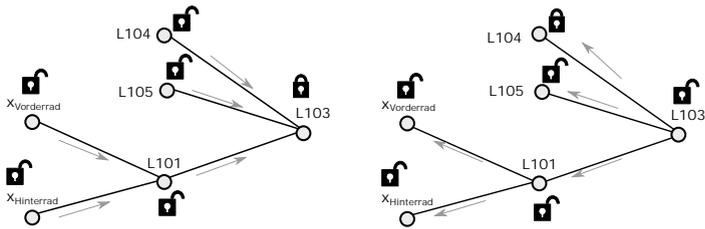


Abb. 5.61: Unterschiedliche Evaluierungsrichtungen von Maßketten

5.5 Klassifikations- und Sichtenmodell

Das integrierte Konzeptmodell umfasst einen hohen Umfang an unterschiedlichen Informationen. Im Zuge einer Konzeptauslegung ist es daher vielfach erforderlich, die vorhandene Informationsmenge bewusst einzugrenzen oder einen alternativen Kontext festzulegen. Hierzu sollen die in Abb. 5.62 (a) dargestellten Objekte genutzt werden können. So kann es erforderlich sein, alle geometrischen Grenzflächen anzeigen zu lassen, welche durch die Gesetzgebung definiert werden, oder eine Filterung von Informationen entsprechend der Anforderungen unterschiedlicher Marktregionen vorzunehmen. Hierzu sollen im Rahmen des vorgestellten Ansatzes zwei verschiedene Objekte eingeführt werden – die *Klassifikation* und die *Sicht* (s. Abb. 5.62 (b)).

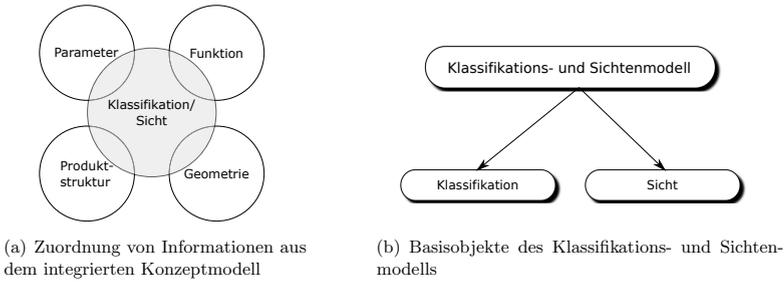


Abb. 5.62: Überblick über das Klassifikations- und Sichtenmodell

Die *Klassifikation* entspricht einer „flachen“ Gruppierung von Objekten des integrierten Konzeptmodells und stellt damit ein typisches Filterkonzept dar. Der Aufbau des zugehörigen Klassifikationsobjektes wird in Abb. 5.63 gezeigt.

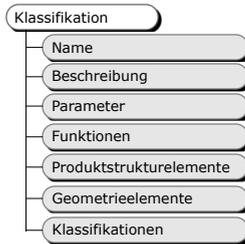


Abb. 5.63: Aufbau eines Klassifikationsobjektes

Die *Sicht* entspricht einer strukturierten und kontextualisierten Informationsgliederung. Analog dem Ansatz nach Gessner [39], der in Kap. 4.7 vorgestellt wird, ist es hilfreich im Kontext des Gesamtfahrzeugs spezielle Objekte zu definieren, die Kernmerkmale eines Fahrzeugs repräsentieren. Hierzu zählen etwa die Fahrzeugbereifung (s. Abb. 5.65) oder die Sitzplätze (s. Abb. 5.66). Solche Objekte sollen im Folgenden im Kontext des vorliegenden Ansatzes als *Sicht* bezeichnet werden.

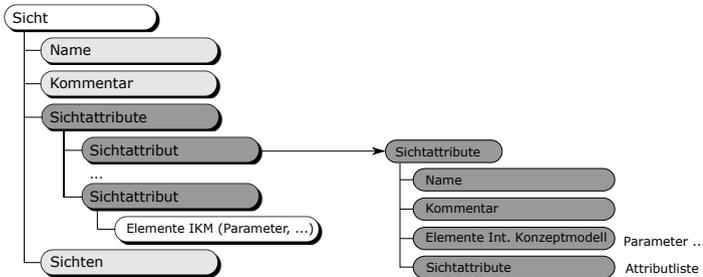


Abb. 5.64: Aufbau des Sichtenobjektes

Auf erster Ebene des Sichtenobjektes finden sich die Elemente *Name*, *Kommentar*, *Auftistung*

Sichtattribute und *Auflistung Sichten* (s. Abb. 5.64). Die Elemente Name und Kommentar umfassen die Benennung und die Beschreibung des jeweiligen Sichtobjektes. Die Auflistung der Sichtattribute beinhaltet alle auf der jeweiligen Ebene vorhandenen Sichtknoten. Ein *Sichtattribut* umfasst dabei die Elemente *Name*, *Kommentar*, *Elemente des integrierten Konzeptmodells* sowie das Element *Sichtattribute*. Name und Kommentar dienen, analog der Sicht, der Benennung und näheren Beschreibung des Sichtattributes. Der Attributtyp legt den Typ des Attributes analog des in Kap. 5.3.1 vorgestellten Parametermodells fest.

Das Konzept einer Sicht soll im Folgenden an zwei Beispielen illustriert werden – der Fahrzeugbereifung und der Sitzauslegung. Die Fahrzeugbereifung ist ein komplexes Themenfeld aus Sicht des Gesamtfahrzeugs. Für moderne Fahrzeuge sind zumeist verschiedene Räder-Reifen-Programme verfügbar, wodurch sich unterschiedliche Breiten und Durchmesser ergeben, die zusätzlich einer Varianz durch die verschiedenen Beladungszustände unterworfen sind. Der grundsätzliche Aufbau des Bereifungsobjektes ist in Abb. 5.65 dargestellt.

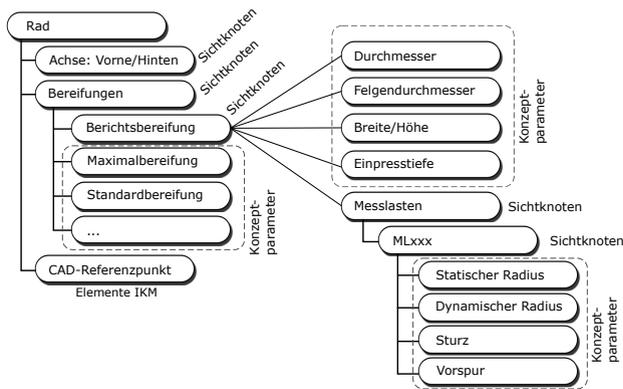


Abb. 5.65: Informationsstruktur des Bereifungsobjektes

Das Attribut *Achse* legt fest, ob sich die Bereifungsinformation auf die Vorder- oder Hinterachse bezieht, da bei modernen PKW Mischbereifungen durchaus üblich sind, d. h. unterschiedliche Reifendimensionen an Vorder- und Hinterachse. Das Objekt *Bereifungen* beinhaltet verschiedene Bereifungsdefinitionen. Diese umfassen etwa die Standardbereifung, welche für Homologations-tätigkeiten herangezogen wird, oder die Maximalbereifung, welche für Package-Fragestellungen maßgeblich ist. Die Bereifungsdefinition selbst setzt sich aus den Attributen Durchmesser, Felgendurchmesser, dem Breite/Höhe Verhältnis sowie der Einpresstiefe zusammen. Des Weiteren sind dem Objekt alle messlastspezifischen Größen, wie etwa die statischen Radien, sowie Sturz und Vorspur untergeordnet.

Ein weiteres Objekt dieser Art ist das *Sitzplatzobjekt*. Dieses bündelt alle sitzspezifischen Informationen, wie etwa Bezeichnung, Kommentar, Anordnung sowie zugehörige Parameter. Der Aufbau des Objektes ist in Abb. 5.66 dargestellt.

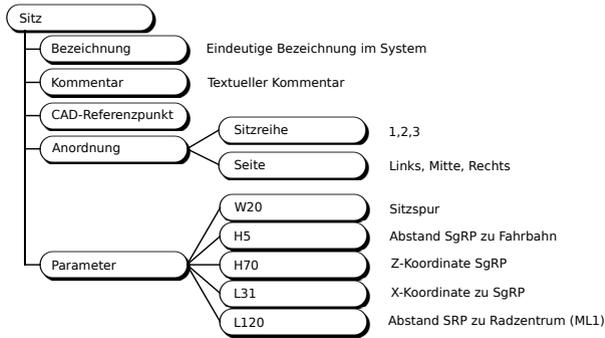


Abb. 5.66: Daten des Sitzplatzobjektes

Die Attribute *Bezeichnung* und *Kommentar* ermöglichen die Hinterlegung entsprechender erläuternder Informationen zu der jeweiligen Sitzposition. Das Attribut *3D-CAD-Referenzpunkt* beinhaltet den Verweis auf den entsprechenden *3D-CAD-Referenzpunkt* aus dem geometrischen Steuerungsmodell. Das Objekt *Anordnung* beinhaltet die Festlegung der Sitzreihe (1, 2, 3) sowie das Attribut *Seite*, das den Verbauort im Fahrzeug (Links, Mitte, Rechts) angibt. Des Weiteren fasst das Sitzobjekt im Knoten *Parameter* alle relevanten sitzplatzspezifischen Parameter zusammen.

In der praktischen Anwendung werden die Klassifikationen primär zur Gliederung von Parametern, wie in Kap. 6 gezeigt wird, genutzt.

5.6 Bewertungsmodell und -systematik

Ein zentraler Bestandteil der technischen Entwicklung, und damit auch der Konzeptarbeit, ist die Bewertung von technischen Eigenschaften des Entwurfs vor dem Hintergrund definierter Randbedingungen. Ein wesentlicher Aspekt des vorgestellten integrierten Konzeptmodells ist daher u. a. die Nutzung einer durchgehenden Bewertungsmethodik. Diese umfasst ein Datenschema zur Ablage erforderlicher Informationen, eine standardisierte Syntax (Taxonomie) zur Bereitstellung von Begrifflichkeiten im Kontext eines Konzeptes und ein zugehöriges Bewertungsschema, das den Bewertungsvorgang selbst beinhaltet. Einen Überblick über die grundlegenden Elemente des Bewertungsmodells sowie deren Verknüpfungen gibt Abb. 5.67.

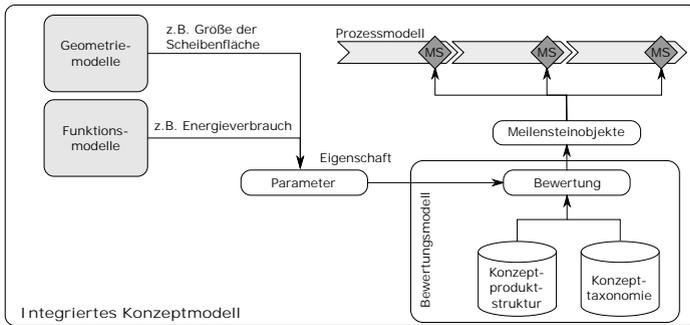


Abb. 5.67: Das Bewertungsmodell im integrierten Konzeptmodell

Dem Bewertungsmodell liegt die Vorstellung zugrunde, dass Parameter zu bewertende Eigenschaften des Fahrzeugs repräsentieren können (z. B. Radstand, Verbrauch, o. Ä.). Die Bewertung soll als Aussage zu dieser Eigenschaft verstanden werden. Eine Bewertung soll im vorliegenden Ansatz lediglich dem Ist-Wert eines Parameters zugeordnet werden können, da Zielwerte von ihrer inhaltlichen Ausprägung einer Vorgabe entsprechen und damit ein gewünschtes Soll darstellen, das selbst keiner Bewertung obliegt. Der Zweck einer Bewertung ist damit die Nachvollziehbarkeit warum ein Konzept zu einem bestimmten Zeitpunkt als funktionierend erachtet wird oder nicht.

Das Bewertungsmodell selbst stellt die geforderten Datenstrukturen bereit, um eine konsistente Bewertungsmethodik im Rahmen des integrierten Konzeptmodells bereitstellen zu können. Des Weiteren bildet es das Bindeglied zwischen den technischen Modellen im integrierten Konzeptmodell und dem Prozessmodell, das in Kap. 5.8 vorgestellt wird. Die Bewertungen und die daraus abgeleiteten technischen Maßnahmen lassen sich über die Zuordnung zu definierten Prozessmeilensteinen als Instrument zur durchgängigen Optimierung des Fahrzeugkonzeptes nutzen. Die Nutzung von Bewertungen und Maßnahmen zur Prozesssteuerung werden in Abb. 5.77 dargestellt. Im Folgenden sollen daher die Datenobjekte sowie deren Verknüpfungen näher betrachtet werden. Die praktische Anwendung des Bewertungsmodells und die Nutzung im Entwicklungsprozess wird in Kap. 6 gezeigt.

Das Datenschema wird durch sogenannte *Prüfobjekte* und deren Verknüpfungen untereinander repräsentiert. Ein Prüfobjekt beinhaltet grundsätzlich die Zuordnung zu einem konkreten Parameter des Konzeptes, oder die Zusammenfassung mehrerer Prüfobjekte zu einer sogenannten *Prüfgruppe*. Den grundsätzlichen Aufbau eines Prüfobjektes zeigt Abb. 5.68.

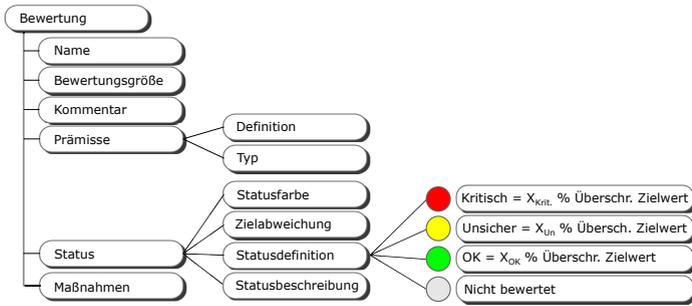


Abb. 5.68: Aufbau eines Bewertungsobjektes

Das Prüfobjekt setzt sich auf der obersten Ebene aus den Attributen *Name*, *Bewertungsgröße*, *Kommentar*, sowie den Objekten *Bewertungsgröße*, *Prämisse* und *Status* zusammen. Das Attribut *Name* dient der Benennung der Prüfung, die *Bewertungsgröße* speichert die Verknüpfung zum jeweiligen Parameterobjekt, Spezialobjekt und der *Kommentar* speichert erklärende Information. Das Objekt *Prämisse* legt den Grundtypus der Prüfung fest. Dieses setzt sich aus den beiden Attributen *Definition* und *Typ* zusammen. *Definition* beinhaltet hierfür die Festlegung des Archetyps der Prüfung. Unterschieden werden qualitative und quantitative Überprüfungen. Qualitative Prüfungen können über das dem integrierten Konzeptmodell zugrundeliegende Regelwerk automatisch evaluiert werden, wie später noch gezeigt wird. Qualitative Prüfungen setzen sich aus einem rein textuellen Bewertungssatz zusammen. Das Objekt *Status* beinhaltet alle weiterführenden Informationsobjekte, die den aktuellen Bewertungsstatus beschreiben. Dies umfasst die Attribute *Statusfarbe*, *Zielabweichung* im Falle numerischer Parameter, *Statusdefinition*, sowie die *Statusbeschreibung*. Die *Statusfarbe* beinhaltet die der jeweiligen Prüfung zugeordnete Statusfarbe. Die *Zielabweichung* speichert für einen verknüpften Konzeptparameter die Abweichung des Ist-Wertes zum definierten Ziel-Wert. Im Attribut *Statusdefinition* erfolgt die Festlegung der gültigen Grenzbereiche für die automatische Zuordnung der jeweiligen Statusfarben im Falle quantitativer Bewertungen. Im Feld *Statusbeschreibung* findet sich die Erläuterung zum jeweiligen Status. Im Falle quantitativer Bewertungen ist dieser Feld leer, im Falle qualitativer Bewertungen findet sich dort die textuelle Statuserklärung in Form eines logischen Bewertungssatzes. Das Schema hierzu ist in Abb. 5.69 angeführt. Für quantitative Bewertungen erfolgt die automatische Durchführung einer Bewertung auf Basis der Überschreitung festgelegter Zielwerte. Falls kein Zielwert spezifiziert ist, werden die entsprechenden Grenzen und Toleranzbereiche des zugrundeliegenden Parameters für die Bewertung herangezogen. Für jeden der möglichen Statuswerte wird hierfür ein Gültigkeitskriterium definiert, das über den gesetzten Wert entscheidet.

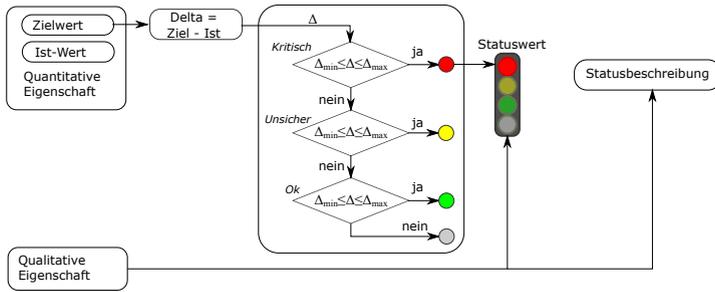


Abb. 5.69: Festlegung des Bewertungsstatus

Im Falle komplexerer Eigenschaften, die etwa in Form einer Prüfgruppe dargestellt werden können, ergibt sich der resultierende Statuswert aus der Akkumulation der untergeordneten Bewertungen (s. Abb. 5.69).

Qualitative Prüfungen können nicht automatisiert bewertet werden, da sie entweder gar nicht oder nicht zur Gänze durch quantifizierbare Eigenschaften dargestellt werden können. Die Abgabe einer qualitativen Bewertung kann außerdem im Falle mangelnder Verfügbarkeit von Detailkomponenten oder Proportionsmodellen in der frühen Konzeptphase erforderlich sein. Eine qualitative Aussage repräsentiert daher eine subjektive Wertung durch einen Anwender oder eine Anwenderin und kann daher nicht automatisiert werden. Damit würde man jedoch einen großen Unschärfegrad in das System eintragen, da die tägliche Sprache viele individuelle Merkmale besitzt und damit zur Beschreibung und Kommunikation technischer Problemstellungen nicht geeignet ist [69]. Um eindeutige und damit reproduzierbare Bewertungen zu erhalten, wird daher eine standardisierte Bewertungssprache eingeführt – der Bewertungssatz. Der grundlegende Aufbau ist in Abb. 5.70 dargestellt.

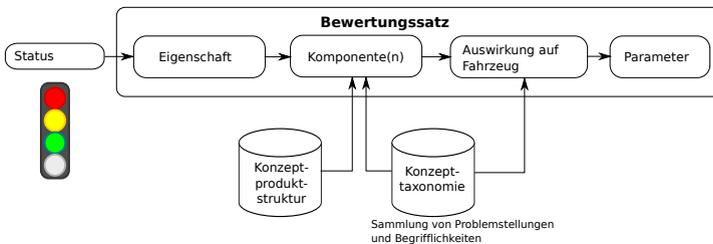


Abb. 5.70: Aufbau eines Bewertungssatzes

Analog quantitativer Eigenschaften muss auch die qualitative Eigenschaft zunächst einen entsprechenden Status erhalten. Dieser wird um den Bewertungssatz ergänzt, der die zentrale Aussage liefern soll: „Status xy weil ...“. Das erste Element im Bewertungssatz ist die Eigenschaft auf welche Bezug genommen wird. Aufgrund dessen, dass der vorliegende Ansatz auf die Belange der Fahrzeugarchitektur fokussiert ist, stellt den nächsten Baustein im Bewertungssatz die mögliche(n) involvierte(n) Komponente(n) des Fahrzeugs dar. Im Feld *Auswirkungen auf Fahrzeug* erfolgt die konkrete Problembeschreibung. Um individuelle, und damit schwer reproduzierba-

re Anmerkungen zu vermeiden, wird eine sog. Taxonomiedatenbank genutzt, welche typische Problembeschreibungen im Kontext der Fahrzeugarchitektur vordefiniert.

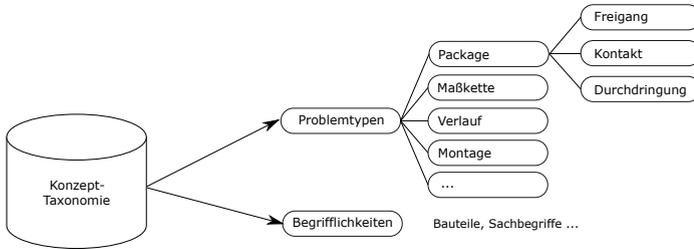


Abb. 5.71: Inhalt der Taxonomiedatenbank

Folgendes Beispiel soll die Nutzung einer Taxonomiedatenbank erläutern: Ein Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang soll einen niedrigen Ladeboden erhalten. Das CAD-Modell der Abgasanlage ist jedoch noch nicht verfügbar. Dennoch wird entschieden, dass die Ladebodenhöhe auf rot gesetzt wird, da aufgrund der bestehenden Entwicklungserfahrung abschätzbar ist, dass sich Kollisionen mit dem Endschalldämpfer (ESD) ergeben werden (s. Abb. 5.72).

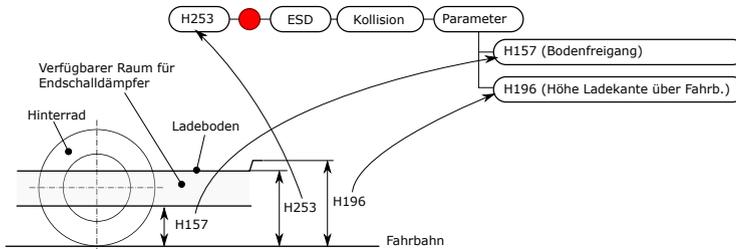


Abb. 5.72: Inhalt der Taxonomiedatenbank

Der Bewertungssatz beinhaltet demnach den Status zur gewählten Eigenschaft Höhe Ladeboden (H253), die beeinflusste Komponente (ESD), das Problem (Kollision) sowie die beeinflussten Parameter H157 (Bodenfreigang) und H196 (Höhe Ladekante über Fahrbahn).

Das letzte Attribut in Abb. 5.68 stellen die *Maßnahmen* dar. Da als wesentliches Merkmal des integrierten Konzeptmodells die Reproduzierbarkeit getroffener Bewertungen und Entscheidungen definiert wird, werden im Attribut *Maßnahmen* alle aufgrund einer erfolgten Bewertung resultierenden technischen Maßnahmen und Konsequenzen abgelegt. Diese werden dort in textueller Form gespeichert (s. Kap. 6.6.9)

5.7 Datenbankmodell und Archivierungssystematik

Ein essentieller Baustein des vorgestellten Ansatzes eines integrierten Konzeptmodells stellt eine konsistente Archivierungssystematik dar. Wie bereits im vorangegangenen Kap. 5.6 angeführt, stellt die konsistente und damit transparente Nachvollziehbarkeit von Informationen und darauf

basierenden Entscheidungen ein zentrales Merkmal des integrierten Konzeptmodells dar. Um die getätigten Bewertungen reproduzieren zu können und das im integrierten Konzeptmodell gespeicherte Auslegungswissen wiederzuverwenden, muss der gesamte Modellzustand archiviert werden. Dies umfasst daher die zum Zeitpunkt x genutzten Parameter, Beziehungen, Geometrie- und Funktionsmodelle sowie Elemente der Konzeptproduktstruktur.

Die Darstellung des Datenmanagements gestaltet sich als komplexe Herausforderung in der frühen Konzeptphase, da viele Datenquellen externer Natur sind, wie etwa Datenbanken, welche nicht durch die implementierten Automatismen des integrierten Konzeptmodells kontrolliert und gesteuert werden. Daher muss an dieser Stelle eine bewusste Eingrenzung vorgenommen werden. Im Falle der Nutzung externer Datenquellen soll es als ausreichend gelten, die Quelle, sowie das Datum, bzw. die Datenkonfiguration, textuell zu hinterlegen. Dies soll im jeweiligen Parameter (Attribut *Datenquelle* in Abb. 5.6) oder CAD-Datensatz gespeichert werden.

Die grundsätzliche Strategie zur Archivierung ist in Abb. 5.73 illustriert. Durch die Nutzung der Datenobjekte aus dem bereits vorgestellten Konfigurationsmodell (s. Kap. 5.4.4) wird die geforderte Eindeutigkeit und Konsistenz über die zeitliche Entwicklung eines Projektes hinweg sichergestellt. Die Archivierung erfolgt über die Sicherung der einzelnen Fahrzeugkonfigurationen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dadurch sind automatisch alle erforderlichen Informationen eindeutig dem jeweiligen Stand zugeordnet. Durch die parametrische Eindeutigkeit der unterschiedlichen Konfigurationen kann die Datenintegrität zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden.

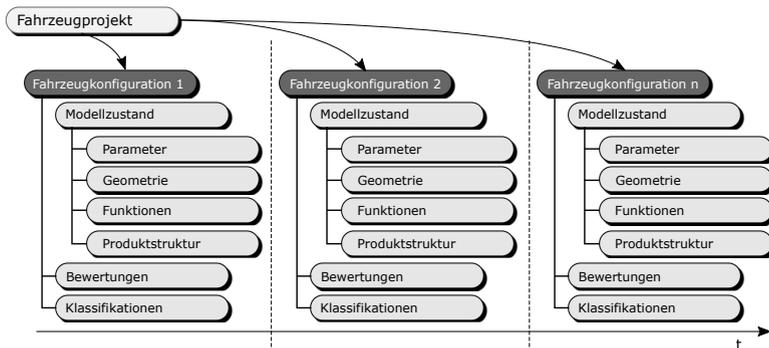


Abb. 5.73: Grundvorstellung zur systematischen Archivierung im integrierten Konzeptmodell

5.8 Das Prozessmodell

Wie in Kap. 3 beschrieben, ist die frühe Konzeptphase aus Informationssicht durch die mannigfaltige Entstehung von Daten gekennzeichnet (s. Abb. 5.74). Viele dieser Informationen sind aufeinander aufbauend, sowie untereinander vernetzt. Die Ermittlung von technischen Produktmerkmalen ist daher stets an einen Datenprozess gekoppelt. Die jeweiligen Meilensteine der frühen Konzeptphase sind durch spezifische Datenbedarfe gekennzeichnet, die es prozessgerecht zu versorgen gilt.

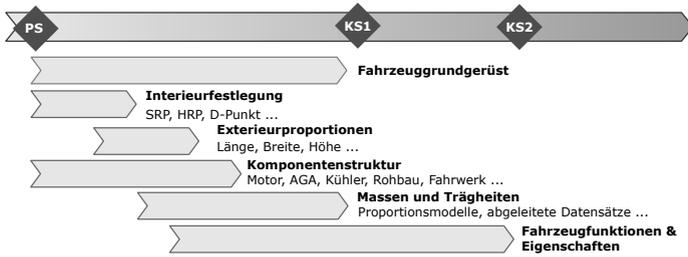


Abb. 5.74: Exemplarische zeitliche Entstehung von Konzeptdaten

Das Prozessmodell des vorliegenden Ansatzes ermöglicht hierzu die Prozessmodellierung mittels folgender Objekte:

- Workflowobjekt
- Meilensteinobjekt
- Eigenschaftsobjekt

Workflows dienen der Beschreibung zusammenhängender Arbeitsabläufe und definieren, wie eine bestimmte Eigenschaft des integrierten Konzeptmodells mit dessen Elementen ermittelt werden kann. Hierzu ist das erforderliche Workflowobjekt in Abb. 5.75 dargestellt. Neben den Grundattributen *Name* und *Beschreibung* können dem Workflowobjekt Konzeptobjekte sowie weitere Workflows zugeordnet werden. Der eigentliche Workflow entsteht durch die sukzessive Abarbeitung der einzelnen untergeordneten Konzeptobjekte und Workflows.



Abb. 5.75: Objektschema eines Workflowobjektes

Meilensteine grenzen Prozessphasen untereinander ab. Ihnen sind entsprechende Eigenschaften zugeordnet, welche mit entsprechenden Qualitätskriterien versehen sind, die über eine erfolgreiche Passage des jeweiligen Meilensteins entscheiden (vgl. [17]). Damit stellen Meilensteine ein wichtiges Steuerungsinstrument im Entwicklungsprozess dar. Hierzu zeigt Abb. 5.76 den Aufbau eines Meilensteinobjektes mit untergeordneten Bewertungsobjekten (s. Kap. 5.6), denen die zu bewertenden Eigenschaften untergeordnet sind.

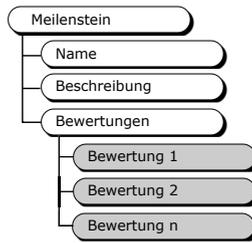


Abb. 5.76: Objektschema des Meilensteinobjektes

Durch die gezeigten Objekte lassen sich daher Prozesse sowie Arbeitsschritte mit Elementen des integrierten Konzeptmodells darstellen. Das Zusammenspiel im Prozess zeigt Abb. 5.77.

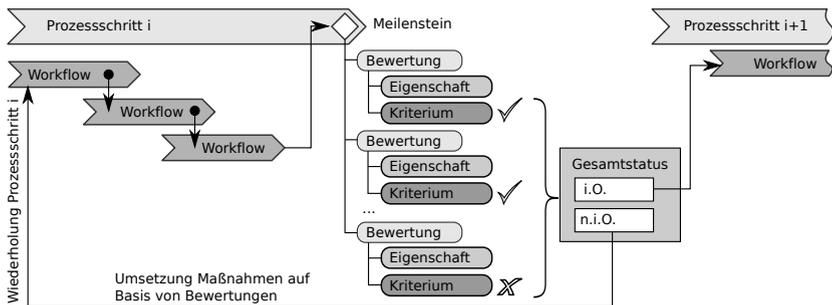


Abb. 5.77: Ablaufmodell für die Nutzung von Meilenstein- und Workflowobjekten

Um ein definiertes Set an Eigenschaften eines Meilensteins zu bestimmen, sind entsprechende Workflows erforderlich. Sind alle erforderlichen Eigenschaften ermittelt, werden deren Qualitätskriterien anhand der zugeordneten Bewertungsobjekte überprüft. Erfüllen alle Eigenschaften ihre definierten Qualitätskriterien, kann mit dem nächsten Prozessabschnitt begonnen werden. Erfüllen eine oder mehrere Eigenschaften ihre festgelegten Qualitätskriterien nicht, kann der Meilenstein nicht passiert werden und die erforderlichen Workflows müssen wiederholt werden.

Durch diese Vorgehensweise kann mittels der Workflowobjekte eine Führung im Rahmen von Entwicklungstätigkeiten vorgenommen werden. Eine mögliche Anwendung des Prozessmodells wird in Kap. 6.6 dargestellt.

5.9 Datenschnittstelle zu externen Prozessen

In den Anforderungen zu Beginn dieses Kapitels wurde als zentrale Forderung u. a. die Einbindung in bestehende Prozesslandschaften formuliert. Hierfür ist eine entsprechende Datenkommunikation zwischen dem integrierten Konzeptmodell und dem umgebenden Entwicklungsumfeld erforderlich. Dies bedingt die flexible und konfigurierbare Übernahme und Ausleitung von technischen Informationen und Modellen. Im Folgenden sollen daher die erforderlichen Schnittstellen beschrieben werden.

5.9.1 Austausch parametrischer Informationen

Der Austausch parametrischer Informationen umfasst die Bereitstellung sowie das Einlesen von Werten und zugehörigen Attributen im Kontext des integrierten Konzeptmodells. Hierbei ist es erforderlich, neben dem Umfang auch die Konfiguration des Austausches flexibel definieren zu können. Abb. 5.78 zeigt hierzu das grundsätzliche Austauschschema.

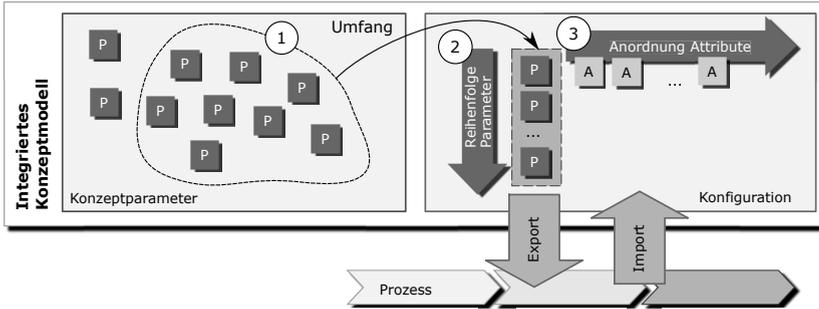


Abb. 5.78: Definition des Parameterexportes

Ein Austausch wird demnach über den Umfang sowie eine Konfiguration beschrieben. Der Umfang definiert hierbei welche Parameter ausgetauscht werden sollen. In der Konfiguration sind die Reihenfolge der Parameter festgelegt, sowie die erforderlichen Attribute und deren Anordnung innerhalb des Austausches. Dadurch können sämtliche parametrischen Informationen im Rahmen des integrierten Konzeptmodells ausgetauscht werden.

5.9.2 Geometrieexport

Der Export von Geometrie umfasst die strukturierte Bereitstellung aller 3D-Informationen des integrierten Konzeptmodells an mögliche Datenabnehmer. Aufgrund der verschiedenen Archetypen von CAD-Daten und deren Darstellungsformen sind entsprechende Exportvarianten erforderlich. Tab. 5.3 zeigt hierzu die grundsätzlichen Varianten eines Geometrieexportes. Es wird im vorliegenden Ansatz zwischen „flachem“ und „strukturiertem“ Export differenziert. Der flache Export beinhaltet dabei lediglich die 3D-Repräsentanz, die strukturierte Variante inkludiert zusätzlich die Produktstruktur.

Tab. 5.3: Varianten im Geometrieexport des integrierten Konzeptmodells

Variante	Geometrieform	Produktstruktur
Flach + Exakt	Exakt	nein
Flach + Hülle	Hülle	nein
Strukturiert Exakt	Exakt	ja
Strukturiert + Hüllen	Teilehüllen	ja
Struktur	-	ja

Im Falle des „flachen“ Geometrieexports handelt es sich um eine Bereitstellung von exakter Geometrie oder deren Einhüllenden. Hierbei können entweder die gesamte Geometrie oder dezidierte

Teilbereiche des Fahrzeugs den Datenabnehmern zur Verfügung gestellt werden (s. Abb. 5.79). Dies ist insbesondere für Datenabnehmer im Bereich der Simulation erforderlich, da Produktstrukturinformationen für diese Bereiche typischerweise von untergeordnetem Interesse sind.

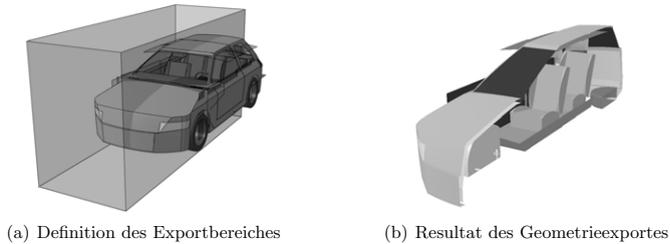


Abb. 5.79: Bereichsspezifischer Geometrieexport

Der „strukturierte“ Export umfasst neben der Geometrie die Produktstruktur. Grundsätzlich kann hierbei analog zum „flachen“ Export entweder eine exakte oder hüllenförmige Repräsentanz bereitgestellt werden (s. Abb. 5.80). Im Sinne der Strukturverwaltung kann zusätzlich ein reiner Strukturausport erfolgen, der keinerlei Repräsentanz besitzt.

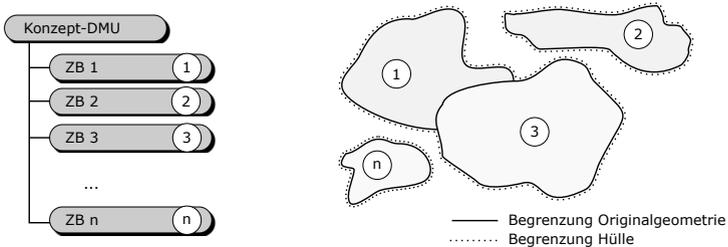


Abb. 5.80: Ergebnisse eines Strukturausports

5.9.3 Geometrieimport

Die Schnittstelle *Geometrieimport* dient der Kontextualisierung von Informationen im Sinne des integrierten Konzeptmodells. Dies bedeutet, dass vorhandene Datensätze um erforderliche Metainformationen sowie Steuerungsparameter angereichert werden. Den grundsätzlichen Importprozess zeigt hierzu Abb. 5.81.

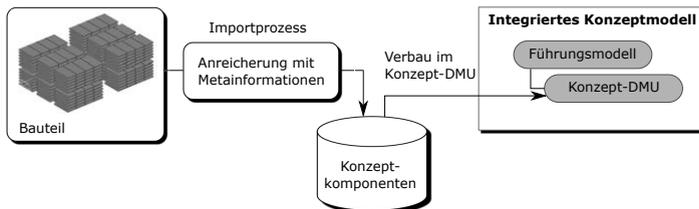


Abb. 5.81: Grundsätzlicher Prozess des Geometrieimports

Zunächst muss bei vorhandenen Daten geprüft werden, ob eine Konvertierung der Daten erforderlich ist. Dieser Schritt ist stets vom jeweiligen CAD-System abhängig, da Fremdformate in unterschiedlichem Umfang unterstützt werden. In einem nächsten Schritt erfolgt die Anreicherung um Parameter, damit die Datensätze durch die Funktionalitäten des integrierten Konzeptmodells genutzt und verwaltet werden können. Die Parameter umfassen dabei die in Tab. 5.4 aufgelisteten Attribute:

Tab. 5.4: Attribute des Geometrieimportes

Attribut	Anmerkung
Typ	Abstrakt oder 3D-Geometrie.
Verwendungsgruppe	Hülle oder Komponente.
Editierbar	ja/nein
Importdatum	Datum des erfolgten Imports.
Version	Versionsnummer der Komponente im integrierten Konzeptmodell.
Quellformat	Datenformat des Originaldatensatzes (sofern abweichend).
Beschreibung	Erklärender Text zum Datensatz.
Preview	Vorschauarstellung zur Nutzung in 3D-Betrachtern.
Alternativen	Verfügbare Alternativrepräsentationen.

Das Attribut *Typ* gibt beschreibt das Wesen des jeweiligen Datensatzes. Hierbei wird zwischen abstrakten Daten und 3D-Geometrie unterschieden. Abstrakte Daten umfassen alle CAD-Informationen, deren primärer Inhalt die genutzte Konstruktionsmethodik selbst darstellt, oder andere abstrakte Zwecke wie etwa Steuerungsskelette verfolgt. 3D-Geometrie umfasst die Gruppe aller typischen CAD-Daten, die Bauteile oder Zusammenbauten darstellen.

Die Attribute *Importdatum*, *Version*, *Quellformat* und *Beschreibung* dienen der Verwaltung der Importdaten. Das Attribut *Preview* ermöglicht die Zuordnung einer vereinfachten Repräsentanz für alle Arten von 3D-Betrachtern. Das Attribut *Alternativen* beinhaltet, sofern erforderlich, alternative Darstellungen der Komponente, wie etwa für das Massenmanagement (s. Kap. 6).

Je nach Fähigkeiten des genutzten CAD-Systems können die Komponenten in der Praxis über integrierte Kataloge verwaltet werden, oder über entsprechende PDM-Systeme.

5.10 Fazit

Wie in Kap. 4 gezeigt wird, stellt sich die virtuelle Entwicklung in der frühen Konzeptphase, aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur, als stark zerklüftete Landschaft in Hinblick auf angewandte Methoden und Prozesse dar. Aus Sicht einer Fahrzeugarchitekturabteilung besteht ein hoher Bedarf an Methoden, um die vorhandenen rechnergestützten Auslegungswerkzeuge und Prozesse effizient im Kontext des Gesamtfahrzeugs vernetzt nutzen zu können. Dadurch sollen Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug und dessen Physis durch geforderte Ziele und Vorgaben effizient und rasch dargestellt werden können, um höherwertigere Modelle im Entwicklungsprozess verfügbar zu haben. Hierzu wird ein neuer Ansatz zu einem integrierten Konzeptmodell in der Automobilentwicklung vorgestellt. Die grundlegenden Bausteine und Datenflüsse werden in Abb. 5.2 und Abb. 5.3 dargestellt.

Das Fundament des vorgestellten Ansatzes bildet das *Parametermodell*, welches alle geometrischen und funktionalen Eigenschaften in Form von Parametern abzubilden vermag. Die Parameter können hierzu zwischen Ziel- und Ist-Werten für die jeweiligen Eigenschaften differenzieren, wodurch das grundlegende prozessuale Vorgehen innerhalb der Konzeptentwicklung unterstützt wird, das stets in einer Gegenüberstellung geforderter Ziele zu technischer Machbarkeit besteht. Neben den Parametern verfügt das Parametermodell über sog. Berechnungsobjekte, welche die Parameter des Modells untereinander durch mathematische Beziehungen verknüpfen können. Diese können entweder eine nicht-umformbare Gleichung repräsentieren, wie sie typischerweise in allen kommerziellen CAD-Systemen, die im Automobilbau Anwendung finden, abgebildet ist, oder ein umformbares lineares Gleichungssystem darstellen, das primär zur Abbildung von Maßketten verwendet wird.

Den nächsten zentralen Baustein stellt das sog. *Konzept-Framework* dar. Dieses dient der konsistenten Einbindung von Geometrie- und Funktionsmodellen in das integrierte Konzeptmodell. Hierzu gliedert sich das *Konzept-Framework* in mehrere Sub-Komponenten: Das *Geometrie-Framework* dient der Integration von CAD-Modellen und repräsentiert damit alle geometrischen Aspekte eines Konzeptes ausgehend von Vorgaben, dem Konzept selbst und der Bereitstellung geometrischer Informationen für andere Bausteine des integrierten Konzeptmodells. Sind CAD-Modelle parametrisch-assoziativer Natur, werden die jeweiligen Steuerungs- und Evaluierungsparameter des CAD-Modells mit den Parametern des integrierten Konzeptmodells über das *Geometrie-Framework* vernetzt. Das *Funktions-Framework* ist das funktionale Pendant zum *Geometrie-Framework*. Die zur Darstellung einer Funktion genutzten Berechnungs- und Simulationsmodelle werden über spezielle *Funktionsobjekte* eingebunden. Diese beinhaltet alle notwendigen Randbedingungen zur konsistenten Ausführung der erforderlichen Berechnungs- und Simulationsmodelle sowie eine definierte Datenablage zur Nutzung der errechneten Ergebnisse. Des Weiteren beinhaltet das *Konzept-Framework* alle erforderlichen Komponenten zur Steuerung und Konfiguration der jeweiligen Konzeptmodelle. Für die Einhaltung von definierten Parametergrenzen, sowie zur Sicherstellung der Modellstabilität im Falle von Parameteränderungen ist das *Kontrollmodell* verantwortlich. Dieses ist in der Lage durch die Nutzung von implementierten Automatismen und spezielle Ereignissen im Modell, instabile Modellbereiche zu erkennen und bei Bedarf zu deaktivieren bzw. zu reaktivieren. In Verbindung mit dem Parametermodell wird so der Anwender von der Erstellung und Verwaltung der Parametrik direkt im Modell vollständig ausgenommen. Neue Parameter und Beziehungen können nur über die bereitgestellten Instrumente erzeugt werden. Dadurch kann die parametrische Konsistenz zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden. Das *Konfigurationsmodell* stellt sicher, dass die aktuell genutzten Daten und CAx-Modelle in einem eindeutigen Kontext genutzt werden, damit die Reproduzierbarkeit ermittelter Ergebnisse gewährleistet werden kann. Alle bautechnischen Inhalte wie physische Bauteile und Komponenten, werden in der sog. *Konzeptproduktstruktur* abgebildet. Diese ist entsprechend dem fertigungsorientierten Strukturierungsverständnis logisch gegliedert. Auf Basis dieser Struktur, erfolgt die identische Gliederung im *Geometrie-Framework* zur Abbildung der CAD-Konzeptstruktur. Des Weiteren wird die Konzeptproduktstruktur zur Verwaltung aller erforderlichen bauteilspezifischen Meta-Informationen wie etwa Gewicht, Schwerpunkt oder Massenträgheitsmomente genutzt, wodurch sie zugleich die Basis für das Massenmanagement darstellt.

Die nächste Säule des integrierten Konzeptmodells bildet das *Bewertungsmodell*. Um die Nachvollziehbarkeit zu späteren Zeitpunkten im Fahrzeugprojekt zu gewährleisten oder Fragen im

Sinne von „*Wie wurde dieses Thema damals gelöst?*“ beantworten zu können, stellt das Bewertungsmodell eine durchgängige Methodik zur Bewertung von Eigenschaften des integrierten Konzeptmodells bereit. Diese besteht im Wesentlichen aus einer Bewertung und einem zugehörigen Bewertungssatz. In Hinblick auf die Bewertung wird zwischen quantitativen und qualitativen Eigenschaften differenziert. Quantitative Eigenschaften können über konkrete Wertegrenzen automatisiert evaluiert werden. Im Falle qualitativer Eigenschaften ist kein Automatismus möglich. Hierbei muss der Status der jeweiligen Eigenschaft stets durch einen Anwender festgelegt werden. Hierfür wird eine spezielle Bewertungssyntax genutzt, um die sprachliche und inhaltliche Form einer Bewertung zu standardisieren und damit uneindeutig reproduzierbar zu gestalten. In diesem Zusammenhang werden durch eine Taxonomie-Datenbank im Zusammenspiel mit der Konzept-Produktstruktur alle Begrifflichkeiten und Basissatzformen zur Bildung einer Bewertung bereitgestellt.

Als wichtiges Element in der virtuell gestützten Konzeptentwicklung wurde die prozessuale Eingliederung von Arbeitsschritten identifiziert. Hierzu soll im vorgestellten Ansatz ein entsprechendes *Prozessmodell* genutzt werden. Dieses ermöglicht die Definition von Workflows, welchen alle Elemente des integrierten Konzeptmodells zugeordnet werden können. Des Weiteren werden Meilensteinobjekte definiert, welche Qualitätskriterien zur Erfüllung oder Nicht-Erfüllung eines bestimmten Prozessabschnittes beinhalten. Dadurch lassen sich gezielt konkrete Aufgabenstellungen modellieren, wodurch Anwender in der Entwicklung „geführt“ werden können.

Das letzte Element des integrierten Konzeptmodells stellt das *Archivierungsmodell* dar. Dieses ermöglicht über die Nutzung des Konfigurationsmodells die Archivierung eindeutiger Konzeptzustände, wodurch jeder Stand ein abgeschlossenes, nachvollziehbares Konstrukt bildet. Des Weiteren lassen sich so bestehende Konzepte als Ausgangspunkte für neue Untersuchungen und Entwürfe effizient nutzen.

Mit dem vorgestellten integrierten Konzeptmodell liegt ein Ansatz vor, der die frühe Konzeptphase in der Automobilentwicklung aus dem Blickwinkel einer Fahrzeugarchitekturabteilung in der Abbildung und Evaluierung neuer Konzepte unterstützen kann. Des Weiteren wird die konsistente Sicherung und Wiederverwendung des entstehenden Auslegungswissens ermöglicht. Durch den modularen und flexiblen Aufbau, lassen sich die Teilmodelle des integrierten Konzeptmodells bedarfsgerecht nutzen. Sind erforderliche Parameter eines Modells nicht bekannt, können diese entweder geschätzt werden, oder der betreffende Modellbereich bleibt solange inaktiv, bis die erforderlichen Informationen vorhanden sind. Im Zusammenspiel mit der flexiblen Parametrik lassen sich dadurch viele Konzeptkonstellationen mit dem integrierten Konzeptmodell durchgängig abbilden. Des Weiteren wird eine Erweiterung um neue Elemente ermöglicht, wodurch sich das integrierte Konzeptmodell an zukünftige Anforderungen und Entwicklungsprozesse flexibel anpassen lässt. Durch die Erweiterung um entsprechende Schnittstellen kann das integrierte Konzeptmodell nahtlos in bestehende Prozesslandschaften eingebettet werden.

In Hinblick auf die Einbindung von Teilmodellen in das integrierte Konzeptmodell ist diese grundsätzlich auf jene Formen beschränkt, die eine Automationsschnittstelle und die erforderliche Funktionen und Methoden bereitstellen. Rechnergestützte Werkzeuge, die ausschließlich eine grafisch orientierte Nutzung vorsehen, können daher nur schwer oder gar nicht integriert werden, wie beispielsweise CAD-Programme mit expliziter Modellierungsstrategie. Eine weitere Limitierung des vorgestellten Ansatzes liegt in den Anforderungen an das Konzept-Framework selbst begründet. Die erforderlichen Funktionen des *Konzept-Frameworks* stellen etwa hohe Anforde-

rungen an die Automationsfähigkeiten des verwendeten CAD-Systems. Durch die Forderung der vollständigen Ausklammerung von Anwendern von der Erstellung und Verwaltung von Parametrik auf Modellebene müssen, neben den genannten Verwaltungsaufgaben wie etwa die Erzeugung von Parametern oder Beziehungen, entsprechende Reparaturfunktionen implementiert werden, die bei Bedarf „defekte“ Elemente korrigieren können. Dadurch entsteht eine hohe Abhängigkeit von der API des jeweiligen CAD-Systems. Andere Einschränkungen können aufgrund der flexiblen Parametrik etwa in Hinblick auf die Anzahl an Parametern entstehen. Da im gezeigten Ansatz keine Limitierung der möglichen Parameter enthalten ist, kann, je nach genutztem CAD-System, eine sehr hohe Parameteranzahl zu reduzierter Performanz der CAD-Modelle, etwa bei Aktualisierungen führen.

Weitere Einschränkungen können sich etwa durch die Nutzung komplexer Proportionsmodelle ergeben, wie später in Kap. 6.3 gezeigt wird. Da nicht alle parametrischen Konstellationen vorhergesehen werden können, ist es notwendig um die Stabilität des Gesamtmodells zu gewährleisten, betroffene Modellbereiche automationsgestützt zu deaktivieren. Dies bedeutet etwa, dass bei bestimmten Parameterkonstellationen solch hohe Instabilitäten auftreten, dass nur der Skelettrumpf des CAD-Modells aktiv bleibt. Ist für einen Anwender jedoch nicht logisch nachvollziehbar, warum die betroffenen Bereiche deaktiviert werden, kann sich dieser Stabilitätsvorteil auch in einen Nachteil umwandeln. Insbesondere beim Einsatz von skriptbasierten Kontrollmechanismen ist besondere Vorsicht geboten, da die Aktivierungslogik nicht für jeden Anwender ohne programmatische Vorkenntnisse verstanden werden kann.

In der Nutzung der Bewertungslogik und der zugehörigen Taxonomie können Nachteile wie in allen datenbankorientierten Entwicklungsansätzen resultieren. Werden keine Wartungs- und Aktualisierungsprozesse, sowie zugehörige personelle Verantwortlichkeiten festgelegt, ist die Aktualität der hinterlegten Informationen nicht gegeben, wodurch sich die Vorteile solcher Ansätze rasch egalalisieren.

Trotz der aufgezeigten Grenzen und möglichen Problemfelder im Einsatz eines integrierten Konzeptmodells zeigt der entwickelte Ansatz ein großes Potential in der technischen Konzeptentwicklung. Die effiziente und rasche Darstellung sowie Bewertung geometrischer und funktionaler Produktmerkmale schafft die Voraussetzungen zukünftige komplexe Herausforderungen in der technischen Entwicklung effizient zu lösen und getroffene Entscheidungen transparent nachvollziehen zu können. Ein wesentlicher Schlüssel für den erfolgreichen Einsatz des gezeigten Ansatzes ist die Festlegung entsprechender personeller Verantwortlichkeiten. Aufgrund der hohen Dynamik in der technischen Entwicklung, muss die Aktualität der verwendeten Modelle und die angewandte Methodik kontinuierlich in Projekten validiert und weiterentwickelt werden. Aufgrund des hohen erforderlichen Automationsgrades ist ferner sicherzustellen, dass die verschiedenen Komponenten des integrierten Konzeptmodells auch bei Release-Wechslen nahtlos zusammenarbeiten können.

6

Anwendung eines integrierten Konzeptmodells in der Entwurfsphase

Im vorangegangenen Kapitel werden die theoretischen Grundlagen und die Architektur zum integrierten Konzeptmodell entwickelt. Dabei werden die erforderlichen Komponenten sowie deren Vernetzung im Kontext des integrierten Konzeptmodells und Schnittstellen zu angrenzenden Prozessen betrachtet. Im vorliegenden Kapitel sollen Überlegungen zur praktischen Umsetzbarkeit der theoretischen Konstrukte vorgestellt werden. Im Rahmen des industriellen Forschungsprojektes erfolgte eine prototypische Umsetzung der theoretischen Ansätze auf Basis des 3D-CAD Programmpaketes CATIA V5 [21] sowie weiterer Programmpakete, die bei den Industriepartnern im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden, wie etwa MATLAB/Simulink [71] oder SFE-CONCEPT [98]. Für die praktische Nutzung der untersuchten Methoden und Vorgehensmodelle ist die Verwendung nicht zwingend auf diese Systeme beschränkt. Grundsätzlich können alle parametrisch-assoziativen CAD-Programmpakete und verschiedene Berechnungssoftware genutzt werden, die über wissensbasierte Funktionalitäten verfügen und eine entsprechende Automationsschnittstelle bereitstellen.

6.1 Architektur der prototypischen Umsetzung

Die grundlegende Architektur des Software-Prototypen ist in Abb. 6.1 dargestellt. Den Kern bilden das *Geometrie-Framework* und das *Funktions-Framework*. Das Bindeglied zwischen den beiden Modulen bildet ein Programm, das alle abstrakten Funktionen, wie etwa die Modellkonfiguration, das Klassifikations- und Sichtenmodell oder das Bewertungsmodell beinhaltet und in Visual Basic for Applications (VBA)¹⁸ implementiert. Aufgrund der Fokussierung auf die Belange einer Fahrzeugarchitekturabteilung stellt die zentrale Anwendung das CAD dar, weshalb der Kern des VBA-Programms in CATIA V5 implementiert wurde.

Das *Geometrie-Framework* wurde in CATIA V5 gemäß den Ausführungen in Kap. 5.4.2 als Produktstruktur ausgeführt. Diese beinhaltet eine strukturierte Ablage aller geometrischen Konzeptinformationen, wie etwa Vorgaben, die Darstellung des Konzeptes selbst sowie die Bereitstellung von Geometrie für funktionsorientierte Sub-Modelle des integrierten Konzeptmodells gemäß den Ausführungen in Kap. 6.3. Des Weiteren sind im *Geometrie-Framework* alle erforderlichen Parameter und mathematischen Beziehungen auf Gesamtfahrzeugebene abgelegt. Auf den konkreten Inhalt des *Geometrie-Frameworks* wird in Kap. 6.3 eingegangen.

¹⁸Die Verwendung von Visual Basic wurde aufgrund der standardmäßigen Verfügbarkeit im Testumfeld gewählt. Grundsätzlich kann jedoch jede Skriptsprache gewählt werden, die einen Zugriff auf das Microsoft Windows Component Object Model (COM) bietet.

Das *Funktions-Framework* wurde aufgrund von IT-seitigen Einschränkungen bei den Industriepartnern als makrobasierte EXCEL-Arbeitsmappe ausgeführt. Diese beinhaltet gemäß den Erläuterungen in Kap. 5.4.3 alle erforderlichen Eingangsparameter, die geometrischen Eingangsobjekte, die Pfade zu den jeweiligen Simulationsmodellen und die zu errechnenden Parameter. Des Weiteren ist die Arbeitsmappe um Skripte angereichert, welche notwendige Aufbereitungsmaßnahmen, wie beispielsweise erforderliche Einheitenkonvertierungen, vornehmen können.

Das *Geometrie-Framework* ist über die Modellparameter und die Output-Geometrie mit dem *Funktions-Framework* verknüpft. Den Datentransfer bewerkstelligen Routinen des VBA-Programms, welche im Falle von Parameteränderungen die notwendigen Werte in die entsprechenden Bereiche der Funktionsschnittstelle übertragen und eine Aktualisierung der zugehörigen Berechnungen vornehmen.

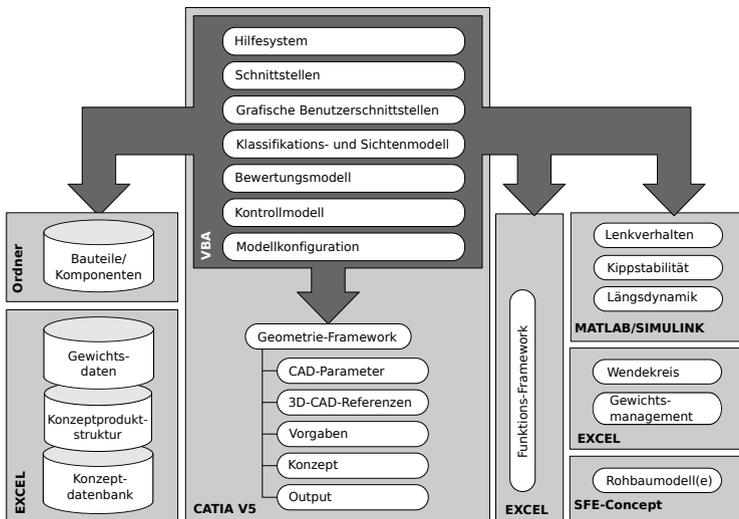


Abb. 6.1: Grundlegende Architektur des Software-Prototypen *ConceptCar*

Um eine effiziente und prozessorientierte Bedienung des integrierten Konzeptmodells zu erreichen, werden parametrische Informationen über Datenbanken bereitgestellt. Die *Konzeptdatenbank* beinhaltet hierzu verschiedene geometrische Vorlagen und definiert das grundlegende parametrische Verhalten für das integrierte Konzeptmodell. Des Weiteren wird die *Konzeptdatenbank* zur Archivierung der parametrischen Konzeptinformationen verwendet.

Die *Konzeptproduktstruktur* dient der Verwaltung aller bautechnischen Umfänge des Konzeptes sowie der Verwaltung aller gewichtstechnischen Aspekte, wie in Kap. 5.3.3 beschrieben. Um auch hier einen möglichst raschen und effizienten Konzeptaufbau zu unterstützen, werden für die Konzeptproduktstruktur typische Standardumfänge definiert, welche die wichtigsten bautechnischen und gewichtsrelevanten Komponenten und Komponentengruppen beinhalten.

6.2 Bedeutung des integrierten Konzeptmodells

Auf die grundlegende Bedeutungssystematik wurde bereits eingegangen. Im Folgenden sollen die Inhalte der Vorlagen konkreter betrachtet werden. In der prototypischen Umsetzung wurden folgende Vorlagentypen genutzt:

- Parametervorlagen
- Gewichtsvorlagen
- Konzeptproduktstrukturvorlagen
- Vordefinierte und parametrisierte Komponenten

Die Parametervorlagen werden zur initialen Bedeutung aller parametrisch-assoziativen Proportionsmodelle im integrierten Konzeptmodell genutzt. Diese sind aufgrund der Vielzahl an parametrischen Informationen auf Ebene des Fahrzeugs in entsprechende Bereiche aufgeteilt:

- Fahrzeugabmessungen
- Fahrzeugmaßverhalten
- Fahrwerksdaten
- Reifendaten
- Sitzdaten

Die Fahrzeugabmessungen wurden auf Basis von gemittelten Werten existenter Fahrzeuge ermittelt und typischen Fahrzeugklassen zugeordnet (s. Abb. A.1 im Anhang und Kap. 6.6). Das Fahrzeugmaßverhalten legt die Optionen für die wesentlichen Maßketten im Fahrzeug fest und beinhaltet die mathematische Definition von Maßen sofern erforderlich. Bei den Fahrwerksdaten handelt es sich ebenfalls um typische Werte für Fahrwerkstypen wie sie im Moment im Automobilbau verwendet wurden. Im Zuge der prototypischen Umsetzung wurden vordefinierte Fahrwerke implementiert (s. Kap. 6.3.5). Im Hinblick auf die Reifendaten wurde die bestehende Datenbank für typische Felgen-Reifen-Kombinationen, wie sie bei den Industriepartnern angewandt werden, eingebunden. Im Falle der Sitzdaten wurden ergonomische Sitzhaltungen auf Basis vorhandener Sitzpläne in ausgewählten Fahrzeugklassen ermittelt.

In Bezug auf die Fahrzeug- bzw. Komponentenmassen werden ebenfalls Vorlagen genutzt, die im Detail und im Hinblick auf die Nutzung in Kap. 6.4.1 vorgestellt werden. Diese beinhalten analog der Geometrieparameter fahrzeugklassenspezifische Gewichtswerte für typische Komponenten und Bereiche im Fahrzeug wie etwa Motor, Antriebsstrang, Sitze oder Karosserie. Durch die Wahl eines Fahrzeugtyps kann damit den jeweiligen Komponenten der Konzeptproduktstruktur ein entsprechender Wert aus der Gewichtsdatenbank zugeordnet werden (s. Abb. 6.2). Im Falle der Konzeptproduktstruktur wurde eine allgemein gültige Komponentenstruktur auf Basis von vorhandenen Strukturen, die bei den beiden Industriepartnern eingesetzt werden, abgeleitet. Diese kann als Ausgangsbasis für den Produktstrukturaufbau genutzt werden, wenn keine projektspezifischen Anforderungen festgelegt sind.

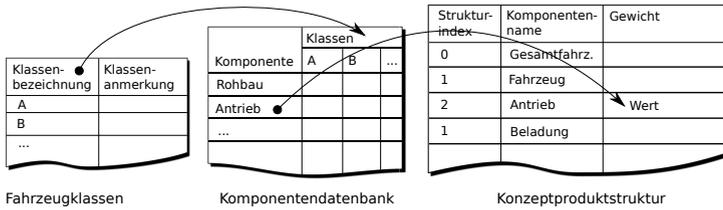


Abb. 6.2: Fahrzeugklassenspezifische Nutzung von Gewichtsinformationen

6.3 Geometriemodelle

Dieser Abschnitt widmet sich den, in der praktischen Evaluierung verwendeten, Geometriemodellen. Abseits von vorhandenen Übernahmeteilen sowie Normgegenständen für die Untersuchung von Beladungskonzepten, werden vorwiegend Proportionsmodelle für die frühe Fahrzeugkonzeption genutzt. Auf die Gründe hierfür wird in Kap. 3 eingegangen. Daher soll in diesem Abschnitt auf die unterschiedlichen Proportionsmodelle sowie deren Parametrierung eingegangen werden.

6.3.1 Konzept-Vorgabenmodell

Das Vorgabemodell beinhaltet sämtliche geometrisch darstellbaren Vorgaben für den Fahrzeugentwurf. Der Begriff Vorgabe ist hierbei sehr weit gefasst. Eine Vorgabe kann von einfachen Schnitten bis hin zu vergleichenden Daten aus Benchmark-Studien reichen. Das Vorgabemodell ist gemäß den Ausführungen in Kap. 5.4.2 in einem eigenen Produktknoten abgelegt. Dieser ist entsprechend der in Abb. 5.40 dargestellten Zusammenhänge auf erster Ebene gemäß geeigneter Gruppen strukturiert. Die Gruppen repräsentieren hierbei funktional bzw. thematisch zusammengehörige Vorgaben. Tab. 6.1 zeigt die im Rahmen der praktischen Evaluierung genutzten Vorgabegruppen.

Tab. 6.1: Vorgabegruppen im integrierten Konzeptmodell

Gruppe	Erläuterung
Design	Beinhaltet Vorgaben in Form von 3D-Schnitten, Flächenpatches oder Punktwolken.
Ergonomie	Dieser Knoten inkludiert Greifraumflächen zur Analyse der Erreichbarkeit von Bedienelementen.
Crash	Hier werden alle Vorgaben bezüglich crash-relevanter Themen gebündelt. Dies umfasst etwa standardisierte Kollisionskörper sowie erforderliche Konturen für die Insaftensicherheit.
Zuladung	In diesem Strukturelement kann verbindlich zuzuladende Geometrie, wie etwa spezielle Koffermodelle, abgelegt werden.
Maßkonzept	Ist zu Beginn des Konzeptes bereits ein Maßplan vorhanden, kann dieser hier hinterlegt werden. Ist dieser ein parametrisch-assoziatives Modell, kann der Maßplan über die Zielwerte gesteuert werden.
Benchmark	Beinhaltet vergleichende Informationen in Form von Schnitten, Scandaten, etc.

Grundsätzlich ist in Hinblick auf Vorgaben zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Vorgaben zu differenzieren. Parametrische Vorgaben werden in ihrer Ausprägung durch das inte-

grierte Konzeptmodell gesteuert, während nicht-parametrische Vorgaben statischer Natur sind, wie etwa ein Crash-Prüfkörper. Die geometrische Repräsentanz von Vorgaben wird grundsätzlich über Flächen, bzw. Drahtgitterkonstruktionen vorgenommen, da diese Darstellungsform bezüglich der Änderungsstabilität überlegen ist¹⁹; in Fällen nicht-parametrischer Geometrie ist auch die Nutzung von Volumina möglich. Parametrische Vorgabelemente werden durch die Zielwerte der jeweils zugeordneten Konzeptparameter gesteuert. Abb. 6.3 zeigt einen Auszug an geometrischen Vorgaben.

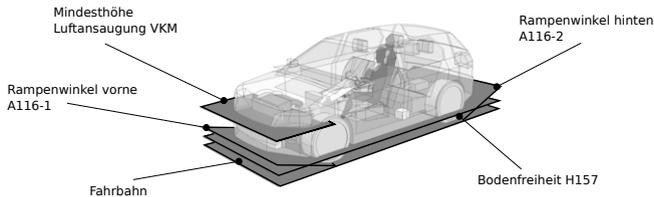


Abb. 6.3: Auszug an geometrischen Vorgaben im Gesamtfahrzeugkontext

In Hinblick auf die Strukturierung der Vorgaben muss jede Vorgabegeometrie in einem separaten Datensatz abgebildet werden. Dies bringt zwei wesentliche Vorteile mit sich:

- Konformität im Klassifikations- und Sichtenmodell
- Konformität in Richtung PDM-Datenablage

In Kap. 5.5 werden die grundsätzlichen Mechanismen des Klassifikations- und Sichtenmodells vorgestellt. Das geometrische Sichtenkonzept fußt auf der Zuordnung von CAD-Datensätzen zu vorhandenen Sichten. Grundsätzlich besteht im CAD die Möglichkeit, je nach Fähigkeiten des eingesetzten CAD-Systems auch auf Teileebene eine geeignete Strukturierung vorzunehmen. Dieses Vorgehen würde jedoch in Hinblick auf das Sichtenkonzept stets die exakte Repräsentanz der Geometrie verlangen, was aus dem Blickwinkel der Rechen-Performanz völlig inakzeptabel ist. Die hier implementierte Vorgehensweise impliziert damit auch die Konformität zu PDM-Betrachtern und dem dort vorherrschenden Datenstrukturierungskonzept (s. Kapitel 3.3.1).

Ein weiterer Vorteil in der Nutzung dieser Strategie liegt darin begründet, dass sich durch die separate Ablage der Vorgaben in einem Produktknoten diese weiter im Entwicklungsprozess nutzen lassen.

6.3.2 3D-Konzept-Proportionsmodelle und Packagekomponenten

Zur Beschreibung des Bauraums sind geeignete 3D-CAD-Daten erforderlich. Je nach Projektsituation können diese in Umfang und Qualität stark variieren. Wie bereits in Kap. 3 gezeigt wird, ist die CAD-Datenwelt in der frühen Konzeptphase einerseits durch detaillierte Übernahmeteile sowie Standardkomponenten (z. B. Kraftstoffkanister, Werkzeug ...) für Packageuntersuchungen gekennzeichnet, andererseits ist man z. T. auf die Nutzung von Proportionsmodellen angewiesen. Im Falle von Übernahmeteilen sowie Standardkomponenten ist eine Änderung der

¹⁹Sollen die Informationen in einem PDM-System abgelegt werden, ist darauf zu achten, dass das entsprechende Betrachtungsformat Drahtgittergeometrie sowie Flächen unterstützt, da im jeweiligen Betrachter ansonsten keine Anzeige von Geometrie erfolgt.

Geometrie typischerweise nicht erforderlich. Proportionsmodelle stehen stellvertretend für eine ganze Gruppe an Geometrieformen und sind grundsätzlich durch eine Abstraktion realer Bauteile charakterisiert. Die Abstraktion kann sich hierbei in geringerem Detailgrad bemerkbar machen, oder in einer Reduktion auf die wesentlichen Außenabmessungen. Auch in der wissenschaftlichen Literatur finden sich vielfältige Ansätze zur Generierung von Proportionsmodellen mit z. T. funktionaler Basis [43], [85]. Der wesentliche Fokus bei der Anwendung von Proportionsmodellen auf Gesamtfahrzeugebene liegt in der raschen Betrachtung von Maßketten im Package, sowie in der zu erwartenden Bauraumsituation, wenn der Umfang an Realdaten, so wie in der frühen Konzeptphase, sehr gering ist. Geometrisch gesehen ist in der Darstellung von Proportionsmodellen typischerweise die Außenkontur ausreichend. Im vorliegenden Ansatz werden ebenfalls Proportionsmodelle eingesetzt (s. Abb. 6.10):

- Exterieurmodell zur Darstellung der Fahrzeugaußenkontur
- Interieurmodell zur Darstellung von Sitzen, Boden und anderen Innenraumelementen
- Technikmodelle für Antriebsstrang, Fahrwerk, Elektrik, usw.
- Zuladungskomponenten zur Analyse von Stauraumkonzepten

Das Exterieur- und Interieurmodell sind in Abb. 6.4 dargestellt. Die Modelle sind so gestaltet, dass die wesentlichen Proportionen, Maßketten und mögliche Auswirkungen dargestellt werden können.

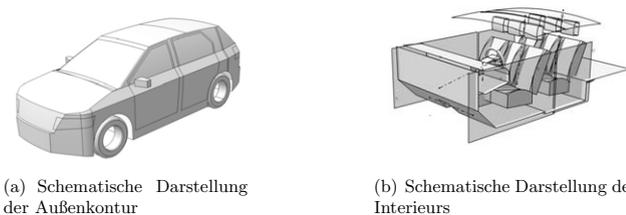


Abb. 6.4: Schematische Darstellung von Exterieur und Interieur

Die Modelle sind als Flächenmodelle ausgeführt, um auch über breite Parametervariationen eine hohe Stabilität zu gewährleisten. So können etwa durch die Nutzung von Parametervorlagen (s. Kap. 6.2) auf Basis des selben Exterieurproportionsmodells unterschiedliche Aufbauvarianten realisiert werden (s. Abb. A.1 im Anhang). Allen Proportionsmodellen gemein ist deren Grundstruktur, die bereits in Kap. 5.4.2 vorgestellt wird. Die Proportionsmodelle sind parametrisch-assoziativ aufgebaut und unterstützen die flexible Parametrik durch implementierte Konsistenzkriterien, wodurch das unkontrollierte Auftreten von Zirkelbezügen oder undefinierten Parameterzuständen unterbunden wird. Abb. 6.5 zeigt hierzu die grundlegende Steuerungs- und Verknüpfungslogik.

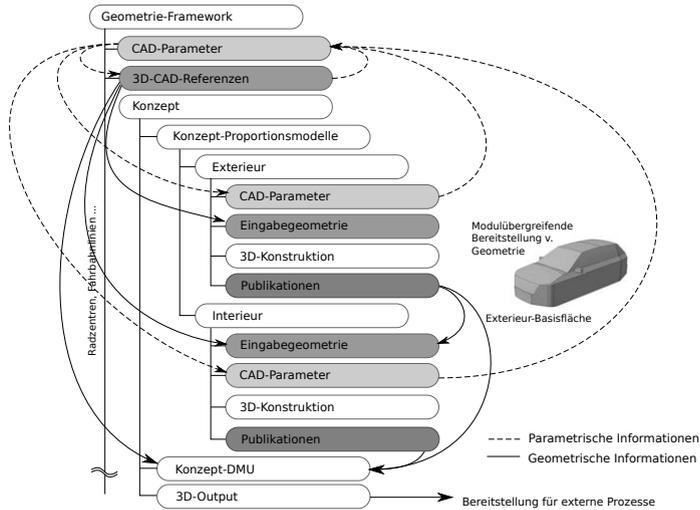


Abb. 6.5: Aufbau, Datenflüsse und Verknüpfungen im 3D-Proportionsmodell

Gemäß den Ausführungen in Kap. 5.4.2 erfolgt die Steuerung der Proportionsmodelle auf Basis dreier Säulen:

- CAD-Parameter
- 3D-CAD-Referenzen
- Publierte Geometrieelemente aus anderen Proportionsmodellen

Die CAD-Parameter werden im Kontext des *Geometrie-Frameworks* einerseits zur Steuerung der globalen 3D-Referenzen genutzt, andererseits direkt mit den jeweiligen Proportionsmodellen verknüpft, um spezifische Abmessungen und Optionen im Modell zu steuern. Als weitere Eingabegröße können den Proportionsmodellen geometrische Elemente aus anderen Proportionsmodellen dienen. Diese werden als Eingabegeometrie auf Basis entsprechender Publikationen verknüpft und sind im Kontext des *Geometrie-Frameworks* definiert. Dadurch können die Proportionsmodelle bei Bedarf auch autark außerhalb des *Geometrie-Frameworks* genutzt werden. So wird, wie in Abb. 6.5 gezeigt, die Exterior-Basisfläche als äußere Einhüllende für das Interieurmodell verwendet.

Auf Basis der genutzten Proportionsmodelle lassen sich fehlende Dimensionen und Maßketten ermitteln, die über die Parameterschnittstelle an die Haupt-CAD-Parameter im *Geometrie-Framework* übertragen werden können. Dadurch ist die parametrische Konsistenz zu jeder Zeit sichergestellt. Die Geometrie der Proportionsmodelle kann über entsprechende Publikationen (s. Abb. 6.6) als 3D-Repräsentanz von Komponenten des Konzept-DMUs genutzt werden, sofern noch keine tatsächlichen Bauteile vorhanden sind. Prinzipiell wäre es auch möglich, entsprechende Proportionsmodelle direkt in den jeweiligen Konzept-DMU-Elementen zu hinterlegen. Dies würde jedoch zu einer komplexeren parametrischen Verknüpfungssituation führen, weshalb diese Strategie hier nicht angewandt wird. Des Weiteren können die 3D-Referenzen sowie die Proportionsmodelle flexibel in den Knoten *3D-Output* verknüpft werden, wodurch die Elemente außerhalb des integrierten Konzeptmodells bereitgestellt werden können.

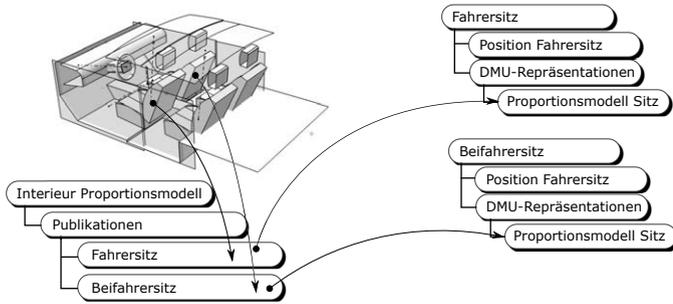


Abb. 6.6: Nutzung von Elementen der Proportionsmodelle im Konzept-DMU

Der interne Aufbau der Proportionsmodelle folgt den Erkenntnissen aus Kap. 5.4. Hierzu sei der schematische Aufbau des Exterieur-Proportionsmodells betrachtet (s. Abb. 6.7).

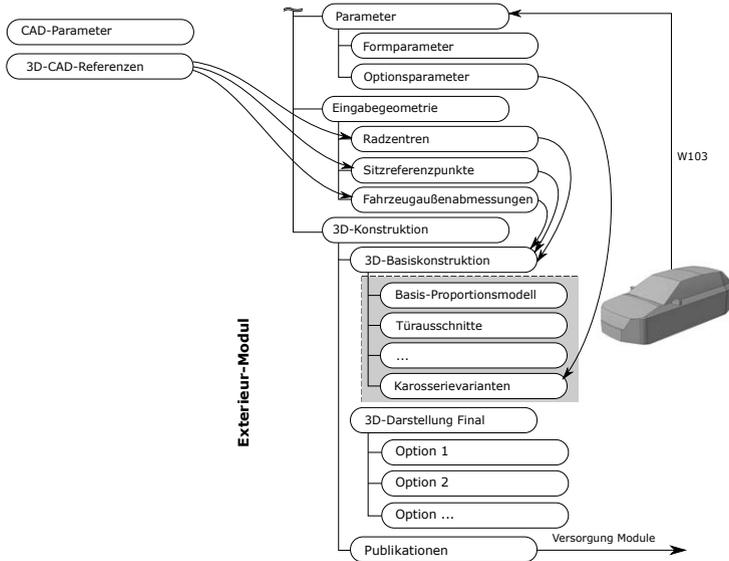


Abb. 6.7: Schematischer Aufbau des Exterieurmodells

Den Grundstein des Modells bildet ein 3D-Skelett, welches alle erforderlichen Referenzen für den Aufbau des Modells beinhaltet. Diese stammen einerseits aus den globalen 3D-Referenzen, um Redundanzen zu vermeiden, andererseits stellen sie spezifische Referenzen des Modells dar. Darauf baut eine Basiskonstruktion auf, welche die grundsätzliche Form des Exterieurs beinhaltet (s. Abb. 6.7). Diese dient einerseits als Referenz für die nachfolgenden Konstruktionschritte, andererseits ist sie die primäre maßliche Konsistenzreferenz.

Wie in Abb. 6.8 dargestellt, ergibt sich die Fahrzeugbreite aus dem maximalen Abstand außenstehender Teile am Fahrzeug. Im Falle klassischer Fahrzeugformen liegt die Fahrzeugbreite daher im Bereich der Karosseriebreite (W116), während im Falle stark abweichender Konzepte, wie

beispielsweise Kabinenroller, sich die Fahrzeugbreite auf Basis der Radabdeckungen der außenstehenden Räder ergibt. Daher wird etwa die Fahrzeugbreite nicht als Steuerungsmaß sondern als Referenzmaß verwendet und über die Hauptproportionsfläche bestimmt.

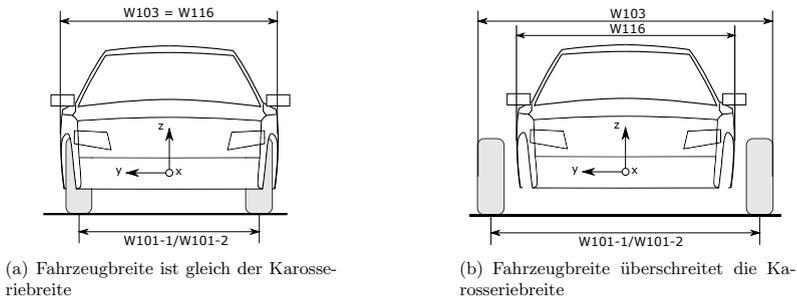


Abb. 6.8: Steuerung der Fahrzeugbreite (W103)

Allen Proportionsmodellen ist die grundlegende Steuerungsprämisse gemein, dass die Parameter des integrierten Konzeptmodells stets die Deutungshoheit besitzen. Damit ist gemeint, dass etwa im Falle einer geometrischen Instabilität infolge einer bestimmten Parameterkonstellation diese nicht zurückgesetzt werden darf, sondern die kollabierten Modellbereiche durch das Kontrollmodell inaktiviert werden müssen.

Für die effiziente Untersuchung von Konzeptalternativen sowie Zuladungsvarianten werden spezielle parametrische sowie „tote“ Komponenten genutzt, die in einem entsprechenden Katalog kontextuell hinterlegt sind (s. Abb. 6.9). Auf der technischen Seite umfasst dies Fahrzeugkomponenten wie z.B. Tanksysteme (a) oder Motoren (b). In Hinblick auf die Betrachtung von Beladungsszenarien finden sich im Katalog typische Elemente wie etwa Kindersitze, Getränkebehälter und Boardwerkzeug (c).



Abb. 6.9: Auswahl schematischer DMU-Komponenten

Durch die Nutzung der im Katalog hinterlegten Komponenten sowie der Basisproportionsmodelle für das Exterieur und das Interieur lässt sich effizient ein Gesamtfahrzeugproportionsmodell aufbauen. Eine mögliche geometrische Ausprägung für ein Kompaktfahrzeug wird in Abb. 6.10 gezeigt.

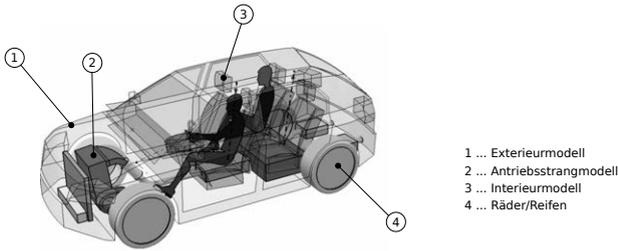


Abb. 6.10: Proportionsmodell eines Gesamtfahrzeugs

Aus der Prozesssicht heraus repräsentieren Proportionsmodelle typischerweise Zielzustände, die sich aus maßlichen sowie funktionalen Forderungen aus Sicht der Fahrzeugarchitektur ergeben. So ergibt sich die Hülle einer möglichen Traktionsbatterie eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs aus der Agglomeration technologischer Annahmen wie etwa Reichweite, Zelltechnologie, Kühlsystem sowie erforderlicher Panzerungsmaßnahmen zum Schutz im Falle eines Unfalles. Für die parametrische Steuerung hat dies zur Folge, dass die geometrische Ausprägung der Proportionsmodelle durch die Ist-Werte der Parameter gesteuert werden müssen. Für Parameter, die einen dezidierten Zielwert aufweisen, muss dieser für den jeweiligen Ist-Wert übernommen werden.

6.3.3 Fahrzeugquerschnittsfläche

Die Querschnittsfläche des Fahrzeugs normal zur x-Achse (s. Abb. 6.11) bestimmt u. a. dessen Luftwiderstand F_L entsprechend Gl. 6.1:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_w \cdot A_{P,x} \cdot v^2 \tag{6.1}$$

Daher ist die möglichst frühe Kenntnis dieser Größe von hoher Bedeutung für weitere Entscheidungswege innerhalb der Konzeptentwicklung. Im gezeigten Beispiel soll die Querschnittsfläche auf Basis des 3D-Proportionsmodells abgeleitet werden. Die Methode ist nicht auf das 3D-Proportionsmodell beschränkt, sondern mit jeder geschlossenen CAD-Fläche (z.B. Fahrzeug-Exterior Designfläche) nutzbar.

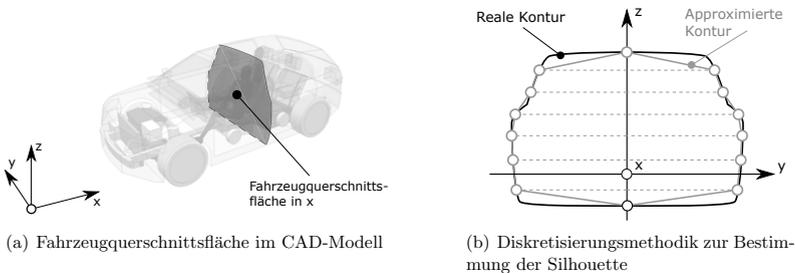


Abb. 6.11: Bestimmung der Fahrzeugprojektionsfläche in Längsrichtung

Geometrisch gesehen entspricht die Fahrzeugquerschnittsfläche einer Silhouette der Außenfläche in der ZY-Ebene des absoluten Fahrzeugkoordinatensystems. Da nicht in allen kommerziellen CAD-Systeme eine solche Funktionalität implementiert ist, wird im CAD-Teil eine eigene Diskretisierungsfunktionalität hinterlegt. Der Prozess ist in Abb. 6.12 dargestellt.

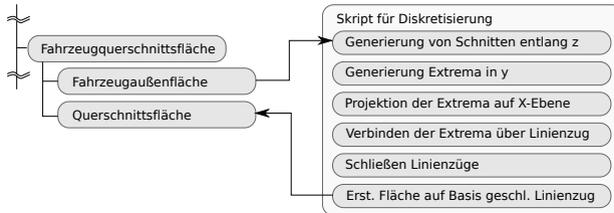


Abb. 6.12: Prozess zur Berechnung der Fahrzeugquerschnittsfläche

Die Querschnittsfläche wird in einem separaten Datensatz ermittelt. Hierzu ist die jeweilige zu diskretisierende Fläche als Referenz eingebunden. Bei Änderung der Fläche wird ein dem Bauteil hinterlegtes Skript gestartet. Diese erzeugt zunächst Schnitte auf Basis der zu diskretisierenden Fläche und gewählten Genauigkeit (s. Abb. 6.11 (b)). Diese Schnitte werden genutzt, um in y-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems Extrema zu erzeugen. Da diese schnittbedingt nicht in einer Ebene liegen müssen, werden diese auf die ZY-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems projiziert. Um eine Fläche zu generieren, wird auf Basis der erzeugten Extremaprojektionen ein geschlossener Linienzug erzeugt. Dieser wird anschließend mit einer Fläche „gefüllt“ wodurch die gesuchte Projektionsfläche entsteht.

6.3.4 Das 2D/3D-Fahrzeuglayout

Das *Fahrzeuglayout* dient als Datengrundlage zur Erzeugung von Layoutzeichnungsdocumenten. Diese beinhalten definierte Schnitte und Ansichten des Fahrzeugs, die zur Diskussion von Maßketten oder zu Dokumentationszwecken genutzt werden können. Dadurch, dass das Fahrzeuglayout erforderliche Schnitte und Ansichten inklusive erforderlicher Abmessungen und textueller Angaben im 3D vordefiniert, können diese automatisiert in Zeichnungsdocumente übergeführt werden. Den grundsätzlichen Prozess hierzu zeigt Abb. 6.13.

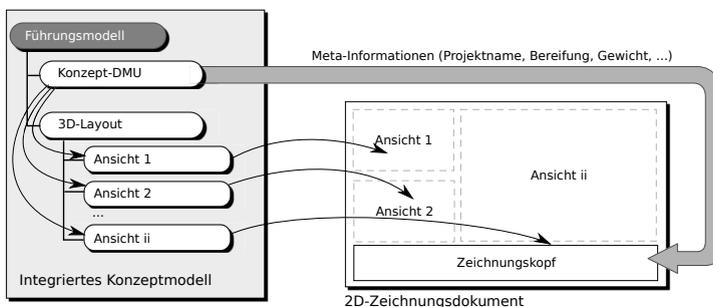


Abb. 6.13: Workflow zur Nutzung des 2D-Layouts im Gesamtfahrzeugkontext

Das 3D-Layout ist in einem separaten Teiledatensatz gespeichert, der alle definierten Ansichten strukturiert beinhaltet. Diese Ansichtselemente sind mit den jeweiligen Zeichnungsansichten assoziativ verbunden. Durch die zentralisierte Ablage in einem singulären Teil ergeben sich im Sinne der Datenaktualisierung zwei zentrale Vorteile: Zum einen lassen sich die den Ansichten zugrundeliegenden Schnitte skriptgesteuert, durch Laden der jeweiligen exakten CAD-Repräsentanz, automatisch sequentiell über die Automationschnittstelle des CAD-Systems aktualisieren, wodurch sich der Aktualisierungsvorgang signifikant beschleunigen lässt, zum anderen können alle geometrischen Elemente durch dieses Vorgehensmodell spezifisch in ihrer visuellen Ausprägung im Schnitt gesteuert werden.

Neben den 3D-Ansichten sind für den Zeichnungskopf entsprechende Informationen, wie etwa Standardbereifung, erforderlich, die über separate Parameter des integrierten Konzeptmodells gesteuert werden. Diese können sowohl dreidimensional als auch in der Zeichnung dargestellt werden.

Weiteres wesentliches Merkmal des Fahrzeuglayouts ist dessen Fähigkeit sich automatisiert an neue geometrische Gegebenheiten anzupassen. Hierzu sind alle Maßketten als Skelettsystem ausgeführt (s. Abb. 6.14). Durch „Auswechseln“ einer Fläche oder eines Volumenelementes, wird eine Aktualisierung der Referenzen vorgenommen, wodurch die 3D-Abmessungen stets den aktuellen Konzeptstand widerspiegeln.

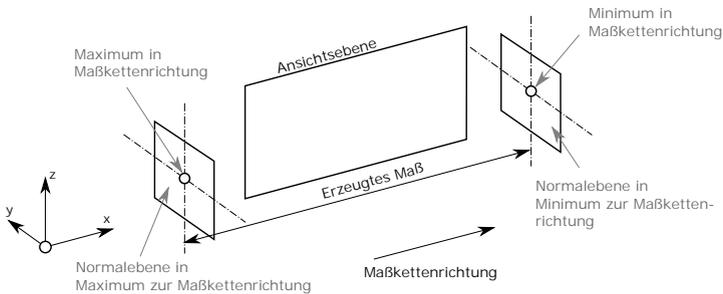


Abb. 6.14: Automatisierte Erzeugung von 3D-Abmessungen

6.3.5 Generierung von Fahrwerkshüllen

Aufgrund der Einfederung und Lenkbewegungen im regulären Fahrbetrieb bedürfen Räder eines hohen Platzbedarfes im Fahrzeug. Um den Raumbedarf infolge von Radbewegungen frühzeitig abschätzen zu können, werden im vorliegenden Ansatz CAD-Kinematikmodelle genutzt. Das Modell ist als parametrisch-assoziative Produktskelettstruktur aufgebaut, die Produktpakete analog der Konzept-DMU-Struktur steuert. Abb. 6.15 zeigt die grundsätzlich Struktur eines Kinematikmodells.

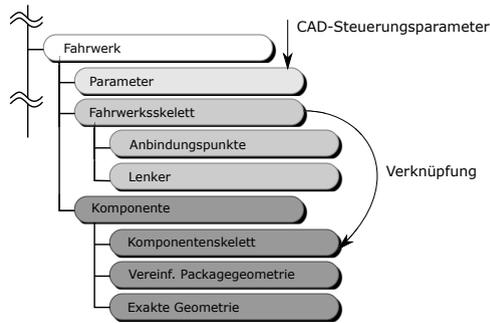


Abb. 6.15: Grundsätzliche Struktur des Fahrwerkkinematikmodells

Die kinematischen Beziehungen werden zwischen den Elementen des Skeletts und dem jeweiligen Komponentenskelett definiert. Dadurch, dass sich bei solchen gekapselten Strukturen der gesamte Strukturzweig mitbewegt, können entweder vereinfachte Packagekomponenten oder Realdaten zur Bestimmung etwaiger Raumbedarfe genutzt oder ausgetauscht werden. Um den verschiedenen Fahrwerkstypen und den damit verbundenen kinematischen Konzepten im Automobilbau Rechnung zu tragen, stehen im integrierten Konzeptmodell unterschiedliche Fahrwerkstypen zur Auswahl. Der Fahrwerksknoten im *Konzept-DMU* ist analog Abb. 6.16 aufgebaut. Erst durch die dezidierte Setzung eines spezifischen Fahrwerks wird dieses im Kontext des integrierten Konzeptmodells genutzt.

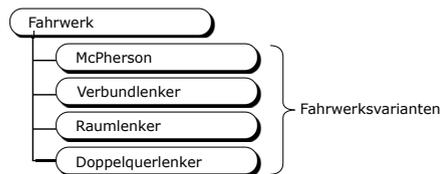


Abb. 6.16: Grundsätzliche Struktur des Sammelknotens für Fahrwerkkinematikmodelle

Grundsätzlich setzt sich jedes Fahrwerksmodell aus der CAD-Repräsentanz eines Reifens sowie vereinfachter Fahrwerkskomponenten zusammen, die entsprechend der vorangegangenen Ausführungen im Bedarfsfall ausgetauscht werden können. Die Komponenten sind parametrisch steuerbar und sind mit dem Führungsmodell über entsprechende Bedingungen verknüpft. Die Positionierung eines Fahrwerks erfolgt entsprechend der Fahrzeugarchitekturansforderungen über das Radzentrum absolut im Raum (s. Abb. 6.17). Die Kinematikpunkte des Skeletts sind relativ zum Radzentrum parametrisiert, um die geometrische Konsistenz im Falle von räumlichen Verschiebungen im Fahrzeug zu gewährleisten.

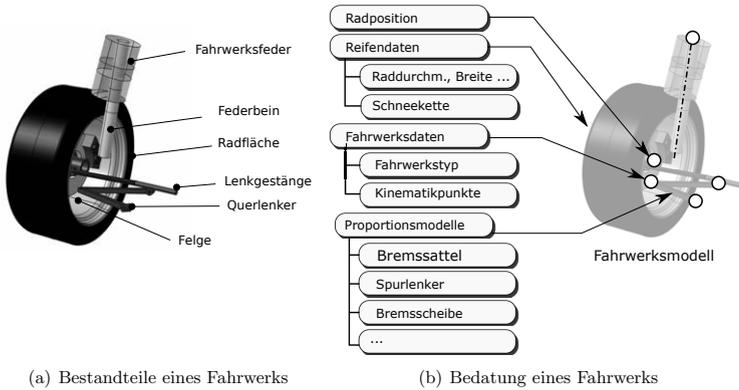


Abb. 6.17: Parametrisches Fahrwerk im integrierten Konzeptmodell

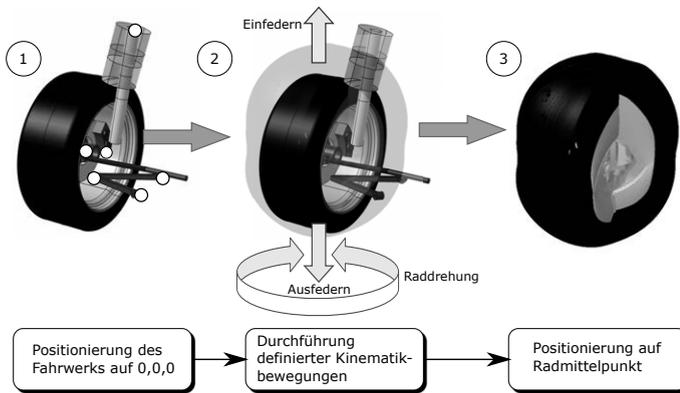


Abb. 6.18: Entstehung einer DMU-Hülle

In Kap. 4.2 wurde bereits auf die Problematik von Hüllgeometrie im Zusammenhang mit der Positionierung im Gesamtfahrzeug eingegangen. Da Hüllen üblicherweise externen Programmen aus Sicht CAD entstammen, nehmen diese bereits die erwartete räumliche Position und Orientierung ein. Im Sinne rascher Parametervariationen ist dies jedoch hinderlich, da eine solches Vorgehen unter Berücksichtigung der geforderten parametrischen Konsistenz im Falle der Änderung von Parametern eine stetige Neuberechnung der Radhülle erfordern würde. Daher wird im vorliegenden Ansatz eine andere Positionierungsstrategie gewählt. Wird eine neue Radhülle generiert, wird der Radmittelpunkt temporär auf $x = y = z = 0 \text{ mm}$ verschoben. Dadurch wird die Positionsinformation der Radhülle eliminiert. Ist die Radhülle generiert, wird diese an der Position des Radzentrums positioniert. Durch diese Vorgehensweise kann die Radhülle zusammen mit den Fahrwerkskomponenten im Falle von Positionsvariationen konsistent im Raum bewegt werden. Finden Modifikationen statt, die einen Einfluss auf die Radeindrehung oder die Einfederung haben, wird die Radhülle automatisch neu gerechnet.

6.3.6 Ergonomieadapter

Für die Einbindung von virtuellen 3D-Menschmodellen (s. Kap. 4.7.4) wird ein entsprechendes Adaptermodell genutzt – der Ergonomieadapter. Dieses Modell führt ausgewählte ergonomisch relevante geometrische Elemente des zentralen Skelettmodells und entsprechende Positionierungsgeometrie zu einer zentralen Referenzierungsquelle zusammen (s. Abb. 6.19). Aus den *3D-CAD-Referenzen* werden alle ergonomisch relevanten Geometrielemente wie etwa die Sitzreferenzpunkte oder die Fersenaufstandspunkte übernommen. Für den Fahrer ist zusätzlich der Lenkradpunkt (D-Punkt) sowie der Pedalreferenzpunkt zur Positionierung des Fußes am Gaspedal erforderlich.

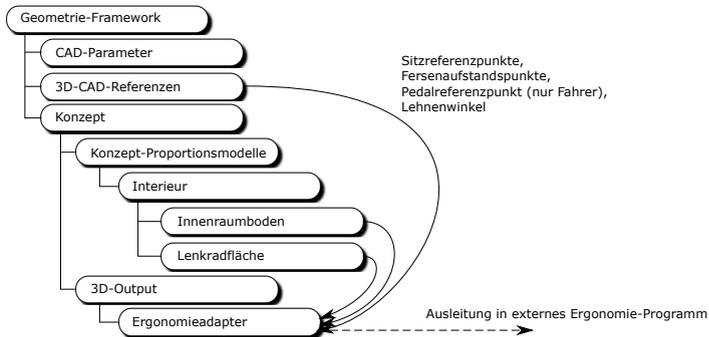


Abb. 6.19: Bereitstellung von Referenzen aus dem integrierten Konzeptmodell für ergonomische Untersuchungen

Hierbei lassen sich die Menschshablonen oder 3D-Menschmodelle entsprechend der jeweiligen Sitzreferenzpunkte, Fersenaufstandspunkte und Lehnenwinkel im Fahrzeug positionieren. Für den Fahrer bietet das Modell eine Lenkradtorsionsfläche mit zwei Greifpunkten unter einem Zenitwinkel von jeweils 30° an, auf welche die Hände des Fahrers referenziert werden können. Abb. 6.20 zeigt die geometrische Gestalt des Ergonomieadapters.

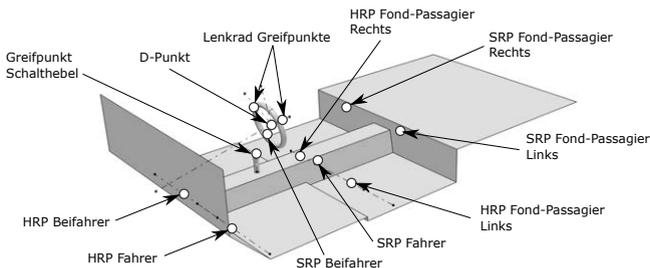


Abb. 6.20: 3D-Ergonomieadapter im Geometrie-Framework

Wie in Kap. 4.7.4 gezeigt, können 2D-Menschshablonen oder 3D-Menschmodelle direkt im jeweils genutzten CAD-System verfügbar sein oder in Form externer Software. Dementsprechend kann der Ergonomieadapter intern im integrierten Konzeptmodell oder in Kombination mit externer Software genutzt werden. Im Falle der internen Nutzung, kann die Positionierung der

Menschmodelle direkt über die bereitgestellten Methoden des CAD-Systems zur parametrisch-assoziativen Positionierung von Bauteilen erfolgen. Im Falle der externen Nutzung muss die jeweilige Ergonomie-Software über eine geeignete Import-Schnittstelle verfügen, die externe Daten entweder in Form von Neutralgeometrie lesen kann, oder mittels probater Konverter umwandeln kann. Die Nutzung in einer externen Ergonomie-Software wird in Abb. 6.21 dargestellt.

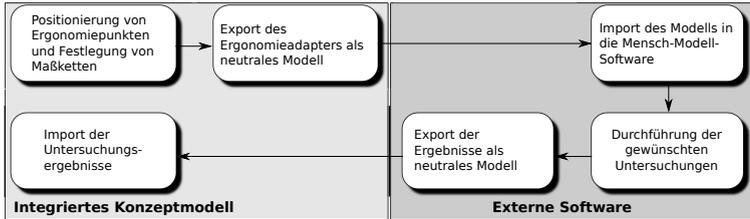


Abb. 6.21: Nutzung eines externen Menschmodells

Im gezeigten Beispiel-Workflow wird der Ergonomieadapter als neutrales IGES-File exportiert. Dieses wird in der Ergonomie-Software eingelesen. In einem nächsten Schritt kann mit der Positionierung der Menschmodelle begonnen werden. Diese werden auf die jeweiligen Sitzreferenzpunkte positioniert, die Fersen der Menschmodelle werden auf die zugehörigen Fersenaufstandspunkte referenziert. Um eine einfache laterale Verschiebung der Fersen für Packageuntersuchungen zu ermöglichen, wird durch den Ergonomieadapter eine entsprechende Linie durch den jeweiligen Fersenpunkt entlang der y-Achse des Fahrzeugs bereitgestellt. Nach der Positionierung in der Ergonomie-Software können nun entweder entsprechende Untersuchungen vorgenommen werden, oder es können geometrische Untersuchungsergebnisse in das integrierte Konzeptmodell rückversorgt werden.

6.3.7 Ableitung des Innenraumvolumens für die Klimatisierungsvorauslegung

Für die Vorauslegung der erforderlichen Leistung des Klimaaggregats ist die Kenntnis des zu klimatisierenden Innenraumvolumens erforderlich. Dieses wird in der prototypischen Umsetzung auf Grundlage der Exterieur-Basisfläche des Exterieur-Proportionsmodells und der Bodenfläche des Interieur-Proportionsmodells bestimmt. Die Einbindung in das integrierte Konzeptmodell zeigt Abb. 6.22. Die Exterieur-Basisfläche, die Verglasungsflächen und die Interieur-Basisfläche werden über die entsprechenden Publikationen in den Knoten *Externen Referenzen* des Klimatisierungsadapters verknüpft. Die Konstruktion des Innenraumvolumens verlangt zunächst eine Offsetierung der Exterieur-Basisfläche nach innen, wodurch Einflüsse des Rohbaus berücksichtigt werden sollen. Die entstehende Fläche wird anschließend mit der Interieur-Bodenfläche getrimmt.

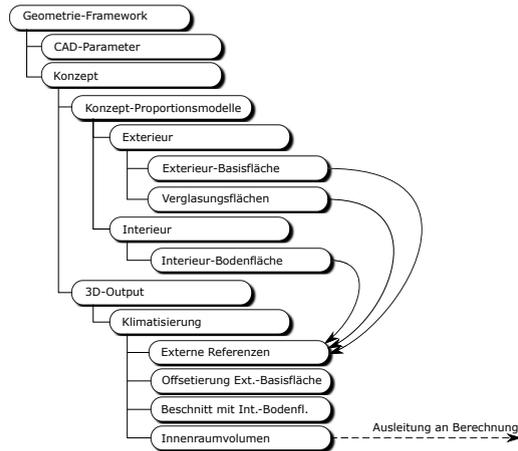


Abb. 6.22: Einbindung des Klimatisierungsadapters im integrierten Konzeptmodell

Die entstehende geschlossene Fläche kann zusammen mit den Verglasungsflächen an einen Flächenvernetzer exportiert werden. Die zugehörigen Arbeitsabläufe skizziert Abb. 6.23.

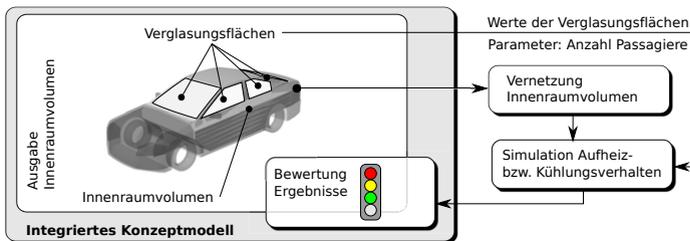


Abb. 6.23: Prozess in der Klimatisierungsbewertung

Neben dem reinen Einzelwert des Volumens werden durch das Geometriemodell für die Simulation der Klimatisierung die vorhandene Gesamtverglasungsfläche, sowie die Neigungswinkel A130-1 und A130-2 der Front- und Heckscheibe bereitgestellt, da diese maßgeblich das Aufheizverhalten des Innenraums beeinflussen. Des Weiteren wird über das Parametermodell die Anzahl der festgelegten Passagiere zur Betrachtung des damit verbundenen Wärmeeintrags bereitgestellt. Spezielle Eigenschaften wie Wärmeleit- und Wärmeübergangseigenschaften sind im Simulationsmodell abgebildet und werden nicht durch das integrierte Konzeptmodell bereitgestellt.

6.3.8 Design-Vorgabemodell

Das Design-Vorgabemodell dient im integrierten Konzeptmodell der Einbindung des Designs in den Konzeptentwicklungsprozess. Das Modell beinhaltet alle für das Design maßgeblichen technologischen Informationen (s. Abb. 6.24) und wird als eigenständiger CAD-Datensatz abgebildet. Dieser umfasst die Verweise auf relevante Packagekomponenten, Menschmodelle mit Begrenzungsflächen (z. B. erforderliche Kopffreiheit, oder Schulterfreiheit) sowie die wesentlichen Fahrzeug Außen- und Innenbegrenzungen. Hierzu sind in allen CAD-Datensätzen die jeweils erforderlichen CAD-Elemente publiziert. Durch die Nutzung von Verweisen auf bestehende Elemente ist eine separate Optionslogik, wie etwa im Falle des Exterieur- oder Interieurmodells nicht erforderlich.

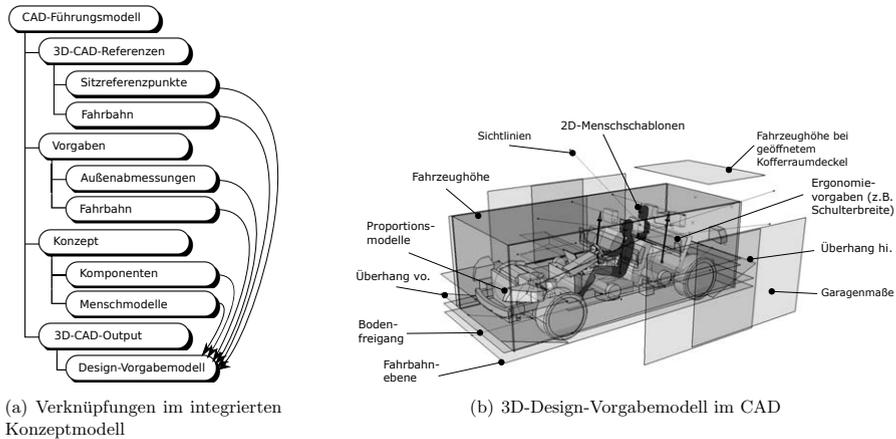


Abb. 6.24: Design-Vorgabemodell im integrierten Konzeptmodell

Die Nutzung und die Stellung des Design-Vorgabemodells im Entwicklungsprozess wird in Kap. 6.6.6 gezeigt.

6.4 Modelle zur Analyse funktionaler Produktmerkmale

Ein zentraler Baustein des integrierten Konzeptmodells ist dessen Fähigkeit, funktionale Modelle konsistent einzubinden. Diese können rein über die Parameter oder über entsprechende Ausgabegeometrie des CAD-Modells gekoppelt werden. Hierbei werden zwei wesentliche Ziele verfolgt. Einerseits sollen sich funktionale Produktmerkmale effizient darstellen lassen, andererseits sollen die Auswirkungen auf die Dimensionierung wesentlicher Komponenten aufgezeigt werden, um bereits in frühen Phasen ein höherwertigeres Bauraummodell für die Architekturplanung bereitzustellen. Hierzu sind entsprechende funktionale Teilmodelle erforderlich, deren Gestaltung und Vernetzung im Rahmen des integrierten Konzeptmodells im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

6.4.1 Betrachtung von Masse, Masseverteilung und masseaffiner Größen

In Kap. 5.3.3.4 werden die grundlegenden Eigenschaften des Massenmodells, das im integrierten Konzeptmodell Verwendung findet, sowie die zugehörigen Berechnungsabläufe erläutert. Im folgenden Abschnitt sollen die in der praktischen Evaluierung genutzten Modelle zur Ableitung und Berechnung von Masse und Masse-Eigenschaften gezeigt werden.

6.4.1.1 Erforderliche Masse-Eigenschaften in der frühen Konzeptphase

Die Masse beeinflusst nicht nur durch ihren absoluten Betrag sondern auch durch ihre räumliche Verteilung maßgeblich die Gestalt des Fahrzeugkonzeptes (s. Abb. 3.30). Da Komponenten, die einen hohen Platzbedarf aufweisen, in späteren Projektphasen nur unter großem Aufwand repositioniert werden können, ist die frühe Kenntnis von Masse-Eigenschaften für die Gestaltung neuer Fahrzeugarchitekturen von zentraler Bedeutung. Im Zuge der praktischen Evaluierung des integrierten Konzeptmodells wurden hierzu die folgenden Themenstellungen betrachtet:

- Prognose des Gesamtfahrzeuggewichts
- Bestimmung von Gesamtfahrzeugschwerpunkt, Achslastverteilung und Achsgewichten
- Massenträgheitsmoment um die Hochachse des Fahrzeugs
- Ableitung von stimmigen Zielwerten für die entwickelnden Fachbereiche

Zur Prognose des Gesamtfahrzeuggewichts, sowie der Berechnung des Massenschwerpunktes und davon abgeleiteter Größen, ist zunächst die reproduzierbare Ableitung von Massewerten erforderlich. Hierzu wurden verschiedene Verfahren betrachtet, die im nachfolgenden Kap. 6.4.1.2 diskutiert werden. Als weiterer wichtiger Punkt wurde die Ableitung von Gewichtsziele für die technischen Fachbereiche identifiziert, um die geforderten Gewichtsziele und Schwerpunktanforderungen auf Gesamtfahrzeugebene zu erreichen.

6.4.1.2 Ableitung von Nutzung von Gewichtswerten im integrierten Konzeptmodell

Um ein Gewicht bzw. Masse-Eigenschaften auf Basis der Konzeptproduktstruktur berechnen zu können, sind zunächst entsprechende Werte für die verbauten Komponenten bzw. Fahrzeugbereiche erforderlich. Diese sind jedoch in der Konzeptphase mit einer hohen Unschärfe behaftet, weswegen geeignete Schätzverfahren erforderlich sind, die eine nachvollziehbare Prognose von Gewichtswerten ermöglichen. Diese kann aus unterschiedlichsten Gesichtspunkten vorgenommen werden und ist stark von den jeweiligen Projekttrandbedingungen, wie etwa mögliche Plattformen und definierte Übernahmeteile, abhängig.

Im einfachsten Fall liegen bereits Masse-Eigenschaften von Vorgänger-Modellen vor, oder es werden entsprechende Übernahmeteile/-module verbaut deren Masse-Eigenschaften bereits bekannt sind. Eine andere Möglichkeit Masse-Eigenschaften zu ermitteln stellen statistisch basierte Verfahren dar. Im Zuge einer Bachelorarbeit [129] wurden hierzu Untersuchungen auf Basis der Benchmark-Datenbank *A2mac1* [1] durchgeführt. Hierbei wurden für wesentliche gewichts- und schwerpunktrelevante Komponentengruppen statistische Mittelwerte für deren Gewicht innerhalb einer bestimmten Fahrzeugklasse ermittelt. Abb. 6.25 zeigt hierzu das Karosseriegewicht über die betrachteten Fahrzeugklassen.

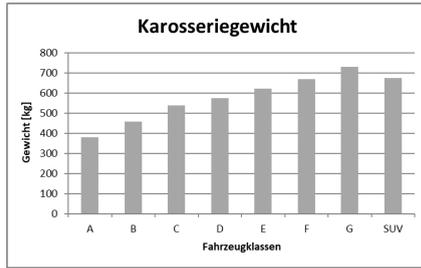


Abb. 6.25: Statistische Verteilung des Rohbaugewichts für ausgewählte Fahrzeugklassen [129]

Speziell etwa für den Rohbau lassen sich Zielgewichte auch auf Basis der Leichtbaugüte L ableiten. Diese ist gemäß [15] definiert als:

$$L = \frac{m_{Ger}}{c_t \cdot A} \tag{6.2}$$

Darin stellen m_{Ger} die Masse des Rohbaus ohne Türen und Klappen dar, c_t repräsentiert die Torsionssteifigkeit und A ist die Aufstandsfläche, die sich aus dem Produkt von Spurweite und Radstand ergibt. Damit kann bei geforderter Torsionssteifigkeit und der Kenntnis von Spurweite und Radstand ein gefordertes Zielgewicht für den Rohbau ermittelt werden:

$$m_{Ger} = L \cdot c_t \cdot A \tag{6.3}$$

Eine andere Möglichkeit der Abschätzung bilden volumetrische Ansätze, wie etwa nach Hirz [49], die eine grobe zonenmäßige Prognose des Gewichtes ermöglichen. Diese Informationen können in einer Datenbank abgelegt werden und zentral im Gewichtsprozess bereitgestellt werden. Abb. 6.26 zeigt die Nutzung der unterschiedlichen Gewichtsinformationen im integrierten Konzeptmodell.

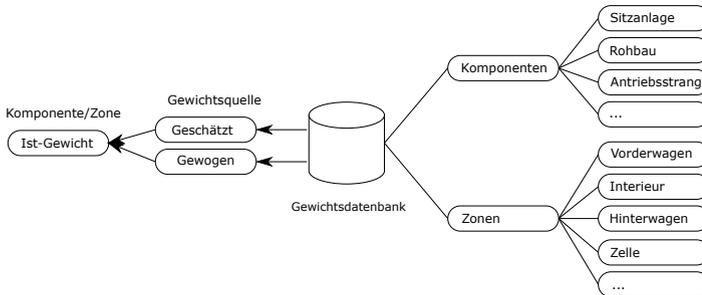


Abb. 6.26: Bestimmung von Gewichtswerten in der Konzeptphase

Die Gewichtsinformationen werden hierzu in der Datenbank entsprechend klassifiziert, damit eine Zuordnung zur jeweiligen Gewichtsquelle möglich ist. Im Falle von statistischen Werten oder berechneten Werten auf Basis von Schätzmodellen wird der ermittelte Wert automatisch in die Gewichtsquelle *Geschätzt* eingetragen. Handelt es sich bei der Komponenten um ein Übernahmeteil mit bekanntem Gewichtswert, erfolgt die Eintragung in die Gewichtsquelle *Gewogen*.

6.4.1.3 Wesentliche Komponenten in der konzeptionellen Gewichtsbehandlung

Die Grundlage der Gewichtsstruktur bildet die bereits vorgestellte Konzeptproduktstruktur, welche um entsprechende Masse-Eigenschaften erweitert wird (s. Kap. 5.3.3.4). Um in der frühen Konzeptphase trotz unscharfer Randbedingungen und mangelnder Schärfe in der technischen Detaillierung dennoch Aussagen zum Gewicht bzw. Gewichts-Eigenschaften von Komponenten treffen zu können, wurden zunächst im Rahmen des industriellen Forschungsprojektes jene Komponenten identifiziert, welche eine besonders hohe Sensitivität auf die Gesamtmasse, den Massenschwerpunkt sowie die Massenträgheitsmomente aufweisen (s. Tab. 6.2), um den zu betrachtenden Umfang an Komponenten eingrenzen zu können.

Tab. 6.2: Auszug an Komponenten mit hohem Anteil am Gesamtfahrzeuggewicht

Komponente	Typische Bauteile	Anteil [%]
Karosserie	Türen und Klappen, Rahmen, Verglasung, Scheibenwischer, Beleuchtung, Kotflügel.	37,8
Interieur	Sitze, Innenausstattung, Klimasystem.	11,15
Antriebssystem	Getriebe, Abgassystem, Kühler, Kraftstoffanlage.	19,09
Fahrwerk	Räder, Radaufhängung, Dämpfer, Brems- und Lenksystem	20,4
Elektrik	Wasswananlage, Scheinwerfer, Interieur-Beleuchtung, Bordnetz, Sensoren, Sicherungskasten, Steuergeräte.	5,10
Flüssigkeiten	Kraftstoff, Bremsflüssigkeit, Motor- und Getriebeöl, Klimaflüssigkeit.	4,42

Deutlich zu erkennen ist die starke Dominanz des Anteils des Rohbaugewichts am Gesamtgewicht mit ca. 38 %. Rein betragsmäßig könnte man daher zum Schluss kommen, dass beispielsweise die Elektrik oder das Interieur für eine erste Betrachtung vernachlässigt werden können. Überlagert man die Verteilung der Masse der rein betragsmäßigen Betrachtung ergibt sich jedoch ein sehr differenziertes Bild. So ist etwa das Interieur lediglich mit einem Anteil von 11,15 % am Gesamtgewicht beteiligt, jedoch sind die Komponenten quer über das Fahrzeug verteilt, wodurch eine hohe Sensitivität auf den Fahrzeugschwerpunkt resultiert. Abb. 6.27 zeigt hierzu die räumliche Verteilung ausgewählter Massenpakete im Fahrzeug.

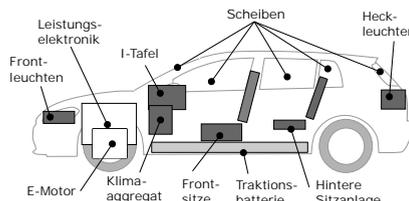


Abb. 6.27: Wesentliche Elemente im Massenpackage

Neben dem eigentlichen Fahrzeuggewicht sind die verschiedenen Beladungszustände des Fahrzeug für die Auslegung von Interesse, da sich in den physikalischen Eigenschaften teils deutliche Unterschiede ergeben. Hierfür ist das Konzept-Beladungsmodell verantwortlich. Wie bereits in Kap. 5.3.3.1 gezeigt, wird dieses parallel zum eigentlichen Fahrzeug innerhalb der Konzeptpro-

duktstruktur definiert, wodurch sich alle erforderlichen Beladungszustände darstellen lassen. Der grundsätzliche Aufbau des Modells ist in Abb. 6.28 dargestellt.

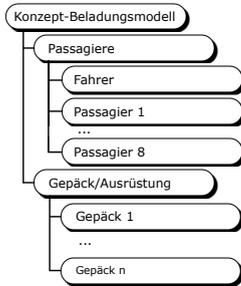


Abb. 6.28: Gliederung des Beladungsmodells

Das Modell gliedert sich auf erster Ebene in die Knoten *Passagiere* und *Gepäck/Ausrüstung*. Die Anzahl an Passagieren ist aufgrund der Fokussierung des vorliegenden Ansatzes auf Kraftfahrzeuge der Klasse M1 auf neun Personen begrenzt, kann jedoch im Bedarfsfall erweitert werden. Der Knoten *Gepäck/Ausrüstung* beinhaltet Gepäckstücke und ausstattungsbedingtes Bordwerkzeug und andere Ausrüstung (s. Abb. 6.9 (c)).

Tab. 6.3: Standardelemente im Knoten *Zuladung* des Beladungsmodells

Komponente	Anmerkung
Wagenheber	
Reserverad	Vollwertiges Ersatzrad im Gegensatz zum Notlaufrad.
Notlaufrad	
Radschlüssel	
Tyre Inflation Kit	Ersetzt Notlaufrad oder Reserverad sofern zulässig.
Warndreieck	
Verbandskasten	
Kindersitz	

Die verschiedenen Komponenten können dem jeweiligen Beladungszustand über das Konfigurationsmodell des integrierten Konzeptmodells zugewiesen werden.

6.4.1.4 Abbildung des Massenpackage im CAD

Wie in Kap. 5.3.3.3 beschrieben wird, erfolgt der Aufbau der Struktur des Konzept-DMU auf Basis der Konzeptproduktstruktur. In der praktischen Nutzung zeigt sich, dass für die meisten Komponenten eine Darstellung mit einem einzigen Quader ausreichend ist. Die Positionierung der Quader im Raum erfolgt auf Basis der zugeordneten *3D-CAD-Referenzpunkte*. Sind alle Quader positioniert, können die Schwerpunktinformationen an die Konzeptproduktstruktur rückversorgt werden, wodurch sich der Gesamtschwerpunkt des Fahrzeugs ermitteln lässt. Abb. 6.29 (a) zeigt hierzu ein detailliertes Massenpackage für ein bestehendes Fahrzeug in CATIA V5.

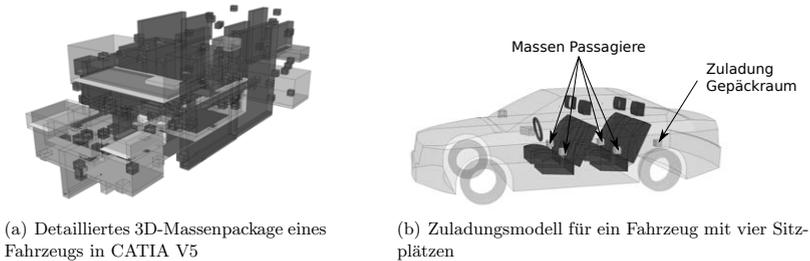


Abb. 6.29: Abbildung von Masse im CAD

Im Falle des Beladungsmodells wird die Abbildung der Einzelmassen als Punktmasse in Form von Quadern vorgenommen. Abb. 6.29 (b) zeigt hierzu das Beladungsmodell im CAD für vier Personen inklusive einer Zuladung im Gepäckraum des Fahrzeugs.

Die gewonnenen Teile- bzw. Modulschwerpunkte können nun genutzt werden, um die Gesamtschwerpunkte der verschiedenen Beladungszustände und Fahrzeugvarianten zu berechnen. Die berechneten Schwerpunktinformationen können in das CAD-Führungsmodell zurückgespielt werden, um die Informationen dort grafisch zu visualisieren (s. auch Kap. 6.6.7). Da die primäre Arbeitsdomäne einer Fahrzeugarchitekturabteilung das 3D-CAD darstellt, wurde in der praktischen Umsetzung eine CAD-basierte Visualisierung der Masse-Eigenschaften implementiert. Hierzu wird die Achslastverteilung als prozentual skaliertes Pfeil im Radaufstandspunkt in der jeweiligen Messlast für Vorder- und Hinterachse dargestellt. An den Achsen wurden 3D-Anmerkungen positioniert, welche die Werte für Achslast, Achsgewicht und prozentualen Anteil anzeigen (s. Abb. 6.30). Diese Darstellung liegt für jede definierte Messlast des Fahrzeugs vor. Die beiden dargestellten Pfeile sind als 3D-Flächen ausgeführt.

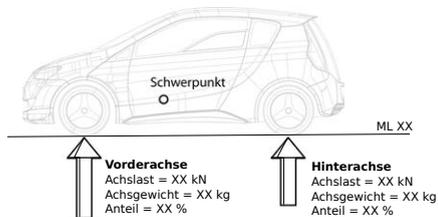


Abb. 6.30: Visualisierung schwerpunktbezogener Informationen im CAD

6.4.2 Betrachtung der Fahrleistung

Viele Bauraumthemen sind direkt oder indirekt mit der Fahrzeugfunktion verknüpft – so auch der Antriebsstrang. Der Fahrzeugantrieb definiert zentrale funktionale Produktmerkmale eines Fahrzeugs wie etwa dessen Steigfähigkeit, Maximalgeschwindigkeit, Reichweite oder Beschleunigung und hat signifikanten Einfluss auf den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch. Je nach dem welches Antriebssystem in einem Fahrzeug genutzt werden soll, gestalten sich die Raumbedarfe unterschiedlich; sie sind aber in jedem Fall hoch. Daher ist eine frühe Kenntnis erforderlicher bzw. resultierender Dimensionen von Vorteil in der Konzeptentwicklung. Um erste Tendenzen

zu Bauraumbedarfen abschätzen zu können sind folglich geeignete Funktions-Ersatzmodelle erforderlich. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden hierzu im Zuge einer Masterarbeit [53] verschiedene Modelle zur Bewertung von Antriebseigenschaften aufgebaut. Hierbei wurden die folgenden Eigenschaften betrachtet:

- Reichweite/Verbrauch/Energiebedarf
- Maximalgeschwindigkeit
- Elastizität
- Steigfähigkeit

Weitere Eigenschaften im Zusammenhang mit der Längsdynamik, wie etwa Geräusch oder Komfort, wurden im vorliegenden Modell nicht berücksichtigt, können aber grundsätzlich durch eine geeignete Erweiterung in das Modell integriert werden.

Die Basis für alle Untersuchungen im Bereich der Fahrleistung bildet ein 120 % Längsdynamikmodell in MATLAB/Simulink²⁰ (s. Abb. 6.31).

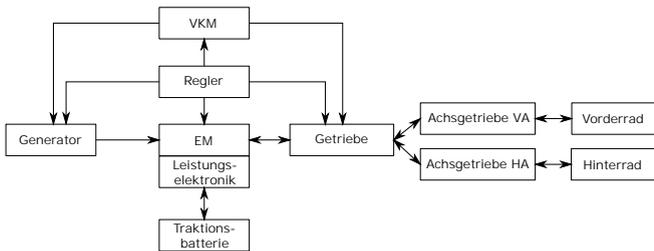


Abb. 6.31: Überlagertes Antriebsstrangmodell

Das bedeutet, dass das Modell so gestaltet ist, dass durch entsprechende Optionen eindeutig definierte Antriebsstrangkonfigurationen realisiert werden können. So ist das Gesamtmodell in Hinblick auf einen rein verbrennungsmotorischen Antriebsstrang überbestimmt, da auch elektrische Antriebsstrangkomponenten vorhanden sind die nicht benötigt werden. Durch die Option *VKM* werden alle elektrifizierten Komponenten des Modells automatisch deaktiviert. Das in der praktischen Evaluierung verwendete Modell kann gegenwärtig die folgenden Konfigurationen abbilden:

- Verbrennungsmotorischer Antriebsstrang
- Paralleler Hybrid
- Serieller Hybrid
- Mischhybrid

Abb. 6.32 zeigt hierzu die exemplarische Aussteuerung eines verbrennungsmotorischen Antriebsstranges mit Vorderradantrieb.

²⁰Die Nutzung von MATLAB/Simulink ist keine zwingende Voraussetzung und wurde im Zuge der prototypischen Umsetzung aufgrund von Vorgaben der Industriepartner genutzt.

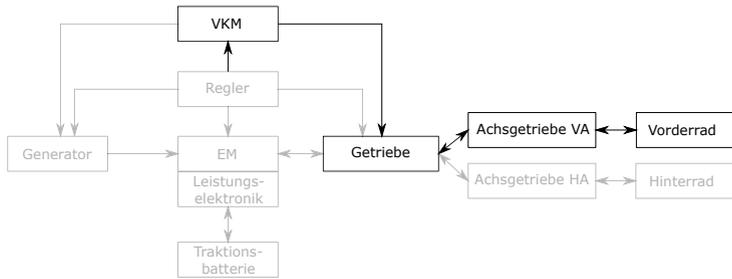


Abb. 6.32: Aussteuerung eines rein verbrennungsmotorischen Antriebsstranges

Aufgrund des hohen Umfangs an Parametern und Teilmodellen des Antriebsstrang-Moduls sollen hier nur die wesentlichen Modellgrundzüge erläutert werden; eine detaillierte Beschreibung findet sich in der Masterarbeit von Herrn Philipp Horner [53]. Die nachfolgenden Überlegungen sollen anhand eines verbrennungsmotorischen Antriebsstranges durchgeführt werden. Für die Komponenten werden entsprechende kennfeldbasierte Modelle verwendet. Nachfolgendes Beispiel zeigt beispielsweise die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs auf Basis eines vorgegebenen Fahrzyklus (s. Abb. 6.33). Das Modell wird über die in Kap. 5.4.3 gezeigte Schnittstelle mit allen erforderlichen Parametern und Informationen versorgt.

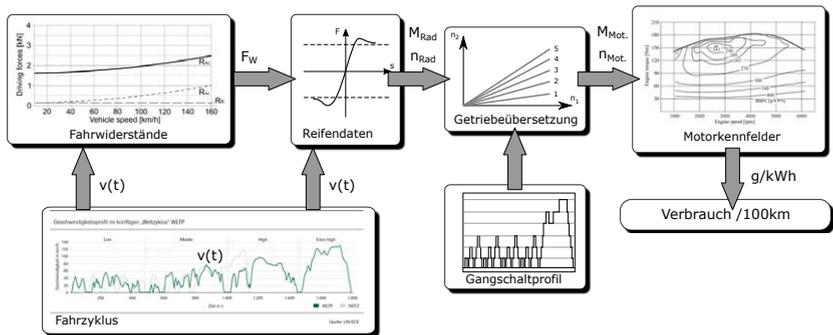


Abb. 6.33: Erforderliche Daten eines vereinfachten Längsdynamikmodells für die Verbrauchsermittlung [53]

Der gewählte Fahrzyklus definiert den Geschwindigkeitsbedarf und Lastzustand über die Zeit. Über die Fahrwiderstände sowie zugehörige Reifendaten lassen sich die Raddrehzahl und das erforderliche Drehmoment bestimmen. Diese definieren zusammen mit der Antriebsübersetzung sowie dem Gangprofil Motordrehzahl und Motormoment, wodurch mittels geeigneter Motorkennfelder der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch bezogen auf 100 km errechnet werden kann.

Neben dem Verbrauch ist die Maximalgeschwindigkeit v_{max} ein weiteres Kriterium für die Auslegung des Antriebsstranges. Die Maximalgeschwindigkeit am Rad lässt sich nach Gl. 6.4 errechnen:

$$v_{max} = \frac{r_{dyn} \cdot n_{Mot,max} \cdot 3,6}{60 \cdot i_{G,max} \cdot i_D} \quad (6.4)$$

Die real erzielbare Maximalgeschwindigkeit hängt jedoch maßgeblich vom Luftwiderstand, sowie vom Reifen und der Fahrbahn ab. In der praktischen Nutzung eines Fahrzeugs ist die Maximalgeschwindigkeit für den Durchschnittsfahrer eher von untergeordnetem Interesse. Im regulären Fahrbetrieb ist die sog. Elastizität wichtiger [53]. Diese Größe stellt die erreichte Beschleunigung ausgehend von einer Startgeschwindigkeit bis hin zu einer definierten Endgeschwindigkeit bei Wahl eines spezifischen Ganges dar und ist damit ein wichtiges Kriterium in der Beurteilung von Überholvorgängen. Typische Bereiche sind 40 – 100 km/h oder 80 – 120 km/h im höchsten Gang.

Ein weiteres wichtiges Kriterium in der Auslegung eines Antriebsstranges ist dessen Steigfähigkeit. Diese gibt an welche Steigung mit dem Fahrzeug bewerkstelligt werden kann. Diese ist von mehreren Faktoren wie Lage des Schwerpunktes, Haftung der Reifen, Motorleistung und der Getriebeübersetzung abhängig. Für die konzeptionelle Betrachtung des Antriebsstranges ist vor allem interessant, ob das Fahrzeug sich bei einer bestimmten Steigung p noch fortbewegen kann. Der Steigungswiderstand berechnet sich nach Gl. 6.5 zu:

$$F_{St} = m_{Fz} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (6.5)$$

Die Steigung p einer Straße wird typischerweise in % angegeben und ist mit dem Steigungswinkel α gemäß Gl. 6.6 verknüpft.

$$p = 100 \cdot \tan(\alpha) \quad (6.6)$$

Da europäische Alpenstraßen eine maximale Steigung von ca. 30% aufweisen dürfen [75], kann eine Vereinfachung der Widerstandsformel aus Gl. 6.5 vorgenommen werden. Darin wird der Term $\sin(\alpha)$ durch die Steigung ersetzt (Gl. 6.7). Dadurch kann der Steigungswiderstand eines Fahrzeugs durch direkte Multiplikation mit dem Steigungswert der Straße berechnet werden.

$$F_{St} = m_{Fz} \cdot g \cdot \frac{p}{100} \quad (6.7)$$

Im Rahmen des Modells lässt sich dadurch entweder die erforderliche Antriebsleistung um eine bestimmte Steigung zu bewerkstelligen ableiten oder die mögliche Steigung bei gegebener Antriebsleistung berechnen.

6.4.3 Bewertung der Querdynamik

Das Lenkverhalten eines Fahrzeugs ist ein wichtiges Kriterium in der Auslegung eines Fahrzeugs. Aufgrund der großen Abhängigkeit von wesentlichen geometrischen Einflussfaktoren, wie etwa dem Radstand oder der Schwerpunktposition, ist die frühe Kenntnis um das querdynamische Verhalten von zentraler Bedeutung für die Fahrzeugarchitektur. Im Rahmen des vorliegenden Ansatzes wird zur Bewertung der querdynamischen Eigenschaften ein Einspurmodell verwendet (s. Abb. 6.34).

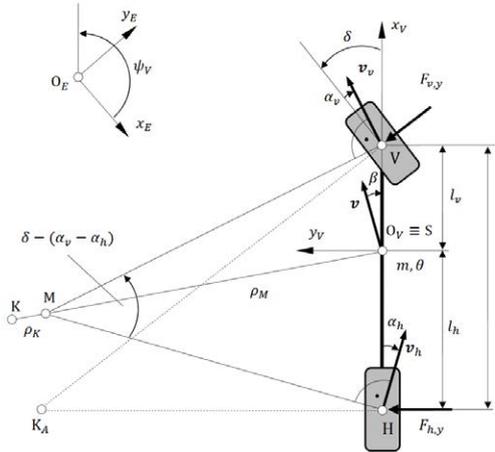


Abb. 6.34: Abmessungen und Winkel am Einspurmodell [96]

Das Einspurmodell repräsentiert eine Reduktion des Fahrzeugs auf je ein Rad an der Vorder- und Hinterachse. Diese Vereinfachung ist für kleine Schräglaufwinkel α und kleine Lenkwinkel δ zulässig. Der Lenkwinkelbedarf für die stationäre Kreisfahrt δ ergibt sich nach Gl. 6.8 aus der Summe von Ackermannwinkel und Korrekturlenkwinkel.

$$\delta = \frac{l_v + l_h}{R} + \frac{m_{F_z} \cdot a_y}{l_v + l_h} \cdot \left(\frac{l_h}{c_{sv}} - \frac{l_v}{c_{sh}} \right) \quad (6.8)$$

Der Schwimmwinkel β resultiert aus der Differenz von Grundschwimmwinkel und Differenzschwimmwinkel nach Gl. 6.9:

$$\beta = \frac{l_h}{R} - \frac{m_{F_z} \cdot a_y}{c_{sh}} \cdot \frac{l_v}{l_v + l_h} \quad (6.9)$$

Das Ziel in der Anwendung des Einspurmodells im integrierten Konzeptmodell liegt in der Identifikation der Steuertendenz. Hierbei wird grundsätzlich zwischen Über- und Untersteuern sowie neutraler Steuertendenz unterschieden. Untersteuernd bedeutet, dass bei gleichbleibendem Kurvenradius und zunehmender Kurvengeschwindigkeit der Lenkwinkelbedarf zunimmt. Bei Untersteuern neigt das Fahrzeug daher über dessen Vorderachse zu „schieben“. Übersteuernde Fahrzeuge weisen ein gegenteiliges Verhalten auf. Bei übersteuernden Fahrzeugen neigt die Hinterachse dazu auszubrechen. Die Steuertendenz bestimmt daher maßgeblich das Wesen des Fahrzeugs in Bezug auf das Verhalten bei Kurvenfahrt. Die meisten herkömmlichen PKW werden aus Sicherheitsgründen leicht untersteuernd ausgelegt.

Für die Steuertendenz sind zwei Größen maßgeblich – der Eigenlenkgradient (EG) und der Gierverstärkungsfaktor. Der Eigenlenkgradient ist in der DIN 70000 entsprechend Gl. 6.10 definiert und charakterisiert den Lenkbedarf des Fahrers.

$$EG = \frac{m_{F_z} \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v)}{l \cdot c_v \cdot c_h} \quad (6.10)$$

Untersteuernde Fahrzeuge weisen einen positiven Eigenlenkgradienten (EG) auf (s. Abb. 6.35), für neutrales Lenkverhalten ist der Eigenlenkgradient = 0 und für übersteuernde Fahrzeuge ist

der Eigenlenkgradient < 0 .

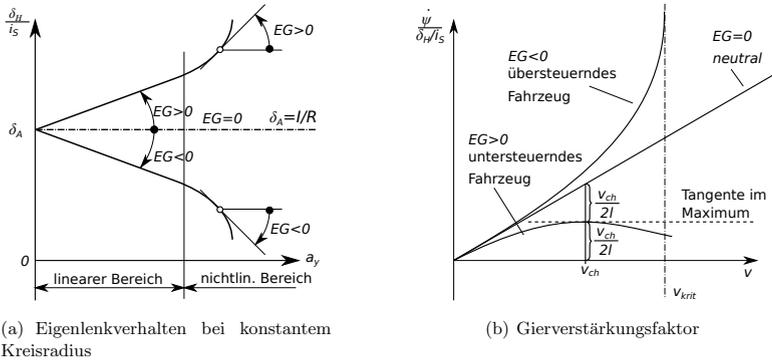


Abb. 6.35: Eigenlenkwinkel und Gierverstärkungsfaktor [46]

Um die Reaktion des Fahrzeugs auf die Anforderung durch den Fahrer darzustellen wird der Gierverstärkungsfaktor verwendet. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ und Lenkwinkel δ . Der Gierverstärkungsfaktor ist in Gl. 6.11 dargestellt.

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_h/i_s}\right) = \frac{v}{l + EG \cdot v^2} \tag{6.11}$$

Eine weitere wesentliche Größe stellt die sog. charakteristische Geschwindigkeit v_{ch} dar. Diese repräsentiert die Geschwindigkeit mit höchster Lenkempfindlichkeit für ein untersteuerndes Fahrzeug.

$$v_{ch}^2 = \frac{l^2 \cdot c_{sv} \cdot c_{sh}}{m_{Fz} \cdot (c_{sh} \cdot l_h - c_{sv} \cdot l_v)} \tag{6.12}$$

Für Fahrzeuge mit übersteuernder Lenktendenz gibt die kritische Geschwindigkeit jene Geschwindigkeit an, bei der ein theoretisch unendlich hoher Gierverstärkungsfaktor vorliegt. Dies bedeutet, dass kleinste Eingriffe oder auftretende Störungen sofort zu einer Instabilität des Systems und damit zum Schleudern des Fahrzeugs führen.

$$v_{krit}^2 = \frac{l^2 \cdot c_{sv} \cdot c_{sh}}{m_{Fz} \cdot (c_{sh} \cdot l_h - c_{sv} \cdot l_v)} \tag{6.13}$$

Aus Perspektive des integrierten Konzeptmodells ergeben sich damit die in Abb. 6.36 dargestellten Datenflüsse. Aus dem Geometriemodell resultiert der Radstand des Fahrzeugs. Über das Massenpackage ergibt sich der Schwerpunkt für die definierte Messlast. Die Werte für die Reifensteifigkeit werden dem aktuellen Reifenobjekt entnommen. Nach Berechnung werden die ermittelten Größen in das Parametermodell übertragen und können im integrierten Konzeptmodell entsprechend bewertet werden. Sind für den Eigenlenkgradienten sowie die Lenk- und Schwimmwinkel entsprechende Zielwerte und/oder Grenzwerte definiert, kann eine automatische Bewertung durch das Bewertungsmodell erfolgen. Die Größen v_{ch} , v_{krit} , EG sowie der Gierverstärkungsfaktor werden in die Konzeptparameter zurückgeführt und können dort unter Nutzung der Bewertungssystematik des integrierten Konzeptmodells weiter verarbeitet werden.

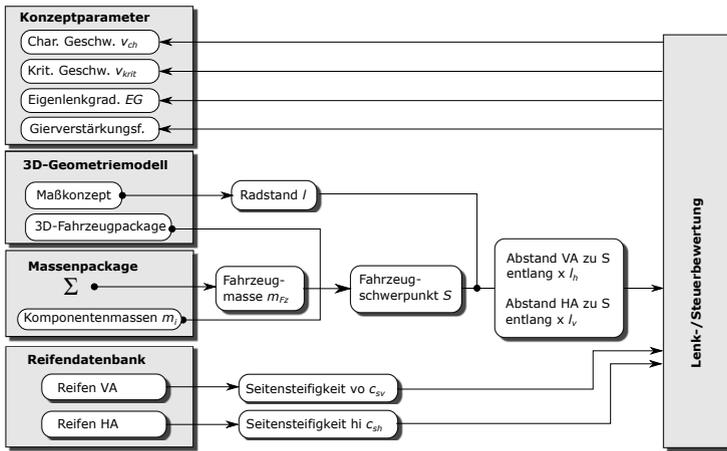


Abb. 6.36: Workflow im integrierten Konzeptmodell für die Bewertung der Steuertendenz

6.4.4 Überschlagsneigung

Ein mögliches Maß zur Bewertung der Überschlagsneigung eines Fahrzeugs ist über den sog. Static Stability Factor (*SSF*) gegeben [87]. Dieser ist abhängig von der Spurweite des Fahrzeugs sowie dessen Schwerpunktlage über der Fahrbahn. Der *SSF* errechnet sich nach Gl. 6.14.

$$SSF = \frac{Spurweite}{2 \cdot S_z} \tag{6.14}$$

Diese Größe wird durch die NHTSA seit 2004 als alleiniges Kriterium zur Bewertung der Überschlagsneigung im NCAP-Test verwendet [111]. Abb. 6.37 zeigt hierzu die Überschlagswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des *SSF*. Diese Darstellung beinhaltet zwei Kurven. Die untere Kurve beschreibt die Überschlagswahrscheinlichkeit rein aufgrund des *SSF* (No tip). Die obere dunklere Kurve zeigt die Überschlagswahrscheinlichkeit aufgrund zusätzlicher Fremdeinwirkung wie etwa Bordsteinkanten oder anderer Fahrbahnhindernisse (Tip) [111].

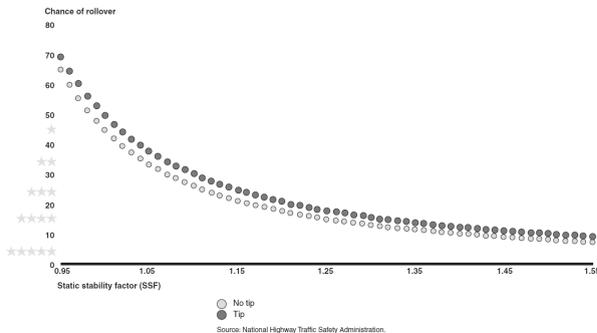


Abb. 6.37: Überschlagswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des *SSF* [111]

Darüber hinaus ist die Höhe des Schwerpunktes etwa für die Produktionsplanung von Interesse, um auf Gegebenheiten im automatisierten Fahrzeugtransport sowie der Positionierung während der Montage Rücksicht nehmen zu können. Den Prozess zur Bewertung der Überschlagsneigung zeigt Abb. 6.38. Aus dem Geometriemodell werden die Spurweite sowie die Höhe des Schwerpunktes über der Fahrbahn an die Berechnung übergeben. Anhand des berechneten Wertes für den *SSF* wird die Überschlagswahrscheinlichkeit ermittelt und im entsprechenden Parameter gespeichert.

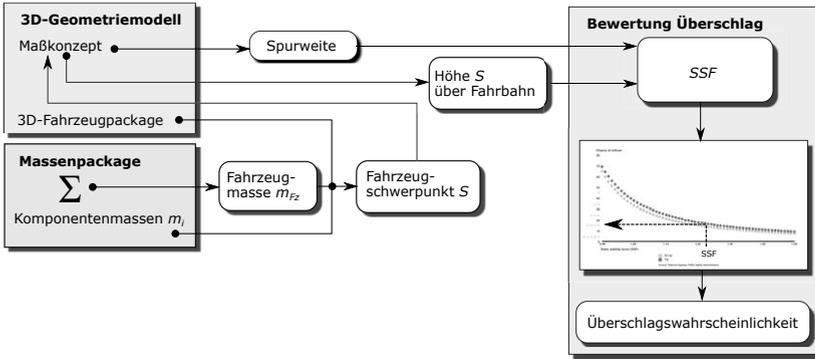


Abb. 6.38: Prozess der Kippstabilitätsbewertung

6.4.5 Analyse und Bewertung des Wendekreises

Der Wendekreis eines Fahrzeugs ist eine wesentliche Produkteigenschaft, die besonders in dicht-besiedelten urbanen Gebieten eine hohe Bedeutung, etwa bei Park- und Rangiervorgängen, hat. Der Wendekreis ergibt sich als zylindrische Einhüllende der Außenkontur des Fahrzeugs bei maximalem Radeinschlag. Der Mittelpunkt liegt im aktuellen Momentanpol der Fahrbewegung. In einer quasistationären Betrachtung wird der Wendekreis somit durch den möglichen Lenkeinschlag der Räder, die Außenabmessungen des Fahrzeugs, die Formgebung des Exterieurs im Vorderwagen, den Radstand (L101) sowie die Spurweite von Vorder- und Hinterachse (W101-1/W101-2) beeinflusst. Um folglich den Wendekreis ermitteln zu können, werden die genannten Größen berücksichtigt. Im Falle der Außenabmessungen kann für erste Untersuchungen das bereits skizzierte Exterieurproportionsmodell genutzt werden. Die übrigen Größen lassen sich den Konzeptparametern des integrierten Konzeptmodells entnehmen. Für die Evaluierung des Wendekreises im Konzeptmodell wurde ein Modell analog Abb. 6.39 angewandt.

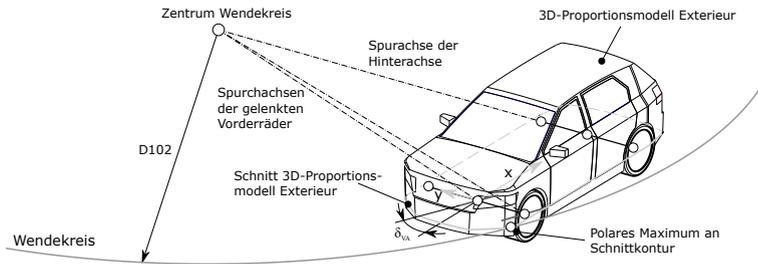


Abb. 6.39: CAD-basierte Abbildung des Wendekreises im integrierten Konzeptmodell

Dem im integrierten Konzeptmodell angewandten Modell liegt hierbei eine Ackermann-Lenkung (s. Kap. 6.4.3) zugrunde, die Hinterachse ist nicht gelenkt. Der Ackermannwinkel δ definiert den mittleren Radeinschlag, der Differenzwinkel δ_A gibt die resultierenden Winkel in den Rad aufstandspunkten wider. Aus dem Schnittpunkt der Spurachse für die ungelenkte Hinterachse sowie der Spurachsen der gelenkten Vorderräder ergibt sich bei gewähltem δ der Momentanpol der Drehbewegung. Der Wendekreis ergibt sich nun als Kreis mit dem Momentanpol der Bewegung als Zentrum und dem äußersten Punkt am Exterieur, der sich als polares Extremum in Richtung der gelenkten Spurachse des kurvenäußeren Rades ermitteln lässt. Dieses vereinfachte Modell ist für die Betrachtungen in der frühen Konzeptphase ausreichend. Durch die Nutzung dieses Modells lassen sich grundsätzlich zwei unterschiedliche Workflowszenarien darstellen:

- Ermittlung eines theoretischen Wendekreises
- Ermittlung des erforderlichen Radeinschlags zur Erzielung eines bestimmten Wendekreises
- Weitere Parametervariationen

Die ersten beiden Fälle sind in der Eingangsphase der Konzeptphase am relevantesten (s. Abb. 6.40). Im ersten Fall wird bei gegebenen Radeinschlag der resultierende Wendekreis ermittelt. In manchen Fällen stellt jedoch der Wendekreis einen Zielwert dar, weswegen eine umgekehrte Betrachtung erfolgen muss. Da hierfür geometrisch keine eindeutige Lösung möglich ist, wird ein iteratives Verfahren angewandt. Durch ein entsprechendes Skript wird der Radeinschlag solange reduziert, bis der gewünschte Wert des Wendekreises erreicht wird.

Durch die Abhängigkeit des Wendekreises vom erfolgten Radeinschlag ergibt sich ein hoher Einfluss auf das Package des Vorderwagens durch die entstehenden Radhüllflächen.

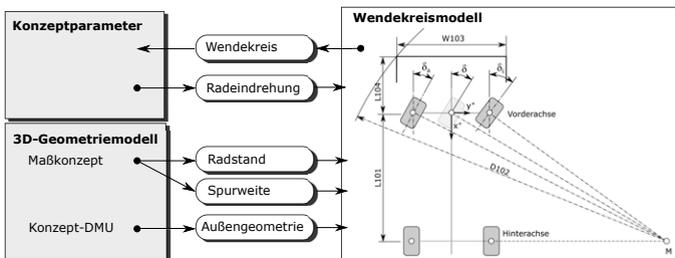


Abb. 6.40: Mögliche Workflows zur Ermittlung des Wendekreises

6.4.6 Einbindung von FE-Rohbaumodellen

Zur Bewertung von Rohbaukonzepten hinsichtlich Packageanforderungen und technischer Eigenschaften werden vielfach Ansätze, wie sie in Kap. 4 beschrieben werden, genutzt. Die hierbei angewandten Modelle sind im Kern parametrisch-assoziativer Natur, wodurch es sich anbietet sie im Verbund mit dem integrierten Konzeptmodell zu nutzen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden hierzu konkrete Untersuchungen mit dem kommerziellen Modellierungswerkzeug SFE-CONCEPT [98], das bei den Industriepartnern eingesetzt wird, durchgeführt.

Die gezeigten Proportionsmodelle des integrierten Konzeptmodells können sich in ihrer Form an beliebige Parameterkonstellationen, sofern eine Lösung geometrisch existiert, anpassen. Diese Modelleigenschaft ist im Falle von Rohbaumodellen nicht zielführend, da die Struktur eine Funktion der Belastungen und erforderlichen geometrischen Abmessungen des Gesamtfahrzeugs darstellt. Daher ist für jeden Fahrzeugtyp ein eigenes Rohbaumodell erforderlich. Im Rahmen einer Bachelorarbeit [95] wurden zunächst verschiedene Rohbaumodelle parametrisch in SFE-CONCEPT aufgebaut.

Die Modellierung folgt in SFE-CONCEPT anhand einer parametrischen Flächenkonstruktion. Zunächst werden über geeignete Profile entsprechende Balkensegmente modelliert (s. Abb. 6.41 (a)).

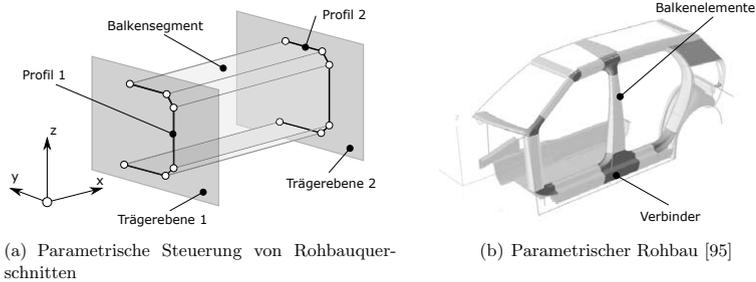


Abb. 6.41: Parametrische Rohbauflächen in SFE-CONCEPT

Diese müssen anschließend über sog. Verbinderelemente verknüpft werden, wodurch sich geschlossene Flächenverbände darstellen lassen (s. Abb. 6.41 (b)). Die Profile selbst können auf sog. *Influence-Points* referenziert werden. Diese stellen spezielle Steuerungspunkte dar, die über ihre absolute Position im Raum oder relativ zu anderen *Influence-Points* definiert werden können. Die Koordinaten können über eine entsprechende Schnittstelle auch von externen Parametersätzen bedatet werden. Die einzelnen Elemente sind assoziativ miteinander verbunden, wodurch diese Modelle über die grundlegenden Eigenschaften parametrisch-assoziativer CAD-Systeme verfügen. Eine Modifikation von Profilen führt damit automatisch zur entsprechenden Aktualisierung abhängiger Elemente.

Da eine direkte Koppelung mit dem genutzten CAD-System mit der bei den Industriepartnern eingesetzten Version nicht möglich ist, werden die erwähnten *Influence-Points* als Koppelungsmechanismus eingesetzt. Hierbei werden alle Profile des Rohbaumodells, welche im Kontext des integrierten Konzeptmodells steuerbar sein sollen, auf geeignete *Influence-Points* referenziert (s. Abb. 6.42).

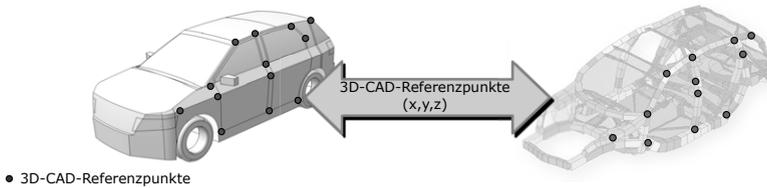


Abb. 6.42: Kopplung eines Strukturmodells mit dem Konzeptgerüst

Daraus ergibt sich die allgemeine Kopplungsstrategie, die in Abb. 6.43 gezeigt wird. Analog den bisher gezeigten Schnittstellenmodellen wird ein separates Rohbausteuereungsmodell im Knoten *3D-CAD-Output* erzeugt. Dieses wird mit den erforderlichen *3D-CAD-Referenzpunkten* des integrierten Konzeptmodells versorgt (1).

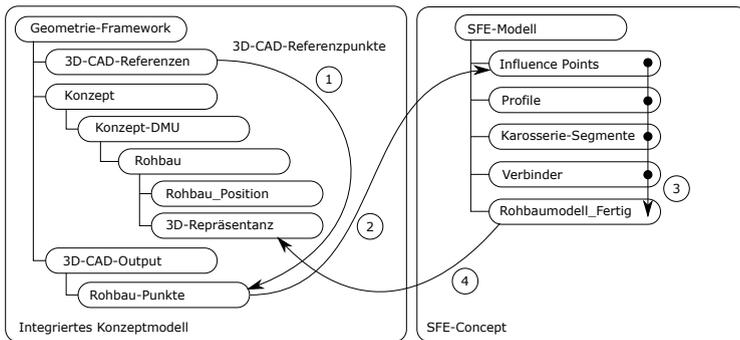


Abb. 6.43: Grundlegende Verknüpfungsstrategie zwischen dem integrierten Konzeptmodell und einem parametrischen Rohbaumodell

Werden Änderungen an den Koordinaten der *3D-CAD-Referenzpunkte* vorgenommen, kann ein automatisierter Abgleich mit dem jeweiligen Rohbaumodell durchgeführt werden (2). Durch die Änderung der *Influence-Points* werden die verknüpften Rohbausegmente in ihrer Position aktualisiert, wodurch sich alle verknüpften Bereiche des Modells aktualisieren (3).

Eine direkte Rückversorgung des integrierten Geometriemodells mit der resultierenden geometrischen Rohbau-Geometrie ist in der eingesetzten Version von SFE-CONCEPT nicht möglich. Daher wird die in SFE-CONCEPT implementierte IGES-Schnittstelle genutzt, um ein neutrales 3D-Modell des Rohbaus zu erzeugen und über die Import-Schnittstelle des integrierten Konzeptmodells zu importieren. Dieses kann wie in Abb. 6.43 gezeigt, etwa in den Konzept-DMU des integrierten Konzeptmodells in einem geeigneten DMU-Knoten als geometrische Repräsentanz verwendet werden. Den zugehörigen Workflow zeigt Abb. 6.44.

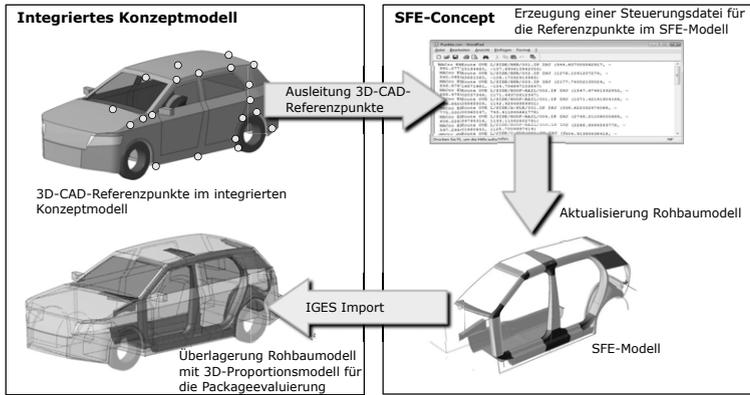


Abb. 6.44: Workflow für die Integration eines parametrischen Rohbaumodells

Erfolgt im integrierten Konzeptmodell eine Verschiebung von relevanten *3D-CAD-Referenzpunkten*, wird automatisch eine neue Textdatei mit den entsprechenden Punktkoordinaten generiert. Diese Datei wird in SFE-CONCEPT eingelesen, wodurch sich die Rohbaugeometrie an die neue Parameterkonstellation anpasst. Nach der Aktualisierung des Rohbaumodells kann dieses über die IGES-Schnittstelle als neutrale CAD-Geometrie in das integrierte Konzeptmodell rückversorgt werden.

Da in Abhängigkeit des jeweiligen Fahrzeugtyps gesonderte Rohbaumodelle erforderlich sind, muss sich dies in der Modellkonfiguration des integrierten Konzeptmodells widerspiegeln. So kann jedem Fahrzeugtyp im integrierten Konzeptmodell ein spezifisches Rohbaumodell zugeordnet werden. Ferner lassen sich diese hinsichtlich Material- und Technologiekonzept aussteuern. Eine prototypische Umsetzung der Schnittstelle wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Herrn Thomas Schmutte [95] vorgenommen.

6.5 Steuerungskonzept der prototypischen Umsetzung

Im Rahmen der prototypischen Umsetzung des integrierten Konzeptmodells, wurden zur effizienten Nutzung der implementierten Funktionen grafische Benutzerschnittstellen in VBA programmiert. Wesentlich für eine erfolgreiche Nutzung komplexer CAX-basierter Werkzeuge ist die Kommunikation zum Anwender bzw. zur Anwenderin. Die grafischen Schnittstellen müssen daher so gestaltet sein, dass der geforderte Arbeitsablauf im Kontext der jeweiligen Aufgabenstellung widerspiegelt wird und über die grafische Eingabeschnittstelle eindeutig abgearbeitet werden kann. Da ein wesentlicher Eckpfeiler der Idee zu einem integrierten Konzeptmodell die vollständige Ausklammerung der Anwender von der Erstellung und Verwaltung von parametrischen Modellbeziehungen ist, kommt den grafischen Schnittstellen eine essentielle Bedeutung zu, da sie das einzige Bindeglied zum Modell darstellen. Dies sei am Beispiel der Parametersteuerung für das integrierte Konzeptmodell illustriert (s. Abb. 6.45).

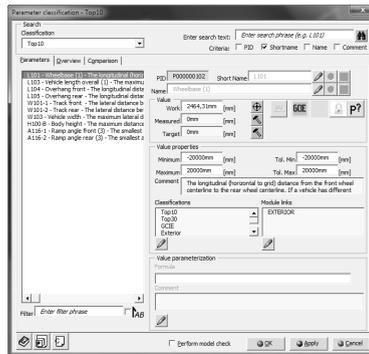


Abb. 6.45: Exemplarische Umsetzung einer grafischen Schnittstelle zur Parametersteuerung

Im gezeigten Parametereditierungsfenster können alle wesentlichen Funktionen im Rahmen der Parametrik des integrierten Konzeptmodells durchgeführt werden. So lassen sich etwa neue Parameter erstellen bzw. ändern, Beziehungen und Maßketten definieren sowie eine Einordnung in spezielle Klassifikationen vornehmen. Eine Auflistung aller in der prototypischen Umsetzung implementierten Parameter findet sich im Anhang (s. Kap. A.4). Des Weiteren kann nach Parametern entsprechend vorgegebener Kriterien gesucht werden, sowie eine klassifikationspezifische Filterung vorgenommen werden. Ein weiterer Vorteil in der Nutzung spezifischer grafischer Schnittstellen liegt in dem Umstand, dass dadurch rechnergestützte Werkzeuge auch weniger erfahrenen Anwendern und Anwenderinnen zugänglich gemacht werden können, indem man etwa in den grafischen Schnittstellen unterschiedliche Sichten implementiert.

Grundsätzlich bieten alle kommerziellen CAD-Systeme wie etwa CATIA V5, NX [100] oder Creo Parametric [22] entsprechende Parametersteuerungsinstrumente. Die Funktionen weisen zwischen den verschiedenen CAD-Systeme hohe Ähnlichkeiten auf. So ist es etwa bei allen genannten Systemen möglich, Parameter entsprechend definierter Filterkriterien anzuzeigen oder diese über ihren Namen zu suchen. Für die Anforderungen und Belange eines komplexen Systems, wie dem integrierten Konzeptmodell, erweisen sich die implementierten Standard-Funktionen dennoch als unbrauchbar. Im Rahmen der prototypischen Umsetzung konnten etwa im Falle CATIA V5 deutliche Performanzeinbußen in der Nutzung der Bordmittel zur Parameteränderung beobachtet werden. Aufgrund dessen, sowie der Forderung nach spezifischer Kontextualisierung von Informationen im Zusammenhang mit der Parametrik, wurde eine eigene Schnittstelle geschaffen. Im Falle der Suchfunktion etwa, ist die in CATIA V5 vorhandene Suchfunktion aus dem Blickwinkel des integrierten Konzeptmodells wenig hilfreich, da, bedingt durch programmatische Anforderungen sowie das zugrundeliegende Datenmodell, erforderliche Informationen vielfach auf eine Art und Weise abgelegt werden müssen, die der Suchfunktion nicht zugänglich sind. So wird etwa ein Parameter in der prototypischen Umsetzung als strukturiertes Parameterset abgebildet. Aufgrund von merklichen Performanzverschlechterungen bei der Verwendung vieler Parameter wurde vielfach der Kommentar-Block zur Ablage von Informationen genutzt; diese sind beispielsweise der Suchfunktion nicht zugänglich.

Auf Basis der in Kap. 5.5 gezeigten speziellen Konzeptobjekte lassen sich aufgabenspezifische Schnittstellen generisch flexibel gestalten. Als Beispiel soll der implementierte Sitzkonfigurator dienen. Das in Kap. 5.5 gezeigte Sitzobjekt bündelt im Kontext des Klassifikationsmodells alle

erforderliche Informationen die Fahrzeugsitze betreffend. Dies kann man sich zunutze machen und die zugeordneten Informationen der Sitzobjekte zur Generierung einer Benutzerschnittstelle heranziehen (s. Abb. 6.46).

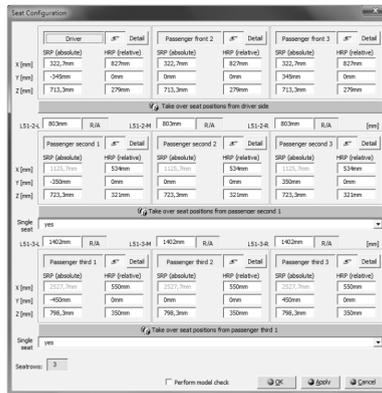


Abb. 6.46: Exemplarische Implementierung eines Sitzkonfigurators

Die Sitze werden hierin per Sitzreihe angeordnet. Die Sitzposition lässt sich entweder über die räumliche Position (L31, W20, H71), oder die entsprechenden Maßketten steuern. Je nach gewählter Option werden die erforderlichen Steuerelemente kontextsensitiv aktiviert oder inaktiviert. Des Weiteren werden Hilfswerkzeuge wie das Spiegeln von Sitzpositionen sowie verschiedene Ein-/Ausblendfunktionen bereitgestellt.

Ein weiterer wesentlicher Eckpfeiler im Steuerungskonzept ist die Bereitstellung eines entsprechenden Hilfe- und Wissensarchivierungskonzeptes. Hierzu werden die vorgestellten Objekte des integrierten Konzeptmodells um ein entsprechendes Hilfeattribut erweitert, das den Pfad zu einer Datei beinhaltet. Dadurch lassen sich typische Dokumente z. B. Parametern oder Beziehungen in Form von Abbildungen, Textdokumenten oder Webdokumenten zuordnen. Damit können in den jeweiligen Eingabemasiken die entsprechenden Hilfeinformationen für alle zugeordneten Objekte flexibel angezeigt werden.

6.6 Anwendungsprozess zur integrierten Konzeptarbeit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die einzelnen Teilmodelle, wie sie in der praktischen Evaluierung genutzt wurden, sowie die grundlegenden Datenflüsse im integrierten Konzeptmodell vorgestellt. Der vorliegende Abschnitt soll die praktische Nutzung des integrierten Konzeptmodells anhand der Entwicklung eines beispielhaften Fahrzeugkonzepts zeigen.

6.6.1 Grundlegendes Vorgehensmodell in der integrierten Konzeptarbeit

Die Nutzung der integrierten Konzeptarbeit lässt sich grundsätzlich in drei Abschnitte gliedern, die in Abb. 6.47 dargestellt sind: Die Bedatung, die Darstellung des Konzeptes sowie die Be-

wertung und Archivierung des Fahrzeugentwurfs und des während der Konzeption entstehenden Wissens.

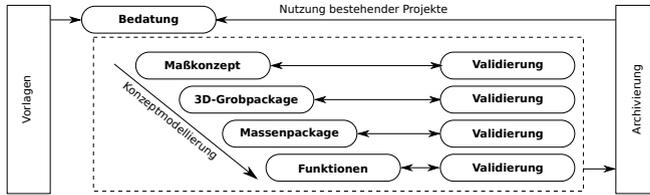


Abb. 6.47: Möglicher Arbeitsprozess mittels integrierter Konzeptarbeit

Aufgrund der hohen Komplexität sowie des Umfangs an erforderlichen Informationen wird im vorliegenden Ansatz eine vorlagenbasierte Bedatungsstrategie gewählt, um eine effiziente Nutzung des integrierten Konzeptmodells von Beginn an zu ermöglichen. Diese umfasst die Festlegung erforderlicher Parameterwerte, die Parametrierung der implementierten 3D-Proportionsmodelle, die initiale Festlegung von zu verbauenden Komponenten, deren Strukturierung und, sofern möglich, die Massenwerte der jeweiligen Bauteile.

Die Darstellung des Konzepts umfasst die eigentliche Gestaltung des Fahrzeugentwurfs und die Betrachtung der zugehörigen Funktionen. Die Ausgangsbasis bildet die jeweils gewählte Vorlage bzw. Fahrzeugklasse. Diese erzeugt zunächst ein konsistentes Basismodell (s. Kap. 6.6.4). Dieses wird in einem nächsten Schritt entsprechend der geforderten geometrischen Zielwerte angepasst. Auf Basis dieses Geometriemodells können erste geometrische und funktionale Untersuchungen durchgeführt werden. In iterativen Schritten wird das Konzept gemäß der geometrischen und funktionalen Anforderungen sukzessive modelliert, verfeinert und evaluiert.

Sowohl die Bewertung als auch die Archivierung finden stets begleitend zur eigentlichen Fahrzeugkonzeption statt. Da sich jedes Konzept in seinen zu beantwortenden technischen Fragen anders darstellt, ist ein entsprechender Leitprozess für die effiziente Nutzung eines integrierten Konzeptmodells unabdingbar. Dieser legt fest, wann welches Teilmodell angewandt werden kann, bzw. zeigt auf, welche Eingangsdaten für die Nutzung erforderlich sind. Im Folgenden soll daher der geometriefokussierte Leitprozess betrachtet werden, so wie er auch in der praktischen Evaluierung bei den Industriepartnern verwendet wurde. Dieser beginnt mit der geometrischen Basisauslegung des Fahrzeugs. Darin werden die grundsätzlichen äußeren und inneren Abmessungen sowie die Sitzposition im Fahrzeug festgelegt. Diese stellen das geometrische Rahmengerüst und damit den Grundlösungsraum für die gesuchte Fahrzeugarchitektur dar. Ist das Basiskonzept grundsätzlich stimmig, kann mit dem Aufbau des Konzept-DMUs begonnen werden. Dieser umfasst alle packagerelevanten Komponenten, sofern zu diesem Zeitpunkt als Realgeometrie oder Proportionsmodell verfügbar. Die DMU-Pakete werden im Raum parametrisch positioniert und mit den jeweiligen Repräsentanzen versehen. Dies gestattet erste Aussagen zu den entstehenden Technikräumen sowie resultierenden Maßketten.

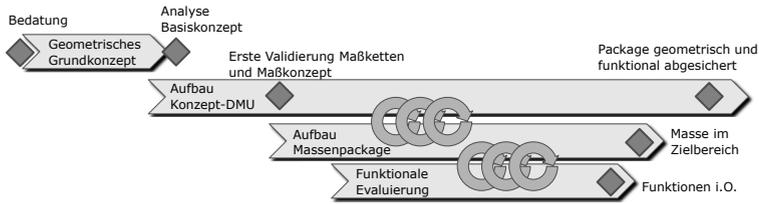


Abb. 6.48: Vorgehensmodell in der Entwurfsgestaltung im integrierten Konzeptmodell

Auf Basis dieses preliminären Bauraummodells kann ein erstes Massenmodell auf Grundlage der Massenwerte in der Konzeptproduktstruktur erstellt werden. Dieses ermöglicht erste Aussagen zu Massenschwerpunkt und Massenträgheitsmomenten des Gesamtfahrzeugs. Damit lässt sich die Achslastverteilung und die Achsgewichte berechnen, wodurch sich weitere funktionale Modelle, je nach Informationslage, zur Validierung nutzen lassen. Die Führungsgröße für alle durchgeführten Untersuchungen ist aus Sicht der Fahrzeugarchitektur stets das Bauraummodell. Sind die Funktionen und entsprechende Massen im Zielbereich, befindet sich auch das Package im gewünschten Zielbereich. Die begleitend durchgeführten Bewertungen ermöglichen die Sicherung des zugrundeliegenden Auslegungswissens.

6.6.2 Technische Randbedingungen und Ziele des Beispielkonzeptes

Um die praktische Nutzung des integrierten Konzeptmodells anschaulich darstellen zu können, sollen alle weiteren Überlegungen auf Basis eines Beispielkonzeptes angestellt werden. Es sei ein kleines elektrisch betriebenes Fahrzeug für den urbanen Raum betrachtet, das eine Gesamtlänge von 2,5 m und Platz für bis zu vier Personen aufweisen soll. Die übrigen Zielwerte und Bereiche sind in Tab. 6.4 angeführt. Es soll eine Machbarkeitsstudie durchgeführt werden, welche eine erste Plausibilisierung der definierten Ziele durchführt und weitere technische Zielwerte für nachfolgende Auslegungsschritte ableitet.

Tab. 6.4: Technische Randbedingungen und Zielwerte für das Beispielkonzept

Maß/Eigenschaft	Wert	Anmerkung
Karosserietyp	Micro	
Sitzplätze	4	
L101	2000 mm	Radstand in Messlast 1.
L103	2500 mm	Fahrzeuglänge über alles.
W101-1 = W101-2	1550 mm	Spurweite vorne und Spurweite hinten.
W103	1800 mm	Fahrzeugbreite über alles.
H100-B = H101-M	1500 mm	Karosseriehöhe in Messlast 1.
H5-1	540 mm	Einstiegshöhe in Messlast 1.
$R_{stat,vo,1} = R_{stat,hi,1}$	325 mm	Statische Radhalbmesser in Messlast 1.
Fahrzeuggewicht	1000 kg	
Antriebssystem	BEV	Antriebsstrang wird als gegeben angenommen.
Antriebsart	Heckantrieb	
Achslastverteilung V:H	40:60	Typische Achslastverteilung für ein Heckantrieb.

6.6.3 Bedeutung des integrierten Konzeptmodells

Die Initialbedeutung verfolgt das Ziel, dass die Eckpfeiler des Konzeptes, wie etwa die Sitzposition, die Außenabmessungen, die Komponenten und die Proportionsmodelle vollständig und eindeutig parametrisiert vorliegen. Grundsätzlich kann die Initialbedeutung des integrierten Konzeptmodells auf Basis von geeigneten Vorlagen oder manuell erfolgen. Im letzteren Fall müssen alle erforderlichen Maßketten und formalen Zusammenhänge selbst gesetzt werden. Den grundlegenden Ablauf einer Bedeutung zeigt Abb. 6.49.



Abb. 6.49: Exemplarischer Bedeutungsworkflow für ein neues Fahrzeugkonzept

Die Vorlagen beinhalten Parameter, Beziehungen und andere Informationen im Kontext von Fahrzeugklassen bzw. Fahrzeugtypen. Somit können sowohl Werte als auch formale Beziehungen fahrzeugtypspezifisch definiert werden. Gemäß Abb. 6.49 umfasst die vorlagenbasierte Bedeutung daher die Festlegung der geometrischen Abmessungen, das Verhalten der wesentlichen Maßketten und einen Basisumfang an zu verbauenden Komponenten samt zugehöriger Informationen. In der Konzeptstückliste wurde in der prototypischen Umsetzung die Möglichkeit geschaffen, an die jeweiligen Komponenten der Konzeptproduktstrukturliste vorhandene Bauteile zu koppeln, wodurch bereits mit dem Laden einer entsprechenden Vorlage ein arbeitsfähiges virtuelles Konzeptmodell vorliegt.

6.6.4 Ableitung des geometrischen Grundkonzeptes

Das geometrische Grundkonzept ist aus dem Blickwinkel einer Fahrzeugarchitekturabteilung der Ausgangspunkt aller Überlegungen. Durch die Festlegung des Fahrzeugtyps *Micro*, dient eine entsprechende Vorlage aus der Parameterdatenbank als Grundlage der Auslegung. Der weitere Ablauf folgt dem in Abb. 6.50 gezeigten Schema, das eine Entwicklung von innen nach außen darstellt – das Fahrzeug wird daher auf Basis der Interieuransforderungen aufgebaut und über die Maßketten nach außen hin entwickelt. Durch die flexible Parametrik kann dieser Ablauf jedoch bedarfsgerecht umgekehrt werden (z. B. Entwicklung von außen nach innen).

Zunächst erfolgt die Festlegung der Sitzhaltung und der Sitzposition sowie die Anzahl an Sitzplätzen²¹. Da in den geometrischen Vorlagen typische fahrzeugklassenspezifische Sitzhaltungen abgelegt sind sowie die Anzahl angeforderten Sitzplätzen gleich vier ist, sind an dieser Stelle für eine erste Betrachtung keine weiteren Schritte notwendig.

²¹ Aufgrund der Fokussierung auf Fahrzeuge der Klasse M1 wird die höchstzulässige Personenanzahl im Fahrzeug auf einen Fahrer bzw. eine Fahrerin sowie maximal acht Passagiere festgelegt.

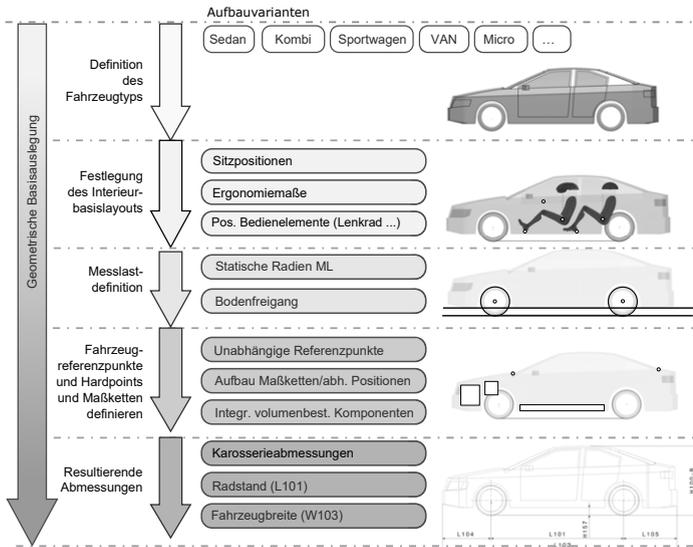


Abb. 6.50: Ablaufschema für die geometrische Basisdefinition

Als nächstes werden die Messlasten, sofern zu diesem Zeitpunkt bekannt, festgelegt. Erfolgt keine nähere Spezifikation, fallen die Messlastzustände 1 – 3 zunächst zusammen und können später über die entsprechenden statischen Radhalbmesser und Radpositionen festgelegt werden. An die Definition der Messlastzustände sind alle bodenspezifischen Vorgaben gekoppelt, wie etwa zulässiger Bodenfreigang, Rampenwinkel vorne und hinten etc., wodurch die fahrbahnabhängige Konzeptlimitierende entsteht. Diese ergibt sich aus der geometrischen Schnittmenge der Bodenfreiheit, des Rampenwinkels, der Bordsteinkantenfreiheit sowie des vorderen und hinteren Überhangwinkels. Für das vorliegende Beispielkonzept werden für keine der angeführten Parameter Zielwerte definiert, wodurch lediglich die gesetzliche Vorgaben sicherzustellen sind. Diese sehen im europäischen Raum 110 mm für die Bodenfreiheit voraus, sowie einen Rampenwinkel von 17°. Durch die Festlegung des Radstandes sowie der statischen Radhalbmesser ist damit nur die Bodenfreiheit relevant.

In einem nächsten Schritt werden weitere Referenzpunkte des Fahrzeugs, wie beispielsweise der vordere oder hintere Windlaufpunkt, festgelegt und die Außenabmessungen gemäß den definierten Randbedingungen angepasst. Dies umfasst zunächst die Festlegung des Radstandes. Dieser kann im integrierten Konzeptmodell aufgrund der flexiblen Parametrik auf zwei Arten festgelegt werden. Die Maßkette für den Radstand ergibt sich nach Gl. 5.1 als Differenz der Radzentren in der Messlast 1. Dadurch kann entweder der Radstand über die Koordinaten der Radzentren berechnet werden, oder der Radstand wird als Eingabegröße verwendet wodurch eines der beiden Radzentren berechnet werden muss. Im vorliegenden Beispiel soll der Radstand als Eingabewert genutzt werden; das hintere Radzentrum soll berechnet werden. Hierfür verfügt die prototypische Umsetzung des integrierten Konzeptmodells über eine eigene Maske, in der die unterschiedlichen Maßketten in ihrem Verhalten angepasst werden können (s. Abb. 6.51). Das vordere Radzentrum wird gemäß der Vorlage mit $x = 0 \text{ mm}$, $y = W101-1/2 \text{ mm}$, $z = 0 \text{ mm}$ gesetzt wodurch das hintere Radzentrum zu $x = L101 \text{ mm}$, $y = W101-2/2 \text{ mm}$ und $z = 0 \text{ mm}$ folgt.

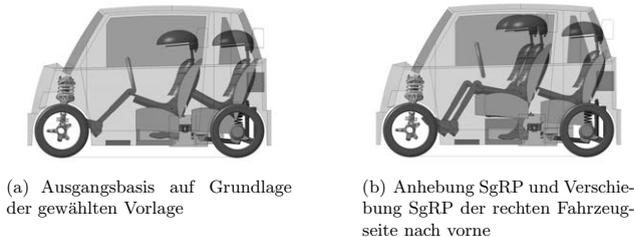


Abb. 6.51: Anpassung des Verhaltens von Maßketten im integrierten Konzeptmodell

Da für den vorderen und hinteren Überhang keinerlei Zielwerte festgelegt sind, sollen diese in einem ersten Ansatz symmetrisch aufgeteilt werden. Damit folgt bei gegebener Gesamtlänge von 2,5 m und einem Radstand von 2 m ein vorderer und hinterer Überhang von 250 mm.

Ab diesem Prozessschritt steht eine Fahrzeughülle sowie ein Interieurmodell gemäß den eingangs definierten Parametern und Zielwerten für die weitere Analyse zur Verfügung. Bei Bedarf kann das Verhalten der übrigen Maßketten angepasst werden. Damit ist das geometrische Grundmodell vollständig definiert.

Da für das Fahrzeugkonzept Teile des Fahrwerks sowie des Antriebsstranges bereits als CAD-Daten vorliegen, können diese über die Konzeptproduktstruktur dem Knoten Konzept-DMU zugewiesen werden. Damit resultiert das geometrische Grundkonzept entsprechend Abb. 6.52.



(a) Ausgangsbasis auf Grundlage der gewählten Vorlage

(b) Anhebung SgRP und Verschiebung SgRP der rechten Fahrzeugseite nach vorne

Abb. 6.52: Geometrisches Basiskonzept für das Beispielfahrzeug

Bereits in diesem Stadium sind erste Problemstellungen im Package zu erkennen. Aufgrund der geforderten Übernahmeteile kann die Sitzposition so nicht umgesetzt werden, da Kollisionen der Insassen mit den Komponenten entstehen (s. Abb. 6.52 (a)). Dadurch muss eine Anhebung der Sitzreferenzpunkte vorgenommen werden. Im vorliegenden Fall wird eine Verschiebung in z-Richtung des Fahrzeugkoordinatensystems um +140 mm vorgenommen (s. Abb. 6.52 (b)). Des Weiteren ist ersichtlich, dass der SgRP-Koppelabstand zu gering ist und die Knie der hinteren Passagiere mit den Sitzen der ersten Sitzreihe kollidieren. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das gesetzte Ziel von vier Passagieren bei Nutzung von 95-Perzentil-Puppen nicht umgesetzt werden kann. Daher sollen im nächsten Prozessschritt alternativ mögliche Positionierungsvarianten

für drei Sitzplätze untersucht werden. Hierzu werden für die hintere Sitzreihe zwei Positionierungsstrategien verfolgt: In der ersten Variante wird der Beifahrer so weit wie möglich nach vorne versetzt und der Passagier in der zweiten Sitzreihe kann konventionell positioniert werden (Abb. 6.53 a). In der zweiten Variante wird der Passagier in der zweiten Sitzreihe um 90° verdreht platziert und sitzt damit quer zur Fahrtrichtung (Abb. 6.53 b).

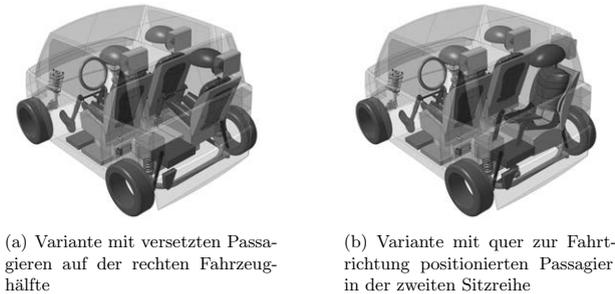


Abb. 6.53: Geometrisches Basiskonzept für ein Kleinfahrzeug

6.6.5 Grundlegende Bewertung ergonomischer Aspekte

Auf Basis des ersten geometrischen Basiskonzeptes lassen sich grundlegende ergonomische Aspekte des Konzeptes untersuchen. Den Ausgangspunkt bildet hierzu ein vereinfachtes Mensch-Modell, etwa auf Basis der vorgestellten Kieler Puppe (s. Kap. 3.3.2). In der praktischen Validierung wurde hierzu das kommerziell verfügbare CATIA Add-On CAVA²² [105] genutzt. Das Werkzeug wurde über die Parameterschnittstelle und die CAD-Referenzpunkte konsistent in das integrierte Konzeptmodell eingebettet. In der praktischen Validierung wurden die Themen, welche in Abb. 6.54 dargestellt sind, untersucht. Dies schließt die grundlegende Untersuchung der wichtigsten Interieur-Maßketten, die Betrachtung ergonomischer Einflüsse auf das Interieur-Package und eine erste Sichtfelduntersuchung ein.

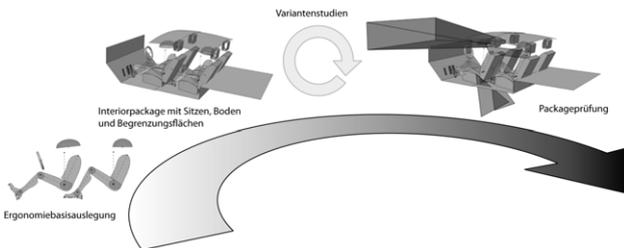


Abb. 6.54: Beispielhafter Ergonomieentwicklungsprozess

Die Referenzierung der Mensch-Schablonen erfolgt auf die jeweiligen SgRP-Punkte; zur Festlegung der Fußposition wird der FRP herangezogen. Im Falle der Passagiere wird die Fußfläche par-

²²CAVA = CATIA Automotive Vehicle Architecture; Dieses CATIA-Werkzeug wurde auf Basis einer Zusammenarbeit verschiedener Fahrzeug-OEMs entwickelt und wird durch die Firma Technia-Transcat kommerziell vertrieben. CAVA wird sowohl in der Volkswagen AG als auch bei der MAGNA Steyr Fahrzeugtechnik in der virtuellen Entwicklung zur rechnergestützten Validierung von Fahrzeugkonzepten angewandt.

allel zum Fahrzeugboden ausgerichtet; im Falle des Fahrers wird der Pedalreferenzpunkt (PRP) herangezogen, der seinerseits als 3D-CAD-Referenzpunkt vorliegt. Für den Lehnenwinkel A40 wird der gebräuchliche Standardwert von 25° verwendet; dieses ist bereits über die gewählte Vorlage festgelegt. Die Schablonen werden für die Grundanalyse von Sitzhaltung, Erreichbarkeit und Platzverhältnissen genutzt (s. Abb. 6.54). Die Grundhaltungen von Fahrer und Passagieren werden über die jeweilige Parametervorlage vordefiniert. Über die Sitzposition soll im vorliegenden Beispielkonzept der Lenkradreferenzpunkt (D-Punkt) relativ zum SgRP des Fahrers festgelegt werden. Zusammen mit dem Lenkwinkel A18 (s. Abb. 6.55) wird damit die grundlegende Position und Orientierung des Lenkrades definiert, wodurch in weiterer Folge Lenksäule und Lenkgetriebe vorpositioniert werden können.

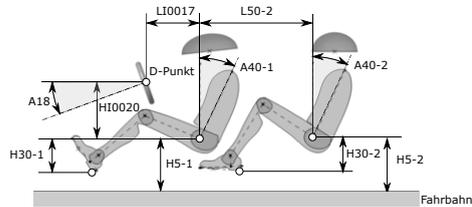


Abb. 6.55: Grundlegende ergonomische Vorauslegung eines Fahrzeugkonzeptes

In einem nächsten Schritt werden die Maßwerte für den SgRP-Koppelabstand und die Einstiegshöhen H5-1 und H5-2 sowie die D-Punkt-Positionierung so vorgenommen, wie sie zunächst aus ergonomischer Sicht zielführend sind (s. Abb. 6.55) bzw. in den Zielwerten festgelegt sind. Auf Basis dieses Ergonomiegrundkonzeptes lassen sich weitere Maße den Innenraum betreffen ableiten. Über die Kopffreiheit H35 lässt sich etwa im Zusammenspiel mit dem Exterieur-Proportionsmodell eine erste Einschätzung hinsichtlich der Umsetzbarkeit der geforderten Fahrzeughöhe vornehmen. Des Weiteren lassen sich anhand der zur Fahrerschablone zugehörigen Augellipse erste Sichtfelduntersuchungen durchführen (s. Abb. 6.56).

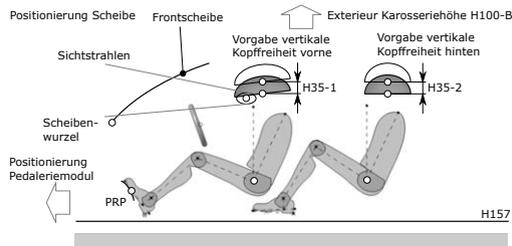


Abb. 6.56: Ableitung von Innenraummaßen aus Sicht der Ergonomie

Dieses Ergonomiegrundkonzept bildet die Grundlage für die Nutzung höherwertigerer Menschmodelle, wie sie in Kap. 4.7.4 gezeigt werden. Da viele dieser Werkzeuge keine direkte Anbindung in das jeweils eingesetzte CAD-System aufweisen, wird der in Kap. 6.3.6 gezeigte Ergonomieadapter genutzt. Damit ist es unerheblich, ob das jeweilige Autorensystem über eine direkte Implementierung eines 3D-Menschmodells verfügt oder nicht. Für die praktische Validierung der Vorgehensweise wurde dieser Prozess mit dem kommerziellen Mensch-Modell RAMSIS vorgenommen, das bei den Industriepartnern für die Validierung ergonomischer Produktmerkmale

verwendet wird. Der Ergonomieadapter wird hierzu als neutrales IGES-Modell bereitgestellt (s. Kap. 4.5.2) und kann durch die Ergonomie-Software eingelesen werden. Einmalig müssen die 3D-Manikins mit dem Adapter verknüpft werden; im Zuge weiterer Aktualisierungen ist keine Neuverknüpfung erforderlich, solange sich die Topologie nicht ändert. Durch die Nutzung hochwertiger Menschmodelle lassen sich aufgrund der sich ergebenden Freiheitsgrade und Bewegungseinschränkungen erforderliche Bewegungs- und Erreichbarkeitschüllen erzeugen, welche für die initiale Positionierung von Bedienelementen herangezogen werden können.

Im vorliegenden Beispielkonzept ist bereits durch die Gegenüberstellung einer typischen Sitzhaltung zum umgebenden Package eine Modifikation der Sitzposition von Fahrern und Passagieren erforderlich. Durch das Ergonomiemodell in Kombination mit dem Prüfmodell, lassen sich ergonomisch relevanten Maßen Grenzwerte zuweisen, welche im Zuge der Anpassung auf ihre Einhaltung geprüft werden können, bzw. kann deren bewusste Überschreitung transparent aufgezeigt werden. Besonders kritisch in der beispielhaften Studie ist die hohe Position des Sitzreferenzpunktes über der Fahrbahn mit 640 mm.

6.6.6 Einbindung und Bewertung des Fahrzeugdesigns

Das Fahrzeugdesign ist ein zentraler Aspekt in der Konzeptentwicklung und ein wesentlicher Kaufanreiz unabhängig von der jeweiligen Fahrzeugklasse. Da sich das Fahrzeugdesign parallel zur technischen Konzeption des Fahrzeugs entwickelt und bisher nur zu bestimmten Meilensteinen mit der Technik abgeglichen wird (Design-Technik-Konvergenz), wurde in der prototypischen Umsetzung des integrierten Konzeptmodells die Möglichkeit geschaffen, das Fahrzeugdesign auf mehrere Arten in den Konzeptionsprozess einfließen zu lassen (s. auch Kap. 3). Dies umfasst die Nutzung von zweidimensionalen Designskizzen, sowie die Möglichkeit vorhandene Flächengeometrie in das 3D-CAD Konzeptmodell zu implementieren, um eine erste Bewertung bezüglich möglicher Design-Varianten treffen zu können, bzw. bereits in initialen Projektphasen Modifikations- und Optimierungsschritte einzuleiten. Zur Unterstützung der Design-Validierung wurde hierzu ein Prozess festgelegt, wie sich das Fahrzeugdesign im Rahmen des integrierten Konzeptmodells entwickeln kann (s. Abb. 6.57).

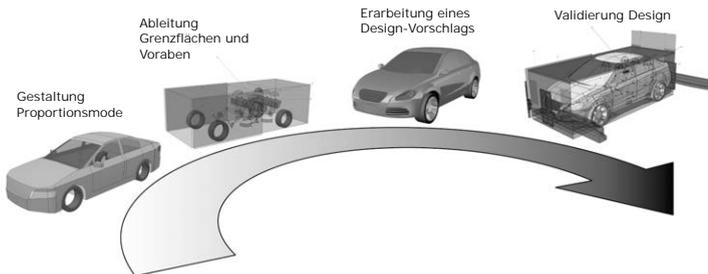


Abb. 6.57: Möglicher Designentwicklungsprozess im integrierten Konzeptmodell

Die Schnittstelle zum Fahrzeugdesign bildet hierbei das bereits beschriebene *Design-Vorgabe-Modell* (s. 6.3.8). Die Integration des Designprozesses in die konzeptionelle Gesamtfahrzeugentwicklung erfolgt damit durch eine Ableitung von für das Design relevanten Randbedingungen aus dem virtuellen Fahrzeugmodell (s. Abb. 6.58). Dieses beinhaltet sämtliche Punkte, Flächen

und andere geometrische Elemente, welche durch eine Fahrzeugarchitekturabteilung als relevant erachtet werden. Dieses Modell bildet den aus technischer Sicht möglichen Lösungsraum für die Umsetzung des Fahrzeugkonzeptes und dient als Anhaltspunkt für die Entwicklung des Fahrzeugdesigns. Das Vorgabemodell kann bei Bedarf durch die verantwortlichen Design-Ingenieure bewusst verletzt werden.

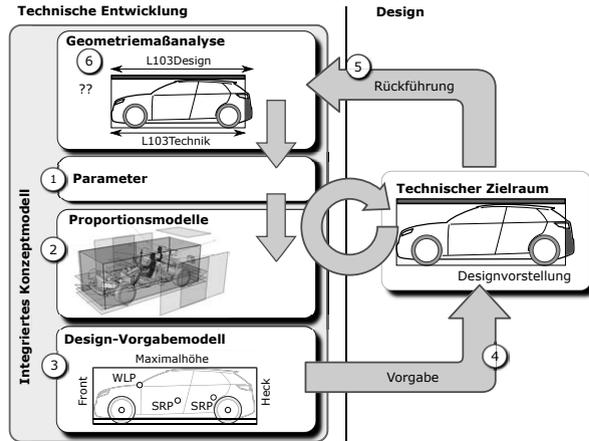


Abb. 6.58: Nutzung von Designinformationen im integrierten Konzeptmodell

Im Kontext des eingangs definierten Beispielkonzeptes soll von der Annahme ausgegangen werden, dass zu Beginn noch keine Designdaten für das Fahrzeug vorliegen. Daher werden zunächst anhand der gezeigten Exterieur- und Interieur-Proportionsmodelle erste Package- und Maßkettenuntersuchungen durchgeführt (2). Diese münden in das beschriebene Design-Vorgabemodell (3), welches im Sinne einer ersten Orientierung (4) der Fahrzeug-Design-Abteilung bereitgestellt wird. Die 3D-CAD-Vorgabegeometrie kann über eine neutrale Datenschnittstelle in die jeweils angewandte Design-Software eingelesen werden und ermöglicht so einen Transfer der technischen Vorgaben aus dem Engineeringprozess (Fahrzeughauptabmessungen, Raumbedarf für Passagiere und Komponenten), sowie von gesetzlichen Vorschriften in den Designprozess. Darauf aufbauend werden erste Design-Varianten erarbeitet. Die im Zuge des Designprozesses erstellte Flächegeometrie kann in Form neutraler CAD-Daten [11] in das integrierte Konzeptmodell rückversorgt werden (5). Über das Vorgabemodell des integrierten Konzeptmodells in Kombination mit den definierten Prüfroutinen lässt sich die Erfüllung von packagingrelevanten oder gesetzlichen Vorgaben überprüfen. In der prototypischen Umsetzung wurden hierzu die zu prüfenden geometrischen Randbedingungen, wie beispielsweise Überhangwinkel vorne oder die Bodenfreiheit, als separate CAD-Datensätze ausgeführt. Dadurch können diese automatisiert über die entsprechenden Funktionalitäten in CATIA V5 einer Kollisionsanalyse zugeführt werden. So lässt sich automationsgestützt bestimmen, welche Vorgaben durch die Designflächen verletzt werden. Im vorliegenden Beispielkonzept stehen zwei Designvarianten zur Auswahl (s. Abb. 6.59).

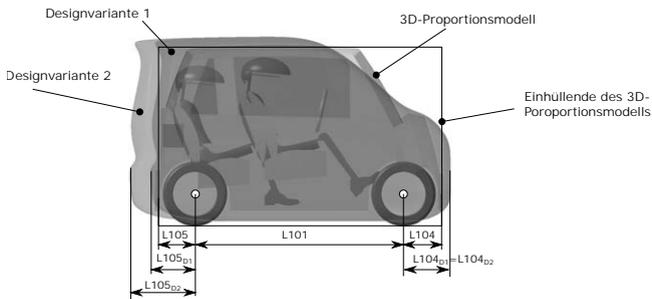


Abb. 6.59: Unterschiedliche Design-Stände im integrierten Konzeptmodell

Beide gezeigten Designvarianten überschreiten die festgelegten Überhangwerte von 250 mm sowie die anvisierte Fahrzeughöhe von 1400 mm; das Fahrzeug ist daher aus dem Blickwinkel der Fahrzeugarchitektur zu lang und zu niedrig. Folglich sind Anpassungen entweder im Design oder in den technischen Vorgaben erforderlich. Unter Berücksichtigung der geometrischen Prämissen wird zugunsten der ersten Designvariante entschieden, um dem gesetzten Zielbereich der Fahrzeuglänge von 2500 mm möglichst nahe zu kommen und dennoch die formalästhetischen Ansprüche erfüllen zu können. Der resultierende Maßkonflikt erfordert eine Anpassung der Fahrzeuglänge über die Überhangwerte an die aus dem Fahrzeugdesign resultierenden Werte. Daher wurde in der prototypischen Umsetzung die Möglichkeit geschaffen, Außenabmessungen auf Basis einer Referenzgeometrie abzuleiten und als neue Ist-Werte in das integrierte Konzeptmodell zu übernehmen. Hierzu wird die Design-Fläche in den Maßkonzeptadapter des integrierten Konzeptmodells abgelegt und entsprechend analysiert. Über die Lage der Radzentren lassen sich in Kombination mit den ermittelten Punkten auf der Design-Fläche die Werte für den hinteren Überhang und die neue Karosseriehöhe automatisiert ableiten. Für das Fahrzeug resultiert damit ein vorderer Überhang von 406 mm, ein hinterer Überhang von 386 mm, wodurch sich eine neue Gesamtfahrzeuglänge von 2792 mm ergibt. Daraus resultiert eine Abweichung zum Zielwert der Fahrzeuglänge von 292 mm. Diese Abweichung kann nun bewertet werden um mögliche Maßnahmen/Entscheidungen im weiteren Entwicklungsprozess zu unterstützen.

6.6.7 Betrachtung von Fahrzeuggewicht und Schwerpunkt

Die grundsätzliche Vorgehensweise in der Handhabung von Masse sowie davon abgeleiteter Größen wurden bereits vorgestellt. Um eine effiziente und zielgerichtete Anwendung des Massenmodells sicherzustellen, wurde im Zuge der praktischen Validierung des integrierten Konzeptmodells ein entsprechender Leitprozess erarbeitet, der auf bei den Industriepartnern etablierten Gewichtsprozessen basiert. Abb. 6.60 zeigt hierzu schematisch den erarbeiteten Leitprozess, wie er in der praktischen Validierung des integrierten Konzeptmodells genutzt wurde.

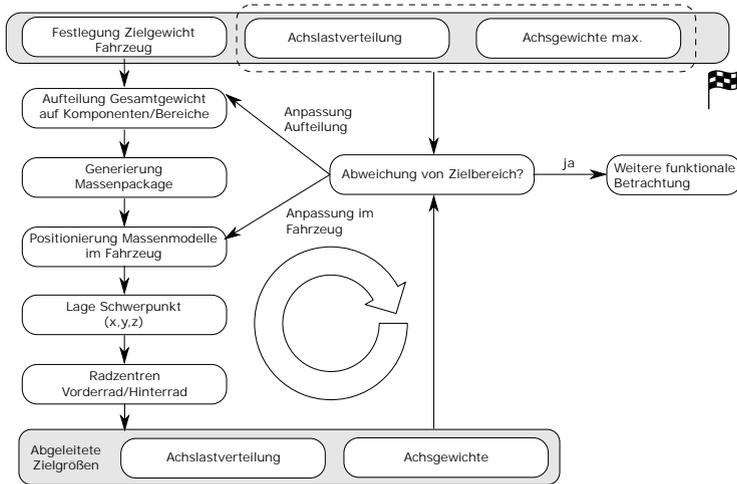


Abb. 6.60: Leitprozess zur Anwendung des Gewichtmodells

Der Prozess beginnt mit der Festlegung der Zielwerte für das Gewicht, die Achslastverteilung und die Achsgewichte. Dem folgt die Aufteilung des Fahrzeuggewichtes auf die Hauptfunktionsgruppen des Fahrzeugs und die darunterliegende Ebene. Diese Aufteilung dient als Zielvorgabe und erste Orientierung zur gewichtstechnischen Entwicklung der Komponenten/Zonen des Fahrzeugs. Im vorliegenden Beispielkonzept sind hierzu aufgrund der verwendeten Vorlage bereits Massenwerte der verschiedenen Fahrzeugbereiche vorhanden, die für eine erste Plausibilisierung herangezogen werden (s. Tab. 6.5).

Tab. 6.5: Gewichtswerte des Beispielkonzeptes

Komponente/Bereich	m [kg]	S_x [mm]	S_z [mm]	Anmerkung
Karosserie	380	1330	426	
Radaufhängung	142	1250	210	
Sitze	55,5	1486	400	
Elektronik	30	1550	426	Annahme: Symmetrisch Verteilung entlang Karosserie.
Bremsanlage	40	1050	50	
Batterie	230	1600	59	Gewichtswert der Traktionsbatterie des VW E-Up ²³ [34].
Innenausstattung	41,4	722	430	
Heizanlage	8	450	300	
Luftsystem	3,3	1250	350	
Flüssigkeiten	10	400	100	
Lenkung	17,6	450	500	
Motor	30	2100	70	
Leistungselektronik	50	1800	59	

²³Komponente eines Serienfahrzeugs als Benchmark-Modell.

Aus den Werten resultiert ein Gewichtswert von 1037,8 kg für das Fahrzeug. Aufgrund der Zielwertfestlegung von 1000 kg können für eine erste Betrachtung der Schwerpunktsituation die Werte aus der Vorlage direkt genutzt werden. Damit kann die Massenstruktur in das CAD abgebildet werden. Im vorliegenden Beispiel werden zur Ermittlung der Teilschwerpunkte einfache einhüllende Quader für bestehende Komponenten genutzt, für fehlende Komponenten wird aufgrund deren wahrscheinlicher Verteilung im Fahrzeug eine entsprechende Annahme getroffen. Damit resultiert für das Beispielkonzept ein Massenpackage entsprechend Abb. 6.61.

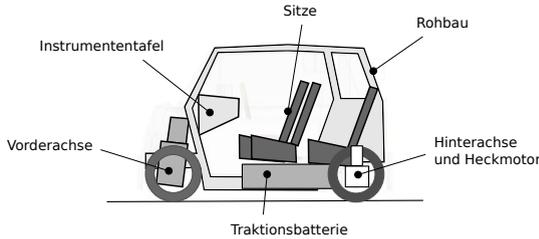


Abb. 6.61: Massenpackage des Beispielkonzepts

Nach Positionierung der Massenelemente können die Schwerpunktinformationen an die Konzeptproduktstruktur rückversorgt werden. Die ermittelten Werte finden sich in Tab. 6.5. Damit resultiert für das Gesamtfahrzeug ein Schwerpunkt von $S_x = 1122,5$ mm und $S_z = 218,31$ mm bezüglich der Vorderachse. Daraus resultiert eine Achslastverteilung von 43,87 % zu 56,13 %.

Auf Basis der Schwerpunktinformationen lassen sich zusammen mit den jeweiligen Gewichtswerten die zugehörigen Trägheitsmomente ermitteln. Für detailliertere fahrdynamische Untersuchungen ist das Hauptmassenträgheitsmoment um die Hochachse des Fahrzeugs von Interesse. Gemäß den Ausführungen in Kap. 5.3.3.4 ist für alle Komponenten, deren Abstand zum Schwerpunkt ihre geometrische Ausdehnung überschreitet, eine Reduktion auf eine Punktemasse zulässig. Damit ist lediglich ein Ersatzmodell für den Rohbau erforderlich, das in Abb. 6.61 gezeigt wird. Damit ergeben sich die in Tab. 6.6 angeführten Einzelträgheitsmomente für das Fahrzeug.

Tab. 6.6: Massenträgheitsmomente für das Beispielkonzept

Komponente/Bereich	$d = x_{S,i} - S_x$ [mm]	Θ [kg m ²]
Karosserie	207,49	16,36
Radaufhängung	127,49	2,31
Sitze	363,157	7,32
Elektronik	427,49	5,48
Bremsanlage	72,5	0,21
Batterie	477,49	52,44
Innenausstattung	400,5	6,64
Heizanlage	672,5	3,61
Luftsystem	127,49	0,054
Flüssigkeiten	722,51	5,22
Lenkung	672,51	7,96
Motor	977,49	28,66
Leistungselektronik	677,49	22,94

Das Gesamtmassenträgheitsmoment um die Hochachse des Fahrzeugs durch den Schwerpunkt errechnet sich damit zu $159,22 \text{ kg m}^2$.

Da für das Beispielkonzept drei Passagiere vorgesehen sind, soll als weiterer Beladungszustand das Gewicht und der Schwerpunkt bei drei Personen im Fahrzeug berechnet werden. Die Insassen werden hierzu über das gezeigte Beladungsmodell in Kap. 6.4.1.4 mit jeweils 80 kg pro Person als einfache Quader mit der Kantenlänge 100 mm angenommen und in den jeweiligen Sitzreferenzpunkten positioniert. Dadurch ergibt sich eine zusätzliche Masse von 240 kg, wodurch sich der Schwerpunkt weiter in Richtung Hinterachse verschiebt. In dieser Messlast resultiert ein Schwerpunkt von $S_x = 1143,76 \text{ mm}$ und $S_z = 246,8 \text{ mm}$, was eine Achslastverteilung von 42,81 % zu 57,19 % zur Folge hat. Das Gesamtgewicht mit Zuladung beträgt $1277,8 \text{ kg}$, wodurch bei Berücksichtigung der Achslastverteilung $547,05 \text{ kg}$ an der Vorderachse und $730,75 \text{ kg}$ an der Hinterachse resultieren. Das Trägheitsmoment für diesen Beladungszustand errechnet sich zu $195,89 \text{ kg m}^2$.

6.6.8 Bewertung funktionaler Fahrzeugeigenschaften

Mit dem geometrischen Grundkonzept sind die wesentlichen Außen- und Innenabmessungen definiert und es liegt eine erste Prognose des Massenschwerpunktes des Fahrzeugs vor. Auf dieser Basis kann mit der funktionalen Grundanalyse des Konzepts begonnen werden. Abb. 6.62 zeigt die benötigten Eingangsdaten zur Ermittlung der erforderlichen Größen.

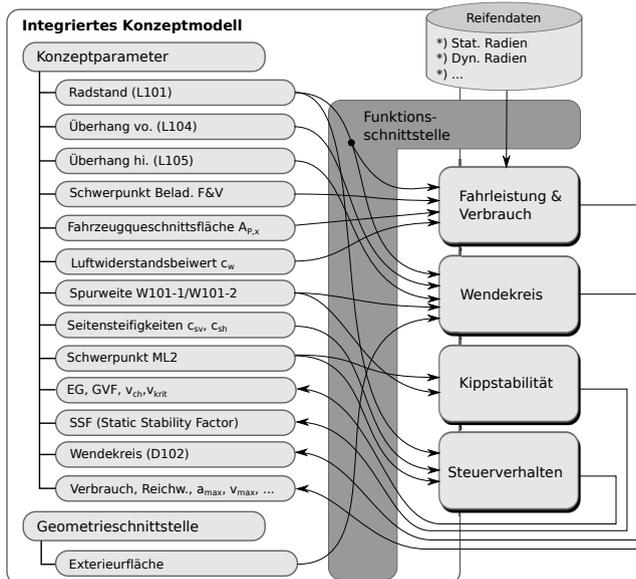


Abb. 6.62: Überblick über Datenflüsse im Funktionsmodell

Bis auf den Wendekreis benötigen alle Funktionsmodelle Informationen zur Lage des Massenschwerpunktes. Wesentlich ist hierbei die parallele Betrachtung von unterschiedlichen Messlasten,

da die resultierenden Aufstandskräfte an Vorder- und Hinterachse von der jeweiligen Beladungssituation abhängig sind. Für das vorliegende Beispielkonzept sollen die Beladungszustände 1 und 3 betrachtet werden, um ein Gefühl für den Wertebereich der verschiedenen Funktionswerte zu bekommen. Die Betrachtung der Fahrleistung soll im vorliegenden Beispiel nicht erfolgen, da im angeführten beispielhaften Projekt bis auf Geometriedaten keinerlei funktionale Informationen über den Antriebsstrang vorlagen. Daher sollen lediglich jene Informationen beschrieben werden, die im Falle einer längsdynamischen Betrachtung aus dem integrierten Konzeptmodell bereitgestellt werden können. Für die Berechnung des Luftwiderstandes werden aus dem integrierten Konzeptmodell der dimensionslose Luftwiderstandbeiwert c_w und die Fahrzeugprojektionsfläche $A_{p,x}$ in Richtung der Längsachse des Fahrzeugs bereitgestellt. Der c_w -Wert²⁴ folgt aus der Vorlage und ergibt sich für ein Kleinfahrzeug mit 0,32 (vgl. [15]). Die Querschnittsfläche ergibt sich aus dem Exterieur-Proportionsmodell mit 2,309 m² (s. Abb. 6.63). Des Weiteren werden die Schwerpunktinformationen und die dadurch bedingten Aufstandskräfte an den Achsen bereitgestellt.

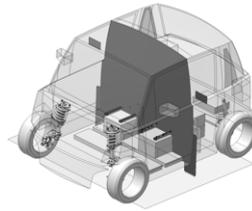


Abb. 6.63: Ermittlung der Projektionsfläche für das Beispielkonzept

In Hinblick auf die Prognose des Wendekreisdurchmessers wird auf Basis des vorgestellten Wendekreismodells zunächst die erforderliche Radeindrehung ermittelt, um den Zielwert von 11 m zu erreichen. Diese beträgt 42° am kurveninneren Rad und 38° am kurvenäußeren Rad. Diese Werte werden als Eingangsgrößen für die Generierung der Radhüllen genutzt, welche als Platzhalter im Fahrzeug-Package dienen, bis entsprechende Rohbaudaten vorhanden sind und eine Kollisions-/Freigangsanalyse durchgeführt werden kann.

Zur Berechnung des Eigenlenkgradienten sind gemäß Gl. 6.10 die Fahrzeugmasse m_{F_z} , der Radstand l , sowie die Abstände des Schwerpunktes in x-Richtung des Fahrzeugs zu den beiden Radzentren l_v und l_h sowie die zugehörigen Seitensteifigkeiten c_v und c_h erforderlich (s. Tab. 6.7).

Tab. 6.7: Eingangsgrößen für die Ermittlung funktionaler Fahrzeugeigenschaften

Parameter	Name	Wert
m_{F_z}	Fahrzeuggewicht	1277,8 kg
l	Radstand	2000 mm
l_v	Abstand Schwerpunkt zu Vorderachse	1143,77 mm
l_h	Abstand Schwerpunkt zu Hinterachse	856,23 mm
c_v	Seitensteifigkeit vorne	80000 N/-
c_h	Seitensteifigkeit hinten	125000 N/-

²⁴Anmerkung: Als Referenz wurde der c_w -Wert des VW Up herangezogen.

Damit resultiert für das Beispielkonzept ein Eigenlenkgradient nach Gl. 6.10 zu $EG = 0,00918 \text{ s}^2/\text{m}$. Das Fahrzeug besitzt daher ein untersteuerndes Lenkverhalten. Auf Basis dieser Informationen lässt sich des Weiteren die charakteristische Geschwindigkeit gemäß Gl. 6.12 errechnen. Diese ergibt sich zu $v_{ch} = 161,63 \text{ km/h}$.

Für die Überschlagsneigung soll ein Grenzwert von 1,3 definiert werden. Unter Berücksichtigung der Vorgabewerte der Spurweite von 1550 mm und der errechneten z-Koordinate des Schwerpunktes mit 246,8 mm errechnet sich ein SSF von 3,14.

In Tab. 6.8 sind die Ergebnisse für die funktionale Betrachtung zusammengefasst.

Tab. 6.8: Errechnete Funktionseigenschaften des Beispielkonzeptes

Parameter	Name	Wert
EG	Eigenlenkgradient	$0,00918 \text{ s}^2/\text{m}$
v_{ch}	Charakteristische Geschwindigkeit	161,63 km/h
SSF	Static Stability Factor	3,14

Das Fahrzeug weist ein untersteuerndes Lenkverhalten auf und der SSF liegt auf einem sehr niedrigen Niveau (s. Abb. 6.37). Aus dem Blickwinkel einer Fahrzeugarchitekturabteilung ist die gewählte Anordnung des Fahrzeugpackages somit auch aus funktionaler Perspektive grundsätzlich tragfähig und kann als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen genutzt werden.

6.6.9 Anwendung der Bewertungsmethodik

Die grundlegenden Eigenschaften und Zielsetzungen des Bewertungsmodells wurden in Kap. 5.6 vorgestellt. Im Gegensatz zu Vorgehensmodellen wie etwa nach Kuchenbuch [67] oder Sander [93] werden im vorliegenden Ansatz Bewertungen eines Konzeptes nur zu dezidierten Zeitpunkten durch den Entwickler bzw. die Entwicklerin selbst vorgenommen. Eine zur Konzeptmodellierung synchrone automatisierte Bewertung hat sich in der praktischen Nutzung als nicht zielführend erwiesen (s. auch Kap. 7). Die praktische Umsetzung und Nutzung des Bewertungsmodells ist mit zwei wesentlichen Elementen verbunden – der Bewertungsübersicht und der Durchführung der Bewertung selbst (s. Abb. 6.64).

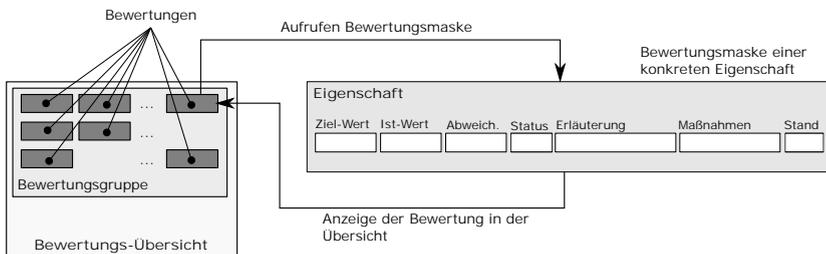


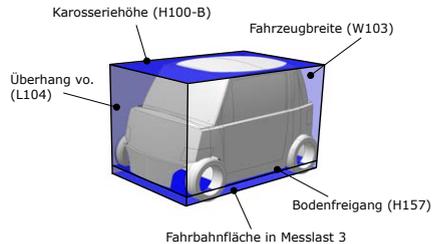
Abb. 6.64: Zentrale Komponenten der praktischen Umsetzung des Bewertungsmodells

Die Bewertungsübersicht stellt den Status aller festgelegten Bewertungen kontextuell entsprechend definierter technischer Bereiche (Bewertungsgruppen) im Fahrzeug übersichtlich und benutzerfreundlich dar. Die Festlegung des eigentlichen Status einer Bewertung erfolgt in einer

separaten Maske. Hier werden alle erforderlichen Detailinformationen der zu bewertenden Eigenschaft angezeigt. Abb. 6.65 (a) zeigt die Bewertungsübersichtsmaske, wie sie in der prototypischen Umsetzung realisiert wurde. Eine vollständige Auflistung der genutzten Prüfungen in der prototypischen Umsetzung findet sich im Anhang (s. A.5).



(a) Grafische Übersicht des Status von technischen Fahrzeugeigenschaften



(b) Visuelle Darstellung von Überschneidungen zu geometrischen Vorgaben

Abb. 6.65: Grundlegende Aspekte in der praktischen Nutzung der Bewertungsmethodik des integrierten Konzeptmodells

Wie in Kap. 5.6 gezeigt, werden die Status derjenigen Eigenschaften, die im integrierten Konzeptmodell gemessen werden können, automatisch validiert. Qualitative Eigenschaften müssen gemäß den Ausführungen in Kap. 5.6 stets durch einen Anwender bewertet werden. In der praktischen Umsetzung wurden hierzu zwei unterschiedliche Modi implementiert. In der automatisierten Variante werden die Status für quantitative Eigenschaften automatisch gesetzt, d. h. der Status wird automatisch entsprechend den jeweils definierten Kriterien im Bezug zu den ermittelten Größen gesetzt. In der semi-automatischen Variante wird zwar der Status, sofern möglich, automatisch ermittelt, muss aber erst durch einen Anwender übernommen werden, d. h. der Anwender definiert in letzter Instanz ob eine Eigenschaft die entsprechende Bewertung erhalten soll oder nicht. Werden nach einer vorgenommen Bewertung assoziierte Parameter geändert, wird der jeweilige Prüfungsstatus automatisch zurückgesetzt und eine erneute Bewertung durch den Anwender ist erforderlich. Hiervon ausgenommen sind Prüfungen, welche ausschließlich über die Erreichung geforderter Zielwerte definiert sind, bzw. automatisiert evaluiert werden können.

Den praktisch genutzten und softwareseitig implementierten Bewertungsprozess zeigt Abb. 6.67. Um die inhaltliche Konsistenz vorgenommener Bewertungen zu gewährleisten, müssen diese stets auf einen dezidierten Fahrzeugzustand bezogen werden. Daher soll das Bewertungsmodell gemäß dem in Abb. 6.66 dargestellten Ablaufschema genutzt werden. Wesentlich für die Nachvollziehbarkeit ist die Koppelung aus Bewertungen und daraus abgeleiteter Maßnahmen.

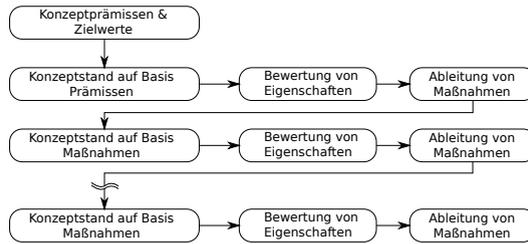


Abb. 6.66: Vorgehensschema in der Nutzung des Bewertungsmodells im Entwicklungsprozess

Mit dem Start des Bewertungsprozesses werden zunächst mögliche Änderungen am Modell überprüft. Werden Änderungen entdeckt, wird ein neuer Stand erzeugt und die bisherigen Bewertungen werden zur erneuten Überprüfung markiert. Werden keine Änderungen detektiert, kann direkt mit der Bewertung fortgefahren werden. Im nächste Schritt erfolgt die eigentliche Durchführung der Bewertung(en). Hier können die automatisiert ermittelten Status im Falle quantitativer Eigenschaften herangezogen werden und im Falle qualitativer Prüfungen eine entsprechende Bewertung vorgenommen werden.

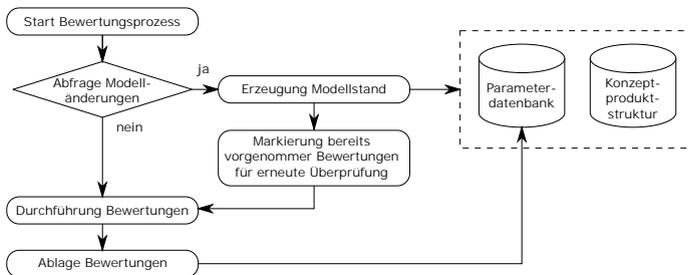


Abb. 6.67: Ablaufmodell für die Bewertung

Im Kontext des vorliegenden Beispiels wurden neben der eingangs definierten Randbedingungen die gesetzlich festgelegten fahrbahnspezifischen Limitierungen genutzt. Aus den Prämissen werden jene Größen in Form von Prüfungen genutzt, die im Kontext des integrierten Konzeptmodells tatsächlich bewertbar sind. So ist etwa der gewählte Typ des Antriebssystem keine Bewertungsgröße im Sinne des Bewertungsmodells, obwohl als Randbedingung in den Prämissen des Konzeptes definiert. In der praktischen Validierung wurden typische Prüfungen, wie etwa die Fahrzeughöhe, oder der Bodenfreigang bereits in die jeweiligen Fahrzeugvorlagen integriert, wodurch im Falle eines neuen Konzeptes lediglich fehlende Prüfungen neu im Vorfeld zu erstellen sind.

Im Falle des vorliegenden Beispielkonzeptes gilt es zunächst eine grundsätzliche Machbarkeitsstudie durchzuführen. Aufgrund des geringen Konzeptreifegrades in Hinblick auf den geometrischen Detailgrad müssen konsequenterweise an einigen Stellen Annahmen bezüglich einer möglichen technischen Umsetzbarkeit getroffen werden. In Bezug auf die Bewertungen bedeutet dies, dass neben dem Status vor Allem die zugehörige Begründung von hohem Interesse ist.

Zunächst werden analog Abb. 5.69 die erforderlichen Grenzwerte für die automatisierte Statusvergabe quantitativer Prüfungen festgelegt. Erfolgt dieser Schritt nicht, wird bei Überschreitung des Zielwertes, sofern existent, automatisch rot gesetzt. In Tab. 6.9 sind die verwendeten Toleranzwerte für die Prinzipuntersuchung des Beispielkonzeptes angeführt. Diese wurden aufgrund von Projektvorgaben bzw. ergonomischer Aspekte definiert.

Tab. 6.9: Toleranzwerte für wesentliche Abmessungen des Beispielkonzeptes

Maß	Name	Zielwert	Toleranz	Prüfgruppe
L34	Abstand SgRP zu Knöchel			Ergonomie
L53-1	Horiz. Abstand SgRP zu FRP			Ergonomie
H5-1	Einstiegshöhe vorne	540 mm	500 – 600 mm	Ergonomie
H100-B	Karosseriehöhe	1500 mm	0 – 1550 mm	Außenabmessungen
H30-1	Vert. Abstand SgRP zu FRP	340 mm	320 – 360 mm	Ergonomie

Nachdem das Konzept unter Einbeziehung aller geometrischen und funktionalen Informationen im integrierten Konzeptmodell aufgebaut wird, zeigt sich gemäß Kap. 6.6.4, dass aufgrund der vorgegebenen Traktionsbatterie eine Kollision im Fußbereich der Insassen resultiert. Daher ist eine Anhebung der Sitzposition erforderlich. Folglich wird für den aktuellen Package-Stand der Status rot gesetzt. Im zugehörigen Bewertungssatz wird *Kollision mit Insassen aufgrund Batteriehöhe* eingetragen. Daraus wird als Maßnahme zur Lösung des vorliegenden Konfliktes die mögliche Anhebung der Sitzposition vermerkt. Des Weiteren können aufgrund der gezeigten Designvarianten in Abb. 6.59 der anvisierte Zielwert für die Fahrzeughöhe und die beiden Überhänge nicht umgesetzt werden. Für diese Maße werden in den zugehörigen Bewertungen die Überschneidungen mit den Design-Varianten vermerkt. Als Maßnahmen werden die Übernahme der jeweiligen designspezifischen Werte eingetragen.

Durch die kombinierte Vorgehensweise aus Bewertung, abgeleiteter Maßnahmen und deren Umsetzung lässt sich die Entwicklung des Konzeptes nachvollziehbar gestalten. Des Weiteren wird dadurch ein effizientes Instrument in der Prozesssteuerung geboten, da die definierten Maßnahmen aufgrund der jeweiligen Bewertungsstatus in den vorgelagerten Prozessschritten eingearbeitet werden müssen, bzw. eine Abweichung davon dokumentiert und verantwortet werden muss.

7

Fazit und Diskussion der Ergebnisse

In der vorliegenden Dissertation wird ein integriertes Konzeptmodell für die technische Konzeptentwicklung im Automobilbau vorgestellt. Das Konzeptmodell verfolgt das Ziel, bereits in frühen Phasen des Auslegungsprozesses Aussagen zu geometrischen und funktionalen Fahrzeugeigenschaften zu tätigen, um unter Berücksichtigung der definierten Prämissen die grundsätzliche technische Umsetzbarkeit eines Fahrzeugentwurfs zu bewerten. Die theoretischen Grundlagen, Methoden und Konstrukte werden hierzu in Kap. 5 entwickelt. Um eine praktische Validierung der theoretischen Überlegungen vorzunehmen, wurde das prototypische Konzeptwerkzeug *ConceptCar* im Zuge eines von der Industrie unterstützten Forschungsprojekts entwickelt [88], [91], [89], [90].

Das Konzeptwerkzeug setzt sich gemäß den Ausführungen in Kap. 6 aus verschiedenen Teilmodellen zusammen, die untereinander konsistent verknüpft sind und einen Framework-basierten Ansatz repräsentieren. Das Konzeptwerkzeug ist modular aufgebaut und lässt sich flexibel an die aktuellen Projektbedürfnisse anpassen. Die Basis des Konzeptwerkzeugs bildet ein parametrisch-assoziatives Führungsmodell in CATIA V5 – das *Geometrie-Framework*. Dieses wird als Produktstruktur dargestellt, die entsprechend inhaltlicher und prozessualer Erfordernisse gegliedert ist. Neben der Gliederungsstruktur beinhaltet das *Geometrie-Framework* parametrisch-assoziative Proportionsmodelle, die der geometrischen Analyse von Bauraumgegebenheiten und maßlichen Konstellationen in der frühen Phase dienen. Die Proportionsmodelle sind als Flächenmodelle ausgeführt, um eine hohe Stabilität auch bei umfangreichen Parametervariationen gewährleisten zu können. Weiteres zentrales Merkmal des *Geometrie-Frameworks* ist die globale Steuerungsstrategie in Form von CAD-Parametern, CAD-basierten Wissenselementen in Form von Regeln, sowie speziellen Referenzpunkten, die als *3D-CAD-Referenzpunkte* bezeichnet werden. Diese dienen der internen Lage- und Positionssteuerung der Komponenten des *Konzept-DMU*. Zeitgleich können die *3D-CAD-Referenzpunkte* über eine Schnittstelle veräußert werden, wodurch sich Modelle geometrisch eingliedern lassen, die nicht Teil des *Geometrie-Frameworks* sind. Die virtuelle Betrachtung von Fahrzeugfunktionen erfolgt über das sog. *Funktions-Framework*. Dieses umfasst eine tabellarische Auflistung von Funktionen im Gesamtfahrzeugkontext, die Definition erforderlicher Ein- und Ausgabegrößen und die Pfade zu ausführbaren Dateien und Skripten. Dadurch lassen sich neue wie vorhandene Modelle effizient im Kontext des integrierten Konzeptmodells einbinden.

Das *Geometrie-* und *Funktions-Framework* werden durch ein übergeordnetes Steuerungssystem konsistent und bidirektional miteinander verknüpft, das in der Skriptsprache VBA programmiert ist und über die Automationsschnittstelle in CATIA V5 nahtlos eingebettet ist. Dadurch besteht die Möglichkeit auf verschiedene Ereignisse, die im integrierten Konzeptmodell stattfinden, reagieren zu können. Bei Veränderung von Parameterwerten im CAD werden im Falle betroffener Funktionen die zugehörigen Berechnungs- und Simulationsmodelle automatisch ge-

startet, um die inhaltliche Konsistenz zu wahren. Eine weitere Verantwortung der Automation besteht in der Verwaltung der Parametrik und der Verknüpfungen im integrierten Konzeptmodell. Durch die vollständige Ausklammerung des Anwenders von der Erstellung und Wartung von Modellverknüpfungen kann die Datenqualität durchgängig sichergestellt werden, da Aufbau und Logik nicht vom spezifischen Strukturierungsverständnis einzelner Anwender abhängig sind. Dadurch wird im integrierten Konzeptmodell eine flexible Parametrik realisiert, die eine freie Anpassung des parametrischen Modellverhaltens ermöglicht. So lassen sich dadurch z. B. in Maßketten auftretende Maße flexibel entweder als Ausgabegröße oder als Eingangsgröße nutzen. Des Weiteren stellt die durchgängige Standardisierung eine mögliche Erweiterung des Systems in Hinblick auf zukünftige Erweiterungen sicher. Da VBA auch in CATIA V5 die Nutzung externer Programmbibliotheken unterstützt, können alle weiteren Programmpakete, wie etwa EXCEL, die eine entsprechende API bereitstellen, eingebunden werden. Des Weiteren umfasst das übergeordnete Steuerungssystem die Bereitstellung spezieller kontextspezifischer grafischer Benutzerschnittstellen, die einen effizienten und intuitiven Zugriff auf die Informationen und die Steuerung des integrierten Konzeptmodells erlauben. Wesentlich für die Betrachtung und Bewertung neuer Fahrzeugkonzepte ist die durchgängige Darstellung und Verwaltung von Masse und Masse-Eigenschaften. Hierzu wurde eine spezielle Konzeptproduktstruktur definiert, welche neben typischen Produktstrukturinformationen um Masse-Eigenschaften angereichert ist.

Ein weiteres wesentliches Merkmal des Konzeptwerkzeugs ist die Bereitstellung einer durchgängigen und standardisierten Bewertungssystematik für die geometrischen und funktionalen Fahrzeugeigenschaften. Diese bestehen im Wesentlichen aus einem Status, einer Status-Definition, einer textuellen Erläuterung in Form eines Bewertungssatzes und zugehörigen Maßnahmen. Im Falle quantitativer Eigenschaften lassen sich mit Hilfe der Status-Definition automatisiert entsprechende Status aus dem integrierten Konzeptmodell ableiten. Im Falle qualitativer Eigenschaften ist stets eine manuelle Bewertung durch einen Anwender vorgesehen. Der Bewertungssatz ist standardisiert und setzt sich aus definierten Bausteinen zusammen. Ziel ist eine effiziente verbale Beschreibung eines Status im Falle einer qualitativen Eigenschaft. Die Maßnahmen beinhalten eine textuelle Beschreibung von Konsequenzen für den Fahrzeugentwurf, die sich auf Basis des Status ableiten lassen. Durch die Koppelung von Bewertungen und daraus abgeleiteten Maßnahmen können Entscheidungen in der Konzeptentwicklung transparent nachvollzogen werden.

Aufgrund des integrierten Charakters des vorgestellten Ansatzes lässt sich das im Zuge einer Konzeptentwicklung entstehende Auslegungswissen effizient speichern und bedarfsgerecht im weiteren Verlauf eines Fahrzeugprojektes oder für neue Projekte bereitstellen. In Hinblick auf die prozessuale Integration ermöglicht das integrierte Konzeptmodell die Definition von Workflows. Diese dienen der Einordnung von Elementen des integrierten Konzeptmodells in einen definierten Ablauf. Dadurch lassen sich etablierte Prozesse abbilden.

Wegen der umfangreichen Daten und Informationen, welche für die Arbeit mit einem integrierten Konzeptmodell erforderlich sind, wurden fahrzeugspezifische Vorlagen geschaffen, um eine effiziente und konsistente Bedatung zu ermöglichen. Diese umfassen geometrische und funktionale Fahrzeugparameterwerte, Komponenten für die DMU-Untersuchung, sowie Massenwerte typischer Fahrzeugkomponenten. Neben den Werten für Maße und Eigenschaften lässt sich überdies das parametrische Verhalten des Modells vordefinieren.

In der praktischen Validierung des Ansatzes konnten in Hinblick auf die Wirksamkeit der de-

finierten Methoden und Workflows unterschiedliche Beobachtungen gemacht werden. Prinzipbedingt sind die resultierenden Vorteile in der geometrischen Umgebung am größten, da der Ansatz auf die Unterstützung eines Fahrzeugarchitekten abzielt. Durch die integrierten Vorlagen in Kombination mit den Proportionsmodellen, lassen sich rasch und effizient geometrische Eigenschaften eines Entwurfes untersuchen. So konnte etwa für den Kabinenroller VW Nils (s. Abb. 1.2 (a)) die Erstellungsdauer des geometrischen Grundkonzeptes von mehreren Tagen auf wenige Stunden bei gleichem Detailgrad reduziert werden. Einen weiteren Mehrwert stellen die implementierten kinematischen Fahrwerksmodelle im CAD dar. Aufgrund der Kinematik lassen sich bei vorgegebenen Einfederungswerten die resultierenden Radhüllkurven ermitteln, wodurch die Qualität des Grob-Packages deutlich angehoben werden kann. In der Gestaltung und Detaillierung der bereitgestellten 3D-Proportionsmodelle zeigte sich, dass eine zu hohe Ähnlichkeit mit einem realen Fahrzeug den fälschlichen Eindruck eines hohen Konzeptreifegrades entstehen lässt gleichbedeutend mit „das Fahrzeug ist bereits fertig“. Daher wurde in Hinblick auf die Proportionsmodelle eine eher technisch-grobe Darstellung der Exterior- und Interiorflächen gewählt, um solche Fehlinterpretationen zu vermeiden. Ein weiterer Mehrwert entsteht in der Nutzung des 3D-CAD-Referenzpunktesystems in Kombination mit der DMU-Adaptersystematik. Durch die spezielle DMU-Adaptersystematik (s. Kap. 5.4.2.3) können die Vorteile eines konventionellen DMU hinsichtlich effizienter Repräsentanz großer Baugruppen mit der parametrischen Baugruppensteuerung verbunden werden. Dadurch wird die Basis für effiziente und konsistente Variantenstudien gelegt. Ein großes Potential für die geometrische Konzeptentwicklung stellt die flexible Parametrik dar. Diese ermöglicht die situationsspezifische Anpassung der Modellparametrik an die gerade herrschenden Anforderungen. Dadurch können die Vorteile parametrisch-assoziativer CAD-Systeme in vollem Umfang genutzt werden, gleichzeitig stellt die automationsgestützte Verwaltung die permanente parametrische Konsistenz sicher. Dies wurde etwa in der Erweiterung des Exterieur-Proportionsmodells für den VW Nils genutzt. Da der Kabinenroller keinen vorderen Überhang im konventionellen Sinn besitzt, stellen die Radhäuser der ausgestellten Räder die vordersten Flächen des Fahrzeugs dar (s. Abb. 1.2 (a)). Folglich muss sich der vordere Überhang des Fahrzeug aus der geometrischen Konstellation im Vorderwagen ergeben. Das Exterieur-Proportionsmodell wurde um entsprechende Referenzmaße erweitert, wodurch sich der vordere Überhang aus der herrschenden maßlichen Konstellation automatisch ergibt. Ebenso mussten in das Exterieur-Proportionsmodell Radhäuser integriert werden, da bedingt durch die ausgestellten Räder keine typische Abdeckung durch die Karosserie gegeben ist. Andere Anwendungsszenarien für die flexible Parametrik ergeben sich vor allem in der Auslegung im Spiel mit den Maßketten. So lassen sich vor dem Hintergrund von Variantenstudien Maßketten flexibel an die jeweilige Maßkonstellation und die zugrundeliegende Fragestellung anpassen. Einmal kann beispielsweise die Lage des Fahrer-SgRP bei gegebener Einstiegshöhe gefragt sein, oder es kann eine umgekehrte Fragestellung nach der Einstiegshöhe bei gegebenen SgRP entstehen.

In Hinblick auf die funktionale Untersuchung von Konzepten ergeben sich für einen Fahrzeugarchitekten vor allem zwei wesentliche Vorteile: Einerseits lässt sich die geometrische Konzeptgestalt grundlegend funktional validieren, wodurch die Aussagekraft definierter Bauräume erhöht werden kann. Andererseits lässt sich die funktionale Betrachtung als effizientes Kommunikationswerkzeug zu involvierten Fachbereichen sowie zurück in die Fahrzeugarchitekturabteilung nutzen. So können neben den geometrischen Informationen erste funktionale Zielwerte an die entwickelnden Fachbereiche übergeben werden, wodurch sich bereits in der frühen Konzeptphase Entwicklungsschleifen reduzieren lassen. Ein weiterer Vorteil in der Erweiterung um funktionale Aspekte resultiert in Kombination mit dem globalen Parametermodell. Dadurch, dass die

funktionalen Produktmerkmale in Form von Parametern abgebildet werden, lassen sich diese um weitere Informationen erweitern. So ist etwa nicht nur der Wert einer Eigenschaft bekannt, sondern auch wie und unter welchen Randbedingungen sich dieser Wert ergeben hat. Durch diese Informationsvernetzung lassen sich alle im Kontext des jeweiligen Fahrzeugkonzeptes entstehenden Informationen effizient sichern. In der praktischen Nutzung erweist sich vor allem das Massenmanagement als wertvolles Instrument zur funktional getriebenen Package-Steuerung, da in Verbindung mit der Konzeptproduktstruktur und den Proportionsmodellen erste Aussagen betreffend der Lage des Massenschwerpunktes und der Massenträgheitsmomente getätigt werden können. Dadurch wird bereits in initialen Projektphasen eine umfassende Betrachtung des Packages ermöglicht.

Bei der Nutzung wissenschaftlicher Elemente wie Regeln und formale Beziehungen zwischen Parametern zeigte sich, dass die flexible Parametrik zwar grundsätzlich in der Lage ist verschiedene Parametriszenarien effizient handzuhaben, eine exzessive Anreicherung um wissenschaftliche Elemente jedoch rasch das System in sich „sperren“ kann und eine hohe Unübersichtlichkeit bewirkt. Neue Beziehungen sollten daher stets mit gebotener Sorgsamkeit und Weitblick eingepflegt werden.

In der Anwendung des Bewertungsmodells zeigt sich, dass eine vollautomatische kontinuierliche Aktualisierung von Bewertungen von Produktmerkmalen, etwa bei Parameteränderungen, bedingt zielführend ist, bzw. die Nutzerakzeptanz z. T. nicht gegeben ist. Manche Anwender fühlten sich durch das System bevormundet, andere sahen sich einer zu hohen Informationsflut bei Änderung von Parametern ausgesetzt. Daher wurde im Zuge des Forschungsprojektes auf eine punktuelle und semi-automatische Nutzung des Bewertungsmodells umgeschwenkt, in der zwar ein automatisiert generierter Status für quantitativ erfassbare Eigenschaften gegeben wird, die Übernahme aber stets durch einen Nutzer übernommen werden muss.

Aus dem Blickwinkel der prozessualen Integration stand die konsistente Einbeziehung des Design-Prozesses sowie der Berechnung im Vordergrund. Die Kommunikation mit dem Design-Prozess erfolgt über das Design-Vorgabemodell. Dieses beinhaltet alle geometrischen Bezugselemente für die Gestaltung des Fahrzeug-Designs. Die entstehenden Design-Informationen fließen in das integrierte Konzeptmodell in Form von neutraler Flächengeometrie zurück und können über die Maßanalysealgorithmen in maßliche Informationen übergeführt werden. Dadurch lassen sich die Abweichungen der Design-Flächen vom aktuellen Technik-Stand in Form von Parameterwerten erfassen. Die Delta-Werte können entweder den jeweiligen Maß-Parametern als Information angehängt werden, oder als neue Parameter für die Ist-Werte der Maße genutzt werden, wodurch sich das integrierte Konzeptmodell an den aktuellen Design-Stand anpasst. Die Eingliederung der Berechnung und Simulation erfolgt mittels der beschriebenen Funktions-Schnittstelle oder über die Parameter-Schnittstelle in Form von mittels des integrierten Konzeptmodells generierten technischen Zielwerten für die Berechnung und Simulation. Dies betrifft alle Berechnungs- und Simulationsprozesse, die aus Prozesssicht und fachlicher Verantwortung nicht in die Funktions-Schnittstelle eingegliedert werden können.

In Hinblick auf die programmatische Implementierung war die Einbindung verschiedener Arbeitsumgebungen in CATIA V5 erforderlich, um einerseits das Datenmodell und andererseits die verschiedenen Steuerungsfunktionen zu implementieren. Hierbei ergab sich eine grundsätzliche Herausforderung darin, dass Programmfunktionalitäten, die aus dem gewohnten interaktiven Umgang mit dem CAD-System bekannt sind, über die API entweder gar nicht oder in stark

abstrakter Form bereitgestellt werden. So ist es etwa möglich ein Dokument mit der Methode *.SaveAs* zu speichern, komplexere Sicherungsfunktionen, wie etwa das *Save Management* werden über die API jedoch nicht zur Verfügung gestellt. Ein anderes Beispiel ist die Sperrung von Parametern für deren Editierung. Interaktiv können Parameter gesperrt werden, d. h. dass Werte nicht mehr geändert werden können, es sei denn die Sperre wird aufgehoben. Über die API wird eine solche Methode nicht bereitgestellt. Die einzige Möglichkeit in solchen Fällen ist ein Workaround über die Methode *StartCommand*, in der Menübefehle über deren Bezeichnung ausgeführt werden können. Diese Methode ist jedoch aufgrund der Bezeichnung sprachabhängig und versionsabhängig, weshalb diese Methode im Allgemeinen nicht verwendet werden soll. Folglich führt dies dazu, dass gewohnte Vorgehensweisen in der Regel nicht immer in der selben Form über die API implementiert werden können. Weitere Herausforderungen ergaben sich in Zusammenhang mit den Release-Wechseln erforderlicher Programmkomponenten und der Bereitstellung von Programmbefehlen über die API. Im Zuge des Forschungsprojektes erfolgten drei Release-Wechsel in CATIA V5 sowie zwei in MATLAB. Aufgrund der intensiven und tiefen Nutzung der API, wirken sich Fehler in deren Implementierung stark auf die Funktionalität des integrierten Konzeptmodells aus. Weitere Herausforderungen ergaben sich durch mangelnde Inkompatibilitäten zwischen verschiedenen Versionen der genutzten Programmpakete. So traten etwa Instabilitäten bei der Nutzung von Skizzen mit externen Referenzen beim Wechsel von CATIA V5 R16 nach R19 auf. Teilweise wurden die Elemente nicht mehr erkannt, oder es wurde die Referenzierung bei Änderung von Parameterwerten nicht nachvollziehbar verloren. In Zusammenhang mit MATLAB ergaben sich vor allem Herausforderungen in der korrekten Kompilierung der Modelle als ausführbare Dateien. Während für konventionelle MATLAB-Dateien die Erzeugung ausführbarer Dateien mit dem verwendeten Release-Stand Stand 2010b kein Problem darstellte, ist bei der Kompilierung von SIMULINK-Modellen eine hohe Sorgfalt den Modellaufbau betreffend geboten. So müssen etwa alle Workspace-Zugriffe in ein *mat*-File umgelenkt werden, da in der kompilierten Variante kein Workspace existiert. Weitere Herausforderungen resultierten in Zusammenhang mit unterschiedlichen Benutzerrechtekonstellationen oder System-Updates. Da sich in den VBA-Steuerelementen standardmäßig keine Fortschrittsanzeige findet, wurde diese aus der *MSCOMCTL.OCX* genutzt. Diese wurde jedoch bei zahlreichen Windows-Updates aus der *Registry* entfernt und erforderte eine manuelle Registrierung, was jedoch Administrationsrechte erfordert, über die nicht alle Anwender standardmäßig verfügen.

Limitierungen des gezeigten Ansatzes konnten im Zusammenhang mit den Proportionsmodellen, der Automationsfähigkeit genutzter Programmpakete sowie der interaktiven Bedienung des integrierten Konzeptmodells beobachtet werden. Um einen Eindruck der Bauraumbegrenzungen im Bereich des Exterieurs und Interieurs zu erhalten, ist ein entsprechender Detailgrad der Flächenmodelle erforderlich. Im Außenbereich ist ein Fahrzeug durch, unter Berücksichtigung formalästhetischer Gesichtspunkte gestalteter, Freiformflächen gekennzeichnet. Diese sind einer parametrischen Darstellung nicht zugänglich und müssen daher im Konzeptmodell durch vereinfachte Flächen approximiert werden. Wichtig ist dabei, dass die wesentlichen Proportionen nicht verfälscht werden. In diesem Zusammenhang ergeben sich Herausforderungen mit einer parameterabhängigen Topologie der Außenfläche. So können unter bestimmten Voraussetzungen Elemente verschwinden, oder sich nicht in einem definierten Kontext befinden, wodurch eine konsistente und für den Anwender verständliche parametrische Steuerung nicht mehr möglich ist. Das in Kap. 5.4.5 beschriebene Kontrollmodell ist zwar in der Lage, instabile geometrische Bereiche selbstständig zu inaktivieren, dies bezieht sich jedoch nicht auf topologische Inkonsistenzen. Eine Möglichkeit diese handzuhaben liegt in der Nutzung entsprechender Referenzmaße,

über die eine Bewertung der jeweiligen topologischen Situation ermöglicht wird. Eine weitere Limitierung des Ansatzes ergab sich im Kontext der Anwendung der kinematischen Radmodelle zur Generierung der bewegungsinduzierten Radhüllen. Die Kinematikmodelle zeigten sich als teilweise sehr empfindlich bei durchgeführten Parameteränderungen, insbesondere wenn diese zu inkonsistenten kinematischen Situationen führten. So wurde teilweise aufgrund nicht durchgeführter oder fehlerhafter Aktualisierungen nicht die gewünschte räumliche Position des Rades eingenommen und ein systemseitiges Zurücksetzen auf die ursprüngliche Position war nur durch einen Modellneustart möglich. Des Weiteren traten Fehler in den Kinematikbeziehungen des Modells bedingt durch Release-Wechsel des CAD-Systems auf, die ein manuelles Eingreifen in das CAD-Modell erforderten. Hierin zeigte sich, dass für die breite Nutzung ein Ersetzen der Kinematikmodelle durch formal-mathematische Fahrwerksmodelle sinnvoller wäre, da diese von einem CAD-Aktualisierungsprozess unabhängig sind. Ferner würde sich durch die Nutzung formal-mathematischer Modelle die grundsätzliche Funktionsfähigkeit sowie Plausibilität genutzter Parameterwerte einfacher überprüfen lassen.

In Hinblick auf zukünftige Erweiterungen ergeben sich vielfältige Möglichkeiten. Aufgrund des hohen Automationsgrades bietet das integrierte Konzeptmodell ideale Voraussetzungen für die Durchführung von automatisierten Variantenuntersuchungen. Durch die offene Skriptschnittstelle lassen sich erweiterte Variantenfunktionen effizient implementieren, die Parameter innerhalb definierter Grenzen modifizieren. Damit wären auch erweiterte Funktionalitäten, wie etwa die automationsgestützte Optimierung des Fahrzeug-Package unter Berücksichtigung funktionaler Zielwerte denkbar. Werden für die verschiedenen Komponenten erforderliche Freigänge und einzuhaltende Maßketten definiert, ließe sich die Position von Komponenten etwa unter Vorgabe eines zu erzielenden Schwerpunktes optimieren. Ebenfalls denkbar wäre die Einbeziehung von Methoden aus dem Systems-Engineering zur effizienten Ableitung von technischen Zielwerten. Ein integriertes Konzeptmodell könnte hier für die frühe Phase als effizientes Vernetzungsinstrument für technische Eigenschaften fungieren. Ebenfalls von Interesse wäre die Implementierung eines integrierten Konzeptmodells in moderne hochintegrierte Entwicklungsumgebungen, wie beispielsweise 3DEXPERIENCE [20] von Dassault Systèmes. Durch die durchgängige Einbindung sämtlicher virtueller Entwicklungsdomänen wie CAD und CAE in ein zentrales Software-Produkt, wäre es interessant in wie weit sich die definierten Methoden und Prozesse darin nutzen lassen. In Richtung des autonomen Fahrens wäre eine Erweiterung um Hüllengenerierungsfunktionen für Insassen interessant, um mögliche Auswirkungen des Innenraumkonzeptes effizient darstellen zu können.

Zusammenfassend birgt der Ansatz eines integrierten Konzeptmodells große Potentiale in der technischen Konzeptentwicklung. Die Möglichkeit der effizienten und raschen Konzeptmodellierung im Zusammenspiel mit der Sicherung des Auslegungswissens in Form von Bewertungen und Maßnahmen schafft die Voraussetzungen zur Steigerung der Konzeptqualität und des Reifegrades. Durch den hohen Automationsgrad, insbesondere in Hinblick auf die vollständig autonome Verwaltung der Modellparametrik, lässt sich die Datenqualität und Modellstabilität durchgehend sicherstellen. Ein integriertes Konzeptmodell ermöglicht jedoch kein „Fahrzeug auf Knopfdruck“ und sollte diesen Anspruch auch nicht stellen. Vielmehr ist es als konsistente Bündelung von Modellen, Strategien und Methoden zu verstehen, die einem Entwickler oder einer Entwicklerin begleitend an die Hand gegeben werden können. Für eine Fahrzeugarchitekturabteilung ergeben sich viele Vorteile bei Nutzung eines integrierten Konzeptmodells, die sich vor allem durch den hohen Automationsgrad und der damit verbundenen Flexibilität und Datenintegrität ergeben.

Dennoch sind in der Nutzung eines integrierten Konzeptmodells vielfältige Aspekte für einen erfolgreichen Einsatz zu beachten. Aufgrund der Modellkomplexität und der Gewährleistung der Aktualität hinterlegter Informationen und Methoden ist die Festlegung eines entsprechenden Wartungsprozesses mit zugehörigen Verantwortlichkeiten unabdingbar. Die rasche technologische Weiterentwicklung in Hinblick auf eingesetzte CAx-Werkzeuge, Methodik, IT-Infrastruktur sowie die Automobiltechnik selbst erfordert eine konsequente Administration und die Anpassung an neue Gegebenheiten sowie eine kontinuierliche Validierung eingesetzter Methoden.

8

Zusammenfassung

Die Automobilentwicklung sieht sich heute mit einem beschleunigten Wandel in ökologischer, ökonomischer, technischer und sozialer Hinsicht konfrontiert. So bedingt beispielsweise die wachsende Anzahl an verfügbaren Antriebssystemen im Fahrzeug flexible und skalierbare Fahrzeugarchitekturen, um die damit einhergehende Variantenvielfalt abbilden zu können. Für die Entwicklung einer Fahrzeugarchitektur ist typischerweise eine sog. Fahrzeugarchitekturabteilung in der technischen Entwicklung verantwortlich. Dies umfasst vorwiegend die geometrische Auslegung auf Gesamtfahrzeugebene in Form eines virtuellen Fahrzeug-Packages. Hierbei sind die geforderten Maße und Freigänge im Außen- und Innenbereich des Fahrzeug zu berücksichtigen, sowie weitere Randbedingungen wie beispielsweise crashspezifische, ergonomische, gesetzliche oder designspezifische Anforderungen. Aufgrund des steigenden Wettbewerbsdruckes infolge zunehmender Globalisierung und der steigenden Variantenvielfalt werden Maßnahmen getroffen, um die Entwicklungsprozesse effizienter zu gestalten und die erforderliche Entwicklungszeit zu verkürzen. Hierbei weist die frühe Konzeptphase eine besondere Bedeutung auf, da diese durch die frühe Stellung im Entwicklungsprozess den höchsten Produktbeeinflussungsgrad besitzt. Änderungen die zu späteren Zeitpunkten im Fahrzeugprojekt erfolgen müssen, sind stets mit hohen Kosten und einem entsprechenden Risiko verbunden. Daher wird versucht, eine möglichst hohe Parallelisierung und Vorverlagerung von Auslegungstätigkeiten in frühe Phasen der Auslegung zu forcieren, um die Entwicklung effizienter gestalten zu können und um mögliche Risiken in späteren Phasen der Entwicklung vorab systematisch und transparent identifizieren und bewerten zu können. Dies hat auch Auswirkungen auf die Architekturgestaltung. Aufgrund der steigenden Funktionsdichte in modernen Fahrzeugen ist es seitens der Fahrzeugarchitekturentwicklung erforderlich, neben typischen geometrischen Eigenschaften zunehmend funktionale Aspekte in die Bauraumplanung einfließen zu lassen. Da trotz des Trends zu steigenden Außenabmessungen, das Bauraumangebot nicht in gleichem Maße steigt, müssen Bauräume, die seitens der Fahrzeugarchitektur definiert werden, bereits eine grundsätzliche funktionale Validierung erfahren. Daher ist es notwendig schon in initialen Phasen der technischen Produktentwicklung belastbare Aussagen zu geometrischen wie funktionalen Produktmerkmalen des zu entwickelnden Konzeptes tätigen zu können, um Auswirkungen auf das Fahrzeug-Package zu beurteilen. Es resultiert der Wunsch diese unter Nutzung virtuell gestützter Methoden und Werkzeuge effizient handhaben zu können.

Aufgrund des Mangels an ganzheitlichen Ansätzen zur Gesamtfahrzeugkonzeption wird in der vorliegenden Dissertation ein Ansatz zur gesamtheitlichen virtuellen Gestaltung und Bewertung neuer Fahrzeugkonzepte präsentiert – das integrierte Konzeptmodell. Dabei stehen die Anforderungen einer Fahrzeugarchitekturabteilung im Zentrum der durchgeführten Überlegungen. Die primäre Zielsetzung des vorgestellten integrierten Konzeptmodells ist die konsistente Vernetzung vorhandener rechnergestützter Auslegungswerkzeuge, um aus Sicht der Gesamtfahrzeugarchitektur rasch und effizient Aussagen zu geometrischen und funktionalen Konzept Eigenschaften

tätigen zu können. Hierbei sind die funktionalen Eigenschaften eines Entwurfes für einen Fahrzeugarchitekten in Hinblick auf die Plausibilisierung definierter Maßketten und Bauräume von besonderem Interesse. Als Basis der Methode wird ein parametrisch-assoziatives Führungsmodell in Form eines speziell strukturierten CAD-basierten Konzeptmodells genutzt, das über verschiedene Schnittstellen geometrische und funktionale Modelle konsistent einbindet. Die komplette Parametrik wird gänzlich über die Automationschnittstelle des CAD-Programms gesteuert und verwaltet, wodurch die Einhaltung von Parametrierungsstandards und die Konsistenz von Verknüpfungen im Modell zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden können. Des Weiteren lässt sich dadurch eine flexible Parametrik umsetzen, was die Anpassung von Maßketten und mathematischen Beziehungen ermöglicht, wodurch sich die Parametrik den jeweiligen Projektgegebenheiten flexibel anpassen lässt. Der Ansatz kann modular verwendet werden, um sowohl den unterschiedlichen Konzeptfragestellungen, als auch den verschiedenen Reifestufen der Konzeptentwicklung Rechnung zu tragen. Des Weiteren stellt der Ansatz ein Vorgehensmodell zur systematischen Bewertung von technischen Fahrzeugeigenschaften vor. Die Nutzung von Prüfobjekten erlaubt eine Zuordnung der Informationen des integrierten Konzeptmodells zur erforderlichen Validierungen im Rahmen der Fahrzeugkonzeption. Durch die automationsgestützte Überprüfung von erforderlichen Zielen sowie der Einführung einer standardisierten Bewertungssprache können die durchgeführten Analysen sowie darauf aufbauende Aussagen konsistent im integrierten Konzeptmodell gespeichert werden. Auf diese Weise wird u. a. die Sicherung des Auslegungswissens im Modell ermöglicht. Um mögliche Entscheidungen auf Basis durchgeführter Bewertungen nachvollziehen zu können, sind den jeweiligen Prüfobjekten Maßnahmen zugeordnet, welche eine verbale Beschreibung möglicher Konsequenzen für das Konzept beinhalten. Die zugehörige Sicherungsstrategie des integrierten Konzeptmodells erlaubt eine parametrisch konsistente Archivierung der Daten des integrierten Konzeptmodells und stellt so die Wiederverwendbarkeit der Modelle, sowie des darin enthaltenen Wissens sicher. Um die Integration des vorgestellten integrierten Konzeptmodells in bestehende Auslegungsprozesse zu ermöglichen, wurde ein Workflow-Modell entwickelt. Dieses ermöglicht die gezielte Zuordnung von Informationen aus dem integrierten Konzeptmodell zu definierten Workflows und ermöglicht dadurch die prozessgerechte Führung in der Entwicklung. Neben den Workflows werden Meilensteinobjekte in Kombination mit sog. „Schleusen“ verwendet, um Qualitätskriterien zur Steuerung des Reifegrades der verschiedenen Konzeptentwicklungsstufen definieren zu können. Diesen können Bewertungen aus dem Bewertungsmodell zugeordnet werden, wodurch sich eine effiziente Prozesssteuerung auf Basis des integrierten Konzeptmodells realisieren lässt.

Die praktische Anwendbarkeit des integrierten Konzeptmodells wurde anhand des prototypischen Entwicklungswerkzeugs *ConceptCar* in Fahrzeugprojekten bei den Industriepartnern entwicklungsbegleitend validiert. Die Umsetzung erfolgte auf Basis des CAD-Systems CATIA V5, sowie durch die Nutzung weiterer kommerzieller und offener Software-Produkte, die bei den Industriepartnern eingesetzt wurden. Das Entwicklungswerkzeug ist als Framework konzipiert und gliedert sich in mehrere Sub-Frameworks. Den Kern des Ansatzes repräsentiert ein parametrisch-assoziatives Führungsmodell – das *Geometrie-Framework*. Dieses ist entsprechend funktionaler und inhaltlicher Anforderungen gegliedert. Zur Darstellung und Bewertung von Bauräumen und maßlichen Gegebenheiten beinhaltet das *Geometrie-Framework* 3D-Proportionsmodelle, welche eine vereinfachte dreidimensionale Repräsentation des Fahrzeug-Exterieurs und des Innenraums umfassen. Diese sind als Flächenmodelle ausgeführt, um eine hohe Flexibilität und Stabilität bei Parametervariationen zu gewährleisten. Die Parametrik des CAD-Modells wird vollständig durch das Konzeptwerkzeug gesteuert und verwaltet. Durch die Automatisierung und Standardisierung

der Modellparametrik lässt sich die Datenqualität und Konsistenz durchgängig sicherstellen, da diese nicht vom jeweiligen Verständnis unterschiedlicher Anwender und Anwenderinnen abhängig ist. Des Weiteren kann dadurch eine flexible Parametrik realisiert werden, wodurch sich Beziehungen zwischen Parametern flexibel an die jeweilige maßliche Fragestellung anpassen lassen. So lässt sich etwa der Radstand als Steuerungsgröße nutzen, oder kann als Ergebnis einer Maßkette resultieren. Auf diese Weise sind auch Anwender, die kein tiefgehendes Wissen in Hinblick auf parametrisch-assoziative Methoden besitzen, in der Lage die Parametrik des Modells an die eigenen Bedürfnisse anzupassen und zu erweitern. Die Einbindung funktionaler Produktmerkmale wird über das sog. *Funktions-Framework* in Form einer EXCEL-Tabelle realisiert. Diese umfasst eine Auflistung aller Funktionen, die im Kontext des integrierten Konzeptmodells genutzt werden können. Eine Funktion besteht aus dem Pfad zum jeweiligen Skript oder Modell, der Zuordnung erforderlicher Eingangsdaten und zu ermittelnder Ausgangsparameter sowie der Festlegung entsprechender Ablagepfade. Dadurch steht eine standardisierte informationstechnologische Funktionsbeschreibung zur Verfügung, die alle Formen von MATLAB/Simulink-Modellen bis hin zu tabellenbasierten Berechnungen integrieren kann.

Durch die übergreifende Wirksamkeit der flexiblen Parametrik kann dieses Konzept auch auf funktionaler Ebene greifen. So lässt sich beispielsweise ein aus fahrdynamischer Sicht wünschenswerter Radstand als Zielwert errechnen und im geometrischen Modell zur Steuerung nutzen. Aufgrund der Vielzahl an Parametern und Beziehungen, die im integrierten Konzeptmodell erforderlich sind, wurden fahrzeugtypspezifische Vorlagen bereitgestellt, um eine effiziente und konsistente Bedatung sicherzustellen und eine rasche Konzeptdefinition zu ermöglichen. Die Vorlagen beinhalten fahrzeugspezifische Abmessungen, das parametrische Verhalten der Maßketten, sowie erforderliche Gewichtswerte für die wichtigsten Fahrzeugkomponentengruppen. Die abstrakten Software-Funktionen, wie etwa das Kontrollmodell, das Bewertungsmodell oder die Datenschnittstellen, wurden in der Skriptsprache VBA in CATIA V5 implementiert. Um eine effiziente und intuitive Steuerung des Konzeptwerkzeugs zu ermöglichen, wurden grafische Benutzerschnittstellen implementiert, die eine kontextuelle und benutzerspezifische Anzeige der Konzeptinformationen ermöglichen.

In der praktischen Anwendung des Konzeptwerkzeugs *ConceptCar* konnte ein hoher Mehrwert für die technische Entwicklung ausgewiesen werden. Im Aufbau von Konzepten, die eine hohe Affinität zu konventionellen Fahrzeugen aufweisen lassen sich in Verbindung mit den Fahrzeugvorlagen rasch und effizient Proportionsmodelle für die Abschätzung von Bauraumerfordernissen und -gegebenheiten aufbauen. Im Falle von Fahrzeugen mit abweichender Topologie, können die Vorlagen ebenfalls genutzt werden, allerdings in reduziertem Umfang, da die Vorlagen auf die Darstellung heute typischer Fahrzeugformen ausgelegt sind. Des Weiteren kann eine Anpassung des geometrischen Inhaltes der Proportionsmodelle erforderlich sein. So konnte etwa in der VW-Konzernforschung für das Konzeptfahrzeug VW Nils eine Reduktion des geometrischen Modellierungsaufwandes von mehreren Tagen auf wenige Stunden erzielt werden.

In Hinblick auf die funktionale Konzeptauslegung erweist sich das Massenmanagement als elementarer Baustein. Durch das Massenmanagement in Verbindung mit der vorgestellten Massenstruktur im CAD lassen sich effizient erste Prognosen zur Lage des Fahrzeugschwerpunktes tätigen. Dies ermöglicht die Überprüfung des Fahrzeug-Packages aus funktionaler Perspektive, da der Fahrzeugschwerpunkt wesentliche Fahrzeugfunktionen, wie etwa das fahrdynamische Verhalten, die Steigfähigkeit oder die Kippstabilität beeinflusst. Unter Einbeziehung funktionaler Zielwerte lassen sich so Rückschlüsse auf die grundlegende funktionale Stimmigkeit des Fahrzeug-

Packages schließen. Des Weiteren lassen sich durch die integrierte funktionale Betrachtung weitere Zielwerte für funktionale Produktmerkmale ableiten, welche sich durch die involvierten technischen Fachbereiche weiterverwenden lassen. Dadurch kann ausgehend von der Fahrzeugarchitektur in Richtung der verantwortlichen Fachbereiche und vice versa bereits in der frühen Konzeptphase eine effiziente bidirektionale Kommunikation über geometrische und funktionale Zielwerte realisiert werden. Das Sichten- und Klassifikationsmodell erlaubt die inhaltspezifische sowie prozessspezifische Nutzung von Sichten, um erforderliche Inhalte entsprechend filtern und auf die wesentlichen Elemente reduzieren zu können. Beispielsweise wurde eine typische Start-sicht implementiert, welche die wesentlichen geometrischen Auslegungsparameter, wie etwa die Sitzposition und zentrale Fahrzeugabmessungen beinhaltet, die zu Beginn eines Konzeptes erforderlich sind. In Kombination mit dem Workflowmodell, konnte auf diese Weise eine „geführte“ Auslegung realisiert werden. Hierzu wird die Konzeptionsaufgabe in entsprechende Teilschritte zerlegt und in Form von sog. *Workflow-Objekten* abgebildet. Durch die sequentielle Aneinanderreihung geeigneter *Workflow-Objekte* lässt sich der jeweilige Entwicklungsprozess abbilden. Die zugehörigen *Meilensteinobjekte* ermöglichen die Zuordnung definierter Kriterien zu einem Workflow-Schritt, wodurch in Verbindung mit dem Bewertungsmodell und darauf aufbauender Maßnahmen ein wirkungsvolles Instrument für die technische Konzeptentwicklung bereitsteht.

In prozessualer Hinsicht wurde die Einbindung des Design-Prozesses sowie der Berechnung stellvertretend in Form eines FE-Rohbaumodells untersucht. Für den Design-Prozess werden in der frühen Phase Proportionsmodelle sowie erforderliche ergonomische, maßliche und gesetzliche geometrische Vorgaben in Form von Drahtgeometrie und Proportionsmodellen der Design-Abteilung zur Verfügung gestellt. Dadurch werden dem Design-Ingenieur architekturrelevante geometrische Informationen effizient bereitgestellt, die in der jeweiligen Design-Software weiter verarbeitet werden können. Die entstehenden Design-Flächen werden in Form neutraler Flächenmodelle in das integrierte Konzeptmodell eingelesen und können entweder im Sinne einer Vorgabe weiterverarbeitet werden, oder es lassen sich Abmessungen wie etwa die Fahrzeughöhe oder die Fahrzeugbreite automationsgestützt ableiten. In Hinblick auf die Einbindung der Berechnung wurde ein in SFE-CONCEPT modelliertes Rohbaumodell über sog. *Influence Points* eingebunden. Diese steuern die Lage der Schnitte, welche die 3D-Strukturelemente des Rohbaus und damit dessen Gestalt, steuern. Dadurch passt sich das Rohbaumodell bei Änderungen in zur Gestalt der verknüpften Proportionsmodelle automatisch an. Hierbei zeigt sich allerdings auch, dass mit zunehmendem Detailgrad der Rohbaugeometrie eine effiziente Steuerung über das integrierte Konzeptmodell nicht mehr möglich ist, da es immer wieder zu Aktualisierungsschwierigkeiten im Rohbaumodell kommt.

Zusammenfassend lässt sich für die Verwendung eines integrierten Konzeptmodells für die technische Entwurfsgestaltung ein großes Potential erkennen. Die Proportionsmodelle ermöglichen rasche Aussagen zu Maßketten und der Gestalt und Ausdehnung von Bauräumen im Fahrzeug. Durch die vollständige Kontrolle und Verwaltung der Parametrik sowie der verschiedenen Beziehungen zwischen den Modellparametern und die implementierten geometrischen Kontrollmechanismen, lassen sich die Vorteile der parametrisch-assoziativen Konstruktion effizient nutzen. Die bereitgestellten Vorlagen ermöglichen eine rasche Konzeptdefinition und die effiziente Nutzung des integrierten Konzeptmodells selbst bei geringem Umfang und Reifegrad der technischen Randbedingungen. Die offene Framework-basierte Struktur des Werkzeugs unterstützt eine flexible Erweiterung um neue Funktionen und Modelle, wodurch die Nutzbarkeit auch für zukünftige Aufgabenstellungen und Forschungsfragen gewährleistet werden kann. Erweiterungsmöglichkei-

ten in geometrischer Hinsicht ergeben sich vor allem im Bereich der Implementierung alternativer Proportionsmodelle, sowie Funktionen zur automationsgestützten Generierung von bewegungsinduzierten Hüllgeometrien, wie etwa Radhüllen oder Sitzhüllen.



Anhang

A.1 Fahrzeugvorlagen

Für die effiziente Bedatung der geometrischen Parameter des integrierten Konzeptmodells wurden fahrzeugklassenspezifische Vorlagen in der Parameterdatenbank hinterlegt, die in Abb. A.1 dargestellt sind. Das Ziel der Vorlagen ist es, die wesentlichen bauraumbestimmenden Proportionen wiederzugeben und kein Fahrzeug formalästhetisch nachzubilden.

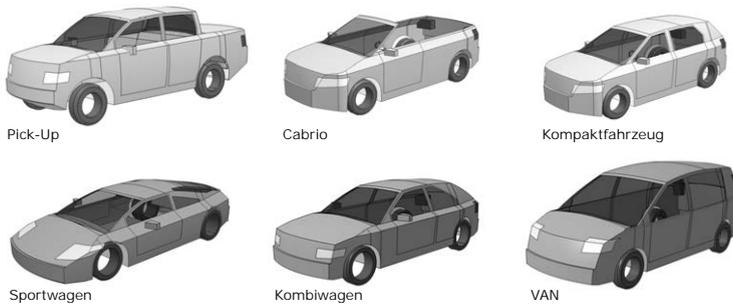


Abb. A.1: Auszug an parametrischen Karosserievorlagen

Die aufgelisteten Vorlagen sind zudem jeweils in einer generischen Variante verfügbar. Diese unterscheiden sich dadurch, dass für die Radien bombierter Flächen sehr hohe Werte definiert sind, um eine höhere geometrische Stabilität im Falle starker Parametervariationen zu erreichen. Die Modelle sind so ausgeführt, dass über entsprechende Optionsparameter verschiedene Darstellungsformen gewählt werden können:

- Hard-Top
- Cabrio
- Anzahl Türen (2/4)

Durch die flexible Optionsstruktur lassen sich weitere Optionen bei Bedarf hinzufügen.

A.2 Einfluss des Abstandes auf das Massenträgheitsmoment

Im integrierten Konzeptmodell werden für die Darstellung von Masse vereinfachte Körper verwendet. Das Massenträgheitsmoment dieser Körper bezüglich des Fahrzeugschwerpunktes ergibt

sich gemäß dem Satz von Steiner aus der Summe des Massenträgheitsmomentes um den körpereigenen Schwerpunkt und jenem durch eine parallele Achse im Abstand r vom Fahrzeugschwerpunkt (s. Gl. 5.5 und Gl. A.2). Im Folgenden soll gezeigt werden, dass für beliebige Körper bereits bei kleinen Abständen r , das Massenträgheitsmoment um den Schwerpunkt des Körpers vernachlässigt werden kann. Hierzu soll ein Kubus mit der Kantenlänge $a = 200\text{ mm}$ und der Dichte $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$ betrachtet werden. Das Basisträgheitsmoment um den Schwerpunkt Θ_S in Richtung der z -Achse des Körpers ergibt sich zu:

$$\Theta_S = \frac{1}{6} \cdot m \cdot a^2 = \frac{1}{6} \cdot \rho \cdot a^3 \cdot a^2 = 0.05333\text{ kg m}^2 \quad (\text{A.1})$$

Bei der gewählten Kantenlänge von 200 mm ergibt sich damit ein Wert von $0,053\text{ kg m}^2$. Das gesuchte Massenträgheitsmoment Θ um die z -Achse und durch den Gesamtschwerpunkt des Fahrzeugs ergibt sich nach dem Satz von Steiner zu:

$$\Theta = \Theta_S + \Theta_R = \frac{1}{6} \cdot m \cdot a^2 + m \cdot r^2 \quad (\text{A.2})$$

Für die Untersuchung wurde eine Variation des Abstandes von $r = 0$ bis 2 m durchgeführt. Wie in Tab. A.1 gezeigt, ist das schwerpunktbezogene Massenträgheitsmoment bereits ab einem Abstand von $r = 300\text{ mm}$ mit ca. 7% vernachlässigbar.

Tab. A.1: Einfluss des Abstandes d auf das Gesamtmassenträgheitsmomentes eines Quaders mit einer Kantenlänge $a = 200\text{ mm}$

Θ_S [kg m ²]	r [m]	Θ [kg m ²]	$\Theta - \Theta_S$ [kg m ²]	Θ_S/Θ [%]
0,05333333	0	0,05333333	0	100
0,05333333	0,001	0,053341333	$8 \cdot 10^{-6}$	99,99
0,05333333	0,01	0,05413333	0,0008	98,52
0,05333333	0,1	0,1333333	0,08	40
0,05333333	0,3	0,7733333	0,72	6,90
0,05333333	0,4	1,333333	1,28	4
0,05333333	0,5	2,053333	2	2,6
0,05333333	1	8,05333333	8	0,66
0,05333333	2	32,053333	32	0,17

A.3 Euler-Winkel

Im Automobilbau werden vielfach sog. Euler-Winkel anstatt der Transformationsmatrizen zur Beschreibung der Orientierung angegeben. Hierbei wird die Orientierung im Raum durch drei Winkel R_x, R_y, R_z angegeben. Die Drehung im Raum über drei Winkel ist nicht kommutativ, d. h. das Resultat der Gesamtdrehung ist stets von der gewählten Reihenfolge der Drehungen abhängig. Im Automobilbau hat sich die folgende Konvention etabliert. Die erste Drehung R_x erfolgt um die absolute x -Achse, die zweite Drehung R_y um die absolute y -Achse und die letzte Drehung R_z erfolgt um die absolute z -Achse. Damit kann die Gesamtdrehung entsprechend Gl.

A.3 geschrieben werden:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(R_x) & -\sin(R_x) \\ 0 & \sin(R_x) & \cos(R_x) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \cos(R_y) & 0 & -\sin(R_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(R_y) & 0 & \cos(R_y) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \cos(R_z) & -\sin(R_z) & 0 \\ \sin(R_z) & \cos(R_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T \quad (\text{A.3})$$

Die gesuchten Drehwinkel ergeben sich damit zu:

$$\begin{aligned} R_y &= -\text{asin}(e_{xz}) \\ R_x &= \text{asin}\left(\frac{e_{yz}}{\cos(R_y)}\right) \\ R_z &= \text{asin}\left(\frac{e_{xy}}{\cos(R_y)}\right) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Zu beachten ist hierbei der sog. Gymbal-Lock-Effekt; dieser resultiert bei Konstellationen in denen zwei Achsen fluchten.

A.4 Parameter des Software-Prototypen

In Tab. A.2 sind alle Parameter angeführt, die im Software-Prototypen *ConceptCar* verwendet wurden. Der Software-Prototyp wurde in englischer Sprache aufgrund Vorgaben seitens der beiden Industriepartner ausgeführt. Daher sind alle Bezeichnungen und Erläuterungen in englischer Sprache verfasst. In der Spalte *Klassifikation* ist die Standard-Klassifikation vermerkt, welcher der Parameter initial zugeordnet ist.

Table A.2: Parameter des Software-Prototypen *ConceptCar*

Kurzname	Name	Klassifikation	Typ	Einheit	Kommentar
A0022	Ackerman angle front	Chassis	Angle	°	
A0023	Delta ackerman outside front	Chassis	Angle	°	
A0024	Delta ackerman inside front	Chassis	Angle	°	
A0025	Ackerman angle rear	Chassis	Angle	°	
A0026	Delta ackerman outside rear	Chassis	Angle	°	
A0027	Delta ackerman inside rear	Chassis	Angle	°	
VBT	Switches between cabrio and hard-top body.	Description	String	-	Switches between cabrio and hard-top. The parameter value only affects visibility.
OEM	Manufacturer's name	Description	String	-	Manufacturer of the vehicle in the current project (optional parameter).
VN	Vehicle name	Description	String	-	Vehicle name in the current project (optional parameter).
AutoShift	Automatic gearshift	Drivetrain	String	-	Automatic gearshift (yes/no). This parameter has no effect on the corresponding CAVA parameter!
Engine	Vehicle engine type	Drivetrain	String	-	Description parameter to be used for adding additional information on the vehicle's motorization.
Gear	Vehicle gear type	Drivetrain	String	-	Description parameter to be used for adding additional information on the vehicle's gear system.
BatX	Battery x-position	Drivetrain	Length	mm	X-position of the battery package model.
BatY	Battery y-position	Drivetrain	Length	mm	Y-position of the battery package model.
BatZ	Battery z-position	Drivetrain	Length	mm	Z-position of the battery package model.
BatL	Battery length	Drivetrain	Length	mm	Length of the battery package model.
BatW	Battery width	Drivetrain	Length	mm	Width of the battery package model.
BatH	Battery height	Drivetrain	Length	mm	Height of the battery package model.
V0001	Engine volume	Drivetrain	Volume	m ³	Represents a volume geometry derived by generating a translation from the vehicle's outer hull and a cutting plane.

BatA1	Position angle battery z	Drivetrain	Angle	°	
BatA2	Position angle battery y	Drivetrain	Angle	°	
BatA3	Position angle battery x	Drivetrain	Angle	°	
SpWheel	Spare wheel parameter	Equipment	String	-	Definition parameter for spare wheel. This parameter is used in context with the wheel calculator and not intended to be altered by the user.
WCtrFX	Wheel center point x-coordinate front	Exterior	Length	mm	Wheel center point x-coordinate front defined within vehicle CAD absolute coordinate system.
WCtrFY	Wheel center point y-coordinate front	Exterior	Length	mm	Wheel center point y-coordinate front defined within vehicle CAD absolute coordinate system.
WCtrFZ	Wheel center point z-coordinate front	Exterior	Length	mm	Wheel center point z-coordinate front defined within vehicle CAD absolute coordinate system.
WCtrRX	Wheel center point x-coordinate rear	Exterior	Length	mm	Wheel center point x-coordinate rear defined within vehicle CAD absolute coordinate system.
WCtrRY	Wheel center point y-coordinate rear	Exterior	Length	mm	Wheel center point y-coordinate rear defined within vehicle CAD absolute coordinate system.
WCtrRZ	Wheel center point z-coordinate rear	Exterior	Length	mm	Wheel center point z-coordinate rear defined within vehicle CAD absolute coordinate system.
WCtrFX1	Relative wheel center point x-coordinate front loading plane 1	Exterior	Length	mm	Wheel center point x-coordinate within loading plane 1 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrFY1	Relative wheel center point y-coordinate front loading plane 1	Exterior	Length	mm	Wheel center point y-coordinate within loading plane 1 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrFZ1	Relative wheel center point z-coordinate front loading plane 1	Exterior	Length	mm	Wheel center point z-coordinate within loading plane 1 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrRX1	Relative wheel center point x-coordinate rear loading plane 1	Exterior	Length	mm	Wheel center point x-coordinate within loading plane 1 rear relative to rear wheel center point grid parallel.
WCtrRY1	Relative wheel center point y-coordinate rear loading plane 1	Exterior	Length	mm	Wheel center point y-coordinate within loading plane 1 rear relative to rear wheel center point grid parallel.
WCtrRZ1	Relative wheel center point z-coordinate rear loading plane 1	Exterior	Length	mm	Wheel center point z-coordinate within loading plane 1 rear relative to rear wheel center point grid parallel.
WCtrFX2	Relative wheel center point x-coordinate front loading plane 2	Exterior	Length	mm	Wheel center point x-coordinate within loading plane 2 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrFY2	Relative wheel center point y-coordinate front loading plane 2	Exterior	Length	mm	Wheel center point y-coordinate within loading plane 2 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrFZ2	Relative wheel center point z-coordinate front loading plane 2	Exterior	Length	mm	Wheel center point z-coordinate within loading plane 2 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrRX2	Relative wheel center point x-coordinate rear loading plane 2	Exterior	Length	mm	Wheel center point x-coordinate within loading plane 2 rear relative to rear wheel center point grid parallel.
WCtrRY2	Relative wheel center point y-coordinate rear loading plane 2	Exterior	Length	mm	Wheel center point y-coordinate within loading plane 2 rear relative to rear wheel center point grid parallel.
WCtrRZ2	Relative wheel center point z-coordinate rear loading plane 2	Exterior	Length	mm	Wheel center point z-coordinate within loading plane 2 rear relative to rear wheel center point grid parallel.
WCtrFX3	Relative wheel center point x-coordinate front loading plane 3	Exterior	Length	mm	Wheel center point x-coordinate within loading plane 3 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrFY3	Relative wheel center point y-coordinate front loading plane 3	Exterior	Length	mm	Wheel center point y-coordinate within loading plane 3 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrFZ3	Relative wheel center point z-coordinate front loading plane 3	Exterior	Length	mm	Wheel center point z-coordinate within loading plane 3 front relative to front wheel center point grid parallel.
WCtrRX3	Relative wheel center point x-coordinate rear loading plane 3	Exterior	Length	mm	Wheel center point x-coordinate within loading plane 3 rear relative to rear wheel center point grid parallel.
WCtrRY3	Relative wheel center point y-coordinate rear loading plane 3	Exterior	Length	mm	Wheel center point y-coordinate within loading plane 3 rear relative to rear wheel center point grid parallel.
WCtrRZ3	Relative wheel center point z-coordinate rear loading plane 3	Exterior	Length	mm	Wheel center point z-coordinate within loading plane 3 rear relative to rear wheel center point grid parallel.

WDF	Wheel diameter front	Exterior	Length	mm	Non deformed wheel diameter.
WDR	Wheel diameter rear	Exterior	Length	mm	Non deformed wheel diameter.
WCaF	Wheel camber front wheel	Exterior	Angle	°	
WCaR	Wheel camber rear wheel	Exterior	Angle	°	
WCaF1	Wheel camber front wheel in loading plane 1	Exterior	Angle	°	
WCaR1	Wheel camber rear wheel in loading plane 1	Exterior	Angle	°	
WCaF2	Wheel camber front wheel in loading plane 2	Exterior	Angle	°	
WCaR2	Wheel camber rear wheel in loading plane 2	Exterior	Angle	°	
WCaF3	Wheel camber front wheel in loading plane 3	Exterior	Angle	°	
WCaR3	Wheel camber rear wheel in loading plane 3	Exterior	Angle	°	
WToeF	Wheel toe/in out front wheel	Exterior	Angle	°	
WToeR	Wheel toe/in out rear wheel	Exterior	Angle	°	
WToeF1	Wheel toe/in out front wheel loading plane 1	Exterior	Angle	°	
WToeR1	Wheel toe/in out rear wheel loading plane 1	Exterior	Angle	°	
WToeF2	Wheel toe/in out front wheel loading plane 2	Exterior	Angle	°	
WToeR2	Wheel toe/in out rear wheel loading plane 2	Exterior	Angle	°	
WToeF3	Wheel toe/in out front wheel loading plane 3	Exterior	Angle	°	
WToeR3	Wheel toe/in out rear wheel loading plane 3	Exterior	Angle	°	
RstatFront	Static tyre radius front	Exterior	Length	mm	Static tyre radius front grid parallel.
RstatRear	Static tyre radius rear	Exterior	Length	mm	Static tyre radius rear grid parallel.
RstatFront1	Static tyre radius front loading plane 1	Exterior	Length	mm	Static tyre radius front in loading plane 1.
RstatRear1	Static tyre radius rear loading plane 1	Exterior	Length	mm	Static tyre radius rear in loading plane 1.
RstatFront2	Static tyre radius front loading plane 2	Exterior	Length	mm	Static tyre radius front in loading plane 2.
RstatRear2	Static tyre radius rear loading plane 2	Exterior	Length	mm	Static tyre radius rear in loading plane 2.
RstatFront3	Static tyre radius front loading plane 3	Exterior	Length	mm	Static tyre radius front in loading plane 3.
RstatRear3	Static tyre radius rear loading plane 3	Exterior	Length	mm	Static tyre radius rear in loading plane 3.
PRPX	X-coordinate of the vehicle's pedal reference point	Exterior	Length	mm	X-coordinate of the vehicle's pedal reference point.
PRPY	Y-coordinate of the vehicle's pedal reference point	Exterior	Length	mm	Y-coordinate of the vehicle's pedal reference point.
PRPZ	Z-coordinate of the vehicle's pedal reference point	Exterior	Length	mm	Z-coordinate of the vehicle's pedal reference point.
L101	Wheelbase (1)	Exterior	Length	mm	The longitudinal (horizontal to grid) distance from the front wheel centerline to the rear wheel centerline. If a vehicle has different wheelbases left and right then only the left side is to be given.[40]
L102-1	Tyresize front	Exterior	String	-	Size of the base front tire.[40]
L102-1-M	Maximum tyresize front	Exterior	String	-	Size of the optional front tire with largest width.[40]
L102-2	Tyresize rear	Exterior	String	-	Size of the base rear tire.[40]
L102-2-M	Maximum tyresize rear	Exterior	String	-	Size of the optional rear tire with largest width.[40]
L103	Vehicle length overall (1)	Exterior	Length	mm	The maximum longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost point and the rearmost point on the vehicle, including the standard equipped bumper, recovery hooks, bumper guards, and/or rub strips; but excludes any attached front license plate holder.[40]
L104	Overhang front	Exterior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from the centerline of the front wheels to the foremost point on the vehicle, including the standard equipped bumper, recovery hooks, bumper guards, and/or rub strips; but excludes any attached front license plate holder.[40]

L105	Overhang rear	Exterior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from the centerline of the rear wheels to the rearmost point on the vehicle, including the standard equipped bumper, recovery hooks, bumper guards, and/or rub strips, but excluding any attached license plate holder. If a vehicle has different wheel-bases left and right then only the left side is to be given.[40]
L0001	X-coordinate cowl point	Exterior	Length	mm	Measured in the vehicle CAD reference coordinate system.
L0002	Distance vehicle rear to rearmost upper vehicle point	Exterior	Length	mm	Distance vehicle rear to rearmost upper vehicle point.
L0003	Offset a-column front door	Exterior	Length	mm	Defines the offset value along x for the a-column.
L0004	Offset c-column rear door	Exterior	Length	mm	Defines the offset value along x for the c-column.
L0005	B-column to SgRP driver	Exterior	Length	mm	Defines the distance along x between the driver srp and the b-column reference point.
L0007	Distance front edge front door to SgRP driver	Exterior	Length	mm	Distance front edge front door to SgRP driver.
L0008	Distance rear door rear edge SgRP second	Exterior	Length	mm	Distance rear door rear edge SgRP second.
L0009	Width b-column	Exterior	Length	mm	Width of the b-column .
L0010	Depth front lamp	Exterior	Length	mm	Defines the lamp packages extension along x.
L0011	Depth rear lamp	Exterior	Length	mm	Defines the lamp packages extension along x.
L0014	Distance bonnet rear edge to cowl point	Exterior	Length	mm	Defines the distance along -x for the bonnet's rear edge referenced to the cowl point.
L0015	Position mirror edge	Exterior	Length	mm	X-coordinate of the side view mirror reference point.
L0018	X-coordinate deck point	Exterior	Length	mm	X-coordinate of the vehicle's deck point defined within the vehicle's absolute coordinate system.
L0019	Bumper length upper edge front	Exterior	Length	mm	Defines the length of the front bumper's upper edge along x.
L0020	Bumper length upper edge rear	Exterior	Length	mm	Defines the length of the rear bumper's upper edge along x.
L0021	Sweep length front	Exterior	Length	mm	Defines the length along x of the vehicle's front sweep.
L0022	Sweep length rear	Exterior	Length	mm	Defines the length along x of the vehicle's rear sweep.
L0023	Width door frame front and rear	Exterior	Length	mm	Defines the offset from the door reference surface boundary.
L0024	Distance SgRP driver side view mirrors	Exterior	Length	mm	Distance along x from the driver srp to the side view mirror reference point.
L0025	Distance SgRP co-driver side view mirrors	Exterior	Length	mm	Distance along x from the co-driver srp to the side view mirror reference point.
L0026	Depth side view mirror	Exterior	Length	mm	Defines the longitudinal extension in x for the side view mirror package geometry.
L0027	Distance vehicle rear to deck-point	Exterior	Length	mm	Defines the horizontal distance from the vehicle rear (L105) to the deckpoint.
W103	Vehicle width	Exterior	Length	mm	The maximum lateral distance between the widest points on the vehicle, including all standard equipped trim and hardware, except the mirrors.[40]
W114-L	Y-coordinate side view mirror driver	Exterior	Length	mm	The lateral distance from the zero y-plane to the widest point on the exterior mirror, including housing, adjusted for normal driving.[40]
W114-R	Y-coordinate side view mirror co-driver	Exterior	Length	mm	The lateral distance from the zero y-plane to the widest point on the exterior mirror, including housing, adjusted for normal driving.[40]
W116	Body width	Exterior	Length	mm	The lateral distance between the widest points of body in white. Excluded from this measurements are mirrors, door handles, marker and signal lamps, moldings, appliques and cladding. Running boards may be excluded if they do not run beyond the mirrors.[40]
W117	Body width at SgRP driver	Exterior	Length	mm	The maximum lateral distance between the natural shape of the vehicle through the SgRP-Front X plane, excluding door handles, running boards, door protection moldings, or any local protrusion.[40]

W120-1	Vehicle width with front-doors opened	Exterior	Length	mm	Measured with the front doors in the maximum hold-open position. The lateral distance between the widest points on the doors including all trim and hardware, except mirrors.[40]
W120-2	Vehicle width with rear-doors opened	Exterior	Length	mm	Same manner as W 120-1. For vehicles with only one second door, measure to the vehicle centerline.[40]
W144	Vehicle width with side view mirrors	Exterior	Length	mm	The maximum lateral distance between the widest points on the outside mirrors, or mirror housings, with the mirrors adjusted for normal driving.[40]
W145	Vehicle width with side view mirrors folded	Exterior	Length	mm	The maximum lateral distance between the widest points on the outside mirrors, or mirror housings, with the mirrors folded.[40]
W0001	Position front lamps	Exterior	Length	mm	Position front lamps measured from vehicle outside inwards.
W0002	Position rear lamps	Exterior	Length	mm	Position rear lamps measured from vehicle outside inwards.
W0004	Width side view mirror	Exterior	Length	mm	Width of the side view mirror taken from W145 towards the vehicle.
W0005	Distance vehicle width to DLO	Exterior	Length	mm	Defines the distance between the DLO reference points along y.
W0007	Inner offset a-column on windscreen	Exterior	Length	mm	Defines the offset on the windscreen base surface for creating the real windscreen.
W0008	Inner offset c-column on backlight	Exterior	Length	mm	Defines the offset on the backlight base surface for creating the real backlight.
H100-B	Body height	Exterior	Length	mm	The maximum distance on the body in white normal to ground. Exclude all hardware and trim from this measurement (e.g., roof racks, running lamps, antennas, spoilers, and aeroshields).[40]
H101-M	Maximum height	Exterior	Length	mm	The maximum distance on the vehicle including all hardware and trim (e.g. roof racks, running lamps, spoilers, etc.), or the fixed, non-removable portion of any antenna normal to ground.[40]
H110	Vehicle height tailgate opened	Exterior	Length	mm	The maximum distance between the rear closure (tail/liftgate, deck lid, etc.), in the maximum hold-open position, normal to ground, including all standard equipped accessories (emblems, wipers, antenna, etc.).[40]
H120-1	Cowl point to ground	Exterior	Length	mm	The minimum distance between the cowl point and ground.[40]
H130-1	Step-in height front	Exterior	Length	mm	The minimum distance from the lower door opening (top of the sill or floor) at the intersection of an x-plane 330 mm forward of SgRP - front to ground.[40]
H130-2	Step-in height rear	Exterior	Length	mm	The minimum distance from the lower door opening (top of the sill or floor) at the intersection of an x-plane 330 mm forward of SgRP - front to ground.[40]
H157	Ground clearance (3)	Exterior	Length	mm	The minimum distance from the underside of the vehicle to ground, excluding only the unsprung parts and assemblies (e.g., shock mounts, suspension mounts, wheels, etc.) Specify location and limiting component.[40]
H193	Lift out height	Exterior	Length	mm	The maximum distance (normal to ground) that must be overcome to remove items from the undepressed luggage, or cargo, compartment floor surface. Measured at vehicle centerline behind the last row of seating. For UCV or open air compartments, measure at vehicle centerline rearward of the last axle station.[40]
H196	Lift in height	Exterior	Length	mm	The maximum distance (normal to ground) that must be overcome to place items in/on the luggage, or cargo, compartment floor surface from outside the vehicle with the rear closure(s) in the open position. Measured at vehicle centerline, from the highest portion of the lower opening, including strikers, locking mechanisms, or any other obstruction to ground.[40]
H0001	Curb height front	Exterior	Length	mm	Curb height front measured in loading plane 3 (parameter not in use).
H0002	Curb height rear	Exterior	Length	mm	Curb height rear measured in loading plane 3 (parameter not in use).
H0003	Z-position bumper front	Exterior	Length	mm	Defines the z-position of the bumper's reference point.

H0004	Z-position bumper rear	Exterior	Length	mm	Defines the z-position of the bumper's reference point.
H0005	Roof offset for door cutting	Exterior	Length	mm	Defines the upper edge of the door geometry. The edge results from an intersection between an offset surface from the roof and the side wall.
H0006	Roof offset for windscreen upper edge	Exterior	Length	mm	Defines the upper edge of the wind screen geometry. The edge results from an intersection between an offset surface from the roof and the wind screen base surface.
H0007	Roof offset for backlight upper edge	Exterior	Length	mm	Defines the upper edge of the backlight geometry. The edge results from an intersection between an offset surface from the roof and the backlight base surface.
H0008	Z-position front lamps	Exterior	Length	mm	Defines the position along z for the reference point of the front lamp geometry.
H0009	Z-position lower edge rear lamps	Exterior	Length	mm	Defines the position along z for the reference point of the rear lamp geometry.
H0010	Z-position cowl point	Exterior	Length	mm	Defines the z-coordinate of the cowl point within the CAD coordinate system.
H0012	Z-position deck point	Exterior	Length	mm	Defines the z-coordinate of the deck point within the CAD coordinate system.
H0016	Height front lamps	Exterior	Length	mm	Defines the height of the front lamp package geometry.
H0018	Z-position upper edge rear lamps	Exterior	Length	mm	Defines the z-coordinate of the rear lamp's upper edge within the CAD coordinate system.
H0019	Z-position lower edge side view mirror driver	Exterior	Length	mm	Defines the z-coordinate of the side view mirror's lower edge within the CAD coordinate system.
H0020	Z-position upper edge side view mirror driver	Exterior	Length	mm	Defines the z-coordinate of the side view mirror's upper edge within the CAD coordinate system.
A116-1	Ramp angle front (3)	Exterior	Angle	°	The smallest angle in side view formed by the ground and the line tangent to the front tire static-loaded radius arc and the lowest fixed point on the underside of the vehicle forward of the front tire. Components designed to deflect, or are flexible, can be excluded, provided they return to their original position with no degradation of function. Designate the measurement point on drawing.[40]
A116-2	Ramp angle rear (3)	Exterior	Angle	°	The smallest angle in side view formed by the ground and the line tangent to the last axle laden tire static-loaded radius arc and the lowest fixed point on the underside of the vehicle rearward of the rear tire. Components designed to deflect, or are flexible, can be excluded, provided they return to their original position with no degradation of function. Designate the measurement point on drawing.[40]
A117	Inner angle (3)	Exterior	Angle	°	The supplement of an angle between two lines tangential to the front and rear tire static laden radii and intersecting at a point on the underside of the vehicle which defines the largest ramp over the vehicle can roll. Components designed to deflect, or are flexible, can be excluded, provided they return to their original position with no degradation of function. Limiting component to be designated.[40]
A122-1	Tumble home	Exterior	Angle	°	The angle from vertical of the front door windows (outside surface). Measured on the x-plane through SgRP - Front. For curved side glass, measure to a chord extending from the upper DGO to the lower DGO.[40]
A125-1	Front door opening angle	Exterior	Angle	°	The angle of the door between the closed and maximum holdopen position. Measured along the hinge axis.[40]
A125-2	Rear door opening angle	Exterior	Angle	°	The angle of the door between the closed and maximum holdopen position. Measured along the hinge axis.[40]
A130-1	Glazing angle windscreen	Exterior	Angle	°	The angle from vertical, measured from a 457 mm chord from the cowl point to the intersecting point on the exterior glazing surface at vehicle centerline. Use the upper limiting edge when the glazing surface is less than 457 mm.[40]

A130-2	Glazing angle backlight	Exterior	Angle	°	The angle from vertical, measured from a 457 mm chord from the deck point to the intersecting point on the exterior glazing surface at vehicle centerline. Use the upper limiting edge when the glazing surface is less than 457 mm.[40]
A0001	Inclination angle front	Exterior	Angle	°	Defines the inclination of the vehicle's front face. The angle is defined between the z-axis through the bumper front reference point and the tangent to the front face surface.
A0002	Inclination angle bonnet	Exterior	Angle	°	Defines the inclination of the vehicle's bonnet surface. The angle is defined between the x-axis through the bonnet reference point (rear edge) and the tangent to the bonnet surface.
A0003	Inclination angle back	Exterior	Angle	°	Angle measured between the tangent to the back surface in the deck point.
A0005	Inclination angle wheel cuttings	Exterior	Angle	°	Defines the center angle between the edges of the wheel housing side wall cut.
A0006	Inclination angle b-column	Exterior	Angle	°	Defines the inclination angle of the b-column. The angle is defined between the z-axis and the b-column axis.
A0007	Angle b-column difference rear	Exterior	Angle	°	Allows to set a delta to the inclination angle of the b-column for the rear door front edge.
A0008	Inclination angle front edge front door	Exterior	Angle	°	Inclination angle front edge front door (parameter not in use).
A0009	Inclination angle rear edge rear door	Exterior	Angle	°	Inclination angle rear edge rear door.
A0010	Inclination angle upper edge sidewall	Exterior	Angle	°	Inclination angle upper edge sidewall.
A0012	Inclination angle rear edge mirror heart	Exterior	Angle	°	Inclination angle rear edge mirror heart.
A0013	Inclination angle side wall	Exterior	Angle	°	The angle is defined between the vertical line through the sidewall reference point and the tangent to the sidewall lower surface.
A0014	Inclination angle side edge front lamps	Exterior	Angle	°	Inclination angle side edge front lamps.
A0016	Inclination angle lower edge front lamps	Exterior	Angle	°	Inclination angle lower edge front lamps.
A0018	sweep angle front	Exterior	Angle	°	Defines the vehicle's front sweep angle. The angle is defined between the x-axis of the CAD reference coordinate system and the sweep line geometry. .
A0019	sweep angle rear	Exterior	Angle	°	Defines the vehicle's rear sweep angle. The angle is defined between the x-axis of the CAD reference coordinate system and the sweep line geometry. .
A0021	Inner inclination angle rear lamps	Exterior	Angle	°	Inner inclination angle rear lamps above deck point.
D102	Minimum turning circle	Exterior	Length	mm	Diameter of the minimum cylindrical envelope in which the vehicle can drive a circle with the front wheels at maximum lock (between walls). If different between left and right turn, the larger one is reported.[40]
R0001	Front bumper lower edge radius	Exterior	Length	mm	Front bumper lower edge radius (deprecated).
R0002	Bending radius front face along Y	Exterior	Length	mm	Bending radius front face along y.
R0004	Bending radius bonnet along Y	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the bonnet surface along the y-direction of the CAD reference coordinate system.
R0006	Bending radius roof along Y	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the roof surface along the y-direction of the CAD reference coordinate system.
R0007	Rear bumper lower edge	Exterior	Length	mm	Rear bumper lower edge (deprecated).
R0008-1	Offset wheel cut chassis front	Exterior	Length	mm	Defines the offset for the chassis wheel cut front. The offset value is added to the vehicle's wheel diameter front.
R0009	Bending radius windscreen along guide curve	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the windscreen along it's supporting guide curve. .
R0011	Bending radius side wall	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the side wall lower part. The reference point is derived by an intersection of the vehicle width (defined by W103) and the upper inclination line of the side wall.
R0012	Bending radius backlight along guide curve	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the backlight along it's supporting guide curve.
R0013	Bending radius bonnet along X	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the bonnet section along it's guide curve.

R0014	Bending radius windscreen along Y	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the windscreen's guide curve.
R0015	Bending radius backlight along Y	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the backlight's guide curve.
R0018	Sweep radius front	Exterior	Length	mm	Defines the radius between the sweep line and the remaining vehicle.
R0019	Sweep radius back	Exterior	Length	mm	Defines the radius between the sweep line and the remaining vehicle.
R0020	Bending radius roof along X	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the roof section along x.
R0021	Bending radius front in z-direction	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the front in z-direction.
R0022	Bending radius rear in z-direction	Exterior	Length	mm	Defines the bending radius of the rear in z-direction.
R0023	Offset rear door - rear wheel cutting	Exterior	Length	mm	Offset rear door - rear wheel cutting.
R0024	Bending radius side window	Exterior	Length	mm	Bending radius side window.
R0027	Bending radius luggage compartment lid along Y	Exterior	Length	mm	Bending radius luggage compartment lid along y.
S101	Windscreen surface area	Exterior	Area	m ²	The surface area of the windscreen within the design glass outline (DGO) as defined.[40]
S102	Side glass surface area	Exterior	Area	m ²	The total surface area within the design glass outline (DGO) as defined in 3-3.13 of any glazing surface on the side of vehicle, including front and rear doors, vents and rear quarter window.[40]
S103	Backlight/tailgate surface area	Exterior	Area	m ²	The surface area of the backlight within the design glass outline (DGO).[40]
S104	Total glass surface area	Exterior	Area	m ²	Total of all front, side and rear exposed areas (S101 + S102 + S103).[40]
H0021	Offset lower edge front door	Exterior	Length	mm	Vertical distance between vehicle bottom and lower edge of the door.
H0022	Offset lower edge rear door	Exterior	Length	mm	Vertical distance between vehicle bottom and lower edge of the door.
L0028	Checks the offset between deck point and rear edge	Exterior	Length	-	Checks the offset between deck point and rear edge.
L0029	Cowl-Point relative to front	Exterior	Length	mm	Cowl-Point relative to front.
A0020	Rotation angle for c-column	Exterior	Angle	°	Sets the inclination angle for the offset of the c-column to allow different angles from the rear door rear edge.
W101-1	Track front	Chassis	Length	mm	The lateral distance between the centerlines of the front tires at the ground, including camber angle.[40]
W101-2	Track rear	Chassis	Length	mm	The lateral distance between the centerlines of the rear tires at the ground, including camber angle. If there are dual rear wheels, measure from the midway points between the inner and outer tires.[40]
A140-L	Obstruction angle a-pillar left	Interior	Angle	°	Angle of obstruction of the A-Pillar on driver side, as defined in Motor Vehicle Driver Forward Visibility - EEC77/649.[40]
A140-R	Obstruction angle a-pillar right	Interior	Angle	°	Angle of obstruction of the opposite side A-Pillar, as defined in Motor Vehicle Driver Forward Visibility - EEC77/649.[40]
L31-1L	X-coordinate SgRP driver	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the driver.[40]
W20-1L	Y-coordinate SgRP driver	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the driver.[40]
H70-1L	Z-coordinate SgRP driver	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the driver.[40]
L53-1L	X-coordinate HRP driver	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from the SgRP to the accelerator heel point (AHP).[40]
W0014	Y-coordinate HRP driver	Interior	Length	mm	Measured from vehicle CAD reference coordinate system.
H30-1L	Z-coordinate HRP driver	Interior	Length	mm	The vertical distance from SgRP to the AHP. Measure with floor mats if they are standard equipment.[40]
L31-1R	X-coordinate SgRP co-driver	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the passenger front.[40]
W20-1R	Y-coordinate SgRP co-driver	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the passenger front.[40]
H70-1R	Z-coordinate SgRP co-driver	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the co-driver.[40]
L53-1R	X-coordinate HRP co-driver	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the co-driver.[40]

W0015	Y-coordinate HRP co-driver	Interior	Length	mm	Measured from vehicle CAD reference coordinate system.
H30-1R	Z-coordinate HRP co-driver	Interior	Length	mm	The vertical distance from SgRP to the FRP. Measure with floor mats if they are standard equipment.[40]
L31-2L	X-coordinate SgRP second left	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the passenger second left.[40]
W20-2L	Y-coordinate SgRP second left	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the passenger second left.[40]
H70-2L	Z-coordinate SgRP second left	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the passenger second left.
L53-2L	X-coordinate HRP second left	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.[40]
W0016	Y-coordinate HRP second left	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.
H30-2L	Z-coordinate HRP second left	Interior	Length	mm	The vertical distance from SgRP to the FRP. Measure with floor mats if they are standard equipment.[40]
L31-2M	X-coordinate SgRP second middle	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the passenger second middle.[40]
W20-2M	Y-coordinate SgRP second middle	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the passenger second middle.[40]
H70-2M	Z-coordinate SgRP second middle	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the passenger second middle.[40]
L53-2M	X-coordinate HRP second middle	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.[40]
W0017	Y-coordinate HRP second middle	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.
H30-2M	Z-coordinate HRP second middle	Interior	Length	mm	The vertical distance from SgRP to the FRP. Measure with floor mats if they are standard equipment.[40]
L31-2R	X-coordinate SgRP second right	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the passenger second right.[40]
W20-2R	Y-coordinate SgRP second right	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the passenger second right.[40]
H70-2R	Z-coordinate SgRP second right	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the passenger second right.[40]
L53-2R	X-coordinate HRP second right	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.[40]
W0018	Y-coordinate HRP second right	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.
H30-2R	Z-coordinate HRP second right	Interior	Length	mm	The vertical distance from SgRP to the FRP. Measure with floor mats if they are standard equipment.[40]
L31-3L	X-coordinate SgRP third left	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the passenger third left.[40]
W20-3L	Y-coordinate SgRP third left	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the passenger third left.[40]
H70-3L	Z-coordinate SgRP third left	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the passenger third left.[40]
L53-3L	X-coordinate HRP third left	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.[40]
W0019	Y-coordinate HRP third left	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.
H30-3L	Z-coordinate HRP third left	Interior	Length	mm	The vertical distance from SgRP to the FRP. Measure with floor mats if they are standard equipment.[40]
L31-3M	X-coordinate SgRP third middle	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the passenger third middle.[40]
W20-3M	Y-coordinate SgRP third middle	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the passenger third middle.[40]
H70-3M	Z-coordinate SgRP third middle	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the passenger third middle.[40]
L53-3M	X-coordinate HRP third middle	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.[40]
W0020	Y-coordinate HRP third middle	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.
H30-3M	Z-coordinate HRP third middle	Interior	Length	mm	The vertical distance from SgRP to the FRP. Measure with floor mats if they are standard equipment.[40]
L31-3R	X-coordinate SgRP third right	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the passenger third right.[40]
W20-3R	Y-coordinate SgRP third right	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the passenger third right.[40]
H70-3R	Z-coordinate SgRP third right	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the passenger third right.[40]

L53-3R	X-coordinate HRP third right	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.[40]
W0021	Y-coordinate HRP third right	Interior	Length	mm	Measured in vehicle CAD reference coordinate system.
H30-3R	Z-coordinate HRP third right	Interior	Length	mm	The vertical distance from SgRP to the FRP. Measure with floor mats if they are standard equipment.[40]
L114	Distance SgRP front to front axle (1)	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the front wheel centerline and SgRP-front.[40]
A123-1-U	Forward vision angle upper	Interior	Angle	°	Measured at car centerline with eyellipse projected to car centerline. The minimum angle from the horizontal to a line tangential to the top of the SAE 95th percentile eyellipse and to the front upper trimmed body, excluding inside mirror, glass mounted hardware, attachments, and DGO.[40]
A123-1-L	Forward vision angle lower	Interior	Angle	°	Measured at car centerline with eyellipse projected to car centerline. The minimum angle from the horizontal to a line tangential to the bottom of the SAE 95th percentile eyellipse and to the first obstructing component (hood, DGO, dashboard, etc.) excluding wiper.[40]
A123-2-U	Rearward vision angle upper	Interior	Angle	°	Measured at car centerline with eyellipse projected to car centerline. The minimum angle from the horizontal to a line tangential to the top of the SAE 95th percentile eyellipse and to the first obscuring component on the rear upper trimmed body or DGO, including Brake light (CHMSL) A negative value indicates restricting component is lower than the top of the eyellipse. For UCV, if the pillars of rear swing doors are obstructing the vision at car centerline, the maximum dimension should be measured at the plane Y= centerline of driver.[40]
A123-2-L	Rearward vision angle lower	Interior	Angle	°	Measured at car centerline with eyellipse projected to car centerline. The minimum angle from the horizontal to a line tangential to the bottom of the SAE 95th percentile eyellipse and to the first obscuring component at the rear, including DGO and the rear end head restraint (if base), but excluding wiper. A negative value indicates restricting component is higher than the bottom of the eyellipse. For UCV, if the pillars of rear swing doors are obstructing the vision at car centerline, the maximum dimension should be measured at the plane Y= centerline of driver.[40]
A124-1-U	Traffic sight angle	Interior	Angle	°	The angle from the horizontal to a plane tangent to the top of the SAE 95th percentile eyellipse and to the upper trimmed body, including all the elements that can obstruct the vision (sun visor, design glass outline, etc...), measured at CLO driver y-plane.[40]
L13	Brake pedal - knee clearance	Interior	Length	mm	The minimum projected distance between the lower edge of the steering wheel rim to the centerline of the brake pedal face in the free position. Measured in the y-plane side view (SV).[40]
L18	Foot entrance clearance - front	Interior	Length	mm	The minimum distance on a z-plane (PV) between the trimmed front seat cushion, frame, or supporting structure and the trimmed door, or pillar. The height of the section is generally determined above ansitional arc, up to a maximum of 100 mm above the sill plate bead, or floor, with the door in the maximum hold-open position. NOTE: If the entire measurement area is composed of the transitional arc, the section is taken at the 100 mm maximum.[40]
L19	Foot entrance clearance - second	Interior	Length	mm	The minimum distance on a z-Plane (PV) between the trimmed front seat cushion, frame, or supporting structure and the trimmed door, or pillar. The height of the section is generally determined above ansitional arc, up to a maximum of 100mm above the sill plate bead, or floor, with the door in the maximum hold-open position. NOTE: If the entire measurement area is composed of the transitional arc, the section is taken at the 100mm maximum.

L26	Steering wheel to center of front wheel	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the rearmost edge of the steering wheel and the center of the front wheels.
L34	Effective legroom front	Interior	Length	mm	The distance along a line from the ankle pivot center to the SgRP - front, plus 254 mm, measured with the right foot on the undepressed accelerator pedal.[40]
L48-2	Minimum knee clearance - second	Interior	Length	mm	Knee clearance is the distance between the knee contour and the front row seatback. If the seatback interferes with the knee contour, knee clearance is negative. It is determined by first taking a z-section through the front row seatback, in the height of Knee-Pivot-Point (K-Point) within 127 mm of the occupant centerline. The y location of the rearmost point on the z-section determines the specific y plane section for the knee clearance/interference evaluation. Measure the minimum distance from the K-point to the seatback. This distance is positive when the K-point is rearward of the seat section, negative if forward. Subtract 51 mm from this value to determine the actual knee clearance/interference.[40]
L48-3	Minimum knee clearance - third	Interior	Length	mm	Same manner as L48-2.[40]
L50-2	SgRP couple distance - front to second	Interior	Length	mm	The longitudinal distance between SgRP front and SgRP second.[40]
L50-3	SgRP couple distance - second to third	Interior	Length	mm	The longitudinal distance between SgRP second and SgRP third.[40]
L51-2-L	Effective legroom - second left	Interior	Length	mm	The distance along a line from the ankle pivot center to the SgRP-Second, plus 254 mm with the heel of the shoe at the FRP and the bottom of the shoe at the FPA (See 3 - 3 . 6). Note 1: For long-coupled seating, leg room is measured from the ankle pivot center of the detached shoe, in the most forward location within a lateral space 127 mm either side of the occupant centerline. The shoe is not located at the FRP or FPA (See Procedure 3 - 5 . 3). Note 2: For short-coupled seating, leg room is measured with the shoe located at the FRP. When the front of the shoe interferes with the preceding seat, the amount of seat track travel needed to clear the interference is subtracted. If the preceding seat does not adjust, the horizontal interference is subtracted.[40]
L51-3-L	Effective legroom - third left	Interior	Length	mm	The distance along a line from the ankle pivot center to the SgRP-Second, plus 254 mm with the heel of the shoe at the FRP and the bottom of the shoe at the FPA (See 3 - 3 . 6). Note 1: For long-coupled seating, leg room is measured from the ankle pivot center of the detached shoe, in the most forward location within a lateral space 127 mm either side of the occupant centerline. The shoe is not located at the FRP or FPA (See Procedure 3 - 5 . 3). Note 2: For short-coupled seating, leg room is measured with the shoe located at the FRP. When the front of the shoe interferes with the preceding seat, the amount of seat track travel needed to clear the interference is subtracted. If the preceding seat does not adjust, the horizontal interference is subtracted.[40]
L52	Brake pedal to accelerator pedal	Interior	Length	mm	The minimum projected distance on a y-plane (SV) from the center of the brake pedal face to the accelerator pedal face with pedals in the free position. If the brake is forward of the accelerator, indicate a negative dimension.[40]
LI0001	Length dashboard x	Interior	Length	mm	Defines the length of the dashboard surface along the x-coordinate.
LI0003	X-coordinate gear lever	Interior	Length	mm	Defines the x-coordinate of the gear lever reference point relative to SgRP driver (default).
LI0004	Length gear lever	Interior	Length	mm	Axis length of the support cylinder.
LI0005-1	Seat length - first	Interior	Length	mm	Defines the length of the seat area for seats in the first row.
LI0005-2	Seat length - second	Interior	Length	mm	Defines the length of the seat area for seats in the second row.
LI0005-3	Seat length - third	Interior	Length	mm	Defines the length of the seat area for seats in the third row.

LI0006-1	Seat rear upper edge to SgRP - first	Interior	Length	mm	Defines the distance from SgRP - first to the rear upper edge of the seat surface.
LI0006-2	Seat rear upper edge to SgRP - second	Interior	Length	mm	Defines the distance from SgRP - second to the rear upper edge of the seat surface.
LI0006-3	Seat rear upper edge to SgRP - third	Interior	Length	mm	Defines the distance from SgRP - third to the rear upper edge of the seat surface.
LI0007-1	Depth torsorest - first	Interior	Length	mm	Defines the depth of the torsorest support geometry. The direction is normal to the torso angle.
LI0007-2	Depth torsorest - second	Interior	Length	mm	Defines the depth of the torsorest support geometry. The direction is normal to the torso angle.
LI0007-3	Depth torsorest - third	Interior	Length	mm	Defines the depth of the torsorest support geometry. The direction is normal to the torso angle.
LI0008-1	Depth headrest - first	Interior	Length	mm	Defines the depth of the headrest support geometry.
LI0008-2	Depth headrest - second	Interior	Length	mm	Defines the depth of the headrest support geometry.
LI0008-3	Depth headrest - third	Interior	Length	mm	Defines the depth of the headrest support geometry.
LI0009-1	Distance SgRP - headrest - first	Interior	Length	mm	Defines the horizontal distance between the SgRP and the headrest front surface.
LI0009-2	Distance SgRP - headrest - second	Interior	Length	mm	Defines the horizontal distance between the SgRP and the headrest front surface.
LI0009-3	Distance SgRP - headrest - third	Interior	Length	mm	Defines the horizontal distance between the SgRP and the headrest front surface.
LI0011	Distance baseplate rear edge to front axle	Interior	Length	mm	Defines the rear edge of the vehicle floor concept geometry.
LI0012	Distance turn indicator lever to steering wheel center	Interior	Length	mm	Distance turn indicator lever to steering wheel center.
LI0013	Length turn indicator lever	Interior	Length	mm	Defines the length of the cylindrical concept geometry.
LI0014	Distance accelerator to clutch pedal	Interior	Length	mm	Distance accelerator to clutch pedal.
LI0015	Distance firewall to cowl point	Interior	Length	mm	Defines the longitudinal distance between the cowl point and the firewall support surface .
LI0016	Distance lower edge foot rest along baseplate	Interior	Length	mm	Defines the longitudinal distance of the firewall and the reference point of the foot rest support surface.
LI0017	X-coordinate steering wheel	Interior	Length	mm	X-coordinate steering wheel (now P000000529).
W3-1	Shoulder room - front	Interior	Length	mm	The minimum cross car distance between the trimmed door or quarter trim surfaces within the measurement zone. The zone lies between the belt line and 254 mm above the SgRP, on the x-plane through front SgRP. The door assist strap is excluded.[40]
W3-2	Shoulder room - second	Interior	Length	mm	The minimum cross car distance between the trimmed door or quarter trim surfaces within the measurement zone. The zone lies between the belt line and 254 mm above the SgRP, on the x-plane through front SgRP. The door assist strap is excluded.[40]
W3-3	Shoulder room - third	Interior	Length	mm	The minimum cross car distance between the trimmed door or quarter trim surfaces within the measurement zone. The zone lies between the belt line and 254 mm above the SgRP, on the x-plane through front SgRP. The door assist strap is excluded.[40]
W7	Steering wheel center y-coordinate	Interior	Length	mm	The intersection of the steering column axis with a plane tangent to the face of the steering wheel rim.[40]
W9	Steering wheel diameter	Interior	Length	mm	Maximum outer diameter of steering wheel. Note : If the steering wheel is not round then the minimum dimension is also provided, separated by a slash.[40]
W10-1	Elbow width - front	Interior	Length	mm	The maximum distance, on the x-plane through the SgRP, measured above the armrest using the template in figure 10. If this is not possible then the dimension is to be measured as closed as possible to the x-plane through the SgRP. On vehicles without armrests the measurement shall be taken 100 mm above the SgRP.[40]

W10-2	Elbow width - second	Interior	Length	mm	The maximum distance, on the x-plane through the SgRP, measured above the armrest using the template in figure 10. If this is not possible then the dimension is to be measured as closed as possible to the x-plane through the SgRP. On vehicles without armrests the measurement shall be taken 100 mm above the SgRP.[40]
W10-3	Elbow width - third	Interior	Length	mm	The maximum distance, on the x-plane through the SgRP, measured above the armrest using the template in figure 10. If this is not possible then the dimension is to be measured as closed as possible to the x-plane through the SgRP. On vehicles without armrests the measurement shall be taken 100 mm above the SgRP.
W14-1	Effective shoulder room - front	Interior	Length	mm	The minimum lateral distance between the trimmed surfaces, on a plane perpendicular to the y-plane which contains the first row torso line. Measured in the area between the belt line and a line 250 mm above the SgRP.[40]
W14-2	Effective shoulder room - second	Interior	Length	mm	The minimum lateral distance between the trimmed surfaces, on a plane perpendicular to the y-plane which contains the first row torso line. Measured in the area between the belt line and a line 250 mm above the SgRP.[40]
W14-3	Effective shoulder room - third	Interior	Length	mm	The minimum lateral distance between the trimmed surfaces, on a plane perpendicular to the y plane which contains the first row torso line. Measured in the area between the belt line and a line 250 mm above the SgRP.[40]
W27-1	Head clearance diagonal - driver	Interior	Length	mm	Measured using a rear view section cut on the x-plane intersecting the side-view top of contour. The minimum outboard shift of the appropriate SAE 95th percentile head contour section to any limiting surface along a diagonal line, originating at the intersection of C/LO and the bottom of the section, at an angle 30 degrees above horizontal, extending outboard. For an interference condition, move the head contour in the opposite direction and indicate a negative dimension.[40]
W27-1-SR	Head clearance diagonal with sunroof - driver	Interior	Length	mm	Same manner as W27-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
W27-2	Head clearance diagonal - second	Interior	Length	mm	Measured using a rear view section cut on the x-plane intersecting the side-view top of contour. The minimum outboard shift of the appropriate SAE 95th percentile head contour section to any limiting surface along a diagonal line, originating at the intersection of C/LO and the bottom of the section, at an angle 30 degrees above horizontal, extending outboard. For an interference condition, move the head contour in the opposite direction and indicate a negative dimension.[40]
W27-2-SR	Head clearance diagonal with sunroof - second	Interior	Length	mm	Same manner as W27-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
W27-3	Head clearance diagonal - third	Interior	Length	mm	Measured using a rear view section cut on the x-plane intersecting the side-view top of contour. The minimum outboard shift of the appropriate SAE 95th percentile head contour section to any limiting surface along a diagonal line, originating at the intersection of C/LO and the bottom of the section, at an angle 30 degrees above horizontal, extending outboard. For an interference condition, move the head contour in the opposite direction and indicate a negative dimension.[40]
W27-3-SR	Head clearance diagonal with sunroof - third	Interior	Length	mm	Same manner as W27-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
WI0001	Y-coordinate gear lever	Interior	Length	mm	Defines the y-coordinate of the gear lever's reference point.

WI0002-1	Width seatsurface front edge - first	Interior	Length	mm	Defines the width of the upper front edge of the seatsurface .
WI0002-2	Width seatsurface front edge - second	Interior	Length	mm	Defines the width of the upper front edge of the seatsurface .
WI0002-3	Width seatsurface front edge - third	Interior	Length	mm	Defines the width of the upper front edge of the seatsurface .
WI0003-1	Width seatsurface rear edge - front	Interior	Length	mm	Defines the width of the upper rear edge of the seatsurface.
WI0003-2	Width seatsurface rear edge - second	Interior	Length	mm	Defines the width of the upper rear edge of the seatsurface.
WI0003-3	Width seatsurface rear edge - third	Interior	Length	mm	Defines the width of the upper rear edge of the seatsurface.
WI0004-1	Upper seatwidth - front - first	Interior	Length	mm	Defines the total width of the upper front edge of the entire seat .
WI0004-2	Upper seatwidth - front - second	Interior	Length	mm	Defines the total width of the upper front edge of the entire seat .
WI0004-3	Upper seatwidth - front - third	Interior	Length	mm	Defines the total width of the upper front edge of the entire seat .
WI0005-1	Upper seatwidth - rear - first	Interior	Length	mm	Defines the total width of the upper rear edge of the entire seat.
WI0005-2	Upper seatwidth - rear - second	Interior	Length	mm	Defines the total width of the upper rear edge of the entire seat.
WI0005-3	Upper seatwidth - rear - third	Interior	Length	mm	Defines the total width of the upper rear edge of the entire seat.
WI0006-1	Lower seatwidth front - first	Interior	Length	mm	Lower seatwidth front - first (=lower seatwidth rear - first).
WI0006-2	Lower seatwidth front - second	Interior	Length	mm	Lower seatwidth front - second (=lower seatwidth rear - second).
WI0006-3	Lower seatwidth front - third	Interior	Length	mm	Lower seatwidth front - third (=lower seatwidth rear - third).
WI0007-1	Width headrest - first	Interior	Length	mm	Width headrest - first along y .
WI0007-2	Width headrest - second	Interior	Length	mm	Width headrest - second along y .
WI0007-3	Width headrest - third	Interior	Length	mm	Width headrest - third along y .
WI0008	Y-coordinate accelerator pedal	Interior	Length	mm	Absolute y-coordinate of the accelerator pedal concept design reference point. .
WI0009	Y-coordinate brake pedal	Interior	Length	mm	Absolute y-coordinate of the brake pedal concept design reference point.
WI0010	Y-coordinate clutch pedal	Interior	Length	mm	Absolute y-coordinate of the clutch pedal concept design reference point.
WI0011	Width accelerator pedal	Interior	Length	mm	Width of the accelerator pedal concept surface.
WI0012	Width brake pedal	Interior	Length	mm	Width of the brake pedal concept surface.
WI0013	Width clutch pedal	Interior	Length	mm	Width of the clutch pedal concept surface.
WI0014	Width gear tunnel	Interior	Length	mm	Width gear tunnel at top of tunnel.
WI0015-2	Width seatrow second	Interior	Length	mm	The seatrow geometry is symmetrical to the SgRP of the second left passenger.
WI0015-3	Width seatrow third	Interior	Length	mm	The seatrow geometry is symmetrical to the SgRP of the third left passenger.
WI0016	Technical Offset Interior Seatrow First	Interior	Length	mm	Technical Offset Interior Seatrow First.
H5-1	SgRP to ground - front	Interior	Length	mm	The minimum distance between SgRP-Front and the ground.[40]
H5-2	SgRP to ground - second	Interior	Length	mm	The minimum distance between SgRP-Second and the ground.[40]
H5-3	SgRP to ground - third	Interior	Length	mm	The minimum distance between SgRP-Third and the ground.[40]
H25-1	Belt height - front	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the bottom of the side window DGO at the front SgRP x-Plane.[40]
H25-2	Belt height - second	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the bottom of the side window DGO at the front SgRP x-Plane.[40]
H25-3	Belt height - third	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the bottom of the side window DGO at the front SgRP x-Plane.[40]
H35-1	Head clearance vertical - front	Interior	Length	mm	Measured using a rear view section cut on the x-plane intersecting the side-view top of contour. The minimum vertical shift of the appropriate SAE 95th percentile head contour section to any limiting surface (headlining, molding, sunroof, etc.). For an interference condition, move the head contour in the opposite direction and indicate a negative dimension.[40]

H35-1-SR	Head clearance vertical with sunroof - front	Interior	Length	mm	Same manner as H35-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments comunn the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H35-2	Head clearance vertical - second	Interior	Length	mm	Measured using a rear view section cut on the x-plane intersecting the side-view top of contour. The minimum vertical shift of the appropriate SAE 95th percentile head contour section to any limiting surface (headlining, molding, sunroof, etc.). For an interference condition, move the head contour in the opposite direction and indicate a negative dimension.[40]
H35-2-SR	Head clearance vertical with sunroof - second	Interior	Length	mm	Same manner as H35-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments comunn the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H35-3	Head clearance vertical - third	Interior	Length	mm	Measured using a rear view section cut on the x-plane intersecting the side-view top of contour. The minimum vertical shift of the appropriate SAE 95th percentile head contour section to any limiting surface (headlining, molding, sunroof, etc.). For an interference condition, move the head contour in the opposite direction and indicate a negative dimension.[40]
H35-3-SR	Head clearance vertical with sunroof - third	Interior	Length	mm	Same manner as H35-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments comunn the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H41-1	Minimum sv head clearance - driver	Interior	Length	mm	Measured using a side view section cut on the C/LO y-plane. The minimum distance between the appropriate SAE 95th percentile head contour section and any surface (headlining, molding, sunroof, etc.) For interference condition indicate a negative dimension.[40]
H41-1-SR	Minimum sv head clearance with sunroof - driver	Interior	Length	mm	Same manner as H41-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H41-2	Minimum sv head clearance - second	Interior	Length	mm	Measured using a side view section cut on the C/LO y plane. The minimum distance between the appropriate SAE 95th percentile head contour section and any surface (headlining, molding, sunroof, etc.) For interference condition indicate a negative dimension.[40]
H41-2-SR	Minimum sv head clearance with sunroof - second	Interior	Length	mm	Same manner as H41-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H41-3	Minimum sv head clearance - third	Interior	Length	mm	Measured using a side view section cut on the C/LO y-plane.? The minimum distance between the appropriate SAE 95th percentile head contour section and any surface (headlining, molding, sunroof, etc.) For interference condition indicate a negative dimension.[40]
H41-3-SR	Minimum sv head clearance with sunroof - third	Interior	Length	mm	Same manner as H41-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H50-1	Upper body opening to ground - front	Interior	Length	mm	The minimum distance between the intersection point of the SgRP-front x-plane with the upper trimmed body opening and the ground.[40]
H50-2	Upper body opening to ground - second	Interior	Length	mm	The minimum distance between the intersection point of an x-plane 330 mm forward of the SgRP-second with the upper trimmed body opening and the ground.[40]
H61-1	Effective headroom - front	Interior	Length	mm	The distance along a line 8 degrees rear of vertical from SgRP to the headlining, plus 102 mm.[40]

H61-1-SR	Effective headroom with sunroof - front	Interior	Length	mm	Same manner as H61-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H61-2	Effective headroom - second	Interior	Length	mm	The distance along a line 8 degrees rear of vertical from SgRP to the headlining, plus 102 mm.[40]
H61-2-SR	Effective headroom with sunroof - second	Interior	Length	mm	Same manner as H61-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H61-3	Effective headroom - third	Interior	Length	mm	The distance along a line 8 degrees rear of vertical from SgRP to the headlining, plus 102 mm.[40]
H61-3-SR	Effective headroom with sunroof - third	Interior	Length	mm	Same manner as H61-1, for a vehicle equipped with the most intrusive roof type (e.g. panoramic roof) Mention in the comments the type of the roof. Measure to be given even if not available on base model.[40]
H74	Steering wheel to cushion	Interior	Length	mm	The minimum projected distance on the y plane between the centerline section of the steering wheel and the occupant centerline section of the undepressed seat cushion.[40]
HI0001	Z-position lower edge dashboard	Interior	Length	mm	Z-coordinate in the absolute coordinate system of the lower edge reference point of the dashboard support geometry.
HI0003	Z-position gear lever	Interior	Length	mm	Defines the z-position of the gear lever's reference point.
HI0004-1	Distance normal SgRP to seating surface - first	Interior	Length	mm	Distance normal SgRP to seating surface - first.
HI0004-2	Distance normal SgRP to seating surface - second	Interior	Length	mm	Distance normal SgRP to seating surface - second.
HI0004-3	Distance normal SgRP to seating surface - third	Interior	Length	mm	Distance normal SgRP to seating surface - third.
HI0005-1	Distance seat upper to lower edge - front - first	Interior	Length	mm	Distance seat upper to lower edge - front - first.
HI0005-2	Distance seat upper to lower edge - front - second	Interior	Length	mm	Distance seat upper to lower edge - front - second.
HI0005-3	Distance seat upper to lower edge - front - third	Interior	Length	mm	Distance seat upper to lower edge - front - third.
HI0006-1	Height seat flank - first	Interior	Length	mm	Height seat flank - first.
HI0006-2	Height seat flank - second	Interior	Length	mm	Height seat flank - second.
HI0006-3	Height seat flank - third	Interior	Length	mm	Height seat flank - third.
HI0007-1	Height torso flank - first	Interior	Length	mm	Height torso flank - first.
HI0007-2	Height torso flank - second	Interior	Length	mm	Height torso flank - second.
HI0007-3	Height torso flank - third	Interior	Length	mm	Height torso flank - third.
HI0008-1	Height torsorest - first	Interior	Length	mm	Height torsorest - first.
HI0008-2	Height torsorest - second	Interior	Length	mm	Height torsorest - second.
HI0008-3	Height torsorest - third	Interior	Length	mm	Height torsorest - third.
HI0009-1	Height headrest - first	Interior	Length	mm	Height headrest - first.
HI0009-2	Height headrest - second	Interior	Length	mm	Height headrest - second.
HI0009-3	Height headrest - third	Interior	Length	mm	Height headrest - third.
HI0010	Height acceleratorpedal	Interior	Length	mm	Height acceleratorpedal.
HI0011	Height brakepedal	Interior	Length	mm	Defines the height of the brake pedal surface.
HI0012	Height clutchpedal	Interior	Length	mm	Defines the height of the clutch pedal surface.
HI0015	Height gear tunnel	Interior	Length	mm	Vertical distance from floor to tunnel top.
HI0019-1	Distance headrest - SgRP along torsoline - first	Interior	Length	mm	Distance headrest - SgRP along torsoline - first .
HI0019-2	Distance headrest - SgRP along torsoline - second	Interior	Length	mm	Distance headrest - SgRP along torsoline - second.
HI0019-3	Distance headrest - SgRP along torsoline - third	Interior	Length	mm	Distance headrest - SgRP along torsoline - third .
HI0020	Z-position steering wheel to SgRP	Interior	Length	mm	Z-position steering wheel to SgRP.
HI0021-2	Height torsorest seatrow second	Interior	Length	mm	Height of the torsorest seatrow support geometry along the direction of the torso angle (only available for seatrows 2 and 3).
HI0021-3	Height torsorest seatrow third	Interior	Length	mm	Height of the torsorest seatrow support geometry along the direction of the torso angle (only available for seatrows 2 and 3).
HI0022-1	Z-position elbowwidth template - first	Interior	Length	mm	Defines the distance between the elbow width template lower edge and the SgRP. .

HI0022-2	Z-position elbowwidth template - second	Interior	Length	mm	Defines the distance between the elbow width template lower edge and the SgRP. .
HI0022-3	Z-position elbowwidth template - third	Interior	Length	mm	Defines the distance between the elbow width template lower edge and the SgRP. .
HI0023	Roof offset	Interior	Length	mm	Roof offset for seatrow first.
A17	Steering column angle in z-plane	Interior	Angle	°	The angle in the z-plane between the steering wheel centerline (nominal design position) and the y-plane. NOTE: A negative value indicates steering wheel is facing inboard (i.e. the steering wheel center inboard of the steering column).[40]
A18	Steering wheel angle in y-plane	Interior	Angle	°	The angle of a plane tangent to the face of the steering wheel rim (nominal design position), measured from vertical.[40]
A40-1	Torso angle - front	Interior	Angle	°	The angle of the torso line from vertical.[40]
A40-2	Torso angle - second	Interior	Angle	°	Same manner as A 40-1, for second row outboard passenger.[40]
A40-2-C	Torso angle - second - center	Interior	Angle	°	Same manner as A 40-1, for second row center passenger.[40]
A40-3	Torso angle - third	Interior	Angle	°	Same manner as A 40-1, for third row center passenger.[40]
AI0001	Upper inclination angle dashboard	Interior	Angle	°	Upper inclination angle dashboard.
AI0002	Inclination angle foot rest surface	Interior	Angle	°	Inclination angle foot rest surface.
AI0003	Lower inclination angle dashboard	Interior	Angle	°	Lower inclination angle dashboard.
AI0005-1	Seatsurface angle - first	Interior	Angle	°	
AI0005-2	Seatsurface angle - second	Interior	Angle	°	
AI0005-3	Seatsurface angle - third	Interior	Angle	°	
AI0006-1	Seatrail angle - first	Interior	Angle	°	
AI0006-2	Seatrail angle - second	Interior	Angle	°	
AI0006-3	Seatrail angle - third	Interior	Angle	°	
AI0007-1	Angle between torsoline and headrest - first	Interior	Angle	°	
AI0007-2	Angle between torsoline and headrest - second	Interior	Angle	°	
AI0007-3	Angle between torsoline and headrest - third	Interior	Angle	°	
AI0008	Pedal inclination angle	Interior	Angle	°	
AI0009	Inclination angle rear edge baseplate	Interior	Angle	°	Inclination angle rear edge baseplate.
AI0010	Draftangle gear tunnel	Interior	Angle	°	Defines the center angle between the side surface of the tunnel concept geometry.
AI0011	Turn indicator lever angle	Interior	Angle	°	Angle between axis turn indicator lever and steering axis.
AI0012	-	Interior	Angle	°	--
AI0013-1L	Seat turning angle driver	Interior	Angle	°	Defines the angle around the SgRP z-coordinate for the driver.
AI0013-1R	Seat turning angle passenger front right	Interior	Angle	°	Defines the angle around the SgRP z-coordinate for the passenger first right.
AI0013-2L	Seat turning angle second - left	Interior	Angle	°	Defines the angle around the SgRP z-coordinate for the passenger second left.
AI0013-2M	Seat turning angle second - middle	Interior	Angle	°	Defines the angle around the SgRP z-coordinate for the passenger second middle.
AI0013-2R	Seat turning angle second - right	Interior	Angle	°	Defines the angle around the SgRP z-coordinate for the passenger second right.
AI0013-3L	Seat turning angle third - left	Interior	Angle	°	Defines the angle around the SgRP z-coordinate for the passenger third left.
AI0013-3M	Seat turning angle third - middle	Interior	Angle	°	Defines the angle around the SgRP z-coordinate for the passenger third middle.
AI0013-3R	Seat turning angle third - right	Interior	Angle	°	Defines the angle around the SgRP z-coordinate for the passenger third right.
AI0014-1L	Foot angle driver	Interior	Angle	°	Defines the foot angle of the driver manikin.
AI0014-1R	Foot angle passenger front	Interior	Angle	°	
AI0014-2	Foot angle passenger second	Interior	Angle	°	
AI0014-3	Foot angle passenger third	Interior	Angle	°	
RI0001	Radius dashboard upper edge	Interior	Length	mm	
RI0004	Gear lever radius cylinder	Interior	Length	mm	
RI0005	Gear lever radius sphere	Interior	Length	mm	
RI0007-1	Bending radius head rest first	Interior	Length	mm	Defines the curvature radius of the head rest front surface within the y-plane for the first seatrow.

RI0007-2	Bending radius head rest second	Interior	Length	mm	Defines the curvature radius of the head rest front surface within the y-plane for the second seatrow.
RI0007-3	Bending radius head rest third	Interior	Length	mm	Defines the curvature radius of the head rest front surface within the y-plane for the third seatrow.
RI0008-1	Radius rear edge head rest first	Interior	Length	mm	Defines the fillet radius of the head rest rear surface within the y-plane for the first seatrow.
RI0008-2	Radius rear edge head rest second	Interior	Length	mm	Defines the fillet radius of the head rest rear surface within the y-plane for the second seatrow.
RI0008-3	Radius rear edge head rest third	Interior	Length	mm	Defines the fillet radius of the head rest rear surface within the y-plane for the third seatrow.
RI0009	Radius turn indicator lever	Interior	Length	mm	Defines the radius for the turn indicator lever concept geometry.
RI0010	Radius steering wheel profile	Interior	Length	mm	Defines the radius for the steering wheel concept geometry.
L206	Rear compartment opening height	Interior	Length	mm	The minimum length of the rear opening, determined by seal, latch/striker, rear end panel/trim. Measured for passenger vehicles, excluding station wagons and MPV's, on the zero y plane.[40]
L206-CV	Rear compartment opening length – folded roof	Interior	Length	mm	Measured with roof open and stored in the luggage compartment.[40]
L212-1	Luggage floor length first	Interior	Length	mm	The maximum distance in the zero-y-plane between the backrest of the front seat, located at the SgRP position, or the folded cushion of the 2nd row of seats and the inner rear limit of the loading floor.[40]
L212-2	Luggage floor length second	Interior	Length	mm	The maximum distance in the zero-y-plane between the backrest of the second seat, located at the SgRP position, or the folded cushion of the 3rd row of seats and the inner rear limit of the cargo floor.[40]
L212-3	Luggage floor length - third	Interior	Length	mm	The maximum distance in the zero-Y-plane between the backrest of the second seat, located at the SgRP position, or the folded cushion of the 3rd row of seats and the inner rear limit of the cargo floor.[40]
L214-1	Luggage length - first	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from the x-plane tangent to the most rearward point on the seat back, at the seat-back top, to the foremost surface of the closed tailgate or inside cab back panel, below the height of the seatback excluding head restraint. Measured at vehicle centerline.[40]
L214-2	Luggage length - second	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from the x-plane tangent to the most rearward point on the seat back, at the seat-back top, to the foremost surface of the closed tailgate or inside cab back panel, below the height of the seatback excluding head restraint. Measured at vehicle centerline.[40]
L214-3	Luggage length - third	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from the x-plane tangent to the most rearward point on the seat back, at the seat-back top, to the foremost surface of the closed tailgate or inside cab back panel, below the height of the seatback excluding head restraint. Measured at vehicle centerline.[40]
W200	Compartment width - maximum	Interior	Length	mm	The maximum lateral distance of the luggage, or cargo compartment, measured between the cargo floor and 70 mm above the floor. Measurement excludes the transitional arc, local protrusions, depressions or pockets, if present. (Measuring position to be designated).[40]
W202	Wheelhouse width - minimum	Interior	Length	mm	The minimum lateral distance between the limiting interferences (pass-through) of the wheelhouses. Measurement excludes the transitional arc, local protrusions, depressions or pockets, if present.[40]
W205	Rear opening width - upper	Interior	Length	mm	The minimum lateral distance between limiting interferences (pass-through) of the upper rear vehicle opening. Measurement taken below the area of transition, up to 70 mm, if present.[40]
W206	Rear opening width - maximum	Interior	Length	mm	The maximum lateral distance between the limiting interferences (pass-through) of the rear vehicle opening.[40]

W207	Rear opening width - lower	Interior	Length	mm	The minimum lateral distance between limiting interferences (pass through) of the lower rear vehicle opening. Measurement taken above the area of transition, up to 70 mm.[40]
H201	Cargo height	Interior	Length	mm	The vertical distance from the top of the cargo floor to the headlining, or other limiting surface. Measured at the rear wheel x-coordinate, at vehicle centerline.[40]
H202	Rear opening height	Interior	Length	mm	The minimum vertical distance between the upper trimmed opening and cargo floor, or the upper edge of the liftgate lower opening (scuff plate) behind the last row of seating with the rear hatch or liftgate in the maximum hold-open position. Measured at vehicle centerline. See 3 - 3 . 21.[40]
H212	Luggage compartment height	Interior	Length	mm	The minimum vertical distance between the floor covering and the compartments upper limit, measured in the area between the opening and the rear seatback. Measured at vehicle centerline with limiting point designated on the drawing.[40]
H212-CV	Luggage compartment height	Interior	Length	mm	Measured with roof open and stored in the luggage compartment.[40]
H251	Open liftgate height to ground	Interior	Length	mm	The minimum vertical distance from the lowest point of the raised liftgate (hatch) to the ground, excluding flexible hand straps, measured in the area behind the rear bumper on vehicle centerline.[40]
H253	Luggage compartment floor to ground	Interior	Length	mm	The minimum distance, on the zero-Y-plane, between the lowest point of the undepressed luggage compartment floor covering and the ground.[40]
H297-1	Front seatback to luggage floor	Interior	Length	mm	The minimum vertical distance between the upper edge of the front seatback * tangential to the rearmost part of the front seats and the undepressed floor covering of the luggage compartment. * Excluding head restraints. Height of seatback with integrated head restraint according to manufacturer's specification.[40]
H297-2	Second seatback to luggage floor	Interior	Length	mm	The minimum vertical distance between the upper edge of the front seatback * tangential to the rearmost part of the front seats and the undepressed floor covering of the luggage compartment. * Excluding head restraints. Height of seatback with integrated head restraint according to manufacturer's specification.[40]
H297-3	Third seatback to luggage floor	Interior	Length	mm	The minimum vertical distance between the upper edge of the front seatback * tangential to the rearmost part of the front seats and the undepressed floor covering of the luggage compartment. * Excluding head restraints. Height of seatback with integrated head restraint according to manufacturer's specification.[40]
A212-1	Luggage Floor Angle - First	Interior	Angle	°	The effective angle of the luggage compartment over the folded (or removed if specified by manufacturer) second and third row of seats, corresponding to the L212-1 measurement.[40]
TL17-1L	H-point travel - front left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]
TL17-1R	H-point travel - front right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]
TL17-2L	H-point travel - second left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]
TL17-2M	H-point travel - second center	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]
TL17-2R	H-point travel - second right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]

TL17-3L	H-point travel - third left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]
TL17-3M	H-point travel - third center	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]
TL17-3R	H-point travel - third right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]
TL18-1-1L	H-point travel - front maximum length left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost achievable H-points. (only concerns 6 way seats; for 2 or 4 way seats TL18-1 = TL17-1).[40]
TL18-1-1R	H-point travel - front maximum length right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost achievable H-points. [40] (only concerns 6 way seats; for 2 or 4 way seats TL18-1 = TL17-1).[40]
TL18-1-2L	H-point travel - maximum length second left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost achievable H-points. [40] (only concerns 6 way seats; for 2 or 4 way seats TL18-1 = TL17-1).[40]
TL18-1-2M	H-point travel - maximum length second center	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost achievable H-points. (only concerns 6 way seats; for 2 or 4 way seats TL18-1 = TL17-1).[40]
TL18-1-2R	H-point travel - maximum length second right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost achievable H-points. [40] (only concerns 6 way seats; for 2 or 4 way seats TL18-1 = TL17-1).[40]
TL18-1-3L	H-point travel - maximum length third left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost achievable H-points. (only concerns 6 way seats; for 2 or 4 way seats TL18-1 = TL17-1).[40]
TL18-1-3M	H-point travel - maximum length third center	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost achievable H-points. (only concerns 6 way seats; for 2 or 4 way seats TL18-1 = TL17-1).[40]
TL18-1-3R	H-point travel - maximum length third right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost achievable H-points. (only concerns 6 way seats; for 2 or 4 way seats TL18-1 = TL17-1).[40]
TL23-1-1L	SgRP to foremost design h-point - front driver	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the SgRP and the foremost design H-point.[40]
TL23-1-1R	SgRP to foremost design h-point - front passenger	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the SgRP and the foremost design H-point.[40]
TL23-1-2L	SgRP to foremost design h-point - second left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the SgRP and the foremost design H-point.[40]
TL23-1-2M	SgRP to foremost design h-point - second center	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the SgRP and the foremost design H-point.[40]
TL23-1-2R	SgRP to foremost design h-point - second right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the SgRP and the foremost design H-point.[40]
TL23-1-3L	SgRP to foremost design h-point - third left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the SgRP and the foremost design H-point.[40]
TL23-1-3M	SgRP to foremost design h-point - third center	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the SgRP and the foremost design H-point.[40]
TL23-1-3R	SgRP to foremost design h-point - third right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the SgRP and the foremost design H-point.[40]
TL28-1-1L	Rearmost lowest to foremost highest h-point length - front left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TL28-1-1R	Rearmost lowest to foremost highest h-point length - front right	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TL28-1-2L	Rearmost lowest to foremost highest h-point length - second left	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]

TH22-1-3R	Rearmost design to rearmost highest highest h-point height third right	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost design and rearmost highest H-points.[40]
TH28-1-1L	Rearmost lowest to foremost highest h-point height front left	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TH28-1-1R	Rearmost lowest to foremost highest h-point height front right	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TH28-1-2L	Rearmost lowest to foremost highest h-point height second left	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TH28-1-2M	Rearmost lowest to foremost highest h-point height second middle	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TH28-1-2R	Rearmost lowest to foremost highest h-point height second right	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TH28-1-3L	Rearmost lowest to foremost highest h-point height third left	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TH28-1-3M	Rearmost lowest to foremost highest h-point height third middle	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TH28-1-3R	Rearmost lowest to foremost highest h-point height third right	Interior	Length	mm	The vertical distance between the rearmost lowest H-point and the foremost highest H-point.[40]
TH33-1-1L	SgRP to foremost highest h-point height - front left	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the foremost highest H-point.[40]
TH33-1-1R	SgRP to foremost highest h-point height - front right	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the foremost highest H-point.[40]
TH33-1-2L	SgRP to foremost highest h-point height - second left	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the foremost highest H-point.[40]
TH33-1-2M	SgRP to foremost highest h-point height - second middle	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the foremost highest H-point.[40]
TH33-1-2R	SgRP to foremost highest h-point height - second right	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the foremost highest H-point.[40]
TH33-1-3L	SgRP to foremost highest h-point height - third left	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the foremost highest H-point.[40]
TH33-1-3M	SgRP to foremost highest h-point height - third middle	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the foremost highest H-point.[40]
TH33-1-3R	SgRP to foremost highest h-point height - third right	Interior	Length	mm	The vertical distance between the SgRP and the foremost highest H-point.[40]
A19-1-1L	Track rise angle front left	Interior	Angle	°	The angle of the H-point travel path, measured from horizontal. If vertical adjustment is available, measurement is of the full down H-point travel path.[40]
A19-1-1R	Track rise angle front right	Interior	Angle	°	The angle of the H-point travel path, measured from horizontal. If vertical adjustment is available, measurement is of the full down H-point travel path.[40]
A19-1-2L	Track rise angle second left	Interior	Angle	°	The angle of the H-point travel path, measured from horizontal. If vertical adjustment is available, measurement is of the full down H-point travel path.[40]
A19-1-2R	Track rise angle second right	Interior	Angle	°	The angle of the H-point travel path, measured from horizontal. If vertical adjustment is available, measurement is of the full down H-point travel path.[40]
A19-1-2M	Track rise angle second middle	Interior	Angle	°	The angle of the H-point travel path, measured from horizontal. If vertical adjustment is available, measurement is of the full down H-point travel path.[40]
A19-1-3L	Track rise angle third left	Interior	Angle	°	The angle of the H-point travel path, measured from horizontal. If vertical adjustment is available, measurement is of the full down H-point travel path.
A19-1-3M	Track rise angle third middle	Interior	Angle	°	The angle of the H-point travel path, measured from horizontal. If vertical adjustment is available, measurement is of the full down H-point travel path.[40]
A19-1-3R	Track rise angle third right	Interior	Angle	°	The angle of the H-point travel path, measured from horizontal. If vertical adjustment is available, measurement is of the full down H-point travel path.[40]

H194	Closed endgate height	Interior	Length	mm	The maximum distance (normal to ground) between the top of the closed endgate and the ground, at vehicle centerline. For vehicles equipped with more than one horizontally hinged closure, measure with the liftgate/glass in the open position.[40]
XCP	Engine flange x-coordinate	Interior	Length	mm	Defines the x-coordinate of the engine reference point. The point is derived by the intersection of the crank axis and the gearbox flange plane.
YCP	Engine flange y-coordinate	Interior	Length	mm	Defines the y-coordinate of the engine reference point. The point is derived by the intersection of the crank axis and the gearbox flange plane.
ZCP	Engine flange z-coordinate	Interior	Length	mm	Defines the z-coordinate of the engine reference point. The point is derived by the intersection of the crank axis and the gearbox flange plane.
Doors	Number of doors	Interior	Integer	-	Number of doors.
Cartype	Vehicle type and description parameter	Interior	String	-	Vehicle type and description parameter.
SPX	Steering point x-coordinate	Interior	Length	mm	Steering point x-coordinate. Default reference is SgRP-driver but behaviour can be altered using the CAD reference point tool.
SPY	Steering point y-coordinate	Interior	Length	mm	Steering point y-coordinate. Default reference is SgRP-driver but behaviour can be altered using the CAD reference point tool.
SPZ	Steering point z-coordinate	Interior	Length	mm	Steering point z-coordinate. Default reference is SgRP-driver but behaviour can be altered using the CAD reference point tool.
W0009	Wheel width front	Interior	Length	mm	Wheel width front overall.
W0010	Wheel width rear	Interior	Length	mm	Wheel width rear overall.
D0001	Rim diameter front	Interior	Length	mm	Rim diameter front displayed in inch.
D0002	Rim diameter rear	Interior	Length	mm	Rim diameter rear displayed in inch.
W0011	Technical offset exterior engine space	Interior	Length	mm	Technical offset exterior engine space.
SeatRows	Number of seatrows	Interior	Integer	-	
W0012	Y-coordinate cowl point	Interior	Length	mm	Y-coordinate cowl point. Only for the sake of completeness. Default value is 0.
W0013	Y-coordinate deck point	Interior	Length	mm	Y-coordinate deck point. Only for the sake of completeness. Default value is 0.
WI0017	Technical Offset Interior Seatrow Second	Interior	Length	mm	Defines the offset value for the interior lateral limitation for seatrow second.
WI0018	Technical Offset Interior Seatrow Third	Interior	Length	mm	Defines the offset value for the interior lateral limitation for seatrow third.
HI0024	Roof Offset Second	Interior	Length	mm	Defines the offset from the roof for seatrow second.
HI0025	Roof Offset Third	Interior	Length	mm	Defines the offset from the roof for seatrow third.
HI0026	Current Distance to Roof First	Interior	Length	mm	The value is determined by measuring the distance between the SgRP and an intersection point of the roof interior offset surface with a line enclosing an angle of 8° with the absolute z-axis.
HI0027	Current Distance to Roof Second	Interior	Length	mm	The value is determined by measuring the distance between the SgRP and an intersection point of the roof interior offset surface with a line enclosing an angle of 8° with the absolute z-axis.
HI0028	Current Distance to Roof Third	Interior	Length	mm	The value is determined by measuring the distance between the SgRP and an intersection point of the roof interior offset surface with a line enclosing an angle of 8° with the absolute z-axis.
SeatSingle 2	Switches between single seat and seat row	Interior	String	-	This parameter has only visual influence. In dependency of the selected option the other one is put to NoShow.
SeatSingle 3	Switches between single seat and seat row	Interior	String	-	This parameter has only visual influence. In dependency of the selected option the other one is put to NoShow.
SpareWheel	Activates/Deactivates the spare wheel	Interior	String	-	Activates/Deactivates the spare wheel.
LI0018	Spare wheel x-coordinate	Interior	Length	mm	X-coordinate of the spare wheel defined within the vehicle's absolute coordinate system.
WI0019	Spare wheel y-coordinate	Interior	Length	mm	Y-coordinate of the spare wheel defined within the vehicle's absolute coordinate system.

HI0032	Spare wheel z-coordinate	Interior	Length	mm	Z-coordinate of the spare wheel defined within the vehicle's absolute coordinate system.
DI0001	Spare wheel diameter	Interior	Length	mm	Diameter of the spare wheel support geometry.
WI0020	Spare wheel width	Interior	Length	mm	Width of the spare wheel support geometry.
HI0029	Interior roof offset 1 difference	Interior	Length	mm	Calculates the difference between H61-1 and the current distance to the roof.
HI0030	Interior roof offset 2 difference	Interior	Length	mm	Calculates the difference between H61-2 and the current distance to the roof.
HI0031	Interior roof offset 3 difference	Interior	Length	mm	Calculates the difference between H61-3 and the current distance to the roof.
V210-1	Closed Luggage Compartment - First	Interior	Volume	m ³	Volume according to ISO 3832. For vehicles with tailgates, the parcel shelf in its normal position defines the upper limit of the compartment. The front limit is marked by the rear of the front seatback.[40]
V210-2	Closed Luggage Compartment - Second	Interior	Volume	m ³	Volume according to ISO 3832. For vehicles with tailgates, the parcel shelf in its normal position defines the upper limit of the compartment. The front limit is marked by the rear of the front seatback.[40]
V210-3	Closed Luggage Compartment - Third	Interior	Volume	m ³	Volume according to ISO 3832. For vehicles with tailgates, the parcel shelf in its normal position defines the upper limit of the compartment. The front limit is marked by the rear of the front seatback.[40]
V214-1	Largest Luggage Volume - First	Interior	Volume	m ³	The luggage compartment capacity, whereby the load height is limited by the headlining. The second seats or the second seatbacks are folded but not removed, even though the Instruction Manual proposes to remove the seats. The front limit is marked by the backrest of front seat back up to the seat height, and a vertical plane tangential to the rear side of the front seatback above.[40]
V214-2	Largest Luggage Volume - Second	Interior	Volume	m ³	The luggage compartment capacity, whereby the load height is limited by the headlining. The second seats or the second seatbacks are folded but not removed, even though the Instruction Manual proposes to remove the seats. The front limit is marked by the backrest of front seat back up to the seat height, and a vertical plane tangential to the rear side of the front seatback above.[40]
V214-3	Largest Luggage Volume - Third	Interior	Volume	m ³	The luggage compartment capacity, whereby the load height is limited by the headlining. The second seats or the second seatbacks are folded but not removed, even though the Instruction Manual proposes to remove the seats. The front limit is marked by the backrest of front seat back up to the seat height, and a vertical plane tangential to the rear side of the front seatback above.[40]
W0022	Exterior Offset Luggage	Interior	Length	mm	Offset value for creating the luggage reference volumes.
L0030	Limit for engine space (from L104)	Interior	Length	mm	Limit for engine space in x-direction of the absolute coordinate system. The reference plane is the vehicle front (L104).
H0023	V211-1 Top Plane	Interior	Length	mm	V211-1 Top plane.
W0023	Depth wheel house front	Interior	Length	mm	Parameter controls the extension of the wheel housing along y.
LI0022	Offset floor edge 1 to srp first	Interior	Length	mm	Parameter controls the distance from the parting edge of the interior floor support surface between seatrow 1 and 2. The distance is measured between the edge and the SgRP of the driver. A positive value moves the edge away from the SgRP in the direction of x (absolute coordinate system). In case of only 1 seatrow this parameter has no effect.
LI0024	Offset floor edge 2 to srp second	Interior	Length	mm	Parameter controls the distance from the parting edge of the interior floor support surface between seatrow 2 and 3. The distance is measured between the edge and the SgRP of the passenger second left. A positive value moves the edge away from the SgRP in the direction of x (absolute coordinate system). In case of only 1 seatrow this parameter has no effect.
H0024	V211-2 Top Plane	Interior	Length	mm	
H0025	V211-3 Top Plane	Interior	Length	mm	

A10013	Inclination angle shift gear	Interior	Angle	°	Inclination angle shift gear.
LI0030	Offset parting plane for H253 from SgRP driver	Interior	Length	mm	Offset parting plane for H253 from SgRP driver. This parameter has no influence on the visible geometry in case of a vehicle with 2 or 3 seatrows.
LI0031	Offset parting plane for H253 from SgRP passenger second	Interior	Length	mm	Offset parting plane for H253 from SgRP passenger second. This parameter has no influence on the visible geometry in case of a vehicle with 1 or 3 seatrows.
LI0032	Offset parting plane for H253 from SgRP passenger third	Interior	Length	mm	Offset parting plane for H253 from SgRP passenger third. This parameter has no influence on the visible geometry in case of a vehicle with 1 or 2 seatrows.
TLFront	Technical length front	Interior	Length	mm	Defines the length of the front vehicle.
TLRear	Technical length rear	Interior	Length	mm	Defines the length of the rear rear.
L31-1M	X-coordinate SgRP passenger first middle	Interior	Length	mm	The longitudinal (x) coordinate of the SgRP location for the passenger first middle.[40]
W20-1M	Y-coordinate SgRP passenger first middle	Interior	Length	mm	The lateral (y) coordinate of the SgRP location for the passenger first middle.[40]
H70-1M	Z-coordinate SgRP passenger first middle	Interior	Length	mm	The vertical (z) coordinate of the SgRP location for the passenger first middle.[40]
G00000031_AZ	Rotation angle z SgRP passenger first middle	Interior	Angle	°	Defines the angle around the z-axis for the front middle manikin.
G00000031_AY	Rotation angle y SgRP passenger first middle	Interior	Angle	°	Defines the angle around the y-axis for the front middle manikin.
G00000031_AX	Rotation angle x SgRP passenger first middle	Interior	Angle	°	Defines the angle around the x-axis for the front middle manikin.
L53-1M	X-coordinate HRP passenger first middle	Interior	Length	mm	X-coordinate HRP passenger first middle relative to SgRP.[40]
W0024	Y-coordinate HRP passenger first middle	Interior	Length	mm	Y-coordinate HRP passenger first middle relative to SgRP.
H30-1M	Z-coordinate HRP passenger first middle	Interior	Length	mm	Z-coordinate HRP passenger first middle relative to SgRP.[40]
G00000032_AZ	Rotation angle z HRP passenger first middle	Interior	Angle	°	Defines the angle around the z-axis for the front middle manikin.
G00000032_AY	Rotation angle y HRP passenger first middle	Interior	Angle	°	Defines the angle around the y-axis for the front middle manikin.
G00000032_AX	Rotation angle x HRP passenger first middle	Interior	Angle	°	Defines the angle around the x-axis for the front middle manikin.
TL-17-1M	H-point travel - front middle	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) between the foremost and rearmost design H-points, not including storage positions.[40]
A10013-1M	Torso angle seatrow first mid	Interior	Angle	°	
A10014-1M	Seat turning angle seatrow first mid	Interior	Angle	°	
A10015-1M	Foot angle passenger seat row first middle	Interior	Angle	°	
S0001	Vehicle cross section area	Interior	Area	m ²	Vehicle's cross section area in the x plane. The area is derived by using the CAVA silhouette feature. In case of CAVA not installed or lack of license, the value remains empty or 0.
R0008-2	Offset wheel cut chassis rear	Interior	Length	mm	Defines the offset for the chassis wheel cut rear. The offset value is added to the vehicle's wheel diameter rear.
L51-2-M	Effective legroom - second middle	Interior	Length	mm	The distance along a line from the ankle pivot center to the SgRP-Second, plus 254 mm with the heel of the shoe at the FRP and the bottom of the shoe at the FPA (See 3 - 3 . 6). Note 1: For long-coupled seating, leg room is measured from the ankle pivot center of the detached shoe, in the most forward location within a lateral space 127 mm either side of the occupant centerline. The shoe is not located at the FRP or FPA (See Procedure 3 - 5 . 3). Note 2: For short-coupled seating, leg room is measured with the shoe located at the FRP. When the front of the shoe interferes with the preceding seat, the amount of seat track travel needed to clear the interference is subtracted. If the preceding seat does not adjust, the horizontal interference is subtracted.[40]

L51-2-R	Effective legroom - second right	Interior	Length	mm	The distance along a line from the ankle pivot center to the SgRP-Second, plus 254 mm with the heel of the shoe at the FRP and the bottom of the shoe at the FPA (See 3 - 3 . 6). Note 1: For long-coupled seating, leg room is measured from the ankle pivot center of the detached shoe, in the most forward location within a lateral space 127 mm either side of the occupant centerline. The shoe is not located at the FRP or FPA (See Procedure 3 - 5 . 3). Note 2: For short-coupled seating, leg room is measured with the shoe located at the FRP. When the front of the shoe interferes with the preceding seat, the amount of seat track travel needed to clear the interference is subtracted. If the preceding seat does not adjust, the horizontal interference is subtracted.[40]
L51-3-M	Effective legroom - third middle	Interior	Length	mm	The distance along a line from the ankle pivot center to the SgRP-Second, plus 254 mm with the heel of the shoe at the FRP and the bottom of the shoe at the FPA (See 3 - 3 . 6). Note 1: For long-coupled seating, leg room is measured from the ankle pivot center of the detached shoe, in the most forward location within a lateral space 127 mm either side of the occupant centerline. The shoe is not located at the FRP or FPA (See Procedure 3 - 5 . 3). Note 2: For short-coupled seating, leg room is measured with the shoe located at the FRP. When the front of the shoe interferes with the preceding seat, the amount of seat track travel needed to clear the interference is subtracted. If the preceding seat does not adjust, the horizontal interference is subtracted.[40]
L51-3-R	Effective legroom - third right	Interior	Length	mm	The distance along a line from the ankle pivot center to the SgRP-Second, plus 254 mm with the heel of the shoe at the FRP and the bottom of the shoe at the FPA (See 3 - 3 . 6). Note 1: For long-coupled seating, leg room is measured from the ankle pivot center of the detached shoe, in the most forward location within a lateral space 127 mm either side of the occupant centerline. The shoe is not located at the FRP or FPA (See Procedure 3 - 5 . 3). Note 2: For short-coupled seating, leg room is measured with the shoe located at the FRP. When the front of the shoe interferes with the preceding seat, the amount of seat track travel needed to clear the interference is subtracted. If the preceding seat does not adjust, the horizontal interference is subtracted.[40]
Mass	Vehicle mass	Interior	Mass	kg	Vehicle total mass.
L115-2-L	SgRP - Second Left to Rear Wheel Centerline	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from SgRP- 2nd left to the centerline of the rear wheels. If the SgRP is rear of the wheel centerline, indicate a negative dimension.[40]
L115-2-M	SgRP - Second Middle to Rear Wheel Centerline	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from SgRP- 2nd middle to the centerline of the rear wheels. If the SgRP is rear of the wheel centerline, indicate a negative dimension.[40]
L115-2-R	SgRP - Second Right to Rear Wheel Centerline	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from SgRP- 2nd right to the centerline of the rear wheels. If the SgRP is rear of the wheel centerline, indicate a negative dimension.[40]
L115-3-L	SgRP - Third Left to Rear Wheel Centerline	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from SgRP- 3rd left to the centerline of the rear wheels. If the SgRP is rear of the wheel centerline, indicate a negative dimension.[40]
L115-3-M	SgRP - Third Middle to Rear Wheel Centerline	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from SgRP- 3rd middle to the centerline of the rear wheels. If the SgRP is rear of the wheel centerline, indicate a negative dimension.[40]
L115-3-R	SgRP - Third Right to Rear Wheel Centerline	Interior	Length	mm	The longitudinal distance (horizontal to grid) from SgRP- 3rd right to the centerline of the rear wheels. If the SgRP is rear of the wheel centerline, indicate a negative dimension.[40]

COG_X	Center of gravity x-coordinate	Mass	Length	mm	X-coordinate of the center of gravity in the absolute coordinate system.
COG_Y	Center of gravity y-coordinate	Mass	Length	mm	Y-coordinate of the center of gravity in the absolute coordinate system.
COG_Z	Center of gravity z-coordinate	Mass	Length	mm	Z-coordinate of the center of gravity in the absolute coordinate system.
Ixx_S	Inertia x-axis COG	Mass	Inertia	kg m ²	Inertia around the x-axis through the vehicles center of gravity.
Iyy_S	Inertia y-axis COG	Mass	Inertia	kg m ²	Inertia around the y-axis through the vehicles center of gravity.
Izz_S	Inertia z-axis COG	Mass	Inertia	kg m ²	Inertia around the z-axis through the vehicles center of gravity.
WheelBuffer	Buffer parameter for wheel data	Wheel	String	-	Buffer parameter for wheel data. This parameter is used in context with the wheel calculator and not intended to be altered by the user.
WFront	Wheel parameter front	Wheel	String	-	Definition parameter for front wheel. This parameter is used in context with the wheel calculator and not intended to be altered by the user.
WRear	Wheel parameter rear	Wheel	String	-	Definition parameter for rear wheel. This parameter is used in context with the wheel calculator and not intended to be altered by the user.
WFrontSW	Front wheel parameter for generating swept volume	Wheel	String	-	Definition parameter for front wheel for generating a swept volume. This parameter is used in context with the wheel calculator and not intended to be altered by the user.
WRearSW	Front wheel parameter for generating swept volume	Wheel	String	-	Definition parameter for rear wheel for generating a swept volume. This parameter is used in context with the wheel calculator and not intended to be altered by the user.

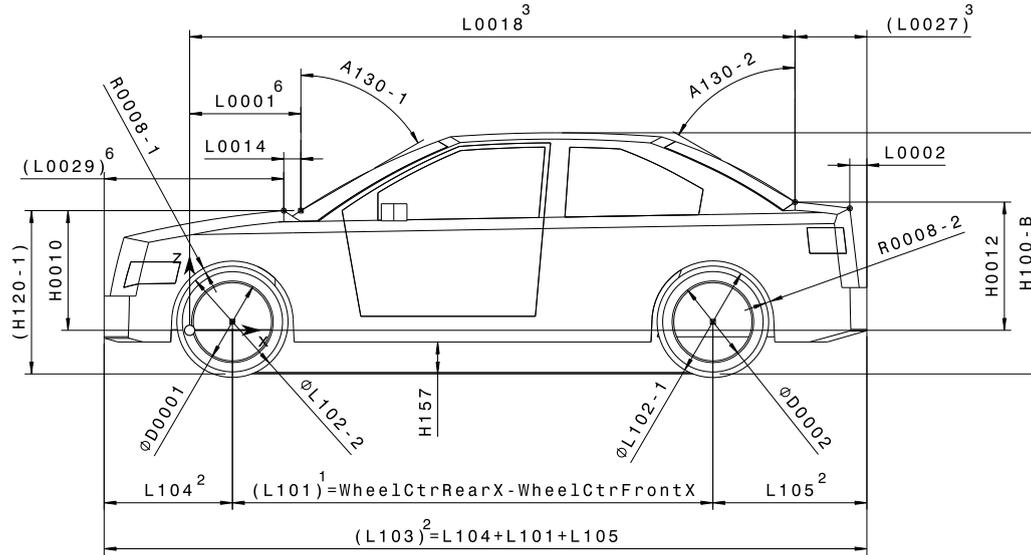


Abb. A.2: Hauptmaße Exterieur (Seitenansicht)

Tab. A.3: Maßketten zu Abb. A.2

Nr.	Name	Anmerkung	Standardausgabeparameter	Formel
1	Radstand	Differenz der Radkoordinaten.	L101	$L101 = WctrRx - WctrFx$
2	Fahrzeuglänge	Summe aus Überh. vo + Überh. hi + Radstand.	L103	$L103 = L104 + L101 + L105$
3	Windlaufpunkt hinten	Steuert die Positionierung des Windlaufpunktes. Standardmäßig ist dieser an das Heck des Fahrzeuges gekoppelt, kann aber auch absolut definiert werden.	L0018	$L0018 = WctrRx + L105 - L0027$
4	SgRP Koppeldistanz 1 - 2 (L50-2)	Differenz Sitzkoordinaten 2-1 (links).	L50-2	$L50 - 2 = L31 - 2L - L31 - 1L$
5	SgRP Koppeldistanz 2 - 3 (L50-3)	Differenz Sitzkoordinaten 3-2 (links).	L50-3	$L50 - 3 = L31 - 3L - L31 - 2L$
6	Windlaufpunkt vorne	Kann absolut oder relativ zum Überhang vorne positioniert werden.	L0029	$L0029 = L0001 + L104 - WctrFx$

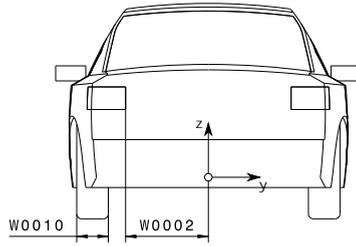


Abb. A.3: Hauptmaße Exterieur (Heckansicht)

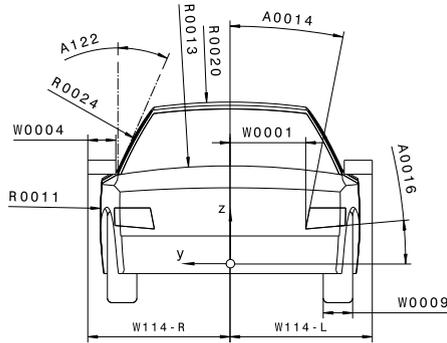


Abb. A.4: Hauptmaße Exterieur (Frontansicht)

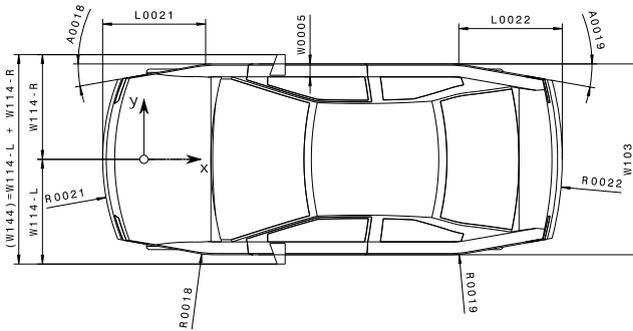


Abb. A.5: Hauptmaße Exterieur (Draufsicht)

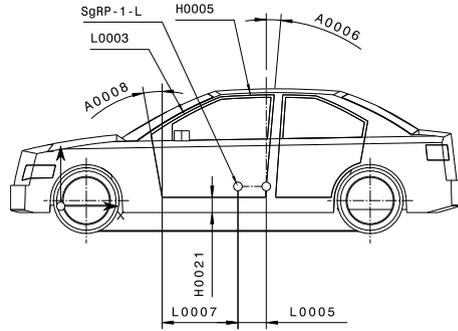


Abb. A.6: Abmessungen der Fronttür

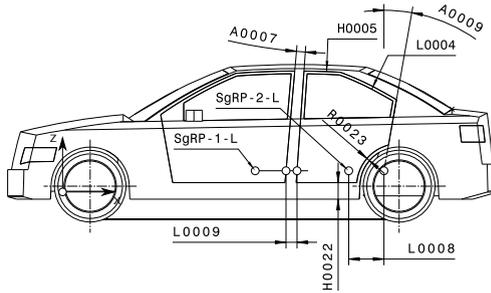


Abb. A.7: Abmessungen der Hecktür

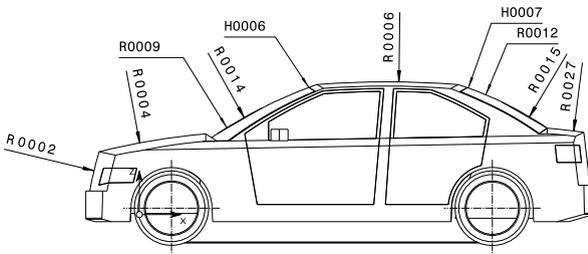


Abb. A.8: Exterieur-Krümmungsradien in der y-Ebene

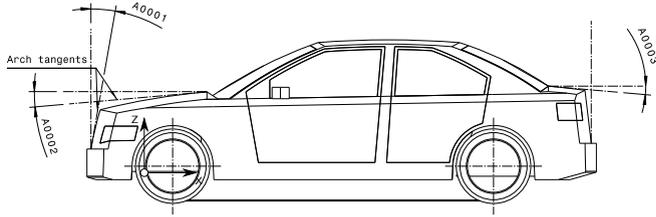


Abb. A.9: Exterieur-Winkelmaße (Seitenansicht)

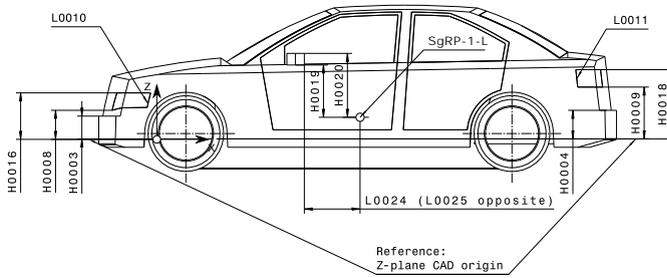


Abb. A.10: Abmessungen und Positionierung von Scheinwerfern und Seitenspiegel

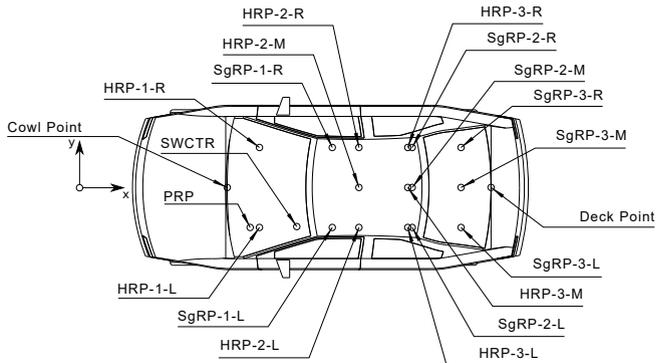


Abb. A.11: Auszug an 3D-CAD-Referenzpunkten

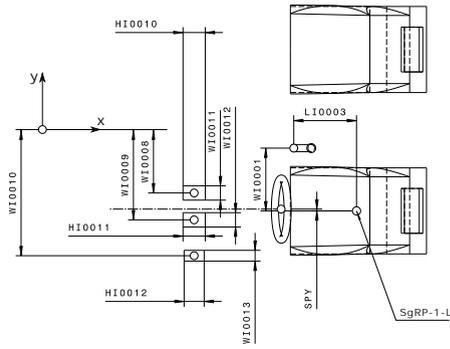


Abb. A.12: Interieurmaße für Pedalerie und Bedienelemente

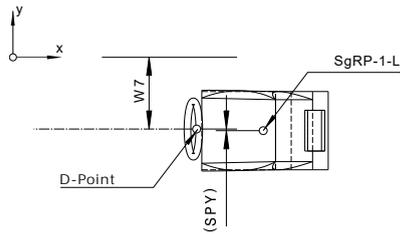


Abb. A.13: Laterale Positionierung des D-Punktes

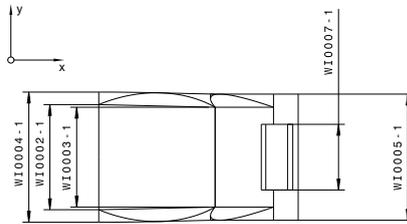


Abb. A.14: Breitenmaße des Sitzproportionsmodells

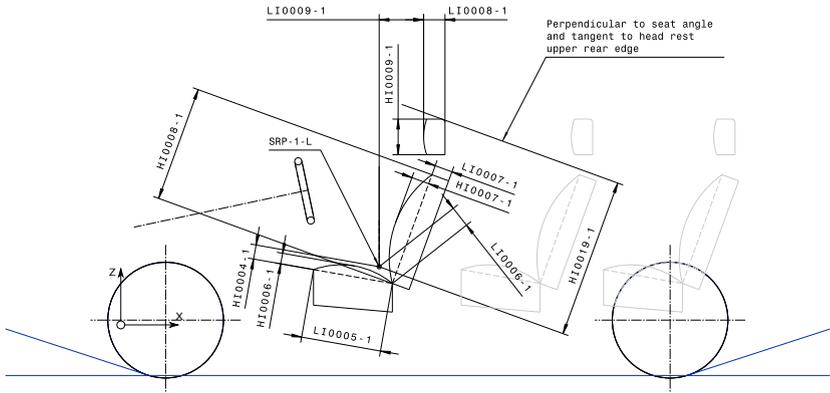


Abb. A.15: Längsmaße des Sitzproportionsmodells

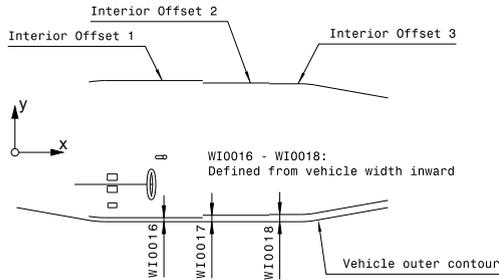


Abb. A.16: Interieurbegrenzungen für die Sitzreihen 1-3

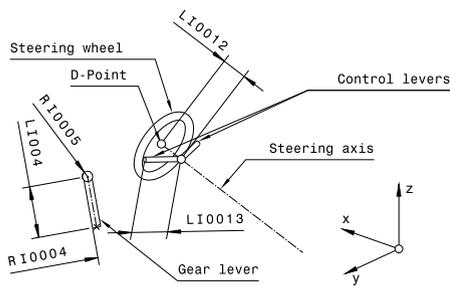


Abb. A.17: Positionierung und Bemaßung von Lenkstockhebel und Schaltknauf

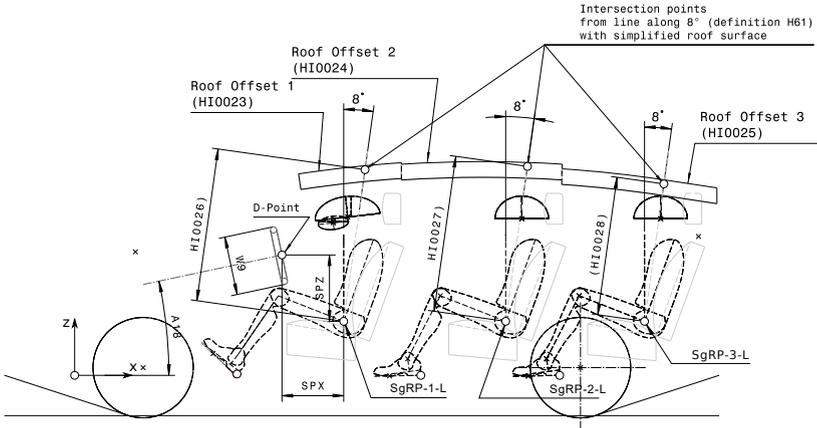


Abb. A.21: Innenraumabmessungen Kopffreiheit (Seitenansicht)

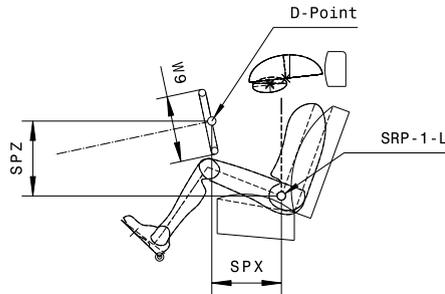


Abb. A.22: Definition der Positionierung des D-Punktes in der y-Ebene

A.5 Bewertungen im Software-Prototypen

In Tab. A.4 sind alle Bewertungen aufgeführt, die im Zuge der Validierung des Software-Prototypen *ConceptCar* genutzt wurden. In der Spalte *Klassifikation* sind jene Klassifikationen vermerkt, denen die jeweiligen Bewertungen initial zugeordnet sind. Diese können nachträglich durch den Anwender geändert werden.

Tab. A.4: Implementierte Prüfungen des Software-Prototypen *ConceptCar*

Name	Beschreibung	Klassifikation
A116-1	Checks the slope angle front.	Checks_Road
A116-2	Checks the slope angle rear.	Checks_Road
Curb front	Checks the static curb front.	Checks_Road
Curb rear	Checks the static curb rear.	Checks_Road
Curb dynamic front	Checks the dynamic curb front.	Checks_Road
Curb dynamic rear	Checks the dynamic curb rear.	Checks_Road
A117	Checks the inner angle.	Checks_Road
H157	Checks the ground clearance.	Checks_Road
Oil pan	Checks the clearance between the road surface and the oil pan.	Checks_Road

Wheel covering front	Checks the resulting wheel covering for the front wheels.	Checks_Exterior
Wheel covering rear	Checks the resulting wheel covering for the rear wheels.	Checks_Exterior
Number plate front	Checks the position of the front number plate.	Checks_Exterior
Number plate rear	Checks the position of the rear number plate.	Checks_Exterior
Lights	Checks the positioning of the exterior lights.	Checks_Exterior
Fields of view	Checks the resulting fields of view.	Checks_View
Wipers	Checks the whiped area on the windscreen surface.	Checks_View
Direct View	Checks the resulting direct view.	Checks_View
Pedestrian Protection	Creates the hit points on the selected vehicle front surface elements.	Checks_Safety
Head Impact	Checks the resulting head impact on the vehicle's bonnet surface.	Checks_Safety
Seating Belts	Checks the position of the seating belts anchor points.	Checks_Safety
Mirror	Checks the mirror view.	Checks_View
A-pillar obstruction	Checks the a-pillar obstruction angle.	Checks_View
B-pillar obstruction	Checks the b-pillar obstruction angle.	Checks_View
Extended/Reduced Fields of View	Checks the extended/reduced fields of view	Checks_View
L103	Checks the vehicle length.	Checks_Exterior
W103	Checks the vehicle width	Checks_Exterior
H100-B	Checks the vehicle body height	Checks_Exterior
H101-M	Checks the vehicle height maximum	Checks_Exterior
H110	Checks the vehicle height when tailgate is opened.	Checks_Exterior
H120-1	Checks the cowl point height.	Checks_Exterior
H130-1	Checks the step in height front.	Checks_Exterior
H130-2	Checks the step in height rear.	Checks_Exterior
H196	Checks the lift in height.	Checks_Exterior
W202	Checks the minimum width between the wheelhouses.	Checks_Luggage
W207	Checks the rear opening width - lower.	Checks_Luggage
W251	Checks the open Liftgate height to ground.	Checks_Luggage
L18	Checks the foot entrance clearance front.	Checks_Interior
L19	Checks the foot entrance clearance rear.	Checks_Interior
L48-2	Checks the knee clearance second.	Checks_Interior
L48-3	Checks the knee clearance third.	Checks_Interior
W3-1	Checks the shoulder room front.	Checks_Interior
W3-2	Checks the shoulder room second.	Checks_Interior
W3-3	Checks the shoulder room third.	Checks_Interior
W10-1	Checks the elbow width front.	Checks_Interior
W10-2	Checks the elbow width second.	Checks_Interior
W10-3	Checks the elbow width third.	Checks_Interior
W27-1	Checks the head clearance diagonal - driver.	Checks_Interior
W27-2	Checks the head clearance diagonal - second.	Checks_Interior
W27-3	Checks the head clearance diagonal - third.	Checks_Interior
H25-1	Checks the belt line front.	Checks_Interior
H25-2	Checks the belt line second.	Checks_Interior
H25-3	Checks the belt line third.	Checks_Interior
H61-1	Checks the effective headroom front.	Checks_Interior
H61-2	Checks the effective headroom second.	Checks_Interior
H61-3	Checks the effective headroom third.	Checks_Interior

Tabellenverzeichnis

3.1	Auswahl typischer Anforderungen in einem Fahrzeugkonzept	25
3.2	Wichtige Messlasten in der Fahrzeugkonstruktion	36
5.1	Gewichtsrelevante Attribute in der Konzeptproduktstruktur	108
5.2	Weitere gewichtsrelevante Attribute in der Konzeptproduktstruktur	110
5.3	Varianten im Geometrieexport des integrierten Konzeptmodells	146
5.4	Attribute des Geometrieimportes	148
6.1	Vorgabegruppen im integrierten Konzeptmodell	156
6.2	Auszug an Komponenten mit hohem Anteil am Gesamtfahrzeuggewicht	173
6.3	Standardelemente im Knoten <i>Zuladung</i> des Beladungsmodells	174
6.4	Technische Randbedingungen und Zielwerte für das Beispielkonzept	190
6.5	Gewichtswerte des Beispielkonzeptes	199
6.6	Massenträgheitsmomente für das Beispielkonzept	200
6.7	Eingangsgrößen für die Ermittlung funktionaler Fahrzeugeigenschaften	202
6.8	Errechnete Funktionseigenschaften des Beispielkonzeptes	203
6.9	Toleranzwerte für wesentliche Abmessungen des Beispielkonzeptes	206
A.1	Einfluss des Abstandes d auf das Gesamtmassenträgheitsmoment eines Quaders mit einer Kantenlänge $a = 200$ mm	222
A.2	Parameter des Software-Prototypen <i>ConceptCar</i>	223
A.3	Maßketten zu Abb. A.2	250
A.4	Implementierte Prüfungen des Software-Prototypen <i>ConceptCar</i>	257

Abbildungsverzeichnis

1.1	Produktkomplexität durch Varianten und Derivate	2
1.2	Neue Fahrzeugkonzepte für den urbanen Bereich	2
1.3	Vorgaben die Fahrzeugsicht betreffend	3
1.4	Gliederung der Fahrzeugarchitektur nach Kuchenbuch	3
1.5	Architektur des BMW i3	5
1.6	Exemplarischer Produktentwicklungsprozess aus Sicht eines OEM	6
1.7	Nach Gesichtspunkten des Simultaneous Engineering erstellter Produktentstehungsprozess am Beispiel der Automobilentwicklung	7
1.8	Produktwissen und Kostenverantwortung im PEP	7
1.9	Beispielhafte Gestalt einer automobilen Konzeptphase	8
1.10	Spannungsfeld der virtuellen Entwicklung von Gesamtfahrzeugen	9
2.1	Technische Aspekte der integrierten Konzeptentwicklung im Kontext der Fahrzeugarchitektur	12
2.2	Struktur der Arbeit	14
3.1	Die frühe Konzeptphase im Überblick	17
3.2	Wesentliche Bestandteile eines virtuellen Fahrzeugkonzeptes	18
3.3	Mögliche Gliederung nach Verantwortlichkeiten der technischen Entwicklung	19
3.4	Fiktive Plattform mit verschiedenen Hüten	22
3.5	BMW 5er Baureihe	23
3.6	Verschiedene Aspekte der Baukastennutzung	23
3.7	Integration von Antriebssysteme in bestehende Fahrzeugarchitekturen	24
3.8	Exemplarische Antriebsstränge alternativer Antriebssysteme	25
3.9	Unterschiede in der Darstellung von geometrischen Vorgaben auf Datensatzebene	27
3.10	Mögliche Definitionsquellen für technische Anforderungen	27
3.11	Exemplarisches Exterieurmaßkonzept	28
3.12	Unterschiedliche Aspekte des Sitzreferenzpunktes	29
3.13	Kopffreiheiten für den Fahrerplatz in Anlehnung an	29
3.14	Wesentliche Maßketten x-Richtung	30
3.15	Einflussnahme des Designs auf das Fahrzeug	31
3.16	Verwendung von Designdaten in der frühen Fahrzeugauslegung	31
3.17	Grundsätzliche Aspekte der Produktstrukturliste	32
3.18	Einflussparameter auf die Variantenstruktur am Beispiel eines Fahrzeugsitzes	33
3.19	Rolle der Produktstrukturliste in der technischen Entwicklung	33
3.20	Zielkonflikte in der Packageentwicklung von PKWs	34
3.21	Festlegung des Fahrzeugkoordinatensystems nach ISO	35
3.22	Aufbau und wesentliche Parameter einer Messlast	36
3.23	Wesentliche Bestandteile eines Gesamtfahrzeug-DMU	37
3.24	Aufbau und Validierung des Packages	37
3.25	Erweiterte Aspekte in der Bauraumbewertung	38
3.26	Verschiedene Bauraumdarstellungen für einen Sitz	39
3.27	Exemplarische Wirkkette in der geometrischen Auslegung einer Traktionsbatterie	41

3.28	Hauptfunktionsgruppen aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur	41
3.29	Approximation des Wendekreises	43
3.30	Einfluss der Fahrzeugmasse auf Produktmerkmale im Gesamtfahrzeugkontext	44
4.1	CAD-Daten im Entwicklungsprozess	46
4.2	Konstruktion einer Fläche mittels Subdivisionsverfahren	47
4.3	Anpassung einer Geometrie durch explizite Modellierung	48
4.4	Mögliche Informationsgehalte von Features	49
4.5	Beispielhafte Konstruktionshistorie in einem featurebasierten Konstruktionssystem	49
4.6	Unterschiedliche Aspekte von Assoziativität	50
4.7	Verschwindende Teilfläche in einem 3D-CAD-Modell	51
4.8	Mögliche Einsparung im Entwicklungsprozess mittels parametrisch-assoziativer Modellierung	52
4.9	Parametrisch-assoziative Baugruppensteuerung	52
4.10	Elemente einer exakten Darstellung	53
4.11	Unterschied zwischen exakter und tessellierter Geometrie	53
4.12	Visualisierungsprozess von CAD-Daten	54
4.13	Aufbau eines Zusammenbaus aus Datensicht	55
4.14	Exemplarische Beziehungen eines Bauteils in wissensbasierten CAD-Systemen	56
4.15	Funktionen innerhalb von wissensbasiertem CAD	56
4.16	Y0-Schnitt durch das DMU eines Mercedes G	58
4.17	Exemplarische DMU-Repräsentationen	58
4.18	Positionierung von Bauteilen/Baugruppen im DMU	59
4.19	Transformationswege zwischen Partialmodellen des integrierten Produktmodells	62
4.20	Konfigurationsmanagement im PDM	63
4.21	Einsatz PDM im Produktentstehungsprozess	63
4.22	Rolle des PDM in der Fahrzeugentwicklung	64
4.23	Horizontale und vertikale Datenaustauschrichtung	64
4.24	Informationen eines 3D-CAD-Datensatzes	65
4.25	Reduktion der übertragbaren Informationen bei autorensystemunabhängigen Standardformaten	65
4.26	Unterschiedliche Aspekte in der Vernetzung eines Bauteils	66
4.27	Bestandteile von STEP mit ihren zugehörigen Nummern der ISO 10303	68
4.28	Beschreibung eines Würfels in STL	68
4.29	Beschreibung eines Rechtecks in VRML	69
4.30	Strukturiertheit von Problemen	71
4.31	Schematische Topologien von Expertenwerkzeugen	72
4.32	Grundlegende Datenflüsse in der Nutzung parametrisch-assoziativer CAD-Modelle	72
4.33	Aspekte in der Planung von Expertenwerkzeugen	74
4.34	Ausgewählte Themenfelder in der Gesamtfahrzeugentwicklung aus Perspektive der Fahrzeugarchitektur	75
4.35	Virtuelle Räume am Beispiel einer Sacklochbohrung mit Gewinde	76
4.36	Exemplarische Darstellung gesetzlicher Vorgaben im CAD	76
4.37	Inhalte eines Konzeptmoduls Aerodynamik nach	77
4.38	Ablaufmodell eines Fahrzeugentwurfs nach Rasenack	78
4.39	Geometrische Kategorisierung von Package-Features nach Gessner	79
4.40	Vorgehensmodell der Fahrzeugkonzeptentwicklung nach Braess	79

4.41 Rohbaumodell eines PKW in SFE-CONCEPT	81
4.42 Einflüsse der Ergonomie auf die Fahrzeugarchitektur	82
4.43 Kiehler Puppe nach DIN 33408	82
4.44 Nutzung von 3D-Mensch-Modellen in der Fahrzeugentwicklung	83
4.45 Erweiterte virtuelle Menschmodelle zur Analyse von Verletzungen	83
4.46 Lücken in der virtuellen Entwicklung auf Ebene des Gesamtfahrzeugs aus dem Blickwinkel der Fahrzeugarchitektur	84
5.1 Zentrale Aspekte der integrierten Konzeptarbeit aus dem Blickwinkel der techni- schen Entwicklung	88
5.2 Komponenten des integrierten Konzeptmodells	90
5.3 Übersicht der Workflows im integrieren Konzeptmodell	92
5.4 Zustandsschema von Konzeptinformationen im integrierten Konzeptmodell	92
5.5 Überblick über das Parametermodell	93
5.6 Aufbau eines Parameterobjektes	94
5.7 Gültigkeitskriterien eines singulären numerischen Parameterwertes	96
5.8 Aufbau des Berechnungsobjektes	96
5.9 Steuerungsmöglichkeiten des Sitzreferenzpunktes im Fahrzeug	97
5.10 Verknüpfung von Parametern und Beziehungen im Parametermodell	97
5.11 Themenfelder in der Integration von CAD-Datensätzen im Gesamtfahrzeugkontext	98
5.12 Unterschiedliche Semantik von CAD-Datensätzen im Gesamtfahrzeugkontext	99
5.13 Modifikation von CAD-Datensätzen im Gesamtfahrzeugkontext	100
5.14 Unterschiedliche Positionierungsverfahren in der 3D-Konstruktion	100
5.15 Vorpositionierte CAD-Daten auf Basis VRML-Import	101
5.16 Unterschiedliche Verknüpfungsformen zwischen CAD-Datensätzen in parametrisch- assoziativen CAD-Systemen	102
5.17 Kriterien geometrischer Stabilität von CAD-Modellen	102
5.18 Beispiele für geometrische Instabilität	103
5.19 Ausführung von ereignisgesteuerten Aktionen in einem CAD-Datensatz	104
5.20 Grundelemente der Konzeptproduktstruktur	105
5.21 Überblick über die Haupt-Attribute der Konzeptproduktstruktur	106
5.22 Schema der assoziativen DMU-Referenzstruktur	107
5.23 Schema der Gewichtsermittlung auf Basis der Konzeptproduktstruktur	108
5.24 Massequellen der Konzeptproduktstruktur	109
5.25 Aussteuerung der Gewichtsrelevanz in der Gewichtsstruktur	109
5.26 Grundlegendes Schema der Gewichtsabschätzung für eine Komponente	109
5.27 Aspekte des Massenmanagements im integrierten Konzeptmodell	110
5.28 Bestimmung der Schwerpunktkoordinaten für eine Messlast	112
5.29 Datentechnische Sicht auf eine Funktion im Kontext des integrierten Konzeptmo- dells	114
5.30 Aufbau einer typischen Tabellenkalkulation	115
5.31 Aufbau einer typischen Simulation	116
5.32 Schematische Darstellung der Kernkomponenten des <i>Konzept-Frameworks</i>	117
5.33 Grundstruktur des <i>Geometrie-Frameworks</i>	118
5.34 Parametrische Steuerung innerhalb des <i>Geometrie-Frameworks</i>	118
5.35 Grundsätzliche Strukturierung der 3D-CAD-Referenzen	119
5.36 Auszug an Inhalten des 3D-CAD-Referenzmodells	120

5.37	Parameter eines <i>3D-CAD-Referenzpunktes</i>	120
5.38	Geometrische Zusammenhänge eines <i>3D-CAD-Referenzpunktes</i>	120
5.39	Einbindung des Vorgabemodells in das <i>Geometrie-Framework</i>	121
5.40	Primäre Strukturierung des Vorgabemodells	121
5.41	Einbindung des Vorgabemodells in das <i>Geometrie-Framework</i>	122
5.42	Aufbau des Konzeptknotens im CAD-Führungsmodell	122
5.43	Struktur des <i>Konzept-DMU</i>	123
5.44	Bestimmung des Komponentenmassenschwerpunktes	124
5.45	Unterschiedliche Repräsentanzen im <i>Konzept-DMU</i>	124
5.46	Nutzung von Proportionsmodellen zur Schwerpunktsabschätzung	125
5.47	Grundsätzliche Struktur des Knotens <i>3D-CAD-Output</i>	125
5.48	Parameterintegration über das <i>Konzept-Framework</i>	126
5.49	Aufbau und Komponenten eines generischen Geometriemoduls	127
5.50	Überblick über das <i>Funktions-Framework</i>	128
5.51	Aufbau eines Funktionsobjektes	129
5.52	Grundlegende Datenflüsse im <i>Funktions-Framework</i>	130
5.53	Grundlegende Elemente des Konfigurationsmodells	131
5.54	Grundlegende Gestalt des Konfigurationsmodells	131
5.55	Hauptobjekte des Konfigurationsmodells	132
5.56	Inhalte des Objektes Fahrzeugkonfiguration	132
5.57	Kaskadierender Prozess bei Änderung eines Parameters	133
5.58	Workflow zur Aktualisierung eines CAD-Features	133
5.59	Mögliche Degeneration von CAD-Modellen infolge Parameterkonstellationen	134
5.60	Maßkettensteuerung im Exterieur	134
5.61	Unterschiedliche Evaluierungsrichtungen von Maßketten	135
5.62	Überblick über das Klassifikations- und Sichtenmodell	136
5.63	Aufbau eines Klassifikationsobjektes	136
5.64	Aufbau des Sichtenobjektes	136
5.65	Informationsstruktur des Bereifungsobjektes	137
5.66	Daten des Sitzplatzobjektes	138
5.67	Das Bewertungsmodell im integrierten Konzeptmodell	139
5.68	Aufbau eines Bewertungsobjektes	140
5.69	Festlegung des Bewertungsstatus	141
5.70	Aufbau eines Bewertungssatzes	141
5.71	Inhalt der Taxonomiedatenbank	142
5.72	Inhalt der Taxonomiedatenbank	142
5.73	Grundvorstellung zur systematischen Archivierung im integrierten Konzeptmodell	143
5.74	Exemplarische zeitliche Entstehung von Konzeptdaten	144
5.75	Objektschema eines Workflowobjektes	144
5.76	Objektschema des Meilensteinobjektes	145
5.77	Ablaufmodell für die Nutzung von Meilenstein- und Workflowobjekten	145
5.78	Definition des Parameterexportes	146
5.79	Bereichsspezifischer Geometriexport	147
5.80	Ergebnisse eines Strukturexports	147
5.81	Grundsätzlicher Prozess des Geometriimports	147
6.1	Grundlegende Architektur des Software-Prototypen <i>ConceptCar</i>	154

6.2	Fahrzeugklassenspezifische Nutzung von Gewichtsinformationen	156
6.3	Auszug an geometrischen Vorgaben im Gesamtfahrzeugkontext	157
6.4	Schematische Darstellung von Exterieur und Interieur	158
6.5	Aufbau, Datenflüsse und Verknüpfungen im 3D-Proportionsmodell	159
6.6	Nutzung von Elementen der Proportionsmodelle im Konzept-DMU	160
6.7	Schematischer Aufbau des Exterieurmodells	160
6.8	Steuerung der Fahrzeugbreite (W103)	161
6.9	Auswahl schematischer DMU-Komponenten	161
6.10	Proportionsmodell eines Gesamtfahrzeugs	162
6.11	Bestimmung der Fahrzeugprojektionsfläche in Längsrichtung	162
6.12	Prozess zur Berechnung der Fahrzeugquerschnittsfläche	163
6.13	Workflow zur Nutzung des 2D-Layouts im Gesamtfahrzeugkontext	163
6.14	Automatisierte Erzeugung von 3D-Abmessungen	164
6.15	Grundsätzliche Struktur des Fahrwerkkinematikmodells	165
6.16	Grundsätzliche Struktur des Sammelknotens für Fahrwerkkinematikmodelle	165
6.17	Parametrisches Fahrwerk im integrierten Konzeptmodell	166
6.18	Entstehung einer DMU-Hülle	166
6.19	Bereitstellung von Referenzen aus dem integrierten Konzeptmodell für ergonomische Untersuchungen	167
6.20	3D-Ergonomieadapter im Geometrie-Framework	167
6.21	Nutzung eines externen Menschmodells	168
6.22	Einbindung des Klimatisierungsadapters im integrierten Konzeptmodell	169
6.23	Prozess in der Klimatisierungsbewertung	169
6.24	Design-Vorgabemodell im integrierten Konzeptmodell	170
6.25	Statistische Verteilung des Rohbaugewichts für ausgewählte Fahrzeugklassen	172
6.26	Bestimmung von Gewichtswerten in der Konzeptphase	172
6.27	Wesentliche Elemente im Massenspackage	173
6.28	Gliederung des Beladungsmodells	174
6.29	Abbildung von Masse im CAD	175
6.30	Visualisierung schwerpunktbezogener Informationen im CAD	175
6.31	Überlagertes Antriebsstrangmodell	176
6.32	Aussteuerung eines rein verbrennungsmotorischen Antriebsstranges	177
6.33	Erforderliche Daten eines vereinfachten Längsdynamikmodells für die Verbrauchsermittlung	177
6.34	Abmessungen und Winkel am Einspurmodell	179
6.35	Eigenlenkwinkel und Gierverstärkungsfaktor	180
6.36	Versorgungsworkflow im integrierten Konzeptmodell für die Bewertung der Steuertendenz	181
6.37	Überschlagswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des <i>SSF</i>	181
6.38	Prozess der Kippstabilitätsbewertung	182
6.39	CAD-basierte Abbildung des Wendekreises im integrierten Konzeptmodell	183
6.40	Mögliche Workflows zur Ermittlung des Wendekreises	183
6.41	Parametrische Rohbauflächen in SFE-CONCEPT	184
6.42	Koppelung eines Strukturmodells mit dem Konzeptgerüst	185
6.43	Grundlegende Verknüpfungsstrategie zwischen dem integrierten Konzeptmodell und einem parametrischen Rohbaumodell	185

6.44	Workflow für die Integration eines parametrischen Rohbaumodells	186
6.45	Exemplarische Umsetzung einer grafischen Schnittstelle zur Parametersteuerung	187
6.46	Exemplarische Implementierung eines Sitzkonfigurators	188
6.47	Möglicher Arbeitsprozess mittels integrierter Konzeptarbeit	189
6.48	Vorgehensmodell in der Entwurfsgestaltung im integrierten Konzeptmodell . . .	190
6.49	Exemplarischer Bedatungsworkflow für ein neues Fahrzeugkonzept	191
6.50	Ablaufschema für die geometrische Basisdefinition	192
6.51	Anpassung des Verhaltens von Maßketten im integrierten Konzeptmodell	193
6.52	Geometrisches Basiskonzept für das Beispielfahrzeug	193
6.53	Geometrisches Basiskonzept für ein Kleinfahrzeug	194
6.54	Beispielhafter Ergonomieentwicklungsprozess	194
6.55	Grundlegende ergonomische Vorauslegung eines Fahrzeugkonzeptes	195
6.56	Ableitung von Innenraummaßen aus Sicht der Ergonomie	195
6.57	Möglicher Designentwicklungsprozess im integrierten Konzeptmodell	196
6.58	Nutzung von Designinformationen im integrierten Konzeptmodell	197
6.59	Unterschiedliche Design-Stände im integrierten Konzeptmodell	198
6.60	Leitprozess zur Anwendung des Gewichtsmodells	199
6.61	Massenpackage des Beispielkonzeptes	200
6.62	Überblick über Datenflüsse im Funktionsmodell	201
6.63	Ermittlung der Projektionsfläche für das Beispielkonzept	202
6.64	Zentrale Komponenten der praktischen Umsetzung des Bewertungsmodells	203
6.65	Grundlegende Aspekte in der praktischen Nutzung der Bewertungsmethodik des integrierten Konzeptmodells	204
6.66	Vorgehensschema in der Nutzung des Bewertungsmodells im Entwicklungsprozess	205
6.67	Ablaufmodell für die Bewertung	205
A.1	Auszug an parametrischen Karosserievorlagen	221
A.2	Hauptmaße Exterieur (Seitenansicht)	250
A.3	Hauptmaße Exterieur (Heckansicht)	251
A.4	Hauptmaße Exterieur (Frontansicht)	251
A.5	Hauptmaße Exterieur (Draufsicht)	251
A.6	Abmessungen der Fronttür	252
A.7	Abmessungen der Hecktür	252
A.8	Exterieur-Krümmungsradien in der y-Ebene	252
A.9	Exterieur-Winkelmaße (Seitenansicht)	253
A.10	Abmessungen und Positionierung von Scheinwerfern und Seitenspiegel	253
A.11	Auszug an 3D-CAD-Referenzpunkten	253
A.12	Interieurmaße für Pedalerie und Bedienelemente	254
A.13	Laterale Positionierung des D-Punktes	254
A.14	Breitenmaße des Sitzproportionsmodells	254
A.15	Längsmaße des Sitzproportionsmodells	255
A.16	Interieurbegrenzungen für die Sitzreihen 1-3	255
A.17	Positionierung und Bemaßung von Lenkstockhebel und Schaltknäuf	255
A.18	Definition des Pedalreferenzpunktes	256
A.19	Definition der Trennung des Innenraumbodens	256
A.20	Abmessungen der I-Tafel und des Innenraumbodens	256
A.21	Innenraumabmessungen Kopffreiheit (Seitenansicht)	257

A.22 Definition der Positionierung des D-Punktes in der y-Ebene 257

Literaturverzeichnis

- [1] A2MAC1: *A2mac1 - Automotive Benchmarking*. <https://www.a2mac1.com/home/loginpage/Default.asp>. – Zugriff: 14.03.2018
- [2] ANDERL, R. ; TRIPPNER, D.: *STEP: standard for the exchange of product model data ; eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP)*. Stuttgart [u.a.] : Teubner, 2000. – ISBN 978-3-519-06377-3
- [3] ANYBODY TECHNOLOGY: *AnyBody Automotive*. <http://www.anybodytech.com/industries/automotive/>. – Zugriff: 12.03.2016
- [4] AUDI AG: *Der neue Audi A3*. <http://www.audi.at>. – Zugriff: 04.03.2016
- [5] BAZILEVS, Y. ; CALO, V. M. ; COTTRELL, J. A. ; EVANS, J. A. ; HUGHES, T. J. R. ; LIPTON, S. ; SCOTT, M. A. ; SEDERBERG, T. W.: Isogeometric analysis using T-splines. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 199 (2010), Nr. 5, S. 229–263. ISBN 0045-7825
- [6] BEITZ, W.: Leistungsfähige Produktentwicklung durch rechnerunterstützte Konstruktionsmethodik und Kreativität. In: *Tagung Konstruktionstechnik (KdT)* 7 (1990), S. 7–27
- [7] BÖHME, M.: *Ein methodischer Ansatz zur parametrischen Produktmodellierung in der Fahrzeugentwicklung*, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Dissertation, 2004
- [8] BMW-GROUP: *Der BMW 5er*. <http://www.bmw.at/de/neufahrzeuge/5/limousine/2016/auf-einen-blick.html>. – Zugriff: 03.10.2017
- [9] BMW-GROUP: *Historie BMW 5er*. <https://mediapool.bmwgroup.com/mediapool/econtroller/pressclub/publicq?actEvent=high&dokNo=P90053786>. – Zugriff: 14.11.2017
- [10] BMW-GROUP: *Konzept BMW i*. www.bmw-i.de. – Zugriff: 03.03.2015
- [11] BONITZ, Peter: *Freiformflächen in der rechnerunterstützten Karosseriekonstruktion und im Industriedesign: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin [u.a.] : Springer Verlag, 2009. – ISBN 978-3-540-79439-4
- [12] BOSSMANN, M.: *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung*, Universität Saarland, Dissertation, 2007
- [13] BRASS, Egbert: *Konstruieren mit CATIA V5: Methodik der parametrisch-assoziativen Flächenmodellierung*. 4., aktualis. u. erw. Aufl. Hanser Verlag, 2009. – ISBN 978-3-446-41378-8
- [14] BRAESS, H.-H.: Konzeption künftiger Personenkraftwagen. In: *Fortschrittsberichte VDI* 25 (1975), Nr. 25
- [15] BRAESS, H.-H ; SEIFFERT, U.: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg Verlag, 2013. – ISBN 978-3-658-01690-6
- [16] BROCKE, T.: *Konzept zur Komplexitätsbeherrschung in der Automobilindustrie*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2011

- [17] BURR, H.: *Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau*, Universität Saarland, Dissertation, 2008
- [18] CHAFFIN, D. B.: Human motion simulation for vehicle and workplace design. In: *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing* 17 (2007), Nr. 5, S. 475–484
- [19] COTTRELL, J. A. ; HUGHES, Thomas J. R. ; BAZILEVS, Yuri: *Isogeometric analysis: toward integration of CAD and FEA*. 1. publ.;1. Aufl.;1., Chichester : Wiley, 2009. – ISBN 978–0–470–74873–2
- [20] DASSAULT SYSTÈMES: *3DEXPERIENCE*. <https://www.3ds.com/products-services/3dexperience/>. – Zugriff: 25.08.2018
- [21] DASSAULT SYSTÈMES: *CATIA*. <https://www.3ds.com/products-services/catia/>. – Zugriff: 24.08.2018
- [22] DASSAULT SYSTÈMES: *CREO Parametric Modellierungssoftware*. <https://www.ptc.com/de/products/cad/creo/parametric>. – Zugriff: 25.08.2018
- [23] DEGEN, E.: *Das Daimler Blog*. <https://blog.daimler.com/2017/01/23/b-klasse-f-cell-mit-wasserstoff-durch-la/>. – Zugriff: 14.03.2018
- [24] Norm DIN 199 Teil 1 März 2002. *Technische Produktdokumentation, CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten*
- [25] Norm DIN 33408 Teil 1 mar 2008. *Körperumrisschablonen - Teil 1: Für Sitzplätze*
- [26] Norm DIN 4000 Teil 13 September 2012. *Sachmerkmal-Listen; Begriffe und Grundsätze*
- [27] Norm DIN EN ISO 9214 Teil 110 September 2008. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion: Grundsätze der Dialoggestaltung*
- [28] Norm DIN 8855 November 2013. *Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe*
- [29] DYLA, A.: *Modell einer durchgängigen rechnerbasierten Produktentwicklung*, TU München, Dissertation, 2002
- [30] EBEL, B. ; HOFER, M. B.: *Automotive Management : Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft*. 2. überarb. und akt. Aufl. 2014;. Berlin, Heidelberg : Springer Gabler, 2014. – ISBN 978–3–642–34067–3;
- [31] EHRENSPIEL, K. ; KIEWERT, A. ; LINDEMANN, U. ; MÖRTL, M.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. Springer Vieweg Verlag, 2007. – ISBN 978–3–642–41958–4
- [32] EHRENSPIEL, K. ; MEERKAMM, H.: *Integrierte Produktentwicklung*. Springer, 2013. – ISBN 978–3–446–43548–3
- [33] EIGNER, M. ; STELZER, R.: *Product Lifecycle Management*. Springer Verlag, 2009. – ISBN 978–3–540–44373–5
- [34] ELECTRIVE.NET BRANCHENDIENST FÜR ELEKTROMOBILITÄT: *VW E-Up – Das Volkswagnis*. <https://www.electrive.net/2013/10/13/vw-e-up-das-volkswagnis/>. – Zugriff: 12.03.2018

- [35] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen*. Europäische Union, 2014
- [36] FORSEN, J.: *Ein systemtechnischer Ansatz zur methodische parametrisch-assoziativen Konstruktion am Beispiel von Karosseriebauteilen*. Aachen : Shaker Verlag, 2003. – ISBN 3-8322-1862-9
- [37] FU, L. ; BURAK KARA, L. ; SHIMADA, K.: Feature, Design Intention and Constraint Preservation for Direct Modeling of 3D Freeform Surfaces. In: *3D Research* 3 (2012), Nr. 2, S. 1–18
- [38] GERKENS, M.: *Standardisierung von 3D-CAD-Modellen und Modellierungsmethoden*, Universität Bayreuth, Dissertation, 2004
- [39] GESSNER, K.: *Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung*. Dissertation an der TU Berlin, 2001. – Fraunhofer IPK/IRB Verlag
- [40] GLOBAL CAR MANUFACTURER INFORMATION EXCHANGE GROUP: *Package Drawing Exchanges*. GCIE, 2013
- [41] GRABNER, J. ; NOTHHAFT, R.: *Konstruieren von Pkw-Karosserien: Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5*. 3., erw. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2006. – ISBN 978-3-540-23884-3
- [42] GRABOWSKI, H. ; ERB, J. ; POLLY, A. ; ANDERL, R.: STEP - Grundlage der Produktdatentechnologie. Aufbau und Entwicklungsmethodik. In: *CIM Management* 10 (1994), Nr. 4, S. 45–51. ISBN 0179-2679
- [43] HARRICH, A.: *CAD basierte Methoden zur Unterstützung der Karosseriekonstruktion in der Konzeptphase*, TU Graz, Dissertation, 2014
- [44] HAVEMANN, S.: *Modellierung in der Computergrafik Polygonnetze und Freiformflächen*, TU Braunschweig, Dissertation, 2003
- [45] HEINKE, O.: Fahrzeugauslegung mit Hilfe von Eigenschaftsparametern - Möglichkeit oder Utopie? In: *Fortschrittsberichte VDI* 12 (1994), Nr. 229
- [46] HEISZING, B. ; ERSOY, M.: *Fahrwerkshandbuch*. Vieweg Verlag, 2007. – ISBN 978-3-834-80444-0
- [47] HÖGBERG, D. ; CASE, K.: Predefined Manikins to Support Consideration of Anthropometric Diversity by Product Designers. In: *Digital Human Modeling: First International Conference on Digital Human Modeling, ICDHM 2007, Held as Part of HCI International 2007, Beijing, China, July 22-27, 2007. Proceedings* (2007), S. 110–119. ISBN 978-3-540-73321-8
- [48] HIAMTOE, P. ; STEINHARDT, F. ; KÖHLER, U. ; BENGLER, K.: Subjective and objective evaluation of sense of space for vehicle occupants based on anthropometric data. In: *Work* 41 (2012), Nr. SUPPL.1, S. 252–257

- [49] HIRZ, M.: *Advanced Computer Aided Design in Conceptual Automotive Development*. TU Graz, 2011. – Habilitation
- [50] HIRZ, M. ; GFRERRER, A. ; LANG, J. ; DIETRICH, W.: *Integrated computer-aided design in automotive development: development processes, geometric fundamentals, methods of CAD, knowledge-based engineering data management*. Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-11939-2
- [51] HIRZ, M. ; HIRSCHBERG, W. ; DIETRICH, W.: Integrated 3D-CAD Design Methods in Early Automotive Development Processes. In: *International Federation of Automotive Engineering (FISITA) (2008)*
- [52] HÄNSCHKE, A.: *Ein Strukturmodell zur rechnergestützten Fahrzeugentwicklung*, TU Berlin, Dissertation, 1989
- [53] HORNER, P.: *Entwicklung von Methoden zur Fahrdynamikauslegung an virtuellen Konzeptfahrzeugen in Matlab/Simulink*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2010
- [54] HS GROUP: *RAMSIS Automotive*. https://www.human-solutions.com/group/upload/bilddatenbank/RAMSIS_Automotive/RAMSIS-aklasse.jpg. – Zugriff: 10.02.2018
- [55] HS GROUP: *RAMSIS Automotive - China remains a strong growth market*. http://www.human-solutions.com/group/front_content.php?idcat=107&idart=3010&lang=2. – Zugriff: 05.02.2018
- [56] HUDELMAIER, J.: *Sichtanalysen im PKW unter Berücksichtigung von Bewegung und individuellen Körpercharakteristika*, TU München, Dissertation, 2003
- [57] Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2011 Dezember 2011. *ISO/IEC/IEEE International Standard - Systems and software engineering – Life cycle processes –Requirements engineering*
- [58] Norm IEEE 42010-2011 November 2011. *ISO/IEC/IEEE Systems and software engineering – Architecture description*
- [59] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *Road vehicles; Three-dimensional reference system and fiducial marks; Definitions*. 1978
- [60] Norm ISO 14306 nov 2017. *Industrial automation systems and integration – JT file format specification for 3D visualization*
- [61] JAROS, M.: *Integration des STEP-Produktmodells in den Getriebeentwicklungsprozess*, TU München, Dissertation, 2007
- [62] JAXON, N. ; QIAN, XP: Isogeometric analysis on triangulations. In: *COMPUTER-AIDED DESIGN* 46 (2014), Nr. 1, S. 45–57. ISBN 0010–4485
- [63] JUNG, K. ; KWON, O. ; YOU, H.: Development of a digital human model generation method for ergonomic design in virtual environment. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 39 (2009), Nr. 5, S. 744 – 748. – ISSN 0169–8141
- [64] KLUG, L.: *Methodischer Einsatz von parametrischen Prototypen in der Produktentwicklung*, TU-Darmstadt, Dissertation, 2006

- [65] KOSCHORREK, R.: *Systematisches Konzipieren mittels Ähnlichkeitsmethoden am Beispiel von PKW-Karosserien*. Logos-Verlag, 2007 (Produktionstechnik - Berlin). – ISBN 978-3-8325-1784-7
- [66] KRAMER, S.: *Virtuelle Räume zur Unterstützung der Feature-basierten Produktgestaltung*. Hanser Verlag, 1994 (Produktionstechnik - Berlin). – ISBN 978-3-446-18035-2
- [67] KUCHENBUCH, K.: *Methodik zur Identifikation und zum Entwurf packageoptimierter Elektrofahrzeuge*, TU Braunschweig, Dissertation, 2012
- [68] KURBEL, K.: *Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen - Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme*. Springer, 1992. – ISBN 978-3-540-55237-6
- [69] LIESE, H.: *Wissensbasierte 3D-CAD-Repräsentation*, TU-Darmstadt, Dissertation, 2004
- [70] LOSSACK, R.: *Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnergestützte Konstruktion*. Springer Verlag, 2006. – ISBN 978-3-540-29947-9
- [71] MATHWORKS: *MATLAB*. <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>. – Zugriff: 24.08.2018
- [72] MENDGEN, R.: *Methodische Vorgehensweise zur Modellierung in parametrischen und featurebasierten 3D-CAD-Systemen*, TU-Darmstadt, Dissertation, 1999
- [73] MERCEDES BENZ: *Neuer S 500 PLUG-IN HYBRID: Die S-Klasse als Dreiliter-Auto*. <http://media.daimler.com>. – Zugriff: 14.01.2018
- [74] MERCEDES BENZ G: *Das Gesamtfahrzeugteam*. <http://www.mercedes-benz-g.at/de/gesamtfahrzeug.html>. – Zugriff: 15.08.2017
- [75] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer, 2004. – ISBN 978-3-540-42011-8
- [76] MÜLLER, M.: *Modularisierung von Produkten. Entwicklungszeiten und -kosten reduzieren*. Fachbuchvlg. Leipzig, 2000. – ISBN 978-3-446-21460-6
- [77] MUELLER, A.: *Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzeptes als Grundlage des Interior- und Exterior designs*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2010
- [78] NGUYEN, VP ; ANITESCU, C. ; BORDAS, SPA ; RABCZUK, T.: Isogeometric analysis: An overview and computer implementation aspects. In: *MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION* 117 (2015;2012;), S. 89–116. ISBN 0378-4754
- [79] NIEMIERSKI, S.: *Parametergesteuerte Karosserie-Generierung im PKW-Vorentwurf*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1988
- [80] PAHL, G. ; BEITZ, W.: *Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*. Springer, 2007. – S. 629ff. – ISBN 978-3-642-29569-0
- [81] PEUGEOT: *BB1 Concept Car*. <http://www.peugeot.de/concept-cars-showroom/bb1/concept-car/#!>. – Zugriff: 04.03.2016
- [82] POTTHOFF, J.: CAVA: Fahrzeugauslegung mit CATIA V5 unter Berücksichtigung gesetzlicher Vorgaben und Richtlinien. 89 (2008), S. 30–41. ISBN 978-3-8169-2776-1

- [83] PRINZ, A.: *Struktur und Ablaufmodell für das parametrische Entwerfen von Fahrzeugkonzepten*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2010
- [84] RAABE, R.: *Ein rechnergestütztes Werkzeug zur Generierung konsistenter Pkw-Maßkonzepte und parametrischer Designvorgaben*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2013
- [85] RASENACK, W.: *Parametervariation als Hilfsmittel bei der Entwicklung eines Parameter-Package*, TU Berlin, Dissertation, 1998. – Offset-Druckerei Gerhard Weinert, Berlin
- [86] RENNER, I.: *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil*, TU München, Dissertation, 2007
- [87] RILL, G.: *Road Vehicle Dynamics - Fundamentals and Modeling*. CRC Press, 2012. – ISBN 978-1-4398-3898-3
- [88] ROSSBACHER, P. ; HIRZ, M.: *Parametrisierte Konzeptauslegung "ParamKa"*. TU Graz : Institut für Fahrzeugtechnik, 2012
- [89] ROSSBACHER, P. ; HIRZ, M.: Flexible parameterization strategies in automotive 3D vehicle layout. In: *Computer-Aided Design and Applications* 14 (2017), Nr. 5, S. 549–562
- [90] ROSSBACHER, P. ; HIRZ, M. ; DIETRICH, W.: 3D CAD Parametric Design Strategies with Interlinked CAE Reference Object Creation for the Overall Vehicle Layout Optimization in the Early Automotive Concept Phase. In: *FISITA World Congress 2010*, 2010
- [91] ROSSBACHER, P. ; HIRZ, M. ; HARRICH, A. ; DIETRICH, W. et a.: The potential of 3D-CAD based process optimization in the automotive concept phase. In: *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* Bd. 2, 2009. – ISBN 1946-3979, 250-257
- [92] SAE INTERNATIONAL: *J1100 – Motor Vehicle Dimensions*. SAE International, 2009
- [93] SANDER, A.: *Potentiale eines multidisziplinären Fahrzeugauslegungssystems*, TU Berlin, Dissertation, 2007
- [94] SCHICHEL, M.: *Produktdatenmodellierung in der Praxis*. Hanser Verlag, 2002. – ISBN 978-3-446-21857-4
- [95] SCHMUTTE, T.: *Verknüpfung der Fahrzeugentwurftools SFE CONCEPT und CONCEPT CAR mit dem Ziel der Prozessdurchgängigkeit*, Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorarbeit, 2012
- [96] SCHRAMM, D. ; HILLER, M. ; BARDINI, R.: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2010. – ISBN 978-3-540-89313-4;
- [97] SFE-GROUP: *Ableitung einer Fahrzeugstruktur auf Basis einer bestehenden Plattform*. www.homepage.sfe-group.org. – Zugriff: 07.03.2015
- [98] SFE-GROUP: *SFE CONCEPT*. <http://www.homepage.sfe-group.org/produkte/sfe-concept/>. – Zugriff: 07.03.2015
- [99] SIEMENS PLM: *Jack and Process Simulate Human*. <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/human-ergonomics/jack.shtml>. – Zugriff: 12.09.2017

-
- [100] SIEMENS PLM: *NX*. https://www.plm.automation.siemens.com/de_at/products/nx/. – Zugriff: 25.08.2018
- [101] SPUR G., Krause F.-L.: *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik*. Fachbuchverlag Leipzig, 1997. – ISBN 978-3-446-19176-1
- [102] STEP AP242 PROJECT: *Introduction*. <http://www.ap242.org>. – Zugriff: 02.06.2016
- [103] SVIOKLA, J. J.: Business Implications of Knowledge-based Systems. In: *SIGMIS Database* 17 (1986), Juli, Nr. 4, S. 5–19. – ISSN 0095-0033
- [104] TASS INTERNATIONAL: *MADYMO Human model*. <https://www.tassinternational.com/madymo>. – Zugriff: 12.09.2017
- [105] TECHNIA TRANSCAT: *CAVA – CATIA Automotive Extensions Vehicle Architecture*. <https://www.techniatranscat.com/de/techniatranscat-software/data-quality-and-validation/cava>. – Zugriff: 25.08.2018
- [106] TEMIZER, P. ; WRIGHTS, P. ; HUGHES, T. J. R.: Contact treatment in isogeometric analysis with NURBS. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 200 (2011), Nr. 9, S. 1100–1112. ISBN 0045-7825
- [107] TOYOTA RD LABS: *Human body model for injury analysis*. <http://www.tytlabs.com/tech/thums/thums02.html>. – Zugriff: 10.06.2017
- [108] TROLL, A.: *CAx-Datenaustausch mit neutralen Datenformaten: Prozessgetriebene Konzeption eines Assistenzsystems für die Produktentwicklung*, Universität Bayreuth, Dissertation, 2011
- [109] TU CHEMNITZ - INSTITUT FÜR MECHATRONIK: *alaska/Dynamicus*. <https://www.tu-chemnitz.de/ifm/produkte-html/alaskaDYNAMICUS.html>. – Zugriff: 12.09.2017
- [110] TU MÜNCHEN - LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE: *RAMSIS - ein digitales Menschmodell für die virtuelle Produktentwicklung*. <https://www.lfe.mw.tum.de/forschung/software/ramsris/>. – Zugriff: 02.01.2018
- [111] UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE: Vehicle Safety - Opportunities Exist to Enhance NHTSA's New Car Assessment Program. In: *Report to Congressional Committees GAO-05-370* (2005)
- [112] VDI-RICHTLINIE 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. VDI-Verlag, 2004
- [113] VDI-RICHTLINIE 2209: *3-D-Produktmodellierung*. VDI-Verlag, 2009
- [114] VDI-RICHTLINIE 2218: *Feature-Technologie*. VDI-Verlag, 2003
- [115] VDI-RICHTLINIE 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI-Verlag, 1993
- [116] VDI-RICHTLINIE 2249: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung CAD-Benutzungsfunktionen*. VDI-Verlag, 2003
- [117] VOLKSWAGEN AG: *Autogramm*. http://autogramm.volkswagen.de/01-02_12/standorte/standorte_01.html. – Zugriff: 12.11.2017

- [118] VOLKSWAGEN AG: *Beginn einer neuen Ära: Volkswagen führt den Modularen Querbaukasten (MQB) ein.* http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/themes/2012/02/MQB.html. – Zugriff: 07.02.2012
- [119] VOLKSWAGEN AG: *Komponenten des e-Antriebs und des Hochvoltbatteriesystems im e-Golf.* <http://www.volkswagen.com>. – Zugriff: 03.09.2015
- [120] VOLKSWAGEN AG: *Der Nils. Das Konzeptauto für die moderne Mobilität.* http://emobility.volkswagen.de/de/de/private/Technologie/Konzeptfahrzeug_NILS.html. – Zugriff: 03.01.2016
- [121] VOLLRATH, M. ; BUBB, H. ; BENGLER, K. ; GRUNEN, R. E.: *Automobilergonomie.* Springer, 2015. – ISBN 978-3-834-81890-4
- [122] VW PW MEDIENPORTAL: *Designskizze T-Roc.* <http://vw.media-corner.ch/suche?cat=5835>. – Zugriff: 02.07.2018
- [123] WARTZACK, S. ; MEERKAMM, H.: Durchgängige Rechnerunterstützung in der Produktentwicklung durch den Einsatz semantisch hochwertiger Features. In: *Beschleunigung der Produktentwicklung durch EDM/PDM- und Feature-Technologie* (1999), Nr. 1497
- [124] WEIT E.V. - VEREIN ZUR WEITERENTWICKLUNG DES V-MODELL® XT: *Das V-Modell XT.* <http://weit-verein.de/>. – Zugriff: 09.09.2018
- [125] WILDEMAN, H.: *Die Zukunft des Wachstums.* München : TCW Transfer-Centrum-Verlag, 2004. – ISBN 978-3-642-41958-4
- [126] WOZNY, M. J.: Research Trends in the U.S. for the next Generation CAD Systems. In: *CAD92 - Neue Konzepte zur Realisierung anwendungsorientierter CAD-Systeme. Tagungsband der GI-Fachtagung.* (1992). – Hrsg. Krause, F.-L.; Ruland, D.; Jansen, H.
- [127] X3D.ORG: *VRML97.* <http://www.web3d.org/documents/specifications/14772/V2.0/part1/javascript.html>. – Zugriff: 12.12.2017
- [128] ZAGEL, M.: *Übergreifende Konzepte zur Strukturierung variantenreicher Produkte und Vorgehensweise zur iterativen Produktstrukturoptimierung,* TU Kaiserslautern, Dissertation, 2006
- [129] ZAINER, P.: *Entwicklung von Methoden zur Fahrdynamikauslegung an virtuellen Konzeptfahrzeugen in Matlab/Simulink,* TU Graz, Bachelorarbeit, 2010
- [130] ZIEGLER, J.: Benutzergerechte Software-Gestaltung im VDI-Gemeinschaftsausschuß Bürokommunikation — VDI 5005 “Software-Ergonomie in der Bürokommunikation“. In: *Menschengerechte Software als Wettbewerbsfaktor. Berichte des German Chapter of the ACM* (1993), S. 140–151. ISBN 978-3-519-02681-5

Monographic Series TU Graz

Reihe Fahrzeugtechnik

- Band 1** Haymo Niederkofler
**Analyse radselektiv eingreifender
Fahrdynamikregelsysteme für die Anwendung
in Elektromechanischen Corner-Modulen**
2012
ISBN 978-3-85125-220-0
- Band 2** Andrés Eduardo Rojas Rojas
Passenger Vehicles with In-Wheel Motors
2012
ISBN 978-3-85125-234-7
- Band 3** Daniel Wallner
**Experimental and Numerical Investigations
on Brake Squeal**
2013
ISBN 978-3-85125-269-9
- Band 4** Alexander Harrich
**CAD-basierte Methoden zur Unterstützung der
Karosseriekonstruktion in der Konzeptphase**
2015
ISBN 978-3-85125-420-4
- Band 5** Cornelia Lex
Maximum Tire-Road Friction Coefficient Estimation
2015
ISBN 978-3-85125-422-8
- Band 6** Stefan Bernsteiner
**Integration of Advanced Driver Assistance
Systems on Full-Vehicle Level**
2016
ISBN 978-3-85125-468-6

Monographic Series TU Graz

Reihe Fahrzeugtechnik

Band 7 Patrick Roszbacher

**Beitrag integrierter Konzeptmodelle
zur virtuellen Gesamtfahrzeugentwicklung
in der frühen Entwurfsphase**

2020

ISBN 978-3-85125-730-4