

Kay Büttner

Systematik zum Entwurf
eines Versuchsfeldes im
Kontext der virtuellen
Kraftfahrzeugentwicklung

Schriftenreihe des Lehrstuhls
Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 2



Schriftenreihe des Lehrstuhls
Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 2

ISSN 2509-694X





Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Thema:

Systematik zum Entwurf eines Versuchsfeldes im Kontext der virtuellen Kraftfahrzeugentwicklung

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Kay Büttner
geb. am 23.11.1979 in Dresden

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop
(Fak. Verkehrswissenschaften – „Friedrich List“, TU Dresden)

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Ruge
(Fak. Bauingenieurwesen, TU Dresden)

Tag der Einreichung: 26.09.2016

Tag der Verteidigung: 13.01.2017



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2017

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2017

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2017

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2017

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9470-6

eISBN 978-3-7369-8470-7



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik der Technischen Universität Dresden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop, der mir in anhaltendem Vertrauen die Projektleitung zur Konzeption eines neuen Versuchsfeldes am Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik übertrug und für mich damit die thematische Grundlage für diese Arbeit schuf. Darüber hinaus bin ich ihm für die Möglichkeit zu unzähligen fachlichen Diskussionen mit vielen hilfreichen Anregungen während der Bearbeitung und letztlich die Begutachtung der Arbeit sehr dankbar.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Ruge danke herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und seine wertvollen Anregungen aus dem Blickpunkt eines Baudynamikers und Mathematikers.

Ich danke den Planern und meinen Kollegen im Planungsteam zum Fahrzeugtechnischen Versuchszentrum für die immer freundliche und konstruktive Zusammenarbeit auch und vor Allem in Zeiten großer Anspannung. Allen voran danke ich den Herren Dipl.-Ing. Hartmut Hofmann, Dipl.-Ing. Robert Kittel und Dipl.-Ing. Jörg Dittrich, welche dieses Projekt mit der Unterstützung vieler hier nicht genannter ermöglicht haben. All denen sei mein Dank gewiss.

Stellvertretend für alle Mitarbeiter/-innen am Lehrstuhl Kraftfahrzeugtechnik danke ich Herrn Dipl.-Ing. Jan Kubenz für das angenehm kollegiale Arbeitsumfeld und die Entlastung während der Schreibphase. Besonders hervorgehoben sei Herr Dipl.-Ing. André Stoller, der durch seine Bereitschaft zu zahlreichen konstruktiven Gesprächen zu vielen Erkenntnissen in dieser Arbeit beigetragen hat. Für die fachliche und freundschaftliche Unterstützung danke ich außerdem Dipl.-Ing. Hendrik Abel, Dipl.-Ing. Christian Angrick, Dipl.-Ing. Christoph Schiller, Dipl.-Ing. Michal Hasenkopf, Dipl.-Ing. Andreas Zäper, Dipl.-Ing. Mathis Luft, Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Scheffler, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf, Dr.-Ing. Joachim Gier, Dipl.-Ing. Falko Berger, Dipl.-Ing. Sten Urban und Dipl.-Ing. Mario Henke.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner lieben Frau Małgorzata, die mir trotz unendlicher Entbehrungen immer zur Seite stand. Du hast mich immer bestärkt und auch in schweren Phasen nie den Glauben an mich verloren. Deine Geduld und Liebe haben mir den Freiraum geschaffen, um diese Arbeit zu vollenden.



Von Herzen danke ich meinen Kindern Olivia und Herbert, die mir durch ihre bedingungslose Liebe jeden Tag aufs Neue Kraft und Durchhaltevermögen gaben. Auch meinen Eltern und meiner Familie danke ich für die rückhaltlose Unterstützung.

Dresden, September 2016

Kay Büttner



Kurzfassung

Der stetig wachsende Mobilitätsbedarf der Gesellschaft erfordert leistungsfähige Verkehrssysteme. Diese müssen in der Lage sein, zum einen höhere Transportleistungen zu erbringen und zum anderen den veränderten individuellen Anforderungen der mobilen Gesellschaft zu genügen. Bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen ergeben sich daraus vielschichtige neue Herausforderungen für Fahrzeughersteller und Zulieferer. Steigende Variantenvielfalt und Systemkomplexität werden mit erhöhtem Umwelt- und Sicherheitsbewusstsein zu bestimmenden Randbedingungen. Im Entwicklungsprozess müssen deshalb funktionale Zielkonflikte zeitig erkannt und aufgelöst werden. Dafür sind neue Analyse- und Entwicklungsmethoden erforderlich, welche mit Hilfe einer Kombination aus simulativen und experimentellen Werkzeugen die Forschung zum grundlegenden Verständnis physikalischer Zusammenhänge im Fahrzeug unterstützen. Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmals eine Systematik zur simultanen Entwicklung eines Versuchsfeldes, der darin funktional abgestimmten Prüfstände und dem Funktionsgebäude vorgestellt. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten nutzt die Systematik methodische Ansätze aus dem Systems Engineering und zeigt das systematische Vorgehen der drei Entwicklungsprozesse unter Anwendung des V-Modells. Beginnend mit einer umfassenden Anforderungsanalyse werden Verfahren zur Wirkkettenanalyse im Versuchsfeld und im Gebäude vorgestellt, welche für deren Konzeption wesentliche Randbedingungen setzen. Anhand ausgewählter Prüfstände wird die Methode der modellbasierten Entwicklung vorgestellt. Die Prüfstände sollen später realistische, komplexe Belastungszustände nachbilden können. Dazu werden charakteristische Fahrmanöver mit Hilfe der Mehrkörpersimulation nachgebildet und durch Einführung von Beobachtungspunkten an den jeweiligen Schnittstellen mechanische Kenngrößen ermittelt. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist die virtuelle Kombination der Prüfstände zu einem funktional zusammenhängenden Versuchsfeld sowie dessen Integration in ein Funktionsgebäude. Dabei werden funktionale und technische Wechselwirkungen der Prüfstände untersucht. Es werden unter anderem Verfahren zur Fundamentierung und zum Energiemanagement entwickelt, die abhängig vom Reifegrad in allen Entwicklungsphasen des komplexen Versuchsfeldes eingesetzt werden können. Es entsteht dabei ein Versuchsfeld für fahrdynamische und schwingungstechnische Untersuchungen physikalischer Wirkketten im Kraftfahrzeug. Das Versuchsfeld stellt dabei die technischen Rahmenbedingungen hinsichtlich mechanischer Entkopplung, räumlicher Nähe und Energieversorgung der Prüfstände. Es ermöglicht damit die Implementierung einer Hardware-in-the-Loop-Anwendung zur Abbildung komplexer Fahrmanöver auf mehreren Prüfständen gleichzeitig. Die Gültigkeit der Systematik wird anhand der Entwicklung des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums der Technischen Universität Dresden nachgewiesen.

Abstract

The society's steady growing mobility need requires more efficient transport systems. These systems must be able to provide better transportation solutions and to face the changing needs individuals in a mobile society. This results in new and complex challenges for motor vehicle manufacturers and suppliers. Increasing number of variants and system complexity relating to rising environmental and safety awareness becomes a constraint. Therefore, the functional trade-offs must be early detected and resolved in the development process. For this purpose new analysis and design methods are needed that support researches in fundamental understanding of physical relationships in the vehicle by using a combination of experimental and simulative tools. This thesis introduces a method for the simultaneous development of a test field, including its functionally coordinated test rigs and the building. In contrast to other publications, this systematic uses methodological approaches from the *Systems Engineering* and shows the systematic approach of the three development processes using the V-Model. Beginning with a comprehensive requirements analysis methods for physical chain analysis in the test field and in the building are presented, which put significant constraints on their design. A method of model-based development is presented based on selected test benches. Later the test benches should be able to reproduce realistic, complex load cases. These characteristic maneuvers are simulated using the multibody simulation and determined by the introduction of observation points at the respective interfaces mechanical characteristics. Another focus of the work is the virtual combination of test rigs to a functionally related test field and its integration into a functional building.

Functional and technical interactions between the test rigs are examined. Among others, methods for vibration isolation and for energy management that can be used depending on the degree of maturity in all stages of development process of the complex test field will be developed. The result is a testing ground for driving dynamics and vibration studies of physical chains in an automotive context. This test field provides the technical conditions in terms of mechanical decoupling, spatial proximity and energy supply. It thus enables the implementation of a hardware-in-the-loop applications to realize complex maneuvers on several test rigs simultaneously. The validity of the scheme is proved during the development process of the Automotive Testing Center at *Technische Universität Dresden*.



Inhalt

Vorwort	v
Kurzfassung	vii
Abstract	viii
Verwendete Formelzeichen	xiii
Abkürzungen	xvi
Abbildungsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Ziele der Arbeit.....	7
1.2 Abgrenzung.....	9
1.3 Aufbau der Arbeit	12
2 Stand der Technik	13
2.1 Kraftfahrzeugentwicklung.....	13
2.1.1 Trends und neue Herausforderungen	15
2.1.2 Methoden	18
2.1.3 Frontloading	28
2.1.4 Simultaneous engineering.....	29
2.2 Methodische Versuchsfeldgestaltung.....	32
2.3 Prüfstandentwicklung	35
2.3.1 Komponentenprüfstände	38
2.3.2 Subsystem- und Systemprüfstände	41
2.3.3 Gesamtfahrzeugprüfstände.....	45
3 Theoretische Vorbetrachtungen	49
3.1 Methoden im Entwicklungsprozess	50
3.1.1 Problemlösungszyklus nach Hall/BWI.....	51
3.1.2 V-Modell	52
3.1.3 Bewertungsmethoden	55
3.2 Virtuelle Methoden	57
3.2.1 Einsatz der numerischen Simulation	57
3.2.2 Modellbasierte Produktentwicklung.....	59
3.3 Schwingungstechnik	61



3.3.1	Schwingungsmessung	62
3.3.2	Schwingungsisolierung	64
3.3.3	Modale Analyse.....	68
4	Entwicklungsprozess „Versuchsfeld“	73
4.1	Beschreibung der Ausgangssituation.....	75
4.1.1	Ausgangssituationsanalyse.....	75
4.1.2	Bestandsanalyse.....	78
4.1.3	Neuausrichtung der Forschungseinrichtung.....	79
4.1.4	Systemdarstellung.....	84
4.2	Anforderungsanalysen	86
4.2.1	Analyse der mobilen Gesellschaft	90
4.2.2	Analyse des Fahrzeugentwicklungsprozesses.....	91
4.2.3	Anforderungen Eigenschaftsfeld „Fahrdynamik“	96
4.2.4	Anforderungen Eigenschaftsfeld „Schwingungskomfort“	99
4.2.5	Anforderungen Eigenschaftsfeld „Haltbarkeit und Lastdaten“	104
4.2.6	Prozessspezifische Anforderungen	107
4.2.7	Fazit des Anforderungsprozesses	111
4.3	Konzepterstellung „Versuchsfeld“	112
4.3.1	Zielformulierung	114
4.3.2	Synthese und Lösungsanalyse	116
4.3.3	Vorläufige Struktur des Versuchsfeldes	122
4.4	Systementwicklung „Prüfstand“	124
4.4.1	Anforderungsanalyse für Prüfstände.....	127
4.4.2	Konzeptentwurf Gesamtprüfstand.....	130
4.4.3	Virtuelle Konzeptabsicherung und Integration.....	139
4.5	Vorbereitung zur Gebäudeintegration	143
4.5.1	Anlagenplan	143
4.5.2	Betreiberkonzept Prüfstände.....	144
4.5.3	Schnittstellenliste	145
4.5.4	Energetische Anforderungen.....	146
4.5.5	Anlagentechnisches Raumbblatt und Raumbuch.....	146
4.5.6	Anlagentechnisches Installations- und Wartungskonzept	147
4.5.7	Anlagensicherheit.....	148



5	Beitrag zum Entwicklungsprozess „Gebäude“	151
5.1	Ablauf des Planungsprozesses	151
5.2	Grundlagenermittlung und Vorplanung	152
5.2.1	Betriebskonzept	153
5.2.2	Standortwahl	154
5.2.3	Anforderungsanalyse „Gebäude und Umfeld“	155
5.2.4	Machbarkeitsanalysen	157
5.2.5	Situationsbewertung	161
5.3	Konzeptentwurf Gebäudestruktur - Entwurfsplanung	161
5.3.1	Darstellung der Ausgangssituation für den Gebäudeplanungsprozess	161
5.3.2	Funktionales Blockschaubild	162
5.3.3	Technologische und geometrische Gleichzeitigkeit	165
5.3.4	Konzept zur Gebäudestruktur	166
5.3.5	Konzepte zur Konditionierung und Medienversorgung	167
5.4	Fundamentierung von Prüfständen	168
5.4.1	Konzeptentwurf	168
5.4.2	Auslegung der Schwingisolierung	181
5.5	Energiemanagement	192
5.5.1	Zielformulierung und Lösungsansatz	193
5.5.2	Modellbildung und Simulation	196
5.5.3	Potenziale und Möglichkeiten	201
6	Ergebnisdiskussion	204
6.1	Plausibilität der Systematik	204
6.2	Chancen und Risiken	206
6.3	Planungsergebnisse Versuchsfeld, Prüfstand und Gebäude	207
6.4	Handlungsempfehlung	212
6.4.1	Projektspezifische Weiterentwicklung	212
6.4.2	Methodenspezifische Weiterentwicklung	212
6.5	Ausblick	213
7	Zusammenfassung	216
	Glossar	219
	Quellenverzeichnis	220
	Anhang	235



A.	Überblick zu Versuchseinrichtungen	235
B.	Matrizen für die Variantenanalyse	243
C.	Anforderungsliste Rad-Achs-Prüfstand	244
D.	Benutzeroberfläche Energiemanagement	248
E.	CAD-Modellstruktur am Beispiel Gebäude 127	249
F.	Berechnungsergebnisse Strukturanalyse Blockfundament	250
G.	Weiterer Darstellungen der Planungsergebnisse	251



Verwendete Formelzeichen

Variable	Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigung
a	m	Abstand vom Mittelpunkt des Ersatzradius
b	Ns/m	Dämpfung
b	m	Abstand vom Mittelpunkt des Ersatzradius
c	N/m	Federsteifigkeit
C	-	Steifigkeitsmatrix
D	-	Dämpfungsgrad, modale Dämpfung
D	-	Dämpfungsmatrix
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
G	m/s^2	Erdbeschleunigung
G_{dyn}	GPa	dynamischer Schubmodul
h	m	Höhe
H	-	Übertragungsfunktion im Frequenzbereich
H	-	Übertragungsfunktionsmatrix
i	%	Isolierungsgrad
k	Ns/m	Dämpfungskonstante
K	-	Dämpfungsmatrix
L	m	Länge
m	kg	seismische Masse im Sensor, Masse
M	-	Massenmatrix
M	Nm	Drehmoment / Biegemoment
n	s^{-1}	Drehzahl
$N_{n,i}$	-	Einzelnutzwert
p	-	Eigenwert
P	kW	Leistung
$P_{n,i}$	-	Erfüllungsgrad
\underline{q}	-	verallgemeinerte Koordinate



Variable	Einheit	Bedeutung
\dot{q}	-	erste Zeitableitung der verallgemeinerten Koordinate
\ddot{q}	-	zweite Zeitableitung der verallgemeinerten Koordinate
Q		Systemantwort
Q	m^3/s	Volumenstrom
R	$^\circ$	Rotation/Winkel
s	m	Abstand
S	kg/m^2	Flächenbezogener Massenfaktor
t	s	Zeit
u	m	Weg
v	m/s	Geschwindigkeit
V	-	Vergrößerungsfunktion
W_i	-	Wichtungsfaktor
x	m	Weg, translatorische Auslenkung in X-Richtung
y	m	Weg, translatorische Auslenkung in Y-Richtung
z	m	Weg, translatorische Auslenkung in Z-Richtung
δ	-	Abklingkonstante
δ	$^\circ$	Lenkradwinkel
η	-	Frequenzverhältnis
ν	-	Querdehnzahl
ρ	kg/m^3	Materialdichte
r	m	Radius
λ	m	Wellenlänge
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit
φ	rad	Phasenwinkel
$\underline{\varphi}$	-	Eigenvektor
ω	s^{-1}	Kreisfrequenz
ω_0	s^{-1}	Eigenkreisfrequenz
Ω	s^{-1}	Erregerfrequenz



Indizes

Index	Bedeutung
<i>A</i>	auf den Ausgang bezogen
<i>A</i>	auf den Aufbau bezogen
<i>dyn.</i>	dynamisch
<i>e</i>	exzentrisch
<i>erf.</i>	erforderlich
<i>Ers.</i>	Ersatz
<i>E</i>	Erregung / Erreger
<i>E</i>	auf den Eingang bezogen
<i>F</i>	auf das Fundament bezogen
<i>hor.</i>	horizontal
<i>h, v</i>	horizontal, vertikal
<i>n</i>	Zählindex / Laufindex
<i>max.</i>	maximal
<i>r</i>	rotatorisch
<i>U</i>	Unwucht
<i>t</i>	translatorisch
<i>stat.</i>	statisch
<i>vert.</i>	vertikal
<i>x</i>	in X-Richtung
<i>y</i>	in Y-Richtung
<i>z</i>	in Z-Richtung

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung	Englische Übersetzung
3D	dreidimensional	three-dimensional
Abb	Abbildung	figure
AFS	Aktive Fahrwerksstabilisierung	active chassis stabilization
AG	Aktien Gesellschaft	corporation
ARS	Aktiver Rollstabilisator	active anti-roll-bar
B	Breite	width
BB	Blockbauweise	block design
BEV	Elektrofahrzeug	battery electric vehicle
BWI	Betriebswissenschaftlichen Institut der ETH Zürich	
CAD	rechnergestütztes Konstruieren	computer aided design
CAE	rechnergestützte Entwicklung	computer aided engineering
CC	Korrelationskoeffizient zwischen links- und rechtsseitiger Unebenheit	correlation coefficient between left and right-side unevennesses
Elek.	Elektroanlagen	electrical installations
EM	Energiemanagement	energy management
EPS	Elektrisch unterstütztes Lenksystem	electric power steering
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm	electronic stability program
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule (Zürich)	
FBA	Fahrbahnanregung	roadway surface excitation
FD	Fahrdynamik	driving dynamics
FEM	Finite Elemente Methode	finite element method
FEP	Fahrzeugentwicklungsprozess	automotive development process
FHG	Freiheitsgrad	degree of freedom
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart	
Fund.	Fundamentierung	foundation
GLT	Gebäudeleittechnik	central building control system
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung	limited liability company



Abkürzung	Bedeutung	Englische Übersetzung
h	Stunden	hours
H	Höhe	height
HEV	Hybridfahrzeug	hybrid electric vehicle
HiL		hardware in the loop
HL	Haltbarkeit und Lastdaten	durability and load data
HV	Hochspannungsbereich	high-voltage range
hyd. / Hyd.	hydraulisch / Hydraulik	hydraulic / hydraulics
IKA	Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University	
IT	Informationstechnologie	information technology
Kap	Kapitel	chapter
KnC	kinematisch und elastokinematisch	kinematics and compliance
L	Links	left
L	Länge	length
LCV	Leichte Nutzfahrzeuge	light cargo vehicle
LDS	Lenkraddrehschwingung	steering wheel rotary oscillation
LR	Lenkrad	steering wheel
LW	Lenkwinkel	steering angle
M	Mitte	middle
M	Massen	masses
max.	maximal	maximum
MDS	Mehr Domain Simulation	multi domain simulation
mech. / Mech.	mechanisch / Mechanik	mechanical / mechanics
Mio	Millionen	millions
MKS	Mehrkörpersimulation	multi body simulation
mph	Meilen pro Stunde	miles per hour
Nfz	Nutzfahrzeug	commercial vehicle, heavy trucks
NP	Nennerpolynom	denominator polynomial
NVH	Geräusch, Vibration, Rauheit	noise vibration harshness
OEM	Hersteller des Originalerzeugnisses / Fahrzeughersteller	original equipment manufacturer
PB	Plattenbauweise	plate design
PEP	Produktentstehungsprozess	product development process



Abkürzung	Bedeutung	Englische Übersetzung
PID	Regler mit Proportional-, Integral- und Differenzialanteil	proportional–integral–derivative controller
PLZ	Problemlösungszyklus	problem-solving cycle
p-p	Amplitude zu Amplitude	peak to peak
R	Rechts	right
Regl.	Regelung	control
SK	Schwingungskomfort	vibration comfort
SL	Schlagleiste	cleat
SOP	Beginn der Serienproduktion	Start of production
SP	Schwerpunkt	center of gravity
SWOT	Analyse von Stärken, Schwächen, Chancen und Bedrohungen	analysis of Strengths Weaknesses Opportunities and Threats
Sz	Szenario	scenario
Tab	Tabelle	table
TU	Technische Universität	
TWB	Technisch Wirtschaftliche Bewertung	technical economic assessment
VDA	Verband der Automobilhersteller	
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	
vgl	vergleiche	compare
vs	im Vergleich zu	versus
XiL		X in the loop
ZMS	Zweimassenschwungrad	dual mass flywheel



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Absatz von Kraftfahrzeugen in China nach [94]	1
Abb. 1.2	Verteilung und Gestaltungsmöglichkeiten der Kosten im PEP aus [34]	4
Abb. 1.3	Umsatzentwicklung der deutschen Automobilindustrie 2000 - 2014 kumuliert [Quelle: Destatis]	5
Abb. 1.4	Handlungsfelder für die Automobilindustrie [95]	6
Abb. 1.5	Wertschöpfungsentwicklung in der Automobilindustrie, nach [92]	6
Abb. 1.6	Gesamtheitlicher Ansatz zur Entwicklungsmethodik des Versuchszentrums	10
Abb. 1.7	Aufbau der Arbeit	12
Abb. 2.1	Produktentstehungsprozess am Beispiel des Fahrwerkes aus [76]	13
Abb. 2.2	V-Modell in der Fahrzeugentwicklung	14
Abb. 2.3	Wirkkettenmatrix "Gesamtfahrzeugeigenschaften" (schematisch)	21
Abb. 2.4	Frontloading im Entwicklungsprozess [41]	29
Abb. 2.5	Höhere Produktreife in frühen Phasen durch Frontloading im Entwicklungsprozess aus [68]	29
Abb. 2.6	Ablauf sequenzieller Produktentstehungsprozesse in Anlehnung an [73]	30
Abb. 2.7	Ablauf simultaner Produktentstehungsprozesse in Anlehnung an [73]	31
Abb. 2.8	Prüffeldkonzept für das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ aus [95]	34
Abb. 2.9	Motoren- und Getriebeprüffeld der Königlich Sächsischen Mechanisch - Technischen Versuchsanstalt [5]	36
Abb. 2.10	Unterflur Rollenprüfstand nach H. Scheit aus [5]	37
Abb. 2.11	Flachbahn-Reifenprüfstand MTS (Flat-Trac [®] CT Plus) ([21])	39
Abb. 2.12	Nutzfahrzeugreifenprüfstand NuRep des IKA Aachen ([7])	39
Abb. 2.13	Dämpferprüfstand MTS (852) ([23])	40
Abb. 2.14	Triaxiales Elastomer Testsystem INOVA	41
Abb. 2.15	Antriebsstrangprüfstand am FKFS in Stuttgart ([2])	42
Abb. 2.16	Transmission Test System der TOYOTA Motorsport GmbH ([22])	43
Abb. 2.17	Straßen-Simulationsprüfstand für Fahrzeugachsen ZF Friedrichshafen AG ([76])	44
Abb. 2.18	Fahrdynamischer Achsprüfstand IABG ([6])	45
Abb. 2.19	Dynamic Chassis Simulator an der TU-Dresden	46
Abb. 2.20	Radnabengebundener Gesamtfahrzeug-Straßensimulator MTS 329 ([20])	47
Abb. 2.21	Fahrzeugrollenprüfstand mit Semifreifeldraum ([93], [26])	48
Abb. 3.1	Einflussfaktoren bei der Wahl des Verfahrensmodells	50
Abb. 3.2	Systems Engineering Konzept nach HABERFELLNER ET AL. [42]	51
Abb. 3.3	Das V-Modell in der Fahrzeugentwicklung nach [84]	53
Abb. 3.4	Bewertungsmethoden (Auswahl) nach [42], [58], [31] und [185]	57
Abb. 3.5	Modellbasierte Produktentwicklung am Beispiel Prüfstand	61
Abb. 3.6	Beschleunigungsaufnehmer nach [153]	63
Abb. 3.7	Schemata Quellisolierung (a) und Empfängerisolierung (b) aus [186]	66
Abb. 3.8	Darstellung der Vergrößerungsfunktion für verschiedene Dämpfungen	67
Abb. 4.1	Vorgehensweise Systementwicklung Versuchsfeld	74
Abb. 4.2	Institutsstruktur der Forschungseinrichtung	76



Abb. 4.3	Struktur der Forschungsfelder in der Forschungseinrichtung	81
Abb. 4.4	Systemmodell „Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum“ (schematisch)	86
Abb. 4.5	Beziehungen und Einflussfaktoren im Anforderungsprozess des Versuchsfeldes	88
Abb. 4.6	Vorgehensweise zur systematischen Analyse physikalischer Wirkketten	95
Abb. 4.7	Einordnung von Schwingungsphänomenen.....	100
Abb. 4.8	Prozessablauf Makroprozess Bsp. Parameteridentifikation Fahrdynamikmodell.....	108
Abb. 4.9	Prozessablauf Mikroprozess verallgemeinert.....	110
Abb. 4.10	Anforderungsanalyse für ein Versuchsfeld	113
Abb. 4.11	Ablauf Konzeptentwicklung "Versuchsfeld"	117
Abb. 4.12	Anlagenkomplexität-Flächenbedarf-Schaubild.....	124
Abb. 4.13	V-Modell zum Ablauf der Systementwicklung "Prüfstand"	126
Abb. 4.14	Gesamtlösungsvarianten (Auswahl) aus [102].....	131
Abb. 4.15	Subsysteme des Rad-Achs-Prüfstandes vgl. [106]	135
Abb. 4.16	Absolute Maximalwerte der Radverschiebung aus [129]	137
Abb. 4.17	Spezifikationsmatrix Radaktuatorik für Fahrmanöveraspekte aus [129]	137
Abb. 4.18	Lösungsvarianten für den Radaktuator aus [129]	138
Abb. 4.19	Abbildung des Koppelgetriebes für den Radaktuator als MKS-Modell vgl. [106]	139
Abb. 4.20	Kopplung von Vollfahrzeug- und Radaktuator-MKS-Modell aus [129]	141
Abb. 4.21	Kollisionsanalyse Gesamtprüfstand im Prüfraum aus [113].....	141
Abb. 4.22	MKS-Modell Bewegungssystem aus [131].....	142
Abb. 4.23	Strukturdynamische Analyse Lastrahmen aus [113]	142
Abb. 4.24	Gesamtsystem Rad-Achs-Prüfstand ([129]).....	142
Abb. 5.1	Umfeld des Gebäudekomplexes August-Bebel-Str.32, Dresden ([191])	154
Abb. 5.2	Luftbild des Gebäudekomplexes August-Bebel-Str.32, Dresden ([192])	154
Abb. 5.3	Außenansicht Halle 127, August-Bebel-Str.32, Dresden	155
Abb. 5.4	Innenansicht Halle 125 August-Bebel-Str.32, Dresden.....	155
Abb. 5.5	Wirkkettenmatrix Versuchsfeld.....	157
Abb. 5.6	Lösungsvarianten zur Position des Prüfstandes im Bestandsgebäude 127 aus [148]	159
Abb. 5.7	Geometrische Untersuchung in der Machbarkeitsanalyse ([148]).....	160
Abb. 5.8	Funktionales Blockschaubild des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums	164
Abb. 5.9	Technische Gleichzeitigkeiten im Versuchsfeld	166
Abb. 5.10	Servohydraulischer Achspulsprüfstand.....	171
Abb. 5.11	Arten der Fundamentierung bei dynamischer Belastung	175
Abb. 5.12	Rechteckfundament mit Ersatzradius r_{0i} nach [160].....	177
Abb. 5.13	Standardbauweise für Prüfstandschwingfundamente	181
Abb. 5.14	Innere Lasten durch Aktuatoren des Prüfstandes.....	182
Abb. 5.15	Äußere Lasten durch Gravitation und beschleunigte Massen.....	182
Abb. 5.16	Visualisierungen zum a) MKS-Modell und zum b) CAD-Modell des Achspulsprüfstandes im Ausgangszustand.....	183
Abb. 5.17	Fundamentierung a) MKS-Modell und b) CAD-Modell.....	185
Abb. 5.18	Konstruktiver Entwurf des Schwingfundamentes eines Achspulsprüfstandes.....	186
Abb. 5.19	Messaufbau experimentelle Modalanalyse	189



Abb. 5.20	Visualisierung Eigenmoden der seismischen Masse am Achspulsprüfstand	189
Abb. 5.21	Darstellung Eigenmoden der Spannplatte Fahrwerk-Antriebsstrang-Prüfstand aus [149].....	192
Abb. 5.22	Ansätze zur Reduzierung der Bezugskosten	194
Abb. 5.23	Modelltopologie Energieinfrastruktur schematisch.....	197
Abb. 5.24	Modellstruktur eines Prüfstandes im Prüfraum nach [145].....	198
Abb. 5.25	Basismodell Hydraulik [145].....	200
Abb. 5.26	Schematischer Lastverlauf der Rad-Achs-Prüfstandes für die Hydraulik [145].....	201
Abb. 6.1	Informationsverknüpfung der Teilentwicklungsprozesse.....	205
Abb. 6.2	Ergebnisse nach SWOT-Analyse.....	207
Abb. 6.3	Neuentstandene und verbesserte Prüfstandkonzepte (vgl. Tab. 6.1)	209
Abb. 6.4	Entwurf Gebäudestruktur	209
Abb. 6.5	Innenansicht der Versuchshalle Gebäude 127 (Lassig).....	211
Abb. 6.6	Schema vernetzte, simulationsbasierte Prüfstandregelung	215
Abb. 0.1	Modelltopologie mit Bedien- und Eingabekonzole für das Energiemanagement aus [147].....	248
Abb. 0.2	CAD-Modell Funktionsgebäude mit Submodellen der Prüfstände	249
Abb. 0.3	Eigenform 1. Biegung Fundamentkörper für Dyn. Kinematics & Compliance Prüfstand [167].....	250
Abb. 0.4	Übersicht Komplex Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum der TU Dresden	251
Abb. 0.5	CAD-Entwurf Gebäude 125 Planungsergebnis.....	251
Abb. 0.6	CAD-Entwurf Gebäude 127 Planungsergebnis.....	252





1 Einleitung

Warum ist die Automobilindustrie wichtig für die deutsche Wirtschaft?

Mobilität ist ein Grundbedürfnis des Menschen. Das zeigt die Entwicklung der Automobilindustrie in den letzten 40 Jahren. WAGNER beziffert in [92] den Bestand an Kraftfahrzeugen in Deutschland für das Jahr 1970 auf 14 Mio. und für 2015 auf 50 Mio.. Dies ist mehr als eine Verdreifachung des Bestandes. Für die internationale Entwicklung konnte ebenfalls ein mit Unterbrechung im Jahr 2008 kontinuierlicher Aufwärtstrend festgestellt werden. Besonders in den sogenannten BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und China) ist vor allem in den letzten zehn Jahren ein sehr starker Trend zur Motorisierung spürbar. Abb. 1.1 zeigt die Entwicklung am Beispiel des Absatzes von Kraftfahrzeugen in China in den letzten 14 Jahren.



Abb. 1.1 Absatz von Kraftfahrzeugen in China nach [94]

Es ist bereits absehbar, dass diese klassischen Absatzmärkte für Premiumfahrzeuge schon bald in eine Sättigung geraten werden. Der Mobilitätsbedarf wird jedoch nicht zurückgehen. Gerade in Schwellenländern wird dieser im Klein- und Kleinwagensegment weiter kontinuierlich wachsen. Darüber hinaus wird das Premiumsegment in diesen Ländern überproportional wachsen.



Für die Deckung des Mobilitätsbedarfes sind heute Mobilitätskonzepte erforderlich, die aus einem Zusammenspiel verschiedener technischer Teilsysteme bestehen. Die Transportaufgaben sind heute deutlich vielschichtiger und können in die Bereiche Personen-, Güter- und Informationstransport gegliedert werden. Darüber hinaus haben sich sowohl Qualität als auch Quantität geändert. Dies ist auf Veränderungen in verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen wie Beruf, Konsum und Ökonomie oder Freizeit zurückzuführen. Sortiert nach quantitativen und qualitativen Änderungen ergibt sich aus der Sicht des Autors eine Übersicht (Tab. 1.1) an technischen Handlungsfeldern, denen sich der zukünftige Fahrzeugentwicklungsprozess (FEP) stellen muss:

Quantitativ	Technisches Handlungsfeld
<ul style="list-style-type: none"> - Verknappung von fossilen Energie-ressourcen und Begrenzung des Schadstoffausstoßes im Verkehr - Erhöhung der Verkehrsdichte durch zunehmende Bevölkerungskonzentration in Großstädten - Erhöhung der Transportleistung durch Globalisierung der Märkte - Verknappung von Rohstoffen und Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> - Steigerung der Energieeffektivität von Antrieben - Entwicklung vernetzter Verkehrssysteme - Reduktion der Fahrzeugmasse - Entwicklung vernetzter Verkehrssysteme - Neuartige Fahrzeugkonzepte - Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur - Entwicklung vernetzter Verkehrssysteme - Neuartige Fahrzeugkonzepte - Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur - Intelligenter Materialeinsatz - Funktionaler Leichtbau - Anpassung der Komponentenhaltbarkeit an die Produktlebensdauer - Entwicklung verbesserter Recyclingkonzepte
Qualitativ	Technisches Handlungsfeld
<ul style="list-style-type: none"> - Verbesserung der Verkehrs- und Fahrzeugsicherheit - Verbesserung von Fahrdynamik und Fahrkomfort - Erhöhung der Fahrzeugfunktionalität im Bereich Information und Unterhaltung 	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung vernetzter Verkehrssysteme - Entwicklung Fahrerassistenzsysteme - Optimierung des Fahrzeugverhaltens - Verständnis und Optimierung der Systemdynamik von Kraftfahrzeugen - Entwicklung Fahrerassistenzsysteme - Entwicklung Fahrzeugregelsysteme - Entwicklung Fahrerassistenzsysteme - Entwicklung echtzeitfähiger Kommunikationssysteme

Tab. 1.1 **Veränderte Randbedingungen und technische Handlungsfelder**



Ein Verkehrsmittel allein ist nicht in der Lage, die Vielfalt an Anforderungen zu erfüllen. Dies erfordert ein leistungsfähiges Verkehrssystem. Die Vernetzung von Verkehrsmitteln aus öffentlichem Verkehr und Individualverkehr in einem Verkehrssystem ist dafür erforderlich. Das Automobil spielt in diesem Mobilitätskonzept nach wie vor eine wesentliche Rolle. Es muss zukünftig so gestaltet werden, dass sowohl die gestiegenen Ansprüche des Insassen hinsichtlich Komfort und Sicherheit erfüllt werden, dabei aber auch die Kompatibilität zum Gesamtsystem „Verkehr“ hergestellt ist.

Dies stellt die Anforderung an den Fahrzeugentwicklungsprozess, ein Teilsystem „Fahrzeug“ im Gesamtsystem „Verkehr“ mit allen erforderlichen Schnittstellen zu Fahrer und Umwelt zu entwickeln. Das Kraftfahrzeug wird ein hochtechnologisches Produkt mit starker Vernetzung. Der Prozess muss so gestaltet sein, dass eine Zusammenarbeit in verschiedenen Entwicklungsdisziplinen möglich ist.

In Deutschland sind beste Voraussetzungen für einen Hightech-Entwicklungsstandort vorhanden. Indikatoren dafür sind ein besonders hohes Bildungsniveau und infrastrukturelle Gegebenheiten, die den Entwicklungsprozess begünstigen und damit zum Erfolg beitragen. Andererseits ist in Deutschland ein verhältnismäßig hohes Lohnniveau vorzufinden. Um unter diesen Umständen die Wirtschaftlichkeit des Produktes sicherstellen zu können, müssen vor allem aufwendige und zugleich anspruchsvolle Schritte, welche ein hohes Maß an Expertenwissen, Kreativität und Entwicklungsmethodik erfordern, in Deutschland stattfinden. Der Anteil dieser Schritte ist in der frühen Entwicklungsphase besonders hoch. In Abb. 1.2 werden dazu die Verteilung und die Gestaltungsmöglichkeiten der Kosten im Produktentwicklungsprozess (PEP) schematisch dargestellt. EHRENSPIEL ET AL. führen diese beiden Darstellungen in [34] ein. Daran lässt sich der Zusammenhang zwischen der Kostenverteilung und der eigenverantwortlichen, kreativen Gestaltung des Produktes ableiten.

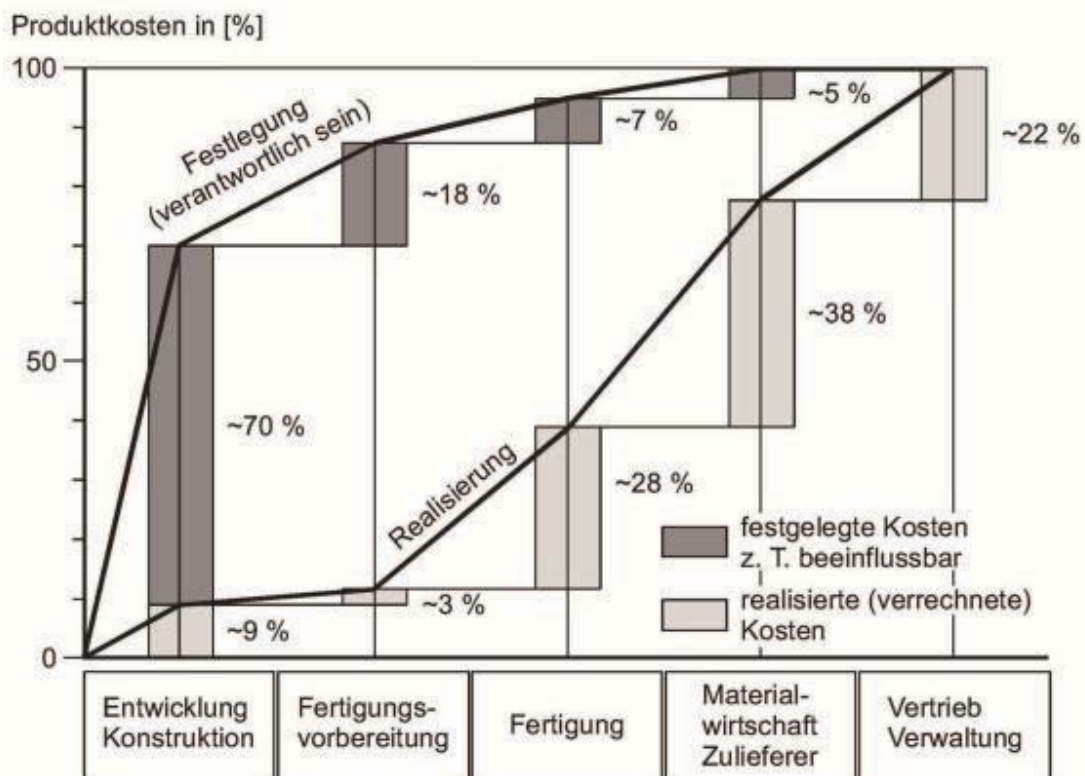
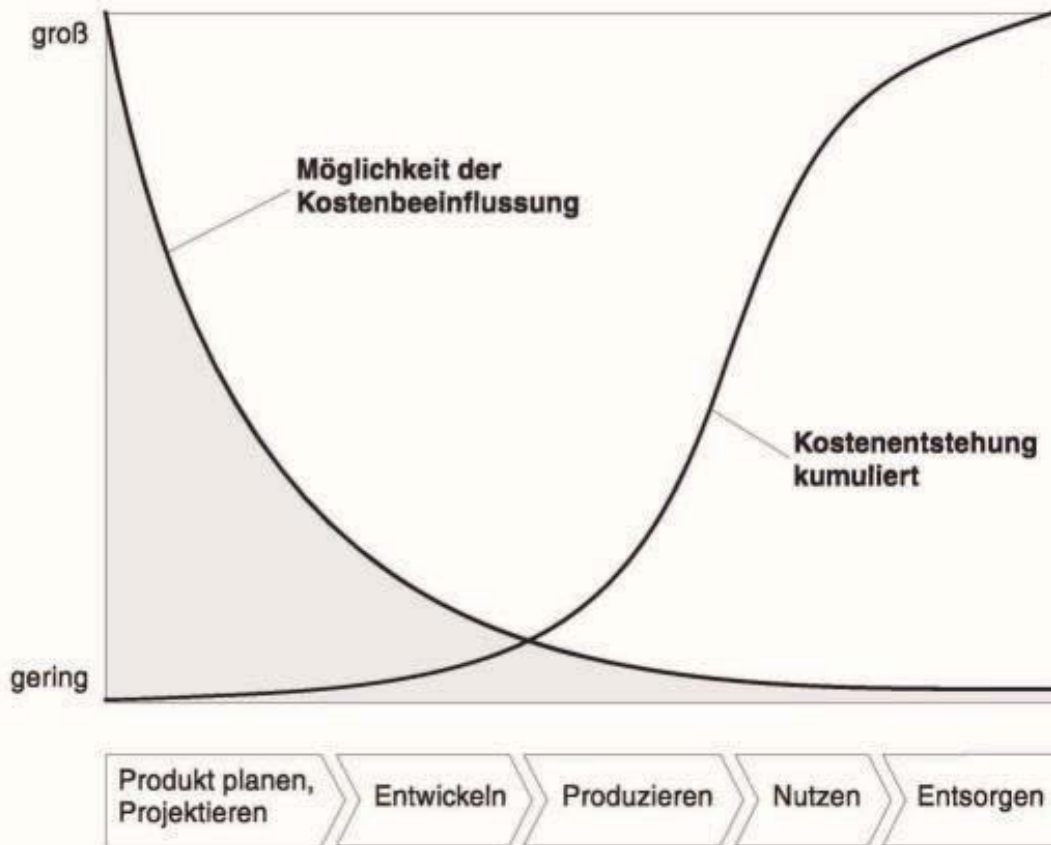


Abb. 1.2 Verteilung und Gestaltungsmöglichkeiten der Kosten im PEP aus [34]



NIßL überführt diese Theorie in [56] in ein Modell zur Kostenverfolgung im Entwicklungsprozess.

Deutschland ist heute weltweit führender Entwicklungsstandort in der Automobilindustrie und trägt somit maßgeblich zur Gestaltung des weltweiten Mobilitätssystems speziell im Bereich Automobil bei. Die Automobilindustrie ist auch deshalb in Deutschland mit einem Umsatz von mehr als 280 Mrd. € und rund 750.000 Beschäftigten einer der wichtigsten Wirtschaftsfaktoren (vgl. [92]). Abb. 1.3 zeigt dazu die kumulierte dargestellte Entwicklung des Umsatzes in der Automobilindustrie für Deutschland entsprechend Angaben aus Destatis.

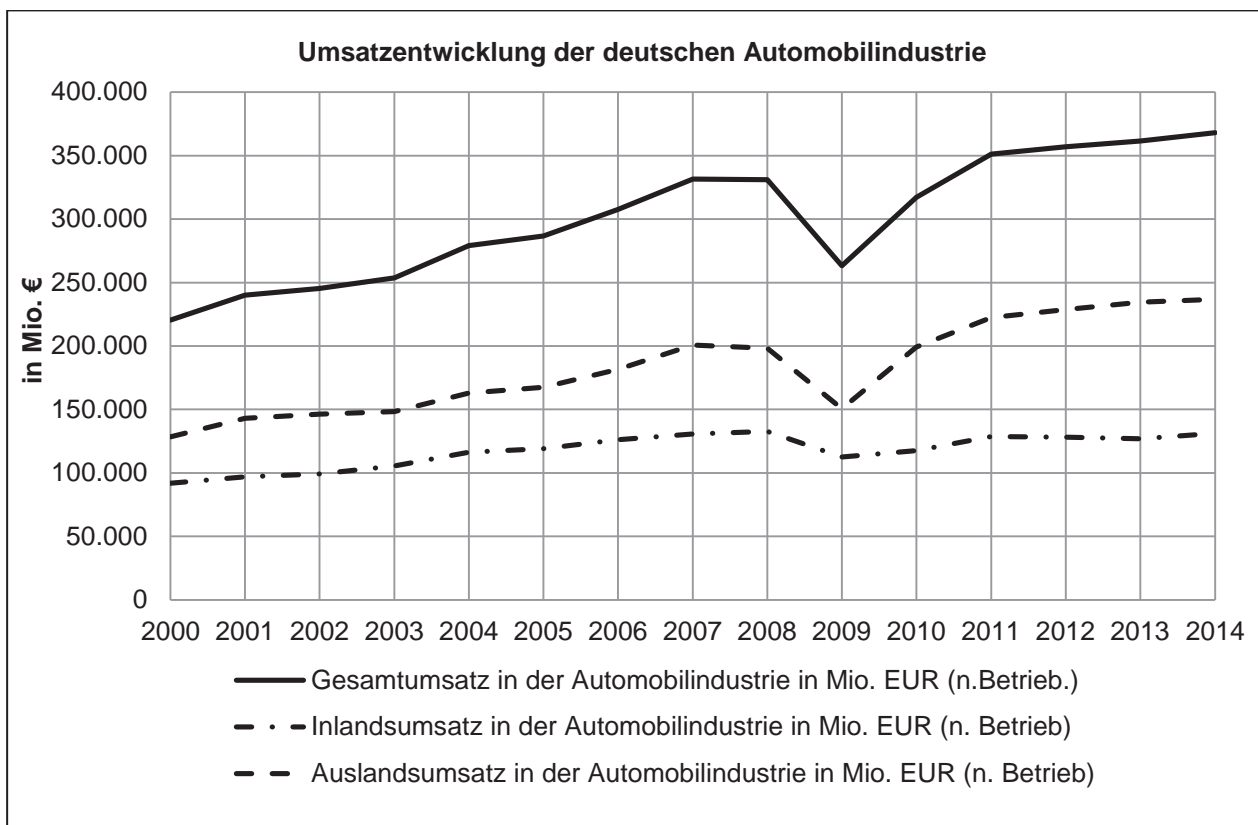


Abb. 1.3 Umsatzentwicklung der deutschen Automobilindustrie 2000 - 2014 kumuliert
[Quelle: Destatis]

Neben den genannten generell geltenden Rahmenbedingungen unterliegt jeder einzelne Fahrzeughersteller marktspezifischen Zwängen. DEUSCHL beschreibt in [95] die in Abb. 1.4 dargestellten fünf Handlungsfelder für die Automobilherstellung.



Abb. 1.4 Handlungsfelder für die Automobilindustrie [95]

Dies führt zu Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess, welcher permanent an sich ändernde Rahmenbedingungen anzupassen ist. Zukünftig werden Entwicklungsprojekte öfter unter der Beteiligung internationaler Partner stattfinden. Anhand der in Abb. 1.5 dargestellten veränderten Verteilung in der weltweiten Wertschöpfung findet diese Aussage bereits jetzt Bestätigung. Demnach wurde in der vergangenen Dekade immer mehr Entwicklungsleistung auf externe Zulieferer und Dienstleister ausgelagert. Dies führte zunehmend zum Verlust von wertvollem Expertenwissen beim eigentlichen Fahrzeughersteller (OEM). Aus dieser Darstellung geht jedoch nicht hervor, dass bei den Automobilherstellern mittlerweile ein starkes Bestreben zu verzeichnen ist, Schlüsselkompetenzen im Entwicklungsprozess wieder selbst zu besetzen.

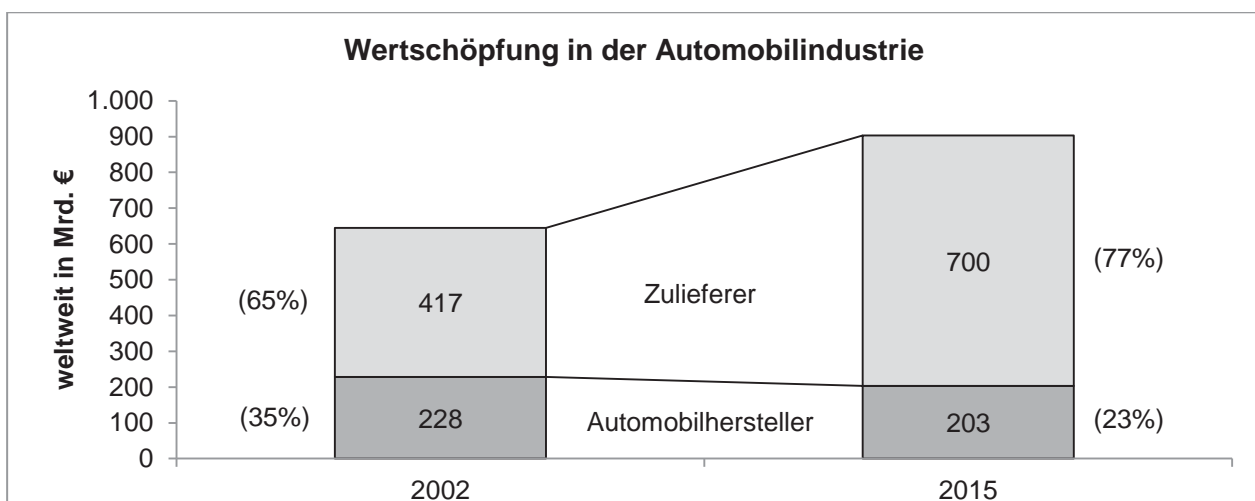


Abb. 1.5 Wertschöpfungsentwicklung in der Automobilindustrie, nach [92]

Zur Unterstützung dieses Bestrebens sollte es jetzt ein besonderes Anliegen der Forschung sein, die erforderlichen methodischen Grundlagen für neue leistungsfähige Ent-



wicklungsprozesse in der Automobilindustrie zu schaffen. Die innerbetriebliche Forschung bei Automobilherstellern bedarf der Unterstützung universitärer und außeruniversitärer Forschungseinrichtungen. Universitäten und außerbetriebliche Forschungseinrichtung verfügen in der Regel über eine deutlich höhere thematische Flexibilität und können Lösungsansätze im Interdisziplinären Kontext verfolgen. Ein weiterer Vorteil der Verlagerung industrieller Forschungsaufgaben ist die Möglichkeit zur Integration methodischer Erkenntnisse aus jenen Forschungsaufgaben in die Ausbildung. Vor allem Universitäten, deren fundamentale Aufgabe neben der Forschung eben die Lehre ist, können damit neben den eigentlichen Forschungsergebnissen einen indirekten zweiten Rückfluss in Form von gut ausgebildeten Absolventinnen und Absolventen in die Unternehmen generieren. Die Vergabe von Forschungsaufgaben, die völlig neue Ansätze und Entwicklungsmethoden hervorbringen, ist damit ein wesentlicher Erfolgsfaktor der deutschen Automobilindustrie.

Damit Forschungsaufgaben übernommen werden können, ist eine sich vom Einsatz im täglichen Entwicklungsgeschäft unterscheidende Versuchsumgebung erforderlich. Sind Versuchseinrichtungen im Entwicklungsgeschäft auf hohen Durchsatz und einen hohen Automatisierungsgrad hin ausgelegt, so müssen Versuchseinrichtungen im Umfeld der Forschung sehr flexibel in der Gestaltung der Versuchsabläufe sein.

1.1 Ziele der Arbeit

Die Entwicklung moderner Automobile erfordert ein hohes Maß an Systematik. Dabei kommen heute experimentelle und simulative Methoden zum Einsatz, die in einem Produktentstehungsprozess koordiniert werden. Dieser Prozess wird später genauer betrachtet. Im weiteren Verlauf dieser Betrachtung wird der Begriff Fahrzeugentwicklungsprozess (FEP) als Spezifikation des allgemeinen Produktentstehungsprozesses verwendet.

Wie bereits weiter oben beschrieben, findet dieser FEP nicht ausschließlich beim Fahrzeughersteller statt, sondern wird bereits heute auf Partnernetzwerke verteilt ([70]). Der Automobilhersteller wird mit Entwicklungsmethoden und –werkzeugen von Forschungspartnern und mit Produkten in Form von Komponenten, Subsystemen und sonstigen nicht forschungsrelevanten Dienstleistungen von Zulieferern unterstützt. Für die Integration eines externen Forschungsdienstleisters oder eines Hochschulinstitutes in ein solches Partnernetzwerk sind strukturelle Voraussetzungen für die Kopplung an bestehende Prozesse



der Partner zu erfüllen, die hier besonders betrachtet werden sollen. Dazu gehören unter anderem technische Möglichkeiten wie Simulationscluster und Versuchszentren, um Methoden und Werkzeuge für den Einsatz im Fahrzeugentwicklungsprozess entwickeln zu können. Die vorliegende Arbeit richtet den Fokus auf die systematische Entwicklung eines Versuchszentrums und dessen Ausrüstung.

Ist die Entscheidung für die Errichtung eines Versuchsfeldes getroffen, ist dies mit großen Investitionen verbunden. Oft stehen Budgets nur für begrenzte Zeiträume zur Verfügung. Für die Durchführung des gesamten Planungs- und Realisierungsprozesses in der sequenziellen Arbeitsweise unter Berücksichtigung eines weitsichtigen Anforderungs- und Änderungsmanagements sowie der Entwicklung der technischen Anlage sind andererseits lange Entwicklungszeiten einzuplanen. Dies steht im Widerspruch zu der von einem Versuchsfeld für zukünftige Fahrzeuge erwarteten technologischen Aktualität. Zu lange Planungs- und Realisierungszeiten für methodische Werkzeuge sind demnach zu vermeiden. Daraus leiten sich auch unmittelbar die Hauptaufgaben der vorliegenden Arbeit ab:

- Es soll untersucht werden, wie sich einzelne Teilschritte oder Planungsabschnitte der drei Entwicklungsprozesse für
 - das Versuchsfeld,
 - die Prüfstände und
 - das Gebäude parallelisieren lassen.
- Entsprechend der jeweils erreichten Reifegrade der drei Entwicklungsprozesse sollen Methoden und Werkzeuge ausgewählt oder entwickelt werden, welche für diese Durchführungsart erforderlich sind. Diese sollen in einzelnen Entwicklungsphasen anhand ausgewählter Beispiele detaillierter erläutert werden.
- Die zu entwickelnde Systematik soll vorwiegend für den Einsatz in der Forschung und Vorentwicklung geeignet sein und Rahmenbedingungen universitärer Forschungseinrichtungen berücksichtigen.
- Die Möglichkeiten der modernen Computersimulation in der Fahrzeugtechnik sollen in die Entwicklung einbezogen und deren Potenzial in Verbindung mit modernen experimentellen Methoden gehoben werden.



1.2 Abgrenzung

Der Schwerpunkt bei der Entwicklung der Systematik liegt im Speziellen auf systemdynamischen Aspekten der Kraftfahrzeugtechnik. Dazu zählen folgende Untersuchungsgebiete:

- Fahrdynamik
- Schwingungskomfort
- Haltbarkeit und Lastdaten.

Die Systematik soll dabei einen Anforderungsprozess zur Berücksichtigung aktueller Entwicklungsmethoden und zukünftiger Trends beinhalten. Daraus sollte ein Systementwurf für das gesamte Versuchsfeld entstehen. Weiterhin sollen konkrete Funktionen auf Prüfstände verteilt und daraus Anforderungen für deren Entwicklung ableitbar sein. Die Entwicklungsmethode für das Prüffeld soll so gestaltet sein, dass die für die bauliche Planung und Realisierung erforderlichen Schnittstellen definiert und mit den entsprechenden Informationen bedient werden. Dies setzt die Erforschung funktionaler Wechselwirkungen zwischen Anlage und Gebäude voraus. Die vorgegebene Entwicklungszeit von drei Jahren, die technologische Reife bestehender Methoden und Werkzeuge sowie die bereits erwähnten funktionalen Wechselwirkungen erfordern die parallele Durchführung mehrerer Entwicklungsprozesse. Es muss also ein gesamtheitlicher Ansatz entsprechend Abb. 1.6 gefunden werden, der diese Randbedingungen erfüllt. Dieser muss sich in die Teilbereiche

- Prüfstandentwicklung
- Gebäudeentwicklung
- Entwicklung einer Simulationsumgebung
- Entwicklung von X-in-the-loop-Strukturen

gliedern und in sich in den Teilbereichen harmonisch abgestimmt sein.

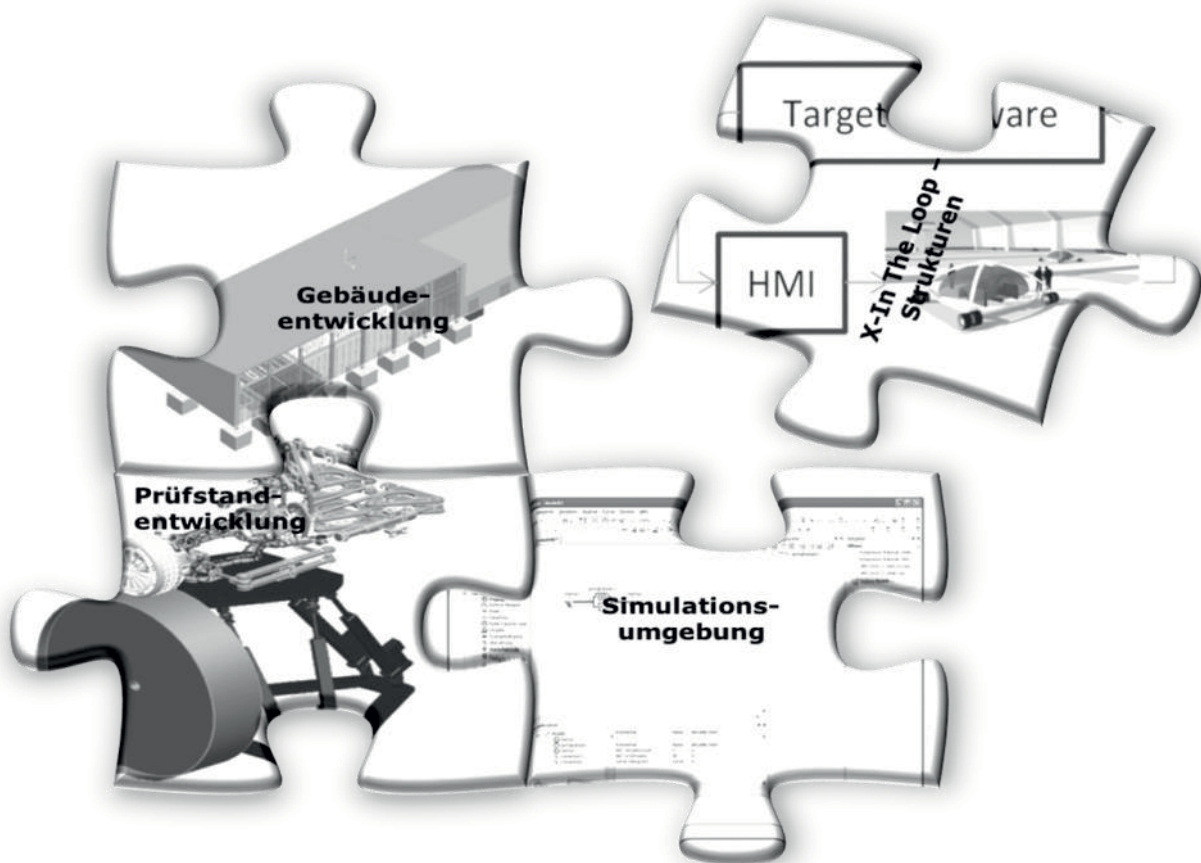


Abb. 1.6 Gesamtheitlicher Ansatz zur Entwicklungsmethodik des Versuchszentrums

Diese Arbeit beschäftigt sich vordergründig mit den in Abb. 1.6 links dargestellten Teilen Prüfstand- und Gebäudeentwicklung. Die Teilbereiche Entwicklung einer Simulationsumgebung und Entwicklung von X-in-the-loop-Strukturen werden tangiert, stehen jedoch nicht im Fokus der Arbeit.

Die im Folgenden vorgestellte Systematik zur Planung eines Versuchsfeldes der Kraftfahrzeugentwicklung am Beispiel eines Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums enthält Methoden und Vorschläge zur Prozessgestaltung bei simultan ablaufenden Teilentwicklungsprozessen zur Prüfstand- und Gebäudeentwicklung. Alle darin erarbeiteten Erkenntnisse basieren auf einer ingenieurwissenschaftlichen Vorgehensweise. Eine Prüfung bezüglich bau- und haftungsrechtlicher Randbedingungen erfolgte nicht.

Für die Bearbeitung werden folgende Thesen aufgestellt:



1. Das Fahrzeug ist heute ein überaus komplexes technisches Produkt und die gesteckten Entwicklungsziele werden umso eher und sicherer erreicht, je eher die physikalischen Zusammenhänge im Fahrzeug analysiert sind.
2. Die wesentlichen Methoden und Werkzeuge zur Identifikation systemdynamischer Parameter für die Erstellung virtueller Fahrzeugmodelle können in einem Versuchsfeld im universitären Umfeld entwickelt werden.
3. Trotz stark unterschiedlicher Strukturen der einzelnen Entwicklungsprozesse von Versuchsfeld, Versuchsgebäude und Prüfstand können diese parallelisiert werden.
4. Der Planungsprozess für das Versuchsgebäude kann trotz einer großen Anzahl unbekannter Systemparameter gestartet werden.
5. Durch die zeitsynchrone Abarbeitung der drei Entwicklungsprozesse kann die Ergebnisqualität im Vergleich zum sequenziellen Ablauf gesteigert werden.

Spezifische Zielsetzung des Beispiels „Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum“:

- Bestehende Prüf-, Mess- und Simulationsmethoden sind entsprechend ihrer Eignung in das neu zu erstellende Konzept zu integrieren.
- Verwendung eines Bestandsgebäude unter Nutzung der im erweiterten Campusgelände der TU Dresden vorhandenen Infrastruktur.
- Ausrichtung der Gesamtstruktur auf die Forschung an neuen kombinierten Entwicklungsmethoden (X-in-the-loop, virtuelle Produktentwicklung und Funktionsabsicherung).
- Bereitstellung von Möglichkeiten zur Abbildung von realen Fahrereigenschaften.
- Bereitstellung einer Gebäudestruktur unter Beachtung von Prozess-, Geheimhaltungs- und Sicherheitsaspekten



1.3 Aufbau der Arbeit

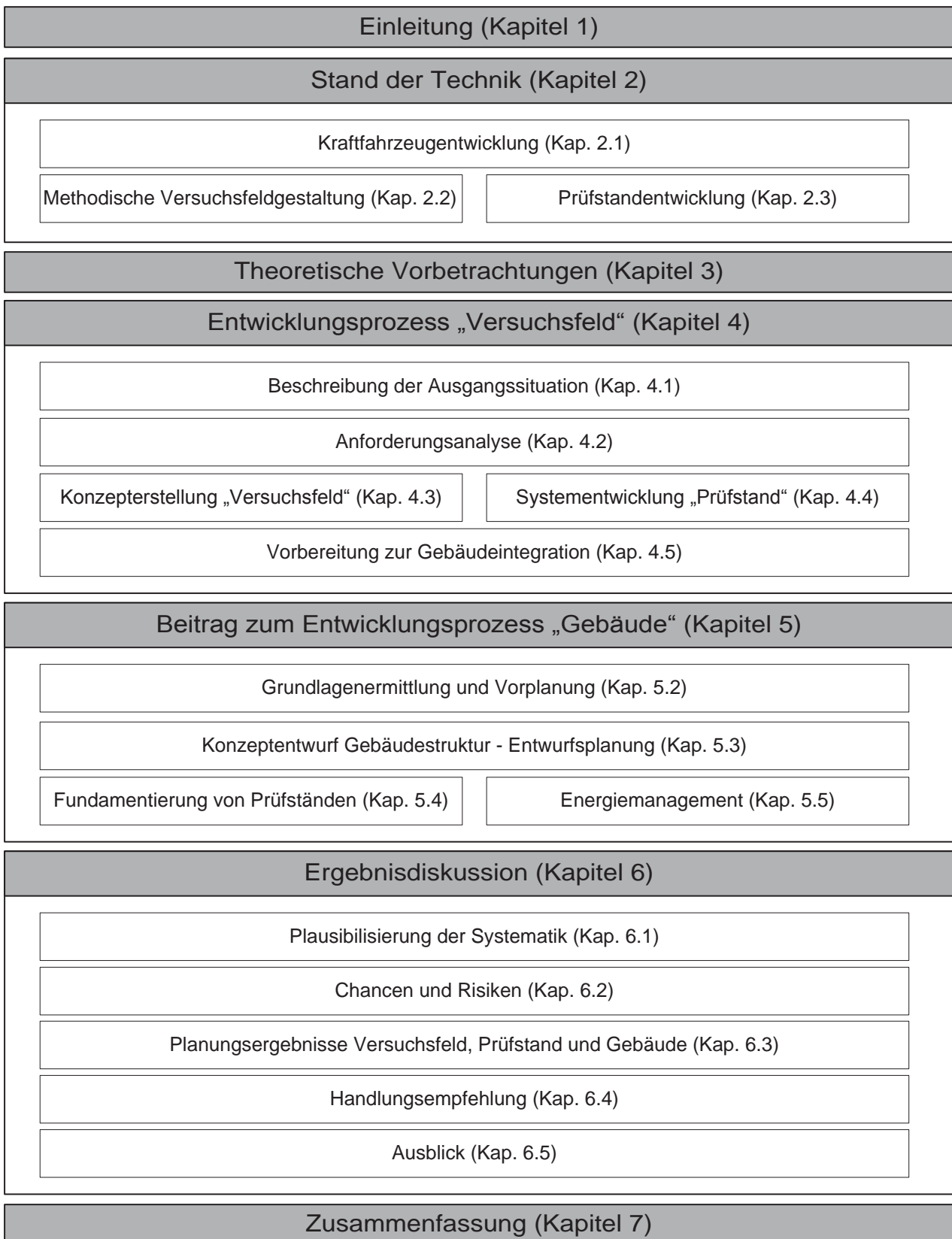


Abb. 1.7 Aufbau der Arbeit



2 Stand der Technik

Die Entwicklung eines Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums berührt eine Vielzahl ingenieurwissenschaftlicher Fachgebiete. Ohne eine Wertung zu Bedeutung und Anspruch zu implizieren, werden im Kapitel 2 „Stand der Technik“ lediglich drei ausgewählte Fachgebiete betrachtet. Im Verlauf der vorliegenden Ausarbeitung werden immer wieder Methoden und Techniken zum Einsatz kommen, deren Einordnung in den Stand der Technik und Wissenschaft mit der Angabe einschlägiger Literaturstellen erfolgt.

2.1 Krafftfahrzeugentwicklung

Der Fahrzeugentwicklungsprozess ist ein klassischer Produktentstehungsprozess und lässt sich durch Prozessmeilensteine in verschiedene Phasen unterteilen. Die Abb. 2.1 zeigt den Ablauf am Beispiel des Fahrwerkes. In Rahmen der Produktplanung werden zu Beginn des Prozesses die Anforderungen und Zielwerte auf Gesamtsystemebene definiert. In der sich anschließenden Konzeptentwicklung werden die Anforderungen in verschiedenen Detailierungsebenen zu Eigenschaften konkretisiert und entwickelt. Das Vorgehen erfolgt dabei vom Groben ins Feine.

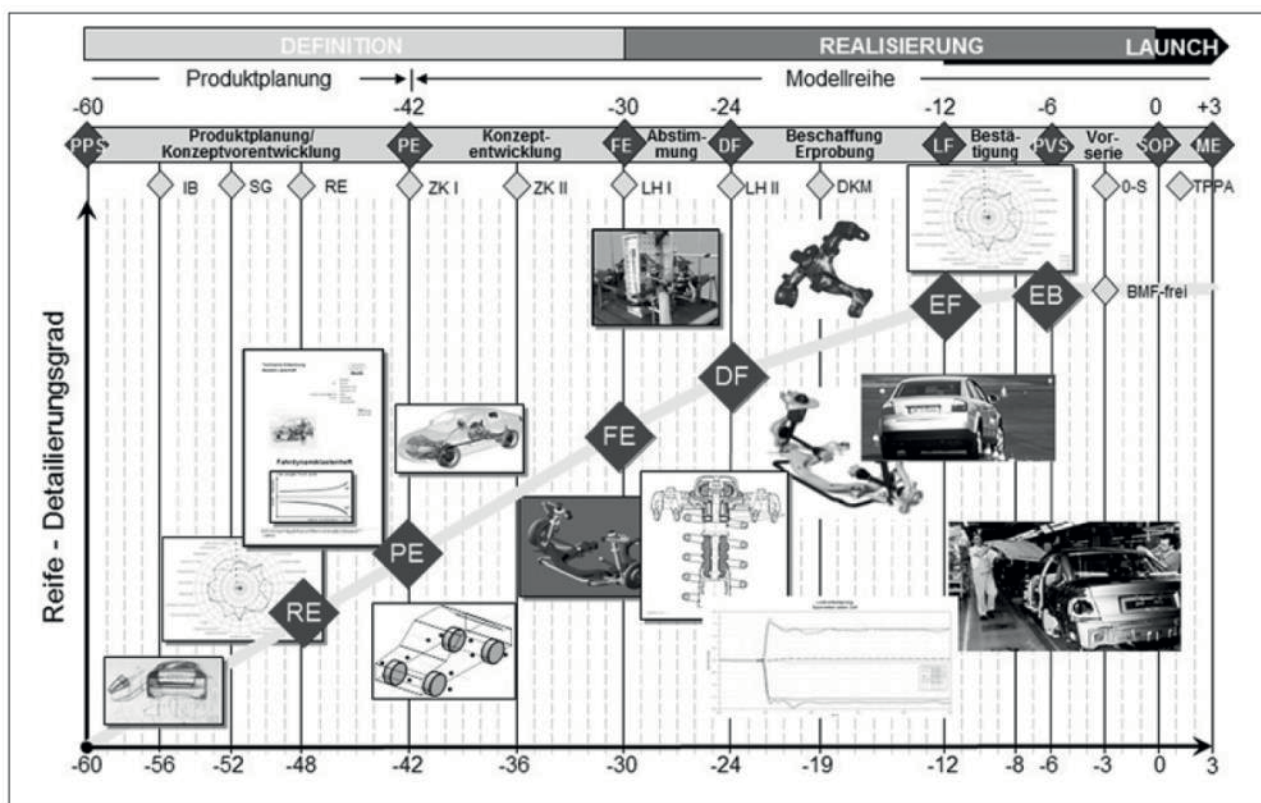


Abb. 2.1 Produktentstehungsprozess am Beispiel des Fahrwerkes aus [76]



Der Entwicklungsprozess orientiert sich heute weitgehend am V-Modell (vgl. [42]). Das V-Modell wird als Verfahrensmodell (vgl. Kap. 3.1.2) auf den FEP angewendet und gliedert diesen in die drei Systemebenen Gesamtfahrzeug, Subsystem und Komponente. Es wird dabei in den linken Ast der Konzeptentwicklung und den rechten Ast der funktionalen Absicherung unterschieden.

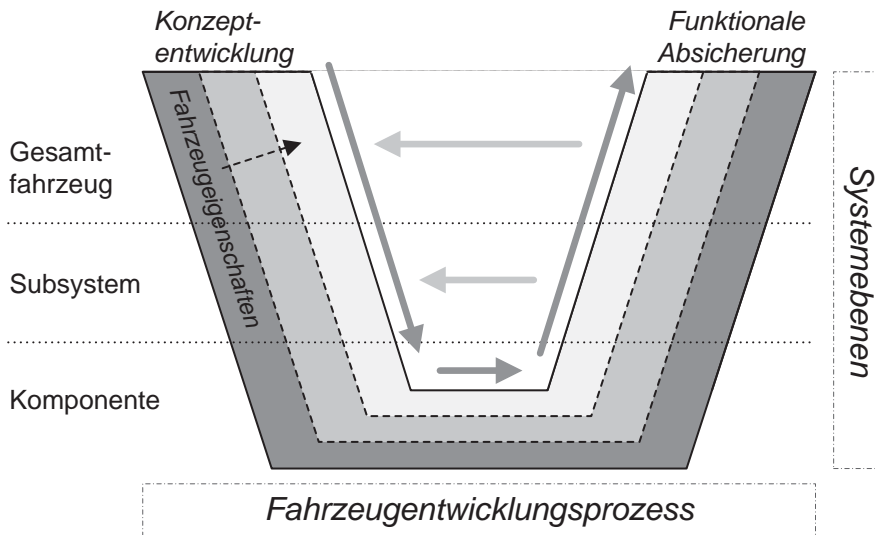


Abb. 2.2 V-Modell in der Fahrzeugentwicklung

Nach der Positionierung des Produktes im Markt wird ein Maßkonzept erstellt. Auf der Gesamtfahrzeugebene werden dann mit Hilfe von Konzeptsimulationen und Eigenschaftsdatenbanken Zielwerte definiert, aus welchen dann durch sukzessive Erhöhung des Detaillierungsgrades Zielwerte für Subsysteme und Komponenten abgeleitet werden. Sind alle Zielwerte und Randbedingungen bestimmt, werden die Anforderungen mit den in der Vorentwicklung und der Konzeptphase erarbeiteten konstruktiven Lösungsansätzen innerhalb der Serienentwicklung vervollständigt und detailliert umgesetzt. Daraus werden dann Prototypen in den einzelnen Systemebenen abgeleitet. Anschließend erfolgt die Absicherung der geforderten Eigenschaften zunächst auf Komponentenebene, dann auf Subsystem- und Gesamtfahrzeugebene durch die Kombination der ausgelegten Komponenten. Innerhalb dieser mehrstufigen Prozesse zur Anforderungsdefinition und Absicherung kommen Werkzeuge aus den Bereichen Simulation, Prüfstandversuch und vor allem während der Absicherung auch aus dem Bereich Fahrversuch zum Einsatz. Diese Bereiche werden in Kap. 2.1.1 noch näher erläutert. Die Automobilentwicklung befindet sich derzeit in einem tiefgreifenden Wandel. Dazu werden einige Herausforderungen in Kap. 2.1.1 herausgegrif-



fen und deren Hintergründe betrachtet. Das Vorgehen im V-Modell lässt sich auch auf andere Technologiebereiche übertragen und wird in Kap. 3.1.2 genauer erläutert.

2.1.1 Trends und neue Herausforderungen

Das Kraftfahrzeug ist - ebenso wie andere technische Produkte, die sehr stark in die moderne Gesellschaft integriert sind - einem stetigen Wandel an Anforderungen unterworfen. Damit dauerhaft eine Akzeptanz des Produktes am Markt gewährleistet ist, müssen Strömungen und Trends, die sich auf die Gestaltung des Produktes und dessen Entwicklungsprozess auswirken können, frühzeitig erkannt und einbezogen werden. Im folgenden Abschnitt werden einige dieser Trends und Herausforderungen genannt. Sie werden später wichtige Ausgangspunkte für die Anforderungsanalyse des Versuchsfeldes im Kap. 4.2.3 sein. WALLENTOWITZ nennt in [91] vier wesentliche Treiber für veränderte Anforderungen im Automobilbau. Diese sind wie folgt motiviert:

- kundenspezifisch
- technologisch
- politisch-rechtlich
- ökonomisch.

Zu ähnlichen Erkenntnissen kommt WAGNER in [92]. Er leitet daraus jedoch konkrete Änderungen für die Gestaltung des Projektmanagements in der Automobilindustrie ab.

Auch MAURER und WINNER beschreiben in [79] starke Veränderungen und kommen zu dem Schluss, dass die stark steigende Fahrzeugkomplexität, der hohe Individualisierungsgrad und die damit stetig wachsende Derivatevielfalt in den heutigen Fahrzeugentwicklungsprozessen ohne den Einsatz der numerischen Simulation nicht mehr in der benötigten Qualität und mit angemessenem Kosten- und Zeitaufwand zu bewältigen sind.

Aus den Erkenntnissen der genannten Arbeiten, den Beobachtungen der einschlägigen Fachpresse und den Prognosen von Experten und Fachverbänden (vgl. [94]) lassen sich die folgenden Trends ableiten:

Technologiewandel

Die Verstärkung der Elektro-Mobilität in den letzten Jahren war ein klarer Beweis dafür, wie Technologien, die bisher im Grundkonzept des Kraftfahrzeuges eine untergeordnete Rolle spielten, Einfluss auf den Entwicklungsprozess nehmen können, wenn deren ver-



stärker Einsatz erforderlich wird. Die Elektro-Mobilität wird auch weiterhin an Bedeutung gewinnen. Besonders wird sie bei der Gestaltung neuer Fahrzeugkonzepte für den urbanen Einsatz eine Schlüsselrolle spielen.

Ein weiterer starker Technologietrend ist die Unterstützung des Fahrers in verschiedenen Facetten der Fahraufgabe bis hin zum hochautomatisierten Fahren. Aus diesem Trend ergeben sich für die Fahrzeughersteller vor allem Herausforderungen bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Hier muss das Verhalten des Fahrers erstmalig sehr differenziert beschrieben werden. Dazu sind grundlegend neue Methoden erforderlich. MAI beschreibt in [80] grundsätzliche Ansätze dazu. Aber auch das Fahrverhalten des Fahrzeuges spielt eine wesentliche Rolle für die Schaffung neuen Sicherheitspotenzials und muss deshalb bereits am Anfang des Fahrzeugentwicklungsprozesses hinreichend beschrieben werden. Nur so lassen sich alle Ressourcen der Verkehrssicherheit sinnvoll nutzen. Fahrerassistenzsysteme sind heute ein wesentlicher Bestandteil des Kraftfahrzeuges und werden in der Zukunft noch deutlich an Bedeutung gewinnen. Hier sind vor allem die Möglichkeiten durch neue leistungsstarke, drahtlose Dateninfrastruktursysteme zu nennen. Dadurch entstehen neue Assistenzfunktionen mit Fahrzeug-Fahrzeug- oder Fahrzeug-Umwelt-Kommunikation, die es zukünftig ermöglichen sollen, einzelne Unfälle komplett zu verhindern. Auch verschärfte gesetzliche Bestimmungen speziell im Fußgängerschutz erfordern neue Technologien, da die konventionellen Mittel der passiven Sicherheit bald ausgeschöpft sind.

Erweiterung der Modellvielfalt

Ein weiterer Trend, der in seiner Ursache auf einen grundsätzlichen gesellschaftlichen Wandel zurückzuführen ist, stellt die deutliche Erweiterung der Modellvielfalt dar. War das Automobil bisher neben dem reinen Transportmittel immer auch Statussymbol, so ist vor allem bei jungen Menschen eine Abkehr von dieser speziellen Wertevorstellung zu erkennen. Das Automobil wird hier zum Ausdruck für Individualität und Lebensgefühl. Daraus leitet sich für die Fahrzeugentwicklung die Anforderung nach hoher Variabilität und Spreizung in der Produktpalette ab. Die Automobilhersteller reagieren entsprechend mit immer neuen Derivaten und gänzlich neuen Produkten, um auch auf Ansprüche regionaler Käufergruppen vorbereitet zu sein. Die Entwicklung dieser Derivate muss dennoch profitable Produkte hervorbringen. Dazu werden zunehmend strategische Entwicklungsmethoden wie die Verwendung von Baukastensystemen und Standardarchitekturen eingesetzt. Da-



mit lassen sich Skaleneffekte in der Herstellung nutzen. Der Aufwand für die Entwicklung und die Absicherung kann bei vergleichbarem Aufwand für eine deutlich größere Anzahl verschiedener Produkte genutzt werden. Als Beispiel sei hier der Modulare Querbaukasten MQB oder der Modulare Längsbaukasten MLB im Volkswagen-Konzern genannt ([70]). Auch im Design werden Veränderungen erwartet. EVENDEN zeigt in [74] einige Konzeptstudien, die sich nicht ausschließlich auf das Kraftfahrzeug beschränken.

Qualität muss wieder steigen

Von der starken Zunahme an Qualitätsproblemen waren in jüngster Vergangenheit nahezu alle Automobilhersteller betroffen. Das zeigen Rückrufstatistiken der letzten Jahre. So stieg die Anzahl qualitätsbedingter Rückrufaktionen in Deutschland von 35 im Jahr 1993 auf 216 im Jahr 2006 (vgl. [91] S. 9). Die Rückrufaktionen werden dann erforderlich, wenn ein Fehler eine sicherheitsrelevante Funktion des Kraftfahrzeuges betrifft und dieser erst nach Markteinführung erkannt wurde. Gründe dafür können zum Beispiel ein unzureichendes Qualitätsmanagement in verschiedenen Bereichen der Kraftfahrzeugentwicklung sein. Dazu zählen neben dem eigentlichen Prozess zur funktionalen Systementwicklung des Fahrzeuges auch die Prozesse zur Fertigungsplanung und zum Anforderungsmanagement. Die Verbesserung des Qualitätsmanagements muss damit auch ein Ziel bei der Erarbeitung neuer Entwicklungsmethoden sein. Für ein fahrzeugtechnisches Versuchszentrum kann das zum Beispiel die Verbesserung der Methoden im Lastdatenmanagement sein.

Klimaschutz

Vor allem durch ein verändertes Umweltbewusstsein der Gesellschaft, gefördert durch Erkenntnisse zum Einfluss der heutigen Mobilitätssysteme auf die Klimaänderung der vergangenen 50 Jahre, entsteht ein weiterer Trend, der die Automobilindustrie vor neue Herausforderungen stellt. In den nächsten Jahren wird sich die Automobilindustrie zum Beispiel mit dem Einsatz neuer Werkstoffe beschäftigen müssen, um Fahrzeuge deutlich effizienter, aber auch im kompletten Produktlebenszyklus umweltverträglicher zu gestalten. Aktuelle Entwicklungen zeigen sehr deutlich, dass es zunehmend schwerer wird, gesetzliche Vorgaben zum Beispiel zum Schadstoffausstoß zu erfüllen. Als Beispiel sei hier der Abgaskandal im Volkswagenkonzern genannt. Auch zukünftig werden die gesetzlichen Vorgaben weiter verschärft. Dies lässt bereits erkennen, dass evolutionäre Maßnahmen künftig nicht mehr ausreichen werden und für Erfüllung der Anforderungen ein Technologie-



sprung erforderlich sein wird. Vor allem in der Antriebstechnik stellt das die Entwicklung vor große Herausforderungen. Hier müssen Wirkketten im Fahrzeug komplett neu beschrieben werden.

Neben den hier genannten sind weitere Trends bekannt und werden von BRAESS und SEIFFERT ([73]) beschrieben.

2.1.2 Methoden

Anforderungsmanagement

Die Verarbeitung der gewonnenen Anforderungen erfolgt meist noch vor der Konzeptphase. Anforderungen können sich jedoch auch während der Entwicklung ändern. Dies kann zum Beispiel durch Gesetzesänderungen oder Strömungen im Markt hervorgerufen werden. Dieser Umstand ist auch ein Grund für das permanente Bestreben, die Entwicklungszyklen zu verkürzen (vgl. Kap. 2.1.3). Je länger der Entwicklungsprozess dauert, umso wahrscheinlicher wird das Eintreten einer Änderung der Anforderung. In diesem Fall können erhebliche Nachteile und Risiken für die Planbarkeit des Entwicklungsprozesses entstehen. Um dem durch strukturiertes Vorgehen entgegenzuwirken, wird ein systematisches Anforderungsmanagement benötigt. Die wesentlichen Aufgaben des Anforderungsmanagements sind:

- Analyse der Aufgabe
- Unterscheidung in funktionale und nichtfunktionale Zielvorgaben
 - Funktionale Anforderungen richten sich an das Systemverhalten, technische Eigenschaften, etc.
 - Nichtfunktionale Anforderungen sind für Realisierung am Ende des PEP und für die organisatorische Gestaltung des Entwicklungsprozesses wichtig
- Erstellung einer unmissverständlichen und lösungsneutralen Definition der Anforderung
- Zusammenfassung aller Vorgaben für die Entwicklungsaufgabe
- Aktualisierung der Anforderungen während der Entwicklungszeit.

Das Anforderungsmanagement kann dazu in drei wesentliche Abschnitte unterteilt werden, die in angepasster Form auch eine Grundlage für die vorliegende Arbeit gebildet haben. Die Abschnitte sind:



- Anforderungen ermitteln
- Anforderungen formulieren
- Anforderungen verwalten.

Zu allen drei Abschnitten bietet sowohl das Fachgebiet Projektmanagement als auch das Systems Engineering Methoden und Werkzeuge, auf die im Laufe der Arbeit an gegebener Stelle detaillierter eingegangen werden soll. Als Grundlage und weiterführende Literatur werden hier die Werke [41], [42], [45], [53], [48], [52], [61] und [62] genannt.

Wirkkettenanalyse

Die Wirkkettenanalyse ist ein methodisches Vorgehen, das in unterschiedlicher Detaillierungstiefe zur Beschreibung von funktionalen Abhängigkeiten entwickelt wurde. Das Ziel ist zunächst die qualitative Identifikation der an einer Produktfunktion oder -eigenschaft beteiligten Übertragungsglieder. In Abhängigkeit von der gesetzten Systemgrenze können die Übertragungsglieder zum Produkt gehören oder Teil des Integrationsbereiches für das zu entwickelnde Produkt sein. Dazu stehen je nach zu entwickelndem Produkt heute bereits Methoden zur Verfügung, die jedoch größtenteils auf Erfahrungswissen und Subjektivbeurteilung beruhen. Es werden dafür zum Beispiel Cascading-Prozesse angewendet, die Expertenwissen konzernweit bündeln und in Datenbanken überführen. Ausführlicher wird dies von SCHARFENBAUM ([89]) beschrieben. Das Vorgehen ist meist phänomenologisch orientiert und fasst die subjektiven Gesamteindrücke und objektive Teilergebnisse zusammen, die zum Beispiel durch Sensitivitätsanalysen an Teilen der Wirkkette gewonnen wurden. Die Einflüsse des spezifischen Übertragungsgliedes zum Beispiel auf die Ausprägung eines charakteristischen Schwingungsphänomens werden dann in Tabellen und Matrizen zusammengefasst. Dieses Vorgehen lässt bereits eine gute, qualitative Beschreibung von funktionalen Wirkketten zu. Für die Ableitung von auslegungsrelevanten Parameterbereichen müssen diese Wirkketten noch quantitativ identifiziert werden.

Ein weiteres Ziel ist also die Quantifizierung der Übertragungspfade. Dafür sind kombinierte Verfahren bestehend aus analytischen, simulativen und experimentellen Teilen erforderlich. Es existieren bereits vielversprechende Ansätze für einzelne Teile dieses Vorgehens, wie KIM ET.AL. in [46] zeigt. Durchgängige Verfahren fehlen jedoch heute noch. Im Fahrzeugentwicklungsprozess werden heute Werkzeuge eingesetzt, welche sich grundsätzlich auch für diese Forschungsaufgaben eignen können. Auf diese wird am Ende dieses Kapi-



tels eingegangen. Die Wirkkettenanalyse ist somit auch innerhalb des Anforderungsmanagements eine Methode, Zielgrößen und Entwicklungsvorgaben zu definieren.

Bei der Erstellung eines Fahrzeugkonzeptes ist zu beachten, dass das Fahrzeug später in ein Verkehrssystem integriert und von Menschen genutzt werden soll. Die vorhandenen Schnittstellen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Verkehrssystem sind bereits in der Konzeptphase von großer Bedeutung. Diese Schnittstellen können funktionale Anforderungen abbilden, z.B. die Übertragbarkeit von Regelungsaufgaben auf den Menschen, ohne diesen zu überlasten, und auch nichtfunktionale Anforderungen, z.B. subjektive Wahrnehmungen, die zur Kaufentscheidung führen.

Die Wechselwirkungen können mit Hilfe von Wirkketten beschrieben werden, die zunächst qualitativ aufzustellen sind und im Laufe des Entwicklungsprozesses sukzessive quantifiziert werden müssen. Für die Darstellung dieser Wirkketten eignet sich eine Wirkkettenmatrix nach BEITELSCHMIDT und PROKOP in [27].

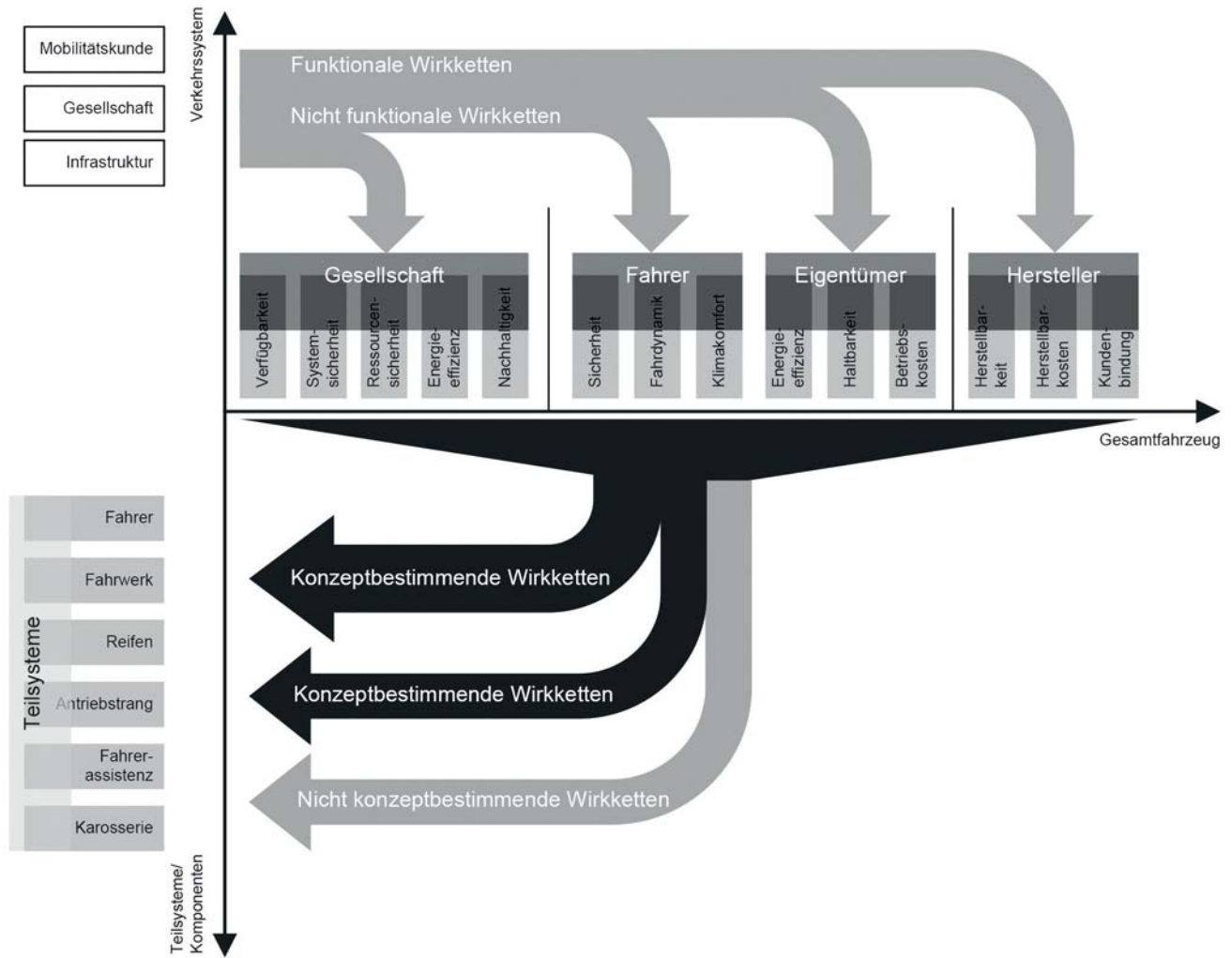


Abb. 2.3 Wirkkettenmatrix "Gesamtfahrzeugeigenschaften" (schematisch)

In Abb. 2.3 ist eine Wirkkettenmatrix für Gesamtfahrzeugeigenschaften nach PROKOP ([60]) dargestellt. Es werden darin die drei Wirkungsrichtungen *Verkehrssystem*, *Gesamtfahrzeug* und *Teilsysteme/Komponenten* verwendet. Auf der positiven Ordinate wird das Verkehrssystem in die Anforderungsbereiche *Mobilitätskunde* (Fahrer, Eigentümer), *Gesellschaft* (Gesetzgeber, Verbraucherschutz, Versicherung) und *Infrastruktur* (Verkehrswege, Datennetze) unterteilt. Diese Einteilung kann sich je nach Fragestellung von der hier gewählten unterscheiden. Diese Achse entspricht dem übergeordneten System oder der Supersystemebene. Auf der positiven Abszisse werden die Eigenschaftsfelder des Gesamtfahrzeuges dargestellt und in Anforderungsbereiche zusammengefasst. Sie stellt



die Systemebene dar. Die negative Ordinate enthält Komponenten und Subsysteme und bildet daher die Subsystemebene.

Die Beziehungen können in dieser Systemdarstellung in zwei Wirkkettenbereiche gegliedert werden. Im oberen Teil der Abb. 2.3 werden Beziehungen in Form von Anforderungen des Verkehrssystems an das Gesamtfahrzeug dargestellt. Dazu gehören die weiter oben beschriebenen Anforderung und Bedürfnisse. Die Wirkketten in diesem Teil können funktional und nicht funktional sein. Funktional bedeutet in diesem Zusammenhang, es handelt sich um konkrete technische Anforderungen wie z.B. Schnittstellen und Standards. Als nicht funktional werden hier Anforderungen und Randbedingungen verstanden, die z.B. die gesellschaftliche Akzeptanz oder ökonomische Aspekte betreffen. Diese Wirkketten können z.B. mittels Trendforschung, Marktstudien oder Nutzwertanalyse identifiziert werden. Darauf soll in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher eingegangen werden. Im unteren Teil der Abbildung werden Anforderungen oder Einflussgrößen der Gesamtfahrzeugeigenschaften auf die Subsysteme und Komponenten dargestellt. Hier soll der Unterschied zwischen:

konzeptbestimmenden Wirkketten, d.h.

- in dieser Wirkkette sind mehrere Subsysteme für die Bereitstellung einer Gesamtfahrzeugfunktion oder -eigenschaft enthalten oder
- es bestehen starke Interaktionen zwischen einzelnen Subsystemen oder Komponenten, was zu Zielkonflikten zwischen zwei oder mehreren Gesamtfahrzeugfunktionen oder -eigenschaften führen kann

und nicht konzeptbestimmenden Wirkketten, d.h.

- ein Subsystem oder eine Komponente realisiert eine Gesamtfahrzeugfunktion oder -eigenschaft ohne Wechselwirkungen

herausgestellt werden. Diese lassen sich mit Methoden der Ingenieurwissenschaften ermitteln und sollen im weiteren Verlauf weiter spezifiziert werden.

Konzeptbestimmende Wirkketten müssen im PEP möglichst früh ausgelegt werden, da sie die Systemarchitektur festlegen.



Nicht konzeptbestimmende Wirkketten können an einer späteren Stelle im PEP berücksichtigt werden. Sie können dafür genutzt werden, derivatspezifische Differenzierungen der Gesamtfahrzeugfunktionen und -eigenschaften zu erreichen.

Verallgemeinerung:

Die Wirkkettenanalyse ist eine Methode zur Systemanalyse, die bereits am Anfang des Entwicklungsprozesses beginnen kann und während dessen stetig weiterentwickelt werden muss. Die Wirkkettenmatrix ist eine Darstellungsform, die qualitative und quantitative Beziehungen zwischen Supersystem, System und Subsystem kenntlich macht.

Die Basis für die Erstellung des unteren Teiles der Wirkkettenmatrix ist die Durchführung einer Wirkkettenanalyse. Speziell in der Kraftfahrzeugentwicklung stehen dafür die Werkzeuge Fahrversuch, Prüfstandversuch, Simulation und Wissensmanagement zur Verfügung.

Fahrversuch

Der Fahrversuch ermöglicht eine ganzheitliche Untersuchung der Wirkketten im Fahrzeug. Dazu wird das Versuchsfahrzeug in Abhängigkeit von der spezifischen Versuchsaufgabe mit Messtechnik und einer Messdatenerfassung ausgestattet. Ein Versuchsfahrer führt je nach Zulassungsstatus des Versuchsfahrzeuges entweder im öffentlichen Verkehrsraum oder auf abgesperrten Versuchsfeldern die zur Versuchsaufgabe erstellten Fahrmanöver durch. Die Reproduzierbarkeit ist beim Fahrversuch eingeschränkt, kann jedoch erhöht werden, indem speziell geschultes und erfahrenes Personal eingesetzt wird. Eine weitere Steigerung der Reproduzierbarkeit wird durch den Einsatz von Fahrrobotern erreicht. Die Vorteile des Fahrversuches sind:

- + die Betrachtung der Wirkketten unter realen Bedingungen,
- + die Einbeziehung aller Wechselwirkungen der Subsysteme und Komponenten,
- + die übergreifende Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften.

Zu den Nachteilen gehören:

- der verhältnismäßig hohe Kostenaufwand für Prüfling, Messtechnik und ggf. Versuchsgelände,
- die geringe Reproduzierbarkeit der Fahrmanöver,



- die fehlende Möglichkeit, das Systemverhalten von Subsystemen und Komponenten im Detail zu analysieren, weil es messtechnisch nur sehr schwer möglich ist, ohne eine Veränderung des Gesamtsystemverhaltens, Messwerte an Subsystemschnittstellen zu gewinnen,
- die bedingte Verfügbarkeit von Versuchsfahrzeugen in den frühen Phasen des PEP,
- die Gefährdung des Fahrversuchspersonals im Versagensfall des Prüflings.

Aufgrund der genannten Vor- und Nachteile kommt der Fahrversuch meist erst in einer späten Phase des PEP zum Einsatz. Für die Wirkkettenanalyse ist er jedoch ein unverzichtbares Mittel, weil es damit möglich ist, das komplette Systemverhalten zu beobachten, wenn auch nicht im Detail.

Prüfstandversuch

Der Prüfstand wird so konzipiert, dass er den Prüfling aufnehmen und in der zur Versuchsaufgabe passenden Weise mit Beanspruchungen oder Umgebungszuständen beaufschlagen kann. Das Ziel des Prüfstandversuches ist die detaillierte Untersuchung des Prüflings unter definierten Belastungszuständen mit höchster Reproduzierbarkeit unter Laborbedingungen. Die Vorteile des Prüfstandversuches sind:

- + die gute Reproduzierbarkeit unter Laborbedingungen,
- + die Möglichkeit für Untersuchungen auch an Teilsystemen oder Komponenten, da der Prüfstand eine Ersatzumgebung schaffen kann, in die Messtechnik so integriert werden kann, dass das Gesamtsystemverhalten berechenbar bleibt,
- + die Extrapolierbarkeit über die Einsatzgrenzen im Fahrversuch hinaus.
- + die geringe Gefährdung des Versuchspersonals im Versagensfall des Prüflings.

Die Nachteile sind:

- hohe Investitionskosten,
- die aufwendige bis unmögliche Darstellung realitätsnaher Fahrmanöver aufgrund der fehlenden realen Fahrzeugumgebung,
- die fehlende Möglichkeit, Wechselwirkungen zwischen mehreren Subsystemen mit einzubeziehen, so dass die Betrachtung mehrerer Wirkketten im Komplex nicht gelingt,



- die eingeschränkte Zugänglichkeit zu Messgrößen,
- die schlechte Verfügbarkeit von Prüflingen in der frühen Phase.

Der Prüfstandversuch wird für die hier dargestellten Zusammenhänge nochmals in Prüfstandversuch am Gesamtfahrzeug und an Subsystemen bzw. Komponenten unterteilt. Je nach Versuchskonzept und Lage der Systemgrenzen des Prüflings können sich weitere versuchssystemspezifische Vor- und Nachteile ergeben. Daher wird hier ein kurzer Vergleich zwischen Subsystem- / Komponentenversuch und Gesamtfahrzeugversuch in Tab. 2.1 angeführt.

Subsystem- / Komponentenversuch	Gesamtfahrzeugversuch
+ höchste Reproduzierbarkeit	+ Hohe Reproduzierbarkeit
+ detaillierter Einblick in Komponenten- / Subsystemverhalten	+ Untersuchung von Wechselwirkungen auf Subsystem- und Komponentenebene möglich
+ gute Zugänglichkeit für die messtechnische Erfassung	+ Witterungsunabhängigkeit
+ geringer messtechnischer Aufwand	+ realitätsnahes Verhalten der Subsysteme in der Fahrzeugumgebung
+ geringer regelungstechnischer Aufwand	+ gute Möglichkeiten zur qualitativen Identifikation physikalischer Wirkketten
+ Analyse von Schnittgrößen	
+ gezielte Erzeugung partieller Umgebungsbedingungen (Lasten, Klima, etc.)	
- Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Subsystemen nicht möglich	- nahezu vollständiges Fahrzeug erforderlich
- reale Konditionierung nicht vollständig darstellbar	- hoher mess- und regelungstechnischer Aufwand
- immer nur die Untersuchung einzelner isolierter Eigenschaften möglich	- detaillierter Einblick in physikalische Wirkketten ist aufwendig
	- reale Konditionierung nicht vollständig darstellbar

Tab. 2.1 Vergleich Subsystem- / Komponentenversuch vs. Gesamtfahrzeugversuch



Ebenso wie beim Fahrversuch, kann auch im Prüfstandversuch erst dann untersucht werden, wenn Prüflinge physisch existent sind. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird noch einmal auf grundlegende Stärken und Schwächen spezieller Versuchskonzepte eingegangen.

Numerische Simulation

Die Gegenüberstellung der Stärken und Schwächen von Fahr- und Prüfstand offenbart einige Lücken, die von der Simulation teilweise geschlossen werden können. So ist die Erstellung eines virtuellen Prototyps oft einfacher als die Erstellung eines physischen Prototyps. Vor allem in der frühen Phase können so auf Basis einfacher Konzeptmodelle bereits erste Erkenntnisse zum Systemverhalten erzeugt werden. In Abhängigkeit von der jeweiligen Ableitungsebene (vgl. Kap. 2.1) kann der Detaillierungsgrad der eingesetzten Modelle variieren. Die Verfügbarkeit von Fahrzeugparametern steigt erst langsam von Prozessschritt zu Prozessschritt an. Oft stammen diese Parameter aus unterschiedlichen Quellen und sind nicht sofort verwendbar (vgl. [87]). Hier kommen anfangs Simulationsmodelle basierend auf einfachen Handformeln zum Einsatz. Im Laufe der Entwicklung werden diese dann zu immer komplexeren Modellen ausgebaut.

Werden die Stärken von Simulation und Versuch richtig kombiniert, lassen sich zum Beispiel durch Interpolation in einem durch Versuche validierten Simulationsmodell Aussagen zu Schnittgrößen im System ermitteln, die am realen Prüfling messtechnisch nicht auflösbar wären. Ferner kann durch die Simulation auch extrapoliert werden. Damit kann das Systemverhalten des Prüflings auch über die im Versuch ggf. durch funktionale Einschränkungen des Prüfstandes oder das Erreichen physikalischer Grenzen im Fahrversuch begrenzten Versuchsmanöver hinaus untersucht werden. Weiterhin kann mittels der Simulation auch das Systemverhalten von Prüfständen vorhergesagt werden und so die Konstruktion dahingehend beeinflusst werden, dass es zum Beispiel einen ausreichenden Frequenzabstand des Eigenschwingungsverhaltens vom Prüfstand zum Untersuchungsbereich des Prüflings gibt. Zusammengefasst ergeben sich als Vorteile der numerischen Simulation:

- + die gute Verfügbarkeit von Beginn des PEP an,
- + die geringen Investitionskosten,
- + die Extrapolierbarkeit über die Einsatzgrenzen von Fahrversuch und Prüfstandversuch hinaus,



- + die gute Abstraktionsfähigkeit und damit die Möglichkeit zur Erzeugung von Systemverständnis.

Die Nachteile sind:

- die Abhängigkeit der Modellgüte vom Parametrierungsprozess,
- die Abhängigkeit der Ergebnislänge vom Detaillierungsgrad der Modelle,
- die geringe Bewertbarkeit der Prognosegüte,
- die Anforderlichkeit, das Modell zielgerichtet auf die zu untersuchende Wirkkette oder Aussage vorzubereiten,
- die eingeschränkte Möglichkeit zur Subjektivbeurteilung, weil objektive Messverfahren nicht immer vorliegen,
- der hohe Modellbildungs- und Validierungsbedarf, wenn eine hohe Ergebnisqualität gefordert ist.

Nicht immer stehen zufriedenstellende Modelle für die Simulation zur Verfügung, welche auch eine ausreichende Ergebnislänge gegenüber der Realität aufweisen. (vgl. [95])

Wissensmanagement

Viele Iterationsschleifen, sowohl in der Wirkkettenanalyse als auch im PEP, können durch den gezielten Einsatz von Expertenwissen eingespart werden. Die erforderlichen Informationen sind quasi unverzüglich abrufbar, wenn der Experte zur Verfügung steht. Das erfahrungsbasierte Wissen der Experten ist jedoch schwer zu katalogisieren, so dass es situationsspezifisch abgerufen werden kann. Zwar werden heute z.B. Datenbanksysteme entwickelt, die mit leistungsfähigen Suchfunktionen schon einen Teil der Anwendungen abdecken, jedoch ist in vielen Fällen das Interpretationsvermögen des Experten erforderlich, um zu entscheiden, ob sich die bestehende Erfahrung auf die vorliegende Fragestellung übertragen lässt. Zusammengefasst ergeben sich als Vorteile:

- + die extrem schnelle Bereitstellung von Ergebnissen und
- + die flexible Anwendbarkeit auf unterschiedliche Fragestellungen.

Die Nachteile sind:

- die hohe Subjektivität,
- die Anforderlichkeit von sehr erfahrenen Experten und
- die geringen Möglichkeiten zur Katalogisierung des Expertenwissens.



Als weitere übergreifende Methode im Fahrzeugentwicklungsprozess sei das Qualitätsmanagement genannt. Grundlagen und Werkzeuge sind der weiterführenden Literatur von BRAUNSPERGER in [28], PFEIFFER und SCHMIDT in [59] und dem VDA in [69] zu entnehmen.

2.1.3 Frontloading

Im Folgenden soll das Frontloading als methodische Entwicklungstendenz dargestellt werden. Es bestimmt die Suche nach Optimierungsansätzen im FEP seit mehreren Jahren und soll daher hier genauer betrachtet werden.

Nach BRAESS ([73]) wird auch in Zukunft die Gestaltung und Optimierung des Prozesses zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die deutlich gestiegene Variantenvielfalt innerhalb von Fahrzeugklassen (vgl. Kap. 2.1.1) und die Verkürzung von Entwicklungszeiten führen zu einer deutlichen Erhöhung des Entwicklungsbedarfes beim Automobilhersteller und seinen Zulieferern. Dieses Pensum an Entwicklungsaufgaben ist mit konventionellen Entwicklungsprozessen nicht mehr in der geforderten Qualität und Zeit zu bewältigen. Nur durch die konsequente Nutzung simulativer Methoden, die erhebliche Potenziale zu Entwicklungszeit- und -kosteneinsparungen bieten, lassen sich diese Aufgaben bewältigen (vgl. SEIFFERT ET AL. in [63]).

Als Frontloading wird eine Neugestaltung des Fahrzeugentwicklungsprozesses bezeichnet, die das Ziel verfolgt, die Produkt- bzw. Prozessreife zu einem frühen Entwicklungszeitpunkt bereits so weit zu steigern, dass Entscheidungen über die Verwertbarkeit von Lösungen oder Lösungsansätzen getroffen werden können, die im regulären Entwicklungsprozess ohne Frontloading erst deutlich später getroffen werden können. (vgl. [29])

Dazu werden auch Entwicklungsbudgets in frühen Entwicklungsphasen erhöht, um die Prognosequalität simulativer Methoden zu verbessern und hohe Kosten für Prototypen oder Änderungen in späten Phasen zu vermeiden. Dafür werden zum Beispiel Entwicklungsstrategien wie *simultaneous engineering* (vgl. Kap. 2.1.4) oder *virtuelle Produktentwicklung* (vgl. Kap. 3.2.2) verwendet. Hier erfolgt eine Parallelisierung von Bauteil- oder Subsystementwicklungsprozessen. Dies erfordert einen hohen Reifegrad des Produktkonzeptes sowie eine sehr klare Schnittstellendefinition zur Kopplung der Teilprozesse (vgl. [29]). In Abb. 2.4 und Abb. 2.5 sind die Veränderungen bezüglich Entwicklungskosten und Entwicklungszeit dargestellt.

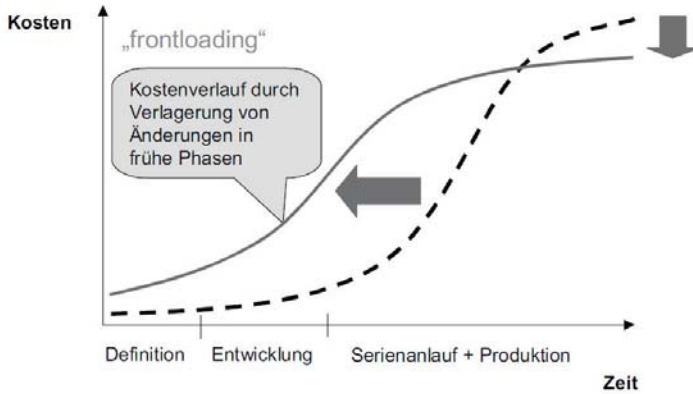


Abb. 2.4 Frontloading im Entwicklungsprozess [41]

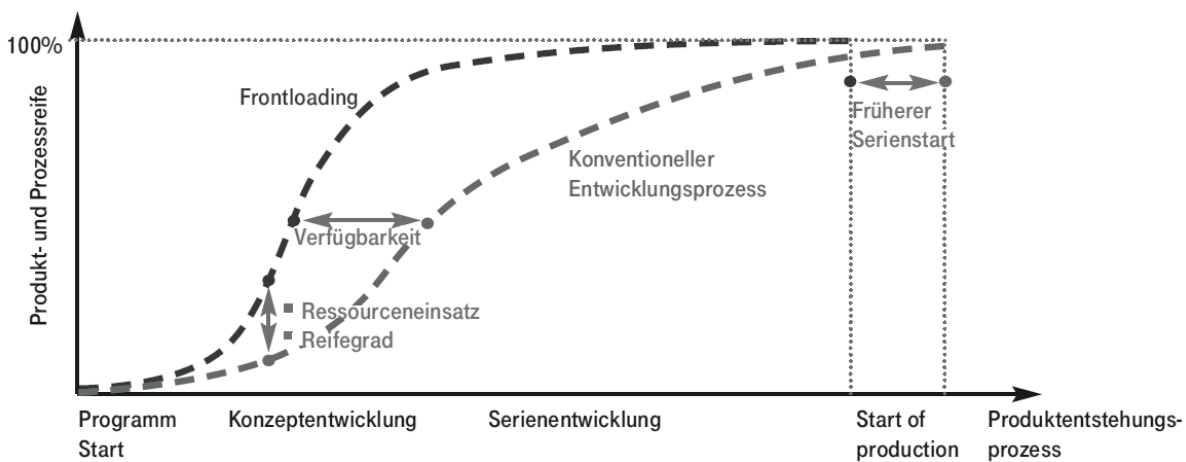


Abb. 2.5 Höhere Produktreife in frühen Phasen durch Frontloading im Entwicklungsprozess aus [68]

2.1.4 Simultaneous engineering

Zur Verkürzung von Entwicklungszeit können Prozessschritte im Entwicklungsprozess parallel d.h. simultan ablaufen. Dies setzt jedoch voraus, dass die Zulieferer nicht mehr allein Hersteller oder bestenfalls Entwickler für Werkzeuge zur Fertigung der jeweiligen Komponente sind, sondern bereits viel weiter oben im linken Ast des V-Modells als Entwicklungsdienstleister mit komponentenspezifischem Wissen einbezogen werden. Aus dieser Erkenntnis wird deutlich, dass neben der Schaffung neuer, leistungsfähiger Entwicklungswerkzeuge auch ein besonderes Augenmerk auf den Ablauf des Entwicklungsprozesses selbst gelegt werden muss. Nur so kann auch zukünftig gewährleistet werden, dass die Anforderungen korrekt und realisierbar definiert, die Zielgrößen vollständig übergeben und



die simultan gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse an der richtigen Stelle zurückgeführt d.h. integriert werden.

In Abb. 2.6 wird ein sequenzieller Ablauf eines Produktentstehungsprozesses in Anlehnung an [73] dargestellt. Daran wird verdeutlicht, dass zu Beginn einer Produktentwicklung mit entsprechender Laufzeit keine klaren Erkenntnisse darüber vorliegen, wie der tatsächliche Kundenwunsch zum Zeitpunkt der Markteinführung des Produktes aussehen wird. Während des gesamten Entwicklungsprozesses können vielseitige Veränderungen Einfluss auf die Randbedingungen im Markt nehmen, sodass die tatsächlichen Anforderungen an das Produkt meist erst kurz vor Fertigungsbeginn feststehen. In jüngster Vergangenheit sind solche Veränderungen häufiger und von größerer Tragweite für die Automobilindustrie. (vgl. [91])

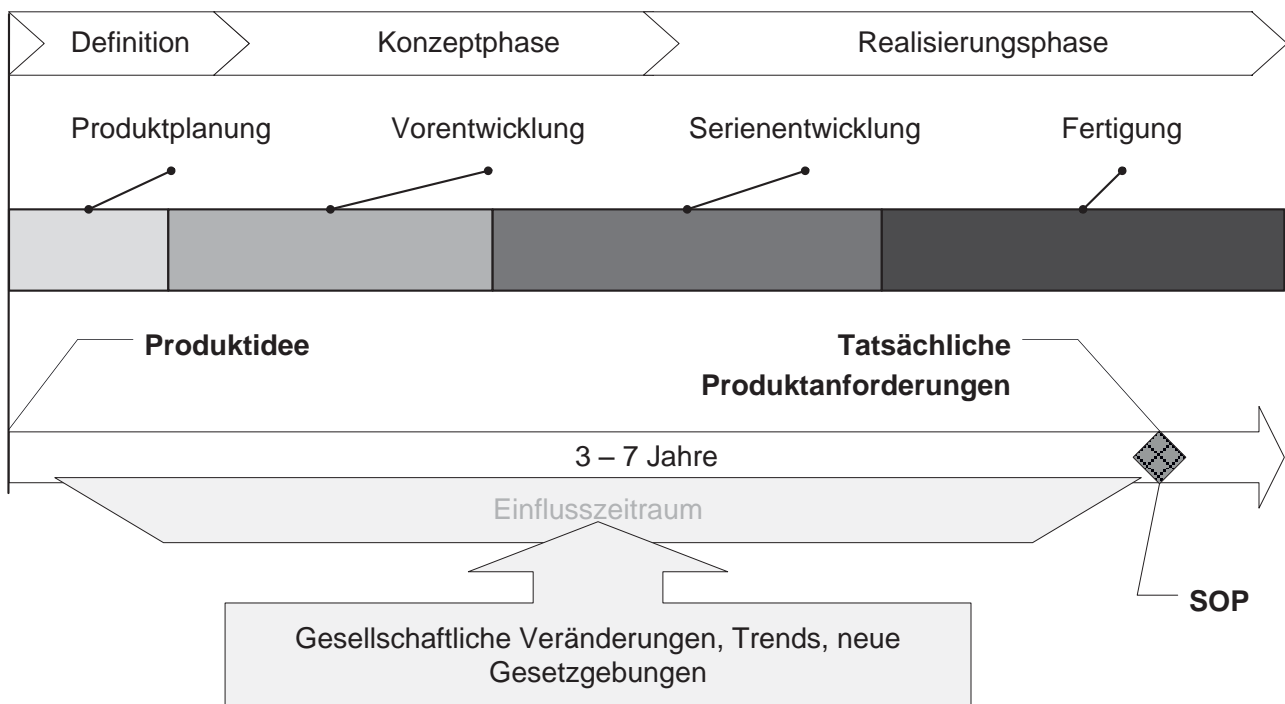


Abb. 2.6 Ablauf sequenzieller Produktentstehungsprozesse in Anlehnung an [73]

Um das Risiko einer Entwicklung an den tatsächlichen Anforderungen vorbei zu minimieren, sind verkürzte Entwicklungszyklen wie in Abb. 2.7 anzustreben.

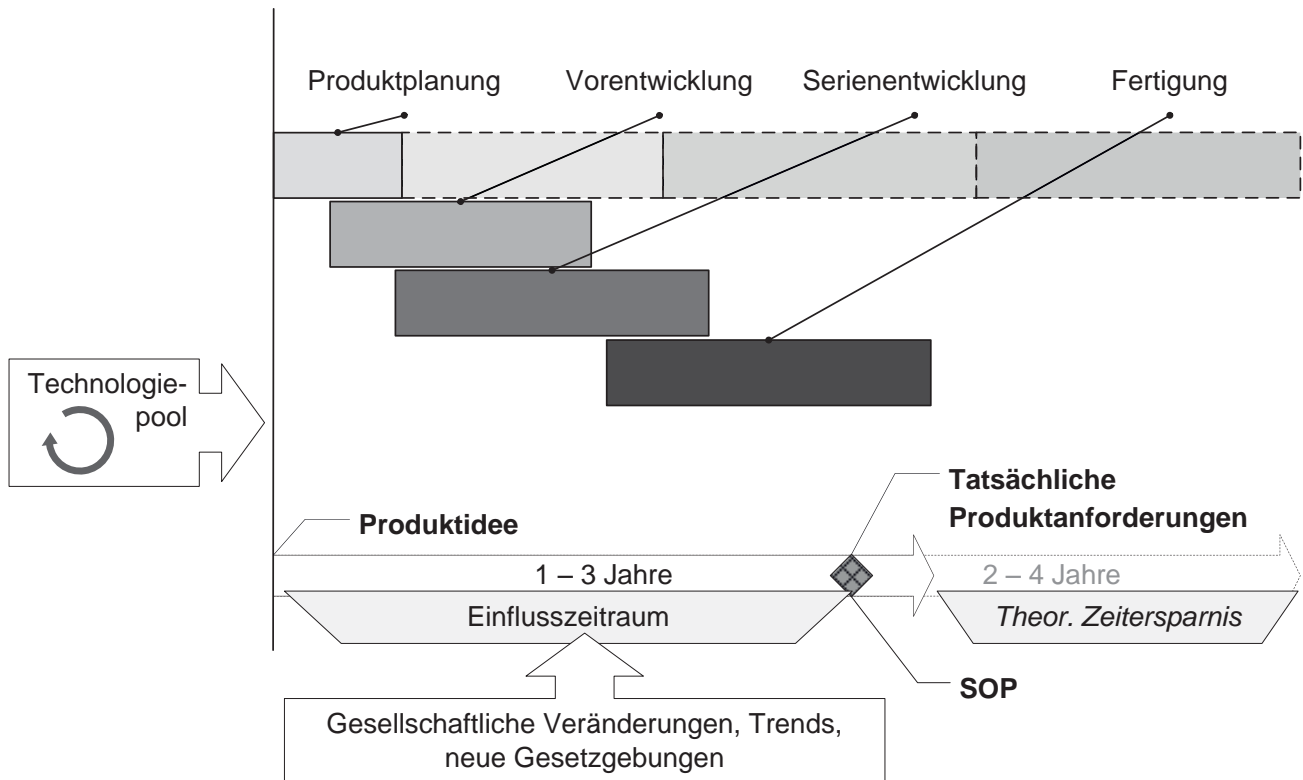


Abb. 2.7 Ablauf simultaner Produktentstehungsprozesse in Anlehnung an [73]

In der Realität lassen sich die in den beiden Abbildungen Abb. 2.6 und Abb. 2.7 gezeigten Entwicklungsabschnitte nicht in der ursprünglichen Ausdehnung zeitlich ineinander schieben. Die Umstellung eines sequenziellen auf einen simultanen PEP erfordert sowohl die Bereitstellung leistungsfähiger Schnittstellen für Kommunikation und Datenaustausch, als auch eine tiefgreifende Umstellung der Methoden und Teilprozesse und zieht eine veränderte Dauer der einzelnen Entwicklungsabschnitte nach sich. Da zu Beginn eines Entwicklungsvorhabens der Modifikationsgrad und damit die Anzahl der im Laufe der Entwicklung zu ermittelnden Parameter sehr hoch ist, folgt daraus oft ein hoher Bedarf an Entwicklungsressourcen. Eine Möglichkeit dem zu begegnen, ist der Unterhalt eines fortwährend zu füllenden Technologiepools aus einer Vorentwicklung. In [73] wird diese Möglichkeit genauer erläutert. An dieser Stelle sei bereits erwähnt, dass für die Entwicklung neuer Technologien leistungsfähige Methoden und Entwicklungswerkzeuge bereitgestellt werden müssen. Aus dieser Erkenntnis leitet sich ab, dass die Anforderungen an Methoden und Werkzeuge, welche sich aus der Vorentwicklung ergeben, für die Anforderungsanalyse zur



Entwicklung eines Versuchsfeldes eine wichtige Rolle spielen werden. Darauf wird in Kap. 4.2 näher eingegangen.

Als weiterführend zu diesem Thema wird auf folgende Literaturstellen verwiesen: [38], [51]

2.2 Methodische Versuchsfeldgestaltung

Systematische, wissenschaftliche Ausarbeitungen zur Gestaltung von Prüffeldern oder ganzen Versuchszentren sind in der Literatur selten zu finden. Es sind jedoch methodische Abhandlungen für einzelne Teilbereiche bekannt. PREUß und SCHÖNE stellen in [155] verschiedene Methoden und Vorgehensweisen für den Konzept- und Planungsablauf für die systematische Planung von Gebäuden auch mit einem hohen Technikanteil vor. Daneben wird auch die Entwicklung einer Betriebsstruktur beschrieben. Besonders der Abschnitt Facility Management – Planung und –Bewirtschaftung liefert für die vorliegende Arbeit wichtige Ansätze.

HAGEMANN ET AL. stellen in [96] ein Prüffeld für die Aggregateentwicklung vor. Das Prüffeld wurde in eine Gebäudestruktur integriert, die in ihrer Gestaltung ähnlich wie im vorliegenden Projekt bereits zu großen Teilen vorgegeben war. Auch wird darin eine schlüssige Begründung für die Abkehr von Gebäudestrukturen in Leicht- oder Containerbauweise dargelegt, der auch im der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Projekt gefolgt wurde. Weiterhin werden Bedarfe und Anforderungen an Versuchsmethoden im Fahrzeugentwicklungsprozess mit dem Fokus auf Antriebsstrangkomponenten dargelegt. Die Arbeit liefert dazu noch einen Ansatz für die Gestaltung der Daten- und Informationsstruktur mit dem Schwerpunkt Mess- und Automatisierungstechnik. Dieser wurde in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und an den heutigen Stand der Informationsverarbeitungstechnik angepasst. Dazu wird ein neues Konzept in Kap. 6.4 vorgestellt.

Eine Vision für das Prüffeld der Zukunft stellt SAMMER ET AL. in [99] aus der Sicht der Informationsverarbeitung vor. Darin wird auch ein Werkzeug beschrieben, welches für einen kontinuierlichen Versuchsprozess von der Versuchsplanung bis zur Ergebnisauswertung eingesetzt werden kann. Eine Grundlage für dieses Werkzeug ist unter anderem die vorgestellte Verfügbarkeitsverteilung von Prüfständen, die später in abgewandelter Form beim Energiemanagement aufgegriffen wird.



Des Weiteren sind in der Literatur zahlreiche Beschreibungen zu Versuchsfeldern verschiedener Forschungseinrichtungen und ingenieurtechnischer Unternehmen zu finden. Darin sind interessante Ideen dargestellt, die wertvolle Impulse zum Entwurf der Gebäudestruktur und zum strukturellen Aufbau von Versuchsfeldern liefern. Darunter stellt auch KÜÇIKAY ([9]) die damalige Neuausrichtung eines universitären Forschungszentrums in Braunschweig vor. Nachfolgend wurde eine Auswahl dieser Quellen zusammengestellt: [97], [100], [101].

DEUSCHL stellt in [95] eine Vorgehensweise zur Entwicklung eines Versuchsfeldes für die Fahrwerktechnik unter besonderer Beachtung des Fortschrittes der virtuellen Entwicklung in der Kraftfahrzeugtechnik vor. Beginnend mit einer Anforderungsanalyse konzentriert er sich dabei auf die Bedürfnisse des Automobilherstellers und gestaltet das Prüffeld auch unter den dort üblichen Randbedingungen. DEUSCHL erarbeitet zunächst zwei Szenarien mit unterschiedlich ausgeprägtem Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Kraftfahrzeugentwicklung. Für beide Szenarien stellt er Konzepte auf, in denen zum einen Prüfstände benannt werden und zum anderen auch, wie diese anzuordnen sind. Das von ihm favorisierte Szenario der fortgeschrittenen Simulation wird auch in dieser Arbeit weiterverfolgt. Neben den in Abb. 2.7 dargestellten Prüfständen werden auch die folgenden Empfehlungen aus Tab. 2.2 zur strategischen Ausrichtung des Versuchsfeldes im Hinblick auf den Entwicklungsprozess gegeben.

Empfehlung aus [95]	Schlussfolgerung für die vorliegende Arbeit	Kapitel
<i>Entwicklung und Absicherung von Innovationen (Alleinstellungsmerkmale)</i>	- Berücksichtigung der Prozesse im Fahrzeugentwicklungsprozess	4.2
	- Erhöhte Flexibilität im Versuchsfeld und an den Prüfständen	4.3 / 4.4
<i>Bewertung von Regelsystemen und aktiven Komponenten</i>	- Entwicklung neuartiger Prüfstandsysteme für HiL-Anwendungen	4.4 / 6.4
<i>Aufbau bzw. Erweiterung von Detailkompetenzen (Erweiterung der Aussagefähigkeit)</i>	- Bereitstellung von Versuchswerkzeugen für die systematische Wirkkettenanalyse	4.2.2

Tab. 2.2 Empfehlungen zur Ausrichtung von Versuchsfelder und Schlussfolgerungen für die vorliegende Arbeit

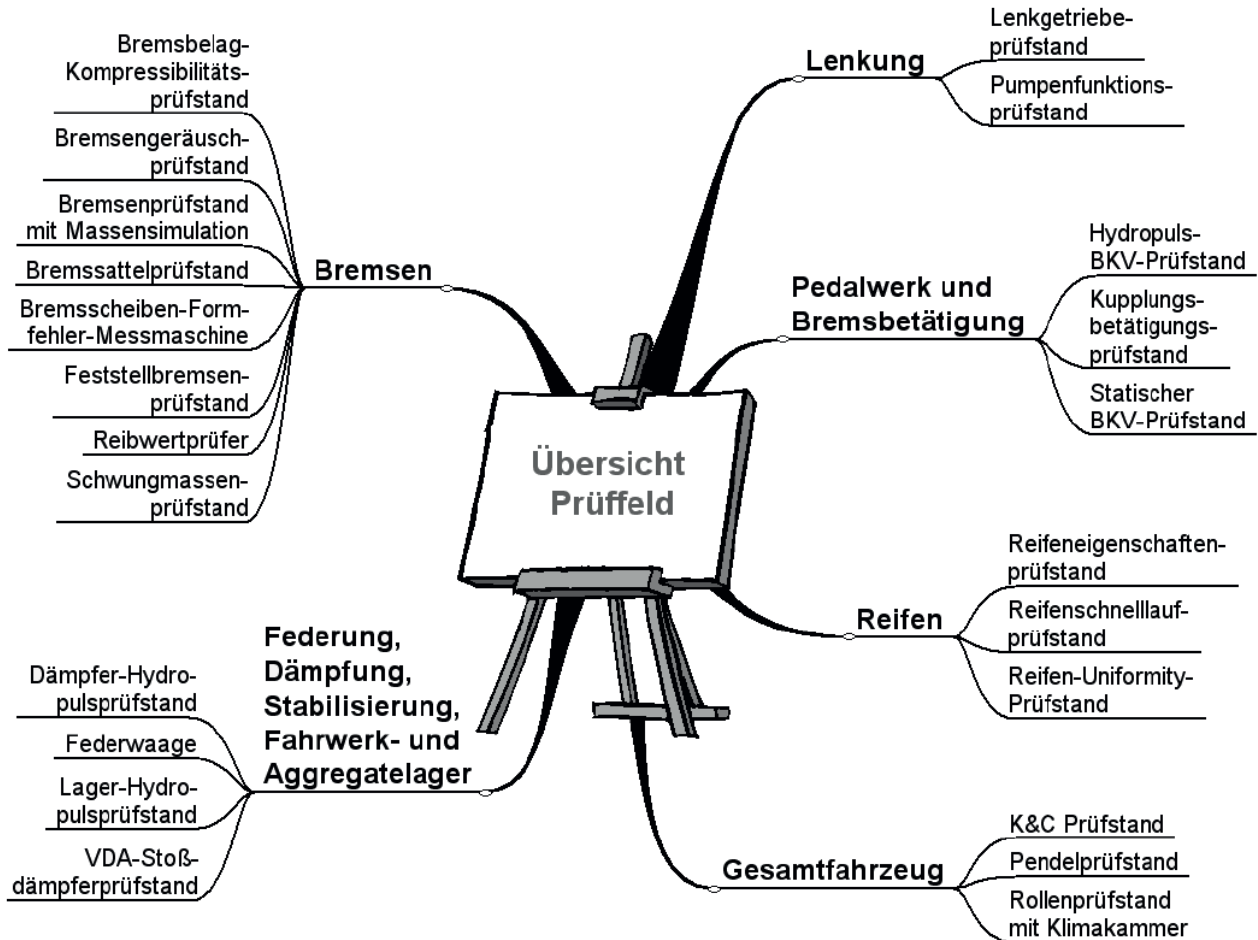


Abb. 2.8 Prüffeldkonzept für das Szenario „Fortgeschrittene Simulation“ aus [95]

Die Empfehlungen werden vorwiegend in Kap. 4 bei der Konzeption des Versuchsfeldes wieder aufgegriffen.

HABERFELLNER ET AL. stellen in [42] zahlreiche Methoden und Ansätze zur Systematisierung bei der Entwicklung größerer, komplexer Produkte oder Projekte vor. Darunter sind Verfahren zur Anforderungsanalyse, Lösungsfindung und –bewertung, aber auch Vorschläge zur Strukturierung des Entwicklungsablaufs. Einige dieser Methoden werden hier aufgegriffen und an die vorliegende Aufgabe angepasst. Weiterhin ist eine Zusammenstellung von Methoden und Techniken aus dem operativen Einsatz der Projektplanung und -administration enthalten. Die Vorgehensweise des Systems Engineering wird anhand von zwei Praxisbeispielen für die Planung und Durchführung von Bauprojekten beschrieben. Es handelt sich dabei um ein Einfamilienhaus und um einen Großflughafen. Die Komplexität des hier vorliegenden Projekts eines Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums liegt



rückblickend nach persönlicher Einschätzung etwa in der Mitte zwischen beiden. Aus der vorgestellten Struktur lassen sich daher auch Elemente auf das Fahrzeugtechnische Versuchszentrum übertragen. Darauf wird an den jeweiligen Stellen der Arbeit verwiesen.

2.3 Prüfstandentwicklung

Seit dem Beginn der Geschichte des Automobils sind Erfinder, Techniker und Ingenieure vor die Herausforderung gestellt, Fahrzeuge und deren Bestandteile zu verbessern. Forderungen nach Haltbarkeit, Sicherheit und Ressourcenschonung waren nur einige Triebfedern für die bevorstehende technische und gesellschaftliche Entwicklung um die Mobilität. Sie sind es auch heute, nach wie vor. Komponenten zu optimieren, um deren Eigenschaften zu verbessern, erforderte bereits damals den konsequenten Einsatz experimenteller Methoden, um so die Grundlagen für die spätere Berechnung zu schaffen (vgl. BRAESS [71]). Neben der Entwicklung von Kraftfahrzeugen bestand demnach auch von Anfang an stets die Forderung nach leistungsfähigen experimentellen Methoden. In [14] fordert ROBERT bereits im Jahr 1905 automobiltechnische Laboratorien an Hochschulen und Bildungseinrichtungen. Da Berechnungsmethoden zu dieser Zeit noch keinen nennenswerten Beitrag zu Entwicklungs- und Absicherungsaufgaben speziell im Automobilbau leisten konnten, spricht er dem Versuch die alleinige Möglichkeit zur Lösung technischer Probleme zu. Die Hochschulen in Aachen, Berlin und Dresden hatten sich zu dieser Zeit bereits mit den Anforderungen aus der noch sehr jungen Automobilindustrie auseinandergesetzt und mit der Einrichtung von Versuchsanstalten in unterschiedlicher Ausrichtung begonnen ([5], [14]).

Die mehr als 110-jährige Geschichte des heutigen Institutes für Automobiltechnik Dresden – IAD beginnt als Königlich Sächsische Mechanisch – Technische Versuchsanstalt unter Hofrat Prof. Hermann Scheit. Die Forderung nach mehr akademischer Forschung im Bereich der Kraftfahrzeugtechnik führte damals in Dresden zum Neubau einer Versuchsanstalt nach Plänen von PROF. HERMANN SCHEIT. Diese wurde im Jahr 1903 eröffnet. Die Schwerpunkte der damaligen Entwicklung waren nach BRUNNER (in [5]) Aufgaben zu Bauteilfestigkeit und -verschleiß. Wenig später kamen dann auch Untersuchungen zum Wirkungsgrad bei der Leistungsübertragung im Antrieb des Fahrzeuges hinzu. Abb. 2.9 zeigt das Motoren- und Getriebeprüffeld im heutigen SACHSENBERGBAU der TU Dresden.

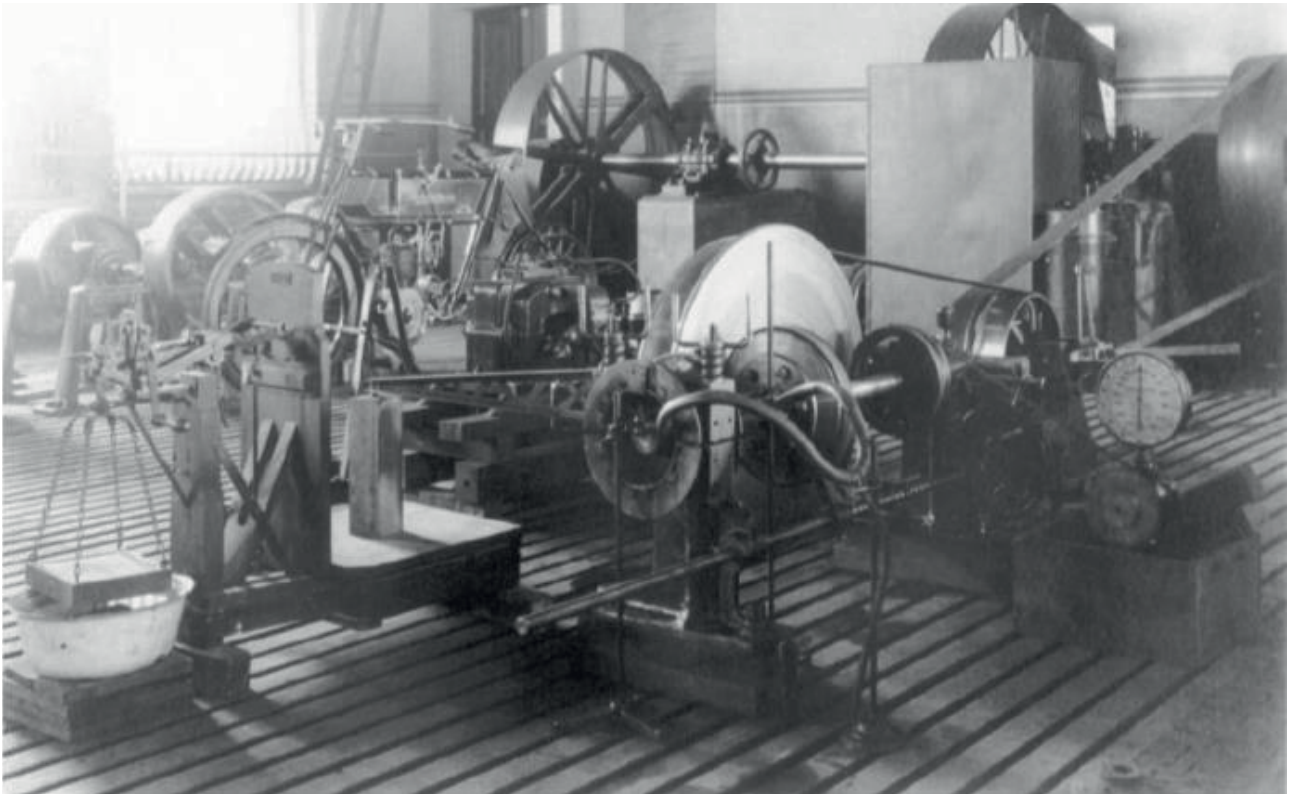


Abb. 2.9 Motoren- und Getriebeprüffeld der Königlich Sächsischen Mechanisch - Technischen Versuchsanstalt [5]

Die Prüffelder wurden damals so gestaltet, dass vor allem Komponenten darauf erprobt werden konnten. So wurden auch Prüfstände zur Untersuchung von Zweitakt-Verbrennungsmotoren und Reifen entwickelt. Der Anspruch lag darin, die Zusammenhänge zwischen Komponenten und Subsystemen zu verstehen. Erst später wurden auch Gesamtfahrzeugprüfstände wie der in Abb. 2.10 dargestellte Unterflur-Rollenprüfstand nach Plänen von Scheit realisiert. Eine ganz ähnliche Entwicklung in Forschung und Lehre auf dem Gebiet der Kraftfahrzeugtechnik fand auch in Aachen und Berlin statt. (vgl. [14], [18] und [19])

Auf eine chronologische Auflistung zur Prüfstandentwicklung soll in dieser Arbeit verzichtet werden. Der Umfang dieser Chronologie würde aufgrund der Vielfalt an Untersuchungs- und Einsatzgebieten von Prüfständen in der Automobilentwicklung den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Dazu wird auf die Schriftenreihe „Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau“ und folgende (vgl. [132], [133], [134], [135] und [136]) verwiesen.

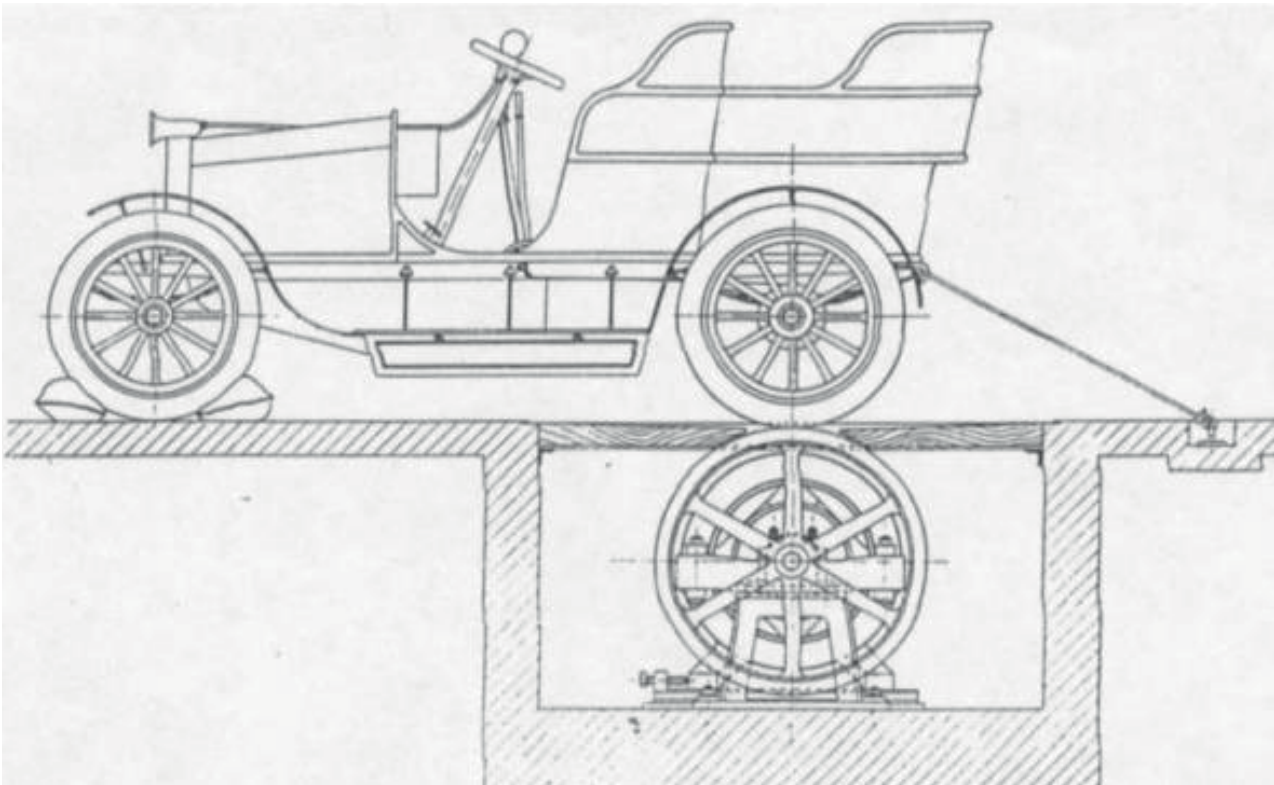


Abb. 2.10 Unterflur Rollenprüfstand nach H. Scheit aus [5]

Stattdessen werden hier nur einzelne Prüfstände und prüfstandbezogene Entwicklungsarbeiten erwähnt, die für die Gestaltung des Versuchsfeldes und die Konzeptentwicklung der Prüfstände im Versuchsfeld maßgebend waren. Der Fokus soll zudem auf Prüfstände gerichtet werden, die in den Untersuchungsbereichen Fahrdynamik, Schwingungskomfort und Haltbarkeit/Lastdaten (vgl. Kap. 1.1) eingesetzt werden.

Für diese Betrachtungen eignet sich eine Unterteilung in Anlehnung an die Ausführungen von HEIBING ET AL. ([76]). Danach wird nach Versuchseinrichtungen für den Komponentenversuch, den Subsystemversuch, den Systemversuch und dem Gesamtfahrzeugversuch unterschieden. Eine weitere Unterscheidung nimmt JACOBY ([122]) vor. Die Unterscheidung nach dem Einsatzzweck in Prüfstände für:

- mathematische Modellbildung,
- Ermittlung von Federkennlinien, Dämpfung und Modalformen,
- Ermittlung von Bemessungskennwerten (Lastdaten),



- Bauteiloptimierung bezüglich Lebensdauer, Fahrkomfort, Fahrdynamik und Funktionalität und
- Lebensdauernachweise / Betriebslastennachfahrversuche

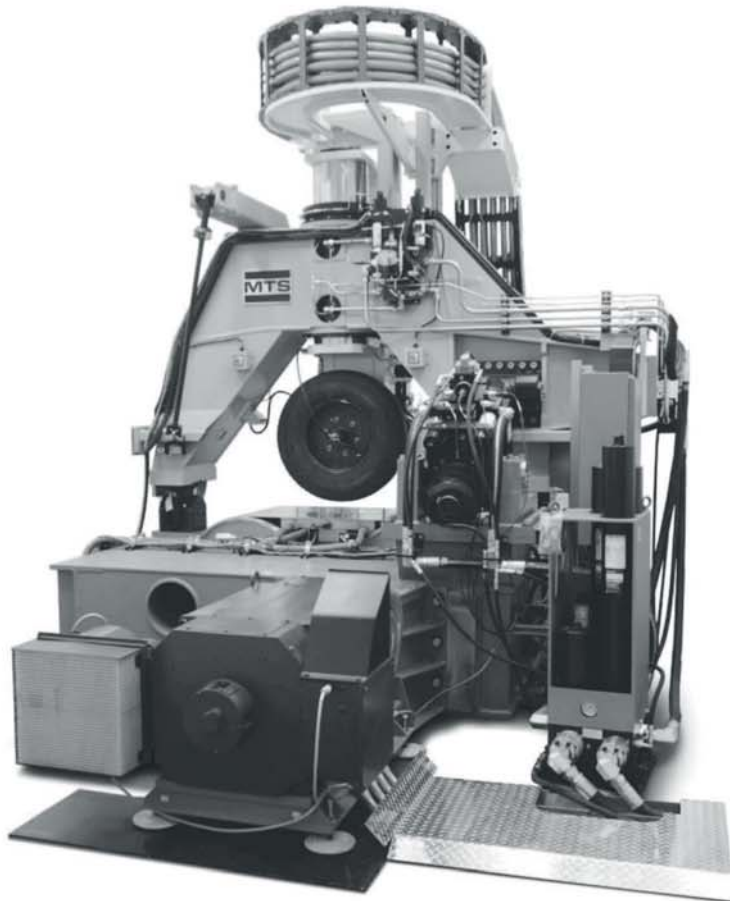
kann bei der Konzepterstellung für Prüfstände Vorteile haben.

Moderne Prüfstände sind hochkomplexe technische Anlagen, deren Entwicklung methodisch ablaufen muss. ALBERS und SCHYR ([103]) stellen einen methodischen Ansatz zur Entwicklung eines modernen Antriebsstrangprüfstandes vor. Auch LUX ([10]) und IBENDORF ([138]) greifen diese Thematik auf.

2.3.1 Komponentenprüfstände

Nach HEIßING ([76]) sind Komponentenprüfstände in ihrer Funktion auf die Untersuchung eines einzelnen Bauteils beschränkt. Diese Prüfstände werden sowohl zur Charakterisierung von spezifischen Bauteileigenschaften als auch zur Prüfung in der Absicherungsphase des Bauteilentwicklungsprozesses eingesetzt. An dieser Stelle werden Prüfstände zur Untersuchung von Reifen, Aufbauschwingungsdämpfern und Elastomerlagern näher betrachtet. Neben diesen bauteilspezifischen Prüfständen werden multifunktionale Prüffelder eingesetzt. Diese bestehen aus Spannvorrichtungen und einem oder mehreren servohydraulischen oder -elektrischen Aktuatoren, mit denen der Prüfling statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt wird.

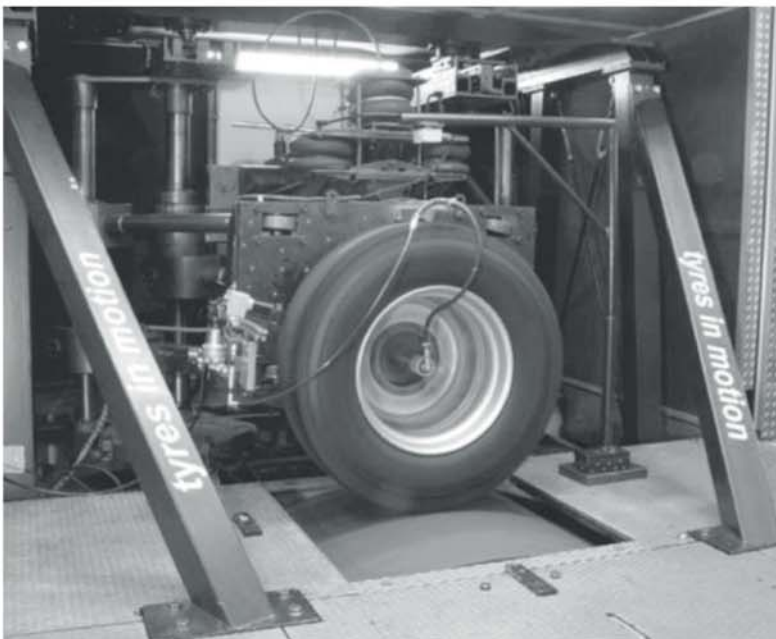
Reifenprüfstände werden heute in großer Anzahl und Vielfalt in Forschung und Entwicklung eingesetzt. Es kann eine Unterscheidung nach dem Prinzip der Fahrbahndarstellung in Trommel- und Flachbahnprüfstände vorgenommen werden. Beim Trommelprinzip kann weiterhin in Innen- und Außentrommelprinzip unterschieden werden. Nach EINSLE ([117]) werden diese Prüfstände zur messtechnischen Erfassung des reifenspezifischen Verhaltens unter gegebenen Randbedingungen eingesetzt. Deren Konstruktion ist speziell auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Messungen ausgerichtet.



Technische Daten (Auszug):

Fahrbahngeschw. (max.):	250 km/h
Längskraft (max.):	± 18 kN
Seitenkraft (max.):	± 20 kN
Radlast (max.):	25 kN
Schräglaufwinkel (max.):	$\pm 20^\circ$
Schräglaufwinkeländerung:	50°/s
Sturzwinkel:	10°
Sturzwinkeländerung:	8°/s
Radantriebsmoment:	6 kNm
Reifendurchmesser:	0,91 m

Abb. 2.11 Flachbahn-Reifenprüfstand MTS (Flat-Trac[®] CT Plus) ([21])



Technische Daten (Auszug):

Fahrbahngeschw. (max.):	120 km/h
Radlast (max.):	50 kN
Schräglaufwinkel:	$\pm 15^\circ$
Sturzwinkel:	10°
Radantriebsmoment:	16 kNm
Reifenbreite:	14"
Trommeldurchmesser:	2,5 m
Trommelbelag:	Korund

Abb. 2.12 Nutzfahrzeugreifenprüfstand NuRep des IKA Aachen ([7])



Schwingungsdämpferprüfstände sind ebenso wie Reifenprüfstände heute in Forschung und Entwicklung weit verbreitet. Das Wirkungsprinzip ist sehr einfach und an die Arbeitsweise von Fahrzeugaufbauswingungsdämpfern angepasst. Der Prüfling wird einseitig an einem mit einem Kraftaufnehmer versehenen Lastrahmen befestigt. Die Belastung erfolgt meist einachsig über einen beweglichen zweiten Einspannungspunkt, der eine definierte translatorische Bewegung ausführt. Der Antrieb erfolgt entweder servohydraulisch oder -elektrisch. Ältere Prüfmaschinen arbeiten mit einem Kurbeltrieb. Eine detaillierte Beschreibung des VDA-Messverfahrens wird durch STRETZ ([17]) beschrieben. Für besondere Prüf- oder Messverfahren kann eine weitere Belastungsrichtung eingeführt werden. Abb. 2.13 zeigt eine Standardprüfmaschine der Firma MTS.



Technische Daten (Auszug):

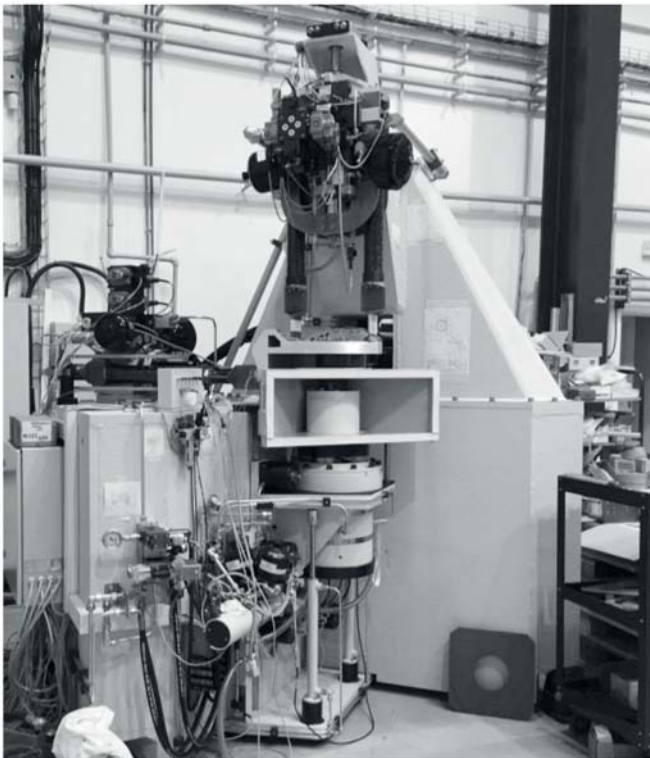
max. Kolbengeschwindigkeit:	5 m/s
max. Kolbenkraft bei 1,7 m/s:	± 40 kN
max. Hub (p-p):	0,25 m
Erweiterbarkeit mit Seitenlasteinheit	

Abb. 2.13 Dämpferprüfstand MTS (852) ([23])

Elastomerlagerprüfstände werden zur Charakterisierung und Prüfung von kompakten Elastomerbauteilen wie Fahrwerks- oder Aggregatlagern verwendet. Sie bestehen äh-



lich wie Dämpferprüfstände aus einem Lastrahmen und ein bis sechs Linear- oder Rotationsaktuatoren. Diese können ebenfalls servohydraulisch oder -elektrisch angetrieben sein.



Technische Daten (Auszug):

Kraft (max.) Z:	$\pm 50 \text{ kN}$
Kraft (max.) X und Y:	$\pm 25 \text{ kN}$
Torsionsmoment (max.) Z:	$\pm 0,2 \text{ kNm}$
Hub (p-p):	0,025 m
Prüffrequenz (max.):	80 Hz
Erweiterbarkeit mit Thermokammer	



Abb. 2.14 Triaxiales Elastomer Testsystem INOVA

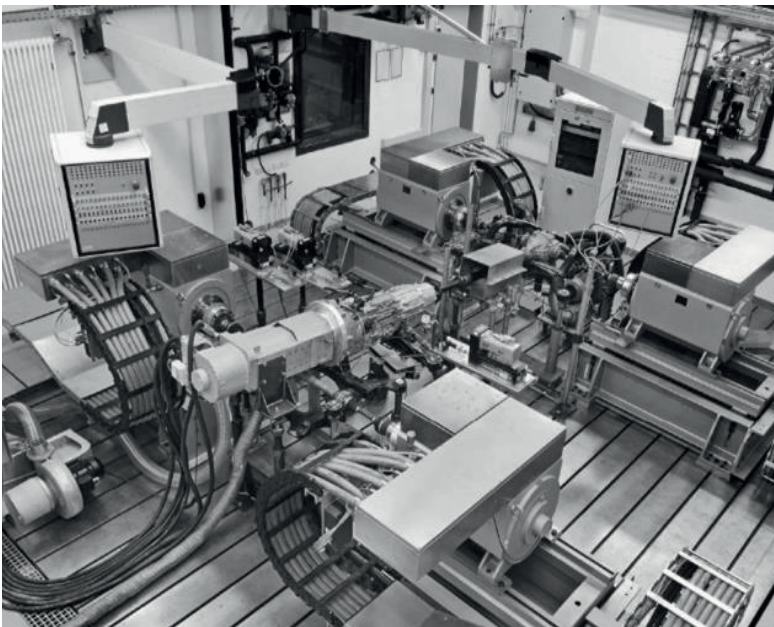
2.3.2 Subsystem- und Systemprüfstände

HEIßING unterscheidet in seinen Darstellungen in Subsystem- und Systemprüfstände. Als Systeme werden in diesem Zusammenhang Teile des Fahrzeuges verstanden, die wiederum aus mehreren Subsystemen bestehen. Ein Beispiel ist der Antriebsstrang, der als System des Kraftfahrzeuges wiederum aus Subsystemen wie Getriebe, Verteilergetriebe oder Achsdifferenzialgetrieben besteht. Die Komplexität von Systemprüfständen ist entsprechend höher als bei Subsystemprüfständen. Diese Unterscheidung wird in diesem Kapitel aufgenommen.

Antriebsstrangprüfstände sind heute in verschiedener Ausprägung in der Fahrzeugentwicklung zu finden. Es kann dabei nach Art und Umfang des Prüflings und nach dem Einsatzzweck in den einzelnen Phasen des Entwicklungsprozesses unterschieden werden. Auf Antriebsstrangprüfständen werden Subsysteme wie schaltbare Kupplungen, Zweimassenschwungräder oder Getriebe bis hin zu Systemen wie dem nahezu vollständigen



Antriebsstrang samt Antriebregelsystemen untersucht. Die Untersuchungsziele reichen dabei von der Charakterisierung bestimmter Subsystemeigenschaften wie dem mechanischen Wirkungsgrad bis hin zu komplexem Übertragungsverhalten für die Entwicklung der Fahrzeugeigenschaften bezüglich Noise-Vibration-Harshness (NVH). Auch experimentelle Festigkeitsuntersuchungen werden durchgeführt. Dazu ist die Auslegung der Prüfstände an den jeweiligen Einsatzzweck anzupassen. IBENDORF zeigt ([138]) eine methodische Vorgehensweise zur Entwicklung eines komplexen Antriebsstrangprüfstandes. Darin wird den Bereichen Regelungsentwurf und Hardware-in-the-Loop-Anwendungen besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Moderne Antriebsstrangprüfstände verfügen heute über leistungsstarke Elektromaschinen, die meist in Synchronbauweise ([2]) ausgeführt werden. Damit ist sowohl die regelungstechnisch anspruchsvolle Simulation von Drehungleichförmigkeiten des Verbrennungsmotors als auch des dynamischen Reifenverhaltens möglich (vgl. [4], [2] und [12]). Abb. 2.15 zeigt den modernen Antriebsstrangprüfstand am FKFS STUTTGART ([2]). Dieser Prüfstand ist besonders an die Anforderungen für den Versuch an Hybridantriebssträngen angepasst. Diese Anforderungen unterscheiden sich zwangsläufig von denen konventioneller Antriebsstrangprüfstände. SCHYR und CHRIST stellen ([16]) Anforderungen für Hybridantriebsstrangprüfstände vor.



Technische Daten (Auszug):

Elektrischer Antrieb

Antriebsleistung (max.):	300 kW
Drehzahl (max.):	8000 1/min

Radmaschinen (4x)

Abtriebsleistung (max.):	250 kW
Drehzahl (max.):	3000 1/min

Energiespeichersimulator HV

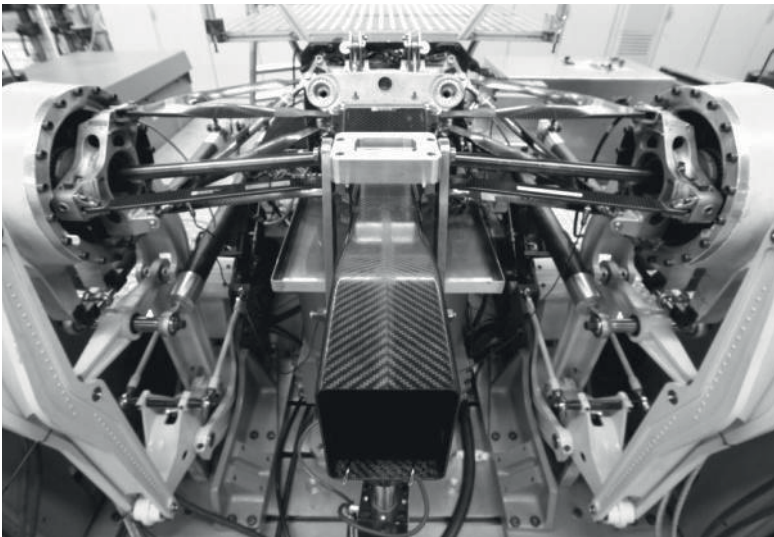
Leistung (max.):	±150 kW
Spannung:	0 bis 600 V
Strom:	±500 A

Abb. 2.15 Antriebsstrangprüfstand am FKFS in Stuttgart ([2])

Eine weitere Ausbaustufe komplexer Antriebsstrangprüfstände zeigt die TOYOTA MOTORSPORT GMBH ([22]) (hier Abb. 2.16). Bei diesem Getriebeprüfstand, der vordergrün-



dig für experimentelle Festigkeitsnachweise an Motorsportfahrzeugen der Formel-1-Klasse konzipiert wurde, können neben einem An- und zwei Abtriebsmomenten auch Vertikal- und Longitudinalkräfte der Radträger in den Prüfling eingeleitet werden. Zusätzlich verfügt dieser Prüfstand über einen Downforce-Zylinder für die Simulation von aerodynamischen Kräften und ein außergewöhnlich großes Drehzahlband.



Technische Daten (Auszug):

Elektrischer Antrieb

Antriebsmoment (max.): 400 Nm

Drehzahl (max.): 22000 1/min

Radmaschinen (2x)

Abtriebsmoment (max.): 2700 Nm

Drehzahl (max.): k.A.

Roadsimulator (X,Y,Z):

Kraft (max.) X: 10 kN

Hub (p-p) X: 0,033 m

Kraft (max.) Y: 14 kN

Hub (p-p) Y: 0,03 m

Kraft (max.) Z: 14 kN

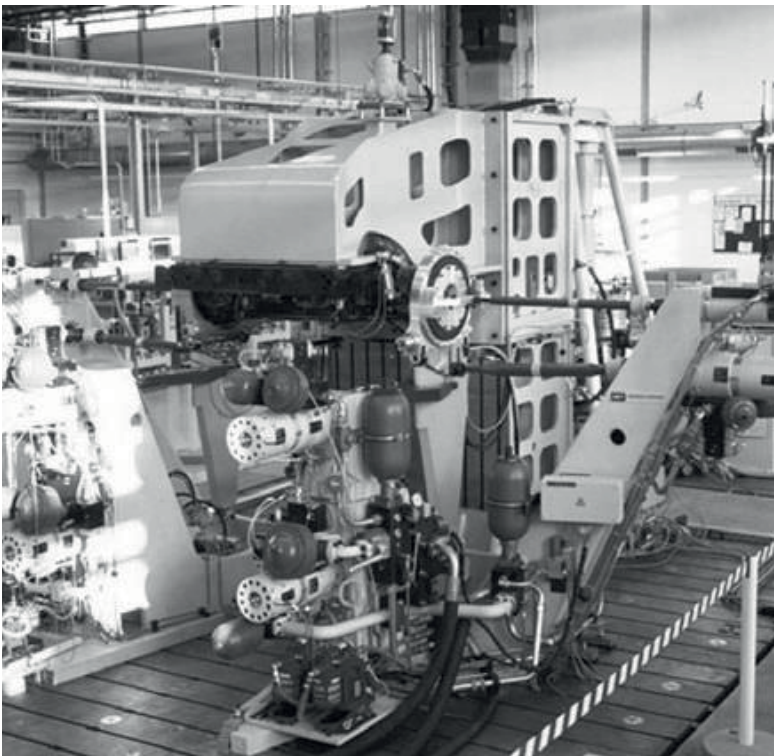
Hub (p-p) Z: 0,12 m

Abb. 2.16 Transmission Test System der TOYOTA Motorsport GmbH ([22])

Radaufhängungs- und Achsprüfstände werden als System- und Subsystemprüfstände verwendet. Das Einsatzgebiet entspricht dem der Antriebsstrangprüfstände. Radaufhängungen oder Radführungssysteme sind in modernen Kraftfahrzeugen komplexe Strukturen mit einer hohen Funktionsintegration. Für die Entwicklung ist es daher erforderlich, den kompletten Achskörper am Prüfstand untersuchen zu können. Moderne Radaufhängungs- und Achsprüfstände bieten diese Möglichkeit. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal im Hinblick auf die konstruktive Struktur des Prüfstandes ist die Integration des drehenden Rades in den Untersuchungsbereich. Achsprüfstände ohne drehendes Rad werden oft als radnabengebundene Straßen-Simulationsprüfstände bezeichnet. Abb. 2.17 zeigt einen Prüfstand dieser Bauform. Diese Prüfstände eignen sich besonders für die Untersuchung des mechanischen Übertragungsverhaltens zum Beispiel für die Parameteridentifikation bei numerischer Simulation, da sie nahezu beliebige Erregungsprofile in den Prüfling einleiten können und damit auch die Betrachtung einzelner Belastungsrichtungen isoliert ermöglichen. Im Gegensatz dazu bieten Radaufhängungsprüfstände mit drehendem Rad die Möglichkeit, den schwer zu simulierenden Reifen- Fahrbahnkontakt und die gyroskopi-



schen Reaktionen des Rades in die Untersuchungskette mit einzubeziehen. Der Reifen-Fahrbahnkontakt wird durch eine Außentrommel oder eine Flachbahn realisiert. In Abb. 2.18 ist der Fahrdynamische Achsprüfstand der Firma IABG dargestellt. Bei diesem Prüfstand wird der gesamte Achskörper samt Rädern, bei Bedarf sogar mit Karosseriebestandteilen durch einen beweglichen Lastrahmen aufgenommen, der die Fahrzeugbewegungen Huben und Wanken realitätsnah abbilden kann. Die Lastabstützung der Räder erfolgt über zwei Außentrommeln, auf denen auch gelenkt werden kann. Mit den heute bestehenden Prüfstandsystemen können jedoch noch keine dem realen Fahrversuch entsprechende Belastungsszenarien am Prüfstand nachgebildet werden. Dazu soll der in Kap. 4.4 vorgestellte Reifen-Achs-Prüfstand einen Beitrag leisten.



Technische Daten (Auszug):

Translatorische Aktuatoren

Kraft (max.) X:	31,5 kN
Hub (p-p) X:	0,1 m
Kraft (max.) Y:	32,5 kN
Hub (p-p) Y:	0,1 m
Kraft (max.) Z:	53 kN
Hub (p-p) Z:	0,18 m

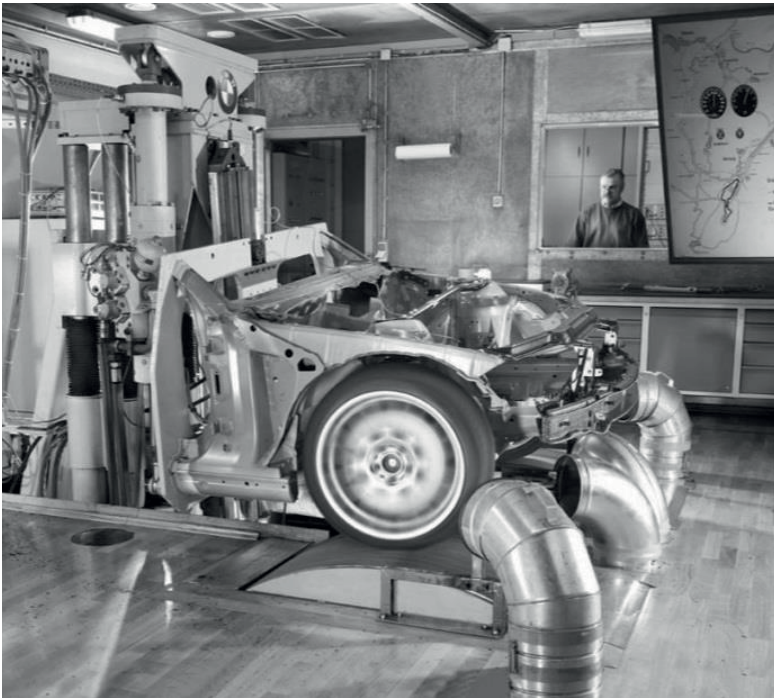
Sturz am Rad

Kraft (max.):	10 kN
Hub (p-p):	0,125 m

Rotatorische Aktuatoren

Moment (max.) Bremsen:	5 kNm
Winkel (p-p) Bremsen:	16 °
Moment (max.) Antrieb:	3 kNm
Winkel (p-p) Antrieb:	140 °
Moment (max.) Lenken:	3,6 kNm
Winkel (p-p) Lenken:	10 °
Moment (max.) Lenkrad:	350 Nm
Winkel (p-p) Lenkrad:	450 °

Abb. 2.17 Straßen-Simulationsprüfstand für Fahrzeugachsen ZF Friedrichshafen AG ([76])



Technische Daten (Auszug):

Trommelantrieb

Antriebsleistung (max.):	2x300 kW
Fahrbahngeschw. (max.):	308 km/h
Beschleunigung (max.)	
0-100 km/h:	2,1 s
0-308 km/h:	8,1 s
308-0 km/h:	8,2 s
100-0 km/h:	1,9 s
Trommeldurchmesser:	2,0 m
Trommelbreite:	0,6 m

Belastungseinheit

Hub (p-p):	0,25 m
Kraft (max.):	40 kN

Abb. 2.18 Fahr-dynamischer Achsprüfstand IABG ([6])

DRESSLER zeigt ([116]) die Bedeutung der Simulation bei der Entwicklung und im Betrieb von Prüfständen. Es wird eine Methode zur Modellerstellung speziell für servohydraulische Prüfstände vorgestellt.

2.3.3 Gesamtfahrzeugprüfstände

Gesamtfahrzeugprüfstände werden hauptsächlich am Anfang und am Ende einer Entwicklungsaufgabe eingesetzt. Diese meist komplexen Anlagen bieten die Integration des kompletten Fahrzeuges und ermöglichen damit die Betrachtung der vollständigen Wirkkette im Fahrzeug. Durch die hohe Komplexität ist der Betrieb dieser Prüfstände zeitaufwendig und teuer. Der Begründung dafür liegt in der komplizierten Regelung der Prüfstände, im Umfang an Anforderungen hinsichtlich Konditionierung des Prüflings und in der Integration des Prüfstandes in eine bauliche Hülle.

Analog zu den Achsprüfständen aus Kap. 2.3.2 kann auch hier die Unterscheidung in Prüfstände mit und ohne Reifen-Fahrbahnkontakt vorgenommen werden.

Eine Zwischenposition nehmen **Stempelprüfstände** mit Reifenkontakt ein. Abb. 2.19 zeigt einen DYNAMIC CHASSIS SIMULATOR, der durch RESCH ET AL. ([13]) und MAST ET AL. ([11]) näher beschreiben wird. Mit dieser speziellen Form eines Achskinematik-Prüfstands kön-



nen als Vier- oder Zweitempelanlage neben Untersuchungen zur statischen Kinematik und Elastokinematik auch dynamische Untersuchungen bis 30 Hertz durchgeführt werden. Eine komplexe Kraft- und Lageregelung erlaubt die Bewegung der Radplattformen in drei Translationen und einer Rotation um die Hochachse. Zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens wird ein optisches dreidimensionales Bewegungsmesssystem eingesetzt. Weitere anwendungsbezogenen Erkenntnisse stellen KATSUTOSHI ET AL. ([8]) vor.



Technische Daten (Auszug):

Translatorische Aktuatoren

Kraft (max.) X:	4 kN
Weg (p-p) X:	0,1 m
Kraft (max.) Y:	4 kN
Weg (p-p) Y:	0,1 m
Kraft (max.) Z:	15 kN
Weg (p-p) Z:	0,1 m

Rotatorische Aktuatoren

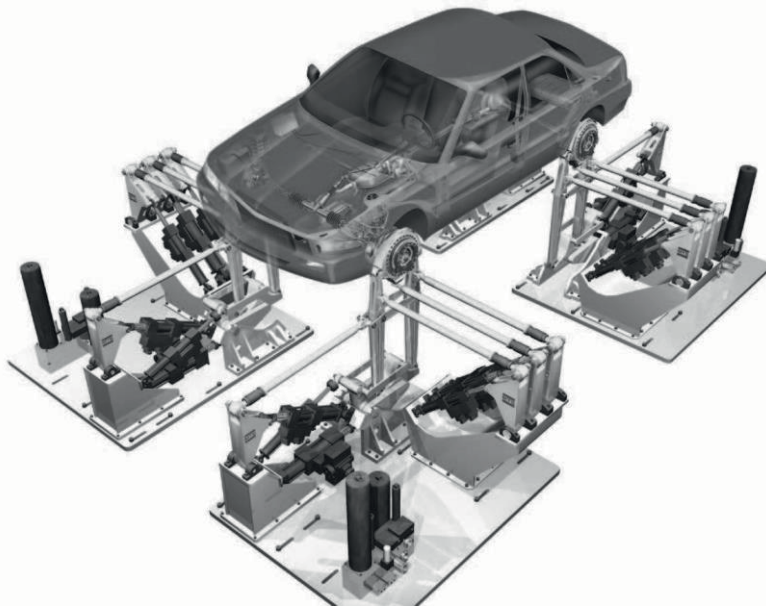
Moment (max.) Lenken:	200 Nm
Winkel (max.) Lenken:	$\pm 5^\circ$

Frequenzbereich Regelung

Kraft und Weg (max.):	30 Hz
-----------------------	-------

Abb. 2.19 Dynamic Chassis Simulator an der TU-Dresden

Eine weitere Hauptgruppe der Gesamtfahrzeugprüfstände stellen die **radnabengebundenen Straßensimulatoren** dar. Mit dieser Art von Prüfständen werden ebenfalls statische und dynamische Charakterisierungsuntersuchungen durchgeführt. Die Krafteinleitung in den Prüfling erfolgt hier direkt an der Radnabe. Der Verzicht auf den Reifen in der Untersuchungskette reduziert zunächst den regelungstechnischen Aufwand und ermöglicht gleichzeitig die Erweiterung des Bewegungsspektrums um zwei weitere Freiheitsgrade pro Radnabe. In Abb. 2.20 ist ein solcher radnabengebundener Straßensimulator der Firma MTS dargestellt.



Technische Daten (Auszug):

Translatorische Aktuatoren

Kraft (max.) X:	20 kN
Weg (p-p) X:	0,39 m
Kraft (max.) Y:	22 kN
Weg (p-p) Y:	0,26 m
Kraft (max.) Z:	63 kN
Weg (p-p) Z:	0,38 m

Rotatorische Aktuatoren

Moment (max.) Lenken:	6,9 kNm
Winkel (max.) Lenken:	$\pm 16^\circ$
Moment (max.) Lenken:	4,0 kNm
Winkel (max.) Lenken:	$\pm 32^\circ$
Moment (max.) Lenken:	9,6 kNm
Winkel (max.) Lenken:	$\pm 16^\circ$
Prüffrequenz (max.):	50 Hz

Abb. 2.20 Radnabengebundener Gesamtfahrzeug-Straßensimulator MTS 329 ([20])

Die **Prüfstände mit Reifen-Fahrbahnkontakt** werden in Rollen-, Trommel- oder Flachbahnbauweise ausgeführt. Sie werden für Betriebsmessung, das heißt am fahrfertigen Gesamtfahrzeug genutzt. Es wird hier zwischen Prüfständen zur Leistungs- oder Abgasemissionsmessung und zur Charakterisierung schwingungstechnischer Fahrzeugeigenschaften unterschieden. Der wesentliche Unterschied besteht vorrangig in der Regelbarkeit der Rollendrehzahlen und dem Lastwiderstand, welcher das Fahrmanöver abbildet. Leistungs- und Abgasprüfstände verfügen meist über kleinere Rollen und Abtriebsmaschinen, die vorrangig für den generatorischen Betrieb konzipiert sind. Die Regelung ist auf einen quasistationären Betrieb ausgelegt. Außerdem verfügen diese Prüfstände über umfangreiche technische Anlagen zur Abgasmessung und Prüflingskonditionierung. Die bauliche Dimensionierung dieser Peripheranlagen zur Versorgung des Prüfstandes erfolgt für einen Dauerbetrieb des Prüflings auch unter Vollast. Im Gegensatz dazu werden Prüfstände zur Charakterisierung von schwingungstechnischen Fahrzeugeigenschaften nicht für längere Messzyklen ausgelegt. Dafür erhalten diese Prüfstände eine aufwendige Regelung der Rollenantriebe. Die Elektromaschinen arbeiten hier im Vier-Quadranten-Betrieb und müssen in der Lage sein, Drehschwingungen zu simulieren. Zudem kommen bei dieser Art von Prüfständen entweder Außentrommeln mit einem Durchmesser größer als 1,8 m, auf denen auch eine synthetische Oberflächenstruktur realisiert werden kann, oder Flachbahnmodule zum Einsatz. Für diese Prüfstände entstehen besondere Anforderungen hinsichtlich Schwingisolation. Außerdem ist hier ein besonderes Leistungsmanagement



erforderlich, um aufgrund der dynamischen Anforderungen kurzzeitig sehr hohe Leistungen bereitzustellen. In Abb. 2.21 ist ein Fahrzeugrollenprüfstand mit Semifreifeldraum dargestellt.



Technische Daten (Auszug):

Vorderachse/ Hinterachse

Antriebsleistung (max.):	300 kW
Geschwindigkeit (max.):	300 km/h
Zugkraft (max.):	18 kN

Rollen

Laufrollendurchmesser:	1,91 m
Laufrollenbreite:	0,7 m
Radstand:	2,3-3,5 m

Akustik

Schalpegelgrenzwert bei 50 km/h:	42 dB(A)
-------------------------------------	----------

Abb. 2.21 Fahrzeugrollenprüfstand mit Semifreifeldraum ([93], [26])



3 Theoretische Vorbetrachtungen

Im folgenden Kapitel werden ausgewählte Grundlagen beschrieben, welche als Randbedingungen, methodische Ansätze und bestehende Lösungswege für die Bearbeitung der eigentlichen Aufgabe – der Entwicklung eines fahrzeugtechnischen Versuchszentrums – herangezogen wurden. Bereits in Kap. 2.1 wurde ein Abriss über einen Produktentstehungsprozess am Beispiel der Fahrzeugentwicklung gegeben. Dieses Beispiel wurde gewählt, weil das Fahrzeug so wie ein Versuchsfeld ein technisch hoch komplexes, interdisziplinär zu gestaltendes Produkt ist und dessen Fahrzeugentwicklungsprozess Grundlage und Bindeglied für die zukünftige Verwendung des Versuchsfeldes ist. Im fahrzeugtechnischen Versuchszentrum sollen später Methoden und Werkzeuge für den PEP entwickelt werden. Beide Produktentstehungsprozesse greifen somit ineinander. (Vgl. Kap. 1.2) Für eine zielgerichtete Definition der Anforderungen an das zu entwickelnde Versuchsfeld ist die Kenntnis zum Ablauf des Fahrzeugentwicklungsprozesses also unentbehrlich. Die Anforderungen leiten sich direkt aus den im Fahrzeugentwicklungsprozess heute angewendeten und zukünftig zu integrierenden Methoden ab. Sie definieren Schnittstellen und sämtliche Randbedingungen für die Integration eines Versuchsfeldes in den Fahrzeugentwicklungsprozess.

Beide PEP werden also einen ähnlichen Ablauf haben. Ein sehr wesentlicher Unterschied beim Vergleich der beiden Entwicklungsprozesse existiert dennoch. Ist der Fahrzeugentwicklungsprozess heute noch von physischen Prototypen in verschiedenen Phasen der Entwicklung geprägt, so sind virtuellen Prototypen für Versuchsfelder von jeher Stand der Technik. Reale Prototypen sind in der Praxis der Gebäudeentwicklung unüblich und darüber hinaus sowohl technisch als auch finanziell nicht zu realisieren. Dies ist durch angestrebte Produktionsstückzahl begründet. Werden Prüfstände oder Versuchsfelder nur einmal bis wenige Male gebaut, so werden Automobile einer Baureihe in der Regel millionenfach hergestellt.

Für die Gestaltung des PEP stehen in der Literatur verschiedene Verfahrensmodelle zur Verfügung. Im Kap. 3.1 werden diese kurz vorgestellt. Im Anschluss daran werden einige virtuelle Methoden in der Kraftfahrzeugentwicklung aufgezeigt und die grundlegende Vorgehensweise bei der modellbasierten Produktentwicklung erläutert.



3.1 Methoden im Entwicklungsprozess

Die Entwicklung komplexer Systeme ist für den Menschen eine erhebliche Herausforderung und setzt ein besonderes Maß an Struktur und Stringenz voraus. Gleichzeitig ist jedoch für das Erkennen neuer Lösungen ein hohes Maß an Kreativität erforderlich. Mit dem Auftrag zur Entwicklung eines Systems muss zuerst eine grobe Vorstellung der Systemgestalt entwickelt werden. Die Systemgestalt bildet gemeinsam mit weiteren Einflussfaktoren die Grundlage für die Planung des Entwicklungsprozesses. HABERFELLNER ET AL. ([42]) beschreiben dazu verschiedene Hilfsmittel, mit denen die Darstellung der Systemgestalt erleichtert wird. Diese werden in Abwandlung auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung finden und nachfolgend kurz vorgestellt. In der Literatur sind für die Gestaltung des Entwicklungsprozesses Verfahrensmodelle zu finden, die helfen sollen, eine für die Projektsteuerung beherrschbare Struktur des Gesamtablaufes zu entwickeln und gleichzeitig genügend Freiraum für Kreativität zu lassen. Für die Entscheidung bei der Wahl der Vorgehensweise, die letztlich zu einem spezifischen Verfahrensmodell führt, sind die äußeren Umstände des Entwicklungsprojektes ausschlaggebend, die in Einflussfaktoren kategorisiert werden.

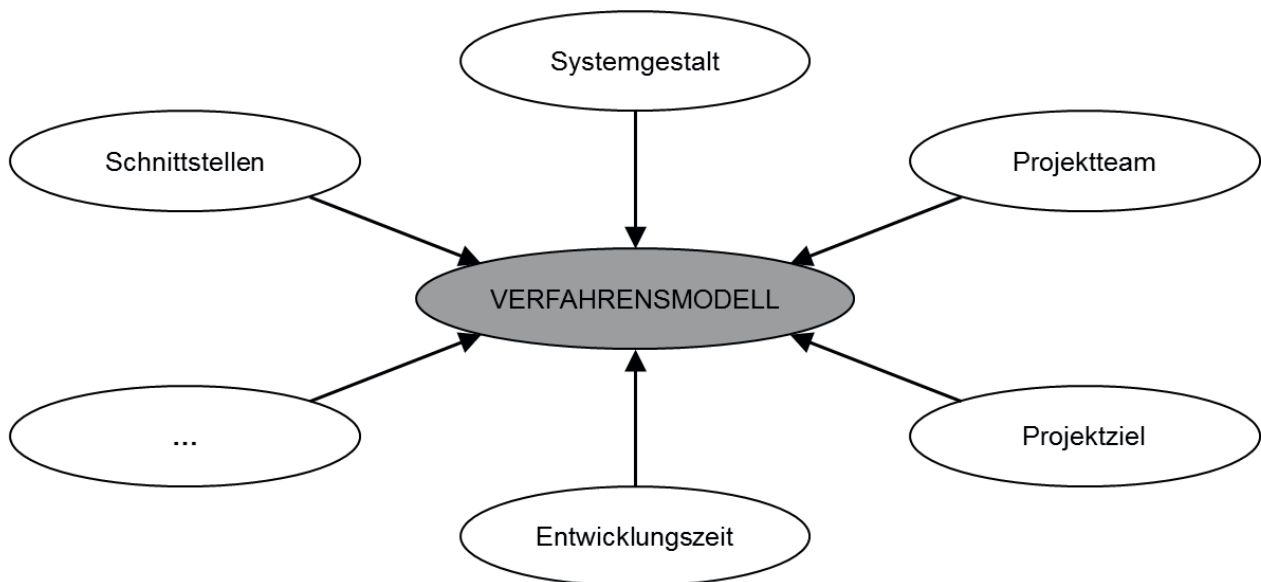


Abb. 3.1 Einflussfaktoren bei der Wahl des Verfahrensmodells

In Abb. 3.1 ist eine Auswahl an Einflussfaktoren aufgeführt, die bei der Wahl des Verfahrensmodells beachtet werden müssen. Nicht für jedes Produkt ist die Aufstellung eines



umfangreichen Verfahrensmodells angemessen. Im systematischen Entwickeln und Konstruieren wurden in der Vergangenheit zahlreiche Hilfsmittel zur Strukturierung und zur Steigerung der kreativen Lösungsfindung erarbeitet. Die hier verwendeten Ansätze für Verfahrensmodelle werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt. Eine Auswahl weiterer Methoden kann den Werken von PAHL/BEITZ ([58]), CONRAD ([32]), KLEEDORFER ([54]) und EVERSHEIM ([33], [38]) entnommen werden.

3.1.1 Problemlösungszyklus nach Hall/BWI

Der Problemlösungszyklus (PLZ) nach Hall/BWI ([42]) ist ein Verfahrensmodell und wesentlicher Bestandteil des Systems Engineering Ansatzes nach Hall/BWI. Der Ansatz des Systems Engineering verfolgt ein systematisches Vorgehen zur Lösung komplexer Problemstellungen und geht auf HALL ([43]) zurück. Die Weiterentwicklung zu einem geschlossenen Problemlösungsprozess erfolgte hauptsächlich am Betriebswissenschaftlichen Institut (BWI) der ETH Zürich. Die wesentlichen Elemente sind im linken Teil von Abb. 3.2 dargestellt.

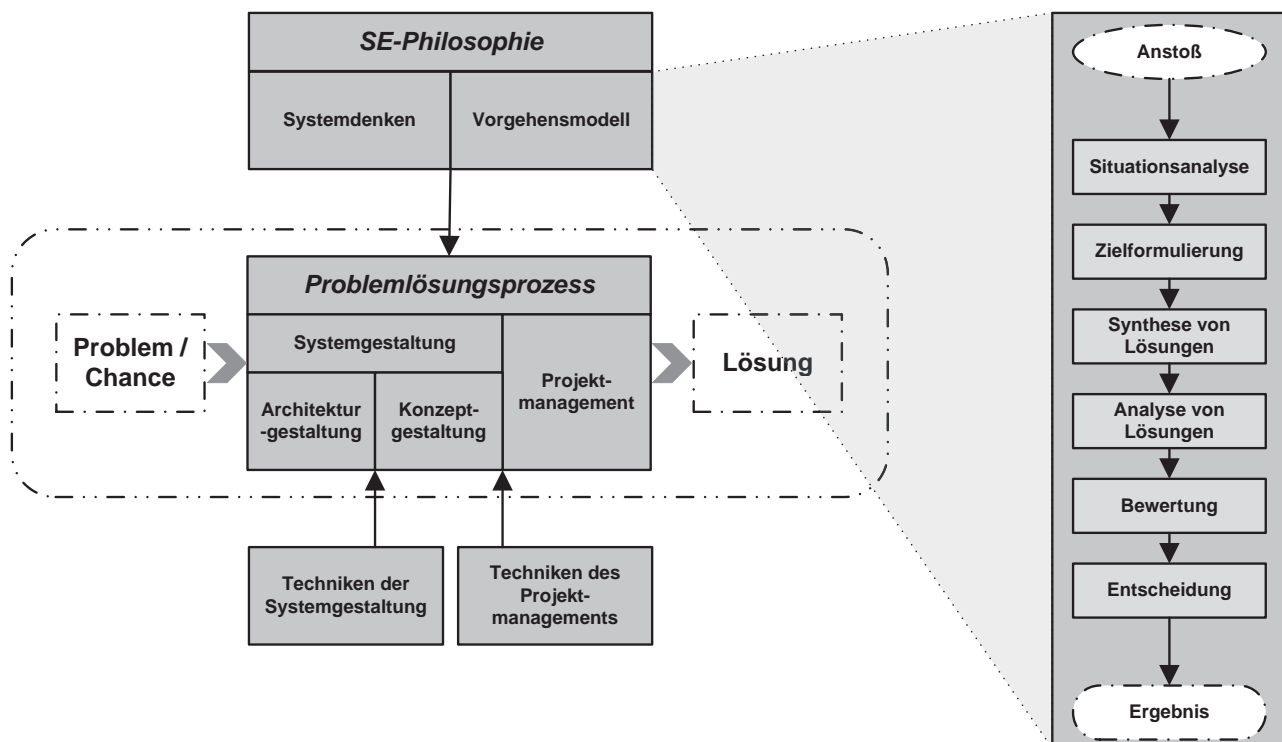


Abb. 3.2 Systems Engineering Konzept nach HABERFELLNER ET AL. [42]

Die Intention dieser Methode ist es, die Problemstellung zunächst zu analysieren und in Teilprobleme zu untergliedern, um später mittels verschiedener Techniken eine objektiv



bewertbare Lösung herbeizuführen. Dazu wird das System, auf welches sich die Problemstellung bezieht, auf seine Bestandteile und deren Beziehungen hin untersucht und eine Systemdarstellung abgeleitet. Der Problemlösungszyklus bietet als Verfahrensmodell einzelne Prozessschritte, die in ihrer Abfolge eine gut nachvollziehbare, objektive Lösungsfindung gewährleisten. Für jeden der auf der rechten Seite der Abb. 3.2 dargestellten Prozessschritte sind individuelle Methoden vorhanden. Mit diesen ist auch die Handhabung komplexer Systeme mit Aufgabenstellungen möglich, welche eine Vielzahl verschiedener Anforderungen enthalten.

3.1.2 V-Modell

Ein weiteres Verfahrensmodell ist das V-Modell in Abb. 3.3. Es unterteilt den PEP in die Konzeptauslegung im linken Ast und die funktionale Absicherung im rechten Ast. BRAESS und SEIFFERT ([73]) beschreiben die Anwendung auf die Fahrzeugentwicklung. Das Vorgehen beginnt hier mit dem Anforderungsprozess als Top-Down-Ansatz im oberen linken Teil ausgehend vom Kundenwunsch bzw. der Marktposition. Mit der sukzessiven Dekomposition der Gesamtfahrzeugziele werden technische Spezifikationen auf Subsystemebene und letztlich auf die Komponentenebene heruntergebrochen.

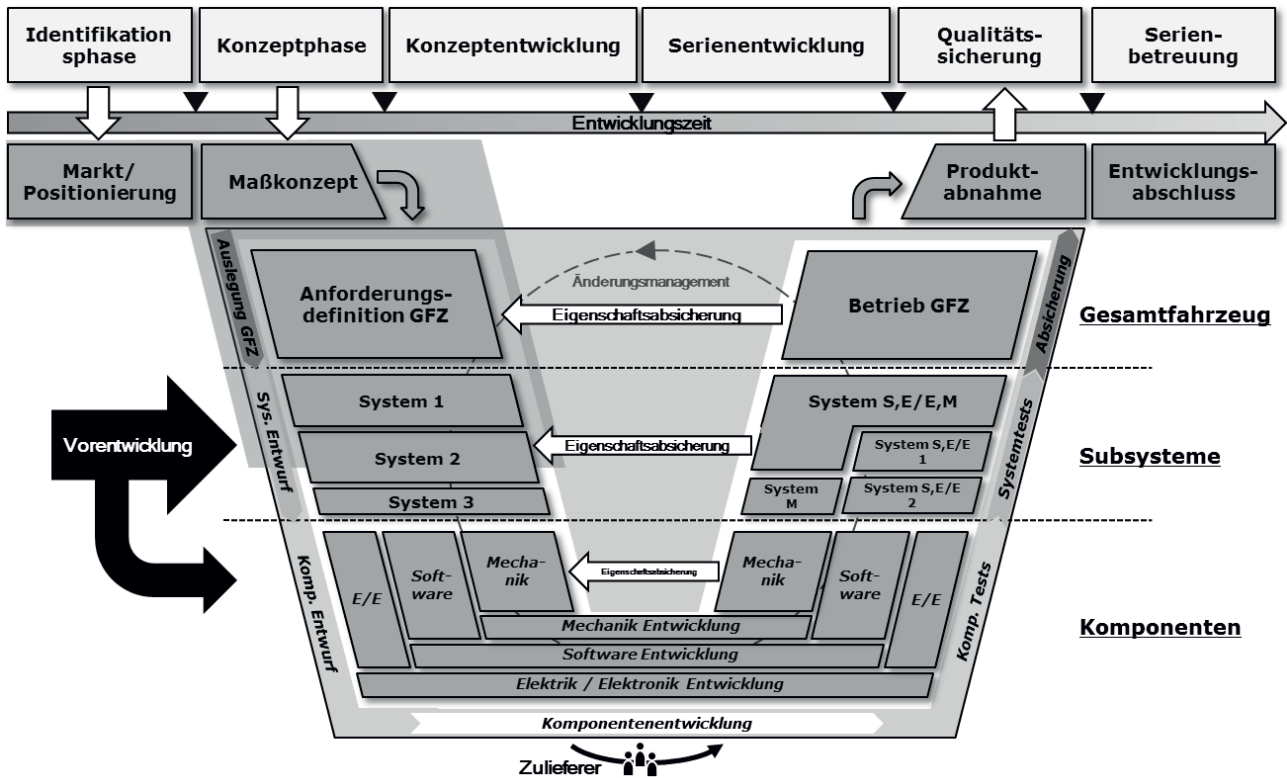


Abb. 3.3 Das V-Modell in der Fahrzeugentwicklung nach [84]

Die auf Gesamtfahrzeugebene definierten Anforderungen an das Produkt werden unter Anwendung verschiedener Entwicklungswerkzeuge soweit präzisiert, dass sich daraus konkrete Zielgrößen für die Komponentenentwicklung bestimmen lassen. Für diesen Entwicklungsschritt, der zu großen Teilen der Gewinnung detaillierter Anforderungen dient, existiert heute noch keine durchgängige, systemische Vorgehensweise bestehend aus Methoden und Werkzeugen. Weitere wesentliche Ergebnisse dieser Phase sind konkrete Lösungsansätze in meist unterschiedlicher Ausprägung für die technische Umsetzung der gesetzten Anforderungen. Fehlende methodische Werkzeuge zur Zielgrößenableitung und Konzeptfindung müssen heute noch immer durch Zuhilfenahme von Vorgängerprodukten kompensiert werden. Dies schränkt jedoch den Blick auf die Vielfältigkeit an möglichen Lösungskonzepten ein. Eine wichtige Rolle übernimmt hier die bereits erwähnte Vorentwicklung. Sie liefert in dieser Phase neue, produktneutrale Ansätze und Technologien meist auf Subsystem- und Komponentenebene. Ebenfalls in der Konzeptphase werden die später abzusichernden Funktionen auf Subsystem- und Gesamtfahrzeugebene festgelegt.



Verallgemeinert formuliert, werden auf diesem Weg vom Groben ins Feine die Gesamtsystemanforderungen iterativ bis auf die Anforderungen an die kleinsten Elemente abgeleitet (Target Cascading). Bei dieser Abwärtsiteration muss die Realisierbarkeit der abgeleiteten Anforderungen geprüft werden. Es werden Gütekriterien zur Bewertung der späteren Zielerreichung definiert.

Sind die Zielgrößen bis auf Komponentenebene definiert und stehen geeignete neue Technologien zur Verfügung, kann die Komponentenentwicklung erfolgen. Die Bereitstellung vieler Komponenten eines Kraftfahrzeuges übernehmen heute Unternehmen, welche sich auf einen Technologiezweig spezialisiert haben und über das zur Herstellung erforderliche Wissen und die Werkzeuge verfügen. Im Fahrzeugentwicklungsprozess werden diese Unternehmen als Zulieferer bezeichnet. Es wird hier noch zwischen KomponentenhHersteller und Systemlieferant unterschieden. Diese Unterscheidung ist maßgebend für den Zeitpunkt im V-Modell, an dem das Unternehmen einbezogen wird. Zulieferer setzen selbst interne Entwicklungsprozesse in Gang. Diese müssen in ihrem Ablauf in den Hauptentwicklungsprozess beim Fahrzeughersteller integriert werden. Gelingt dies, bildet es die Grundlage für eine erfolgreiche Parallelisierung von Entwicklungsaufgaben unternehmensübergreifend (vgl. Kap. 2.1.3).

Im rechten Ast des V-Modells wird ein Bottom-Up-Ansatz für die Integration der vorher entwickelten Komponenten in Subsysteme und schlussendlich zum Gesamtsystem verfolgt. Diese Aufwärtsiteration erfolgt auf Basis der in Eigenschaftskatalogen zusammengefassten Gütekriterien. In Absicherungsschleifen durchlaufen die Komponenten dann Testfälle, in denen die Eigenschaften vor der Integration in das Subsystem verifiziert werden. Wird der Test erfolgreich durchlaufen, kann eine Integration in die nächsthöhere Systemhierarchieebene erfolgen. Ist die Verifikation im Testfall nicht erfolgreich, d.h. es wurden Anforderungen nicht erfüllt, führt dies zur Überarbeitung der spezifischen Anforderung. Durch das Änderungsmanagement muss die erforderliche Änderung dann hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen auf andere System-, Subsystem- oder Komponenteneigenschaften überprüft werden und in die Abwärtsiteration, d.h. den linken Ast des V-Modells eingestellt werden. Als weiterführende Literatur zum Änderungsmanagement sei hier auf [53] verwiesen.

Die aktuelle Erweiterung des V-Modells ist mit Zwischenschritten das V-Modell-XT ([39]). Die Endung XT steht dabei für eXtreme Tailoring und soll die deutlich verbesserte Anpas-



sungsfähigkeit des V-Modells-XT an die Größe, Struktur und Veränderlichkeit des Projektes symbolisieren. Dieses Vorgehen kommt vordergründig in der Softwareentwicklung zum Einsatz. Dort ist es bereits in IT-Entwicklungsprojekten des Bundes verbindlicher Standard.

3.1.3 Bewertungsmethoden

Im Produktentwicklungsprozess ist der Einsatz von Bewertungsmethoden immer dann erforderlich, wenn die faktischen Grundlagen für eine Entscheidung nicht mit analytischen oder numerischen Ansätzen geschaffen werden können. Dies tritt immer dann auf, wenn entweder der Informationsstand nicht ausreicht, um die zu erwartende Situation ausreichend genau zu beschreiben oder aufgrund hoher Subjektivität in den zugrunde gelegten Zielen eine Formulierung nicht möglich ist. Mit den hier vorgestellten Bewertungsverfahren wird der Ansatz verfolgt, die Subjektivität bei Entscheidungen zu reduzieren. Dazu werden die Entscheidungsoptionen detailliert und aus verschiedenen auch nicht funktionalen Perspektiven betrachtet. Die Detaillierung der Option oder Lösungsvariante erlaubt eine stärkere Differenzierung zwischen einzelnen Vor- und Nachteilen der Optionen. Außerdem werden Bewertungsverfahren auch zur Erkennung von Zielkonflikten eingesetzt.

Binärer Variantenvergleich

Mit dem binären Variantenvergleich werden immer jeweils zwei Lösungsvarianten direkt miteinander verglichen und die Dominanz der Variante erfasst. Für die Beurteilung wird nur binär entschieden. Aus der spaltenweisen Summation in der Dominanzmatrix (vgl. Abb. 3.4 a)) ergibt sich der Rang der Varianten.

Zielrelationen

Die Zielrelationen-Matrix (vgl. Abb. 3.4 b)) nach [42] erlaubt einen direkten Vergleich von je zwei Optionen oder Anforderungen. Mit einer dreieckförmigen Matrix wird die Beziehung paarweise ermittelt.

Technisch-Wirtschaftliche Bewertung / Nutzwertanalyse

Mit der Technisch-Wirtschaftlichen Bewertung wird ein methodisches Vorgehen zur Bewertung technischer Produkte nach Kriterien der Technik und Wirtschaftlichkeit in verschiedenen Reifestadien bereitgestellt. Das Vorgehen ist damit Bestandteil der Richtlinie VDI2225 (vgl. [185]). Die Anwendung dieser Vorgehensweise eignet sich besonders bei



technischen Entwicklungen mit hohem zu erwartenden Kosteneinsatz. Hier kann sie auf das Gesamtprodukt – zum Beispiel einen Prüfstand – ebenso angewendet werden wie auf Subsysteme und Komponenten eines solchen. Das s-Diagramm mit Entwicklungslinie (vgl. Abb. 3.4 c)) ermöglicht eine einfache Darstellung der Entwicklungsschritte in Bezug auf die technische und wirtschaftliche Wertigkeit. Zur Erstellung wird das Produkt nach 10 bis 15 technischen Kriterien in einer Punkteskala bewertet. Der Quotient aus erreichter und maximal möglicher Punktzahl ergibt die technische Wertigkeit, die im Bereich $0,6 < x \leq 1,0$ für ein leistungsfähiges Produkt liegen soll. In die wirtschaftliche Wertigkeit gehen die Herstellkosten, der Marktpreis und ein Zuschlagfaktor ein. Diese soll im Bereich $0,7 < y \leq 1,0$ liegen.

Bewertungsverfahren für komplexe Systemlösungen nach vielschichtigen Kriterien

Die Bewertung bestehender komplexer Systeme als Lösungsvarianten für technische Fragestellungen stellt den Ingenieur vor besondere Herausforderungen, welche meist nur mit einem hohen Maß an Erfahrung zu bewältigen sind. Dies impliziert jedoch den Nachteil, dass Entscheidungen auf Basis subjektiver Wahrnehmungen und Erfahrungen getroffen werden müssen und so für Dritte schlecht nachvollziehbar bleiben. In [31] wird eine Methode vorgestellt, mit der es gelingt, komplexe Systeme in Basisfunktionen zu zerlegen und damit die Objektivität bei der Bewertung zu erhöhen. Zusätzlich können verschiedene Wichtungsfaktoren eingeführt werden. Ein Schema der Bewertungsmatrix für dieses Verfahren ist in Abb. 3.4 d dargestellt.



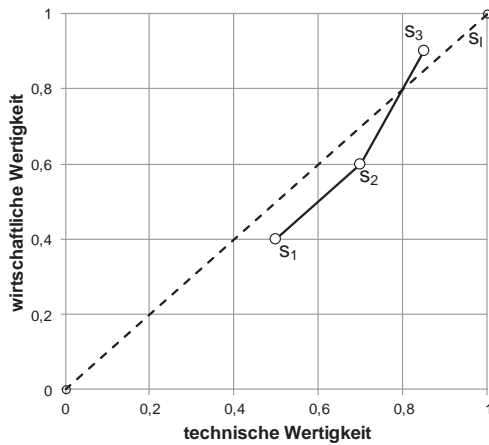
	Variante 1	Variante 2	...	Variante n
Variante 1	-	1	1	1
Variante 2	0	-	0	0
...	0	1	-	0
Variante n	0	1	1	-
Summe	0	3	2	1
Rang	4	1	2	3

a) Dominanzmatrix

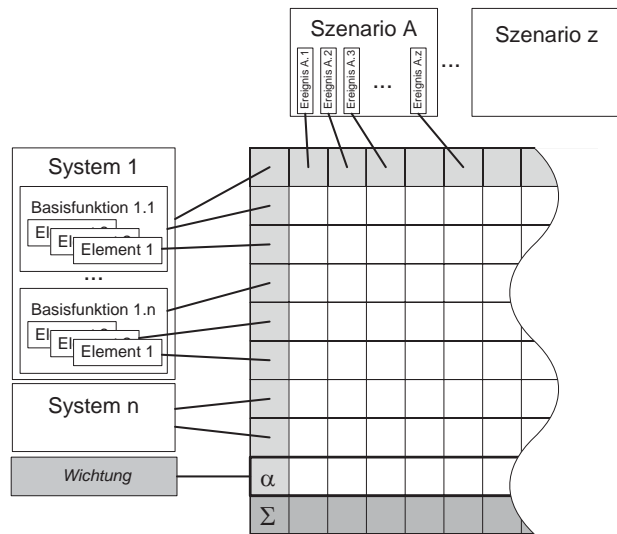
Anforderung A	w	u	i	i	u	i
Anforderung B	i	u	i	u	u	i
Anforderung C	i	?	u	u	u	i
Anforderung D	i	?	i	i	u	i
...	?	w	i	i	u	i
Anforderung n	?					

b) Zielrelationsmatrix

i ... indifferent
u ... unterstützend
w ... widersprüchlich
? ... unklare Recherche



c) s-Diagramm mit Entwicklungslinie



d) Bewertungsmatrix für komplexe Systemlösungen

Abb. 3.4 Bewertungsmethoden (Auswahl) nach [42], [58], [31] und [185]

Eine ausführliche Darstellung von Methoden zur Beurteilung von Varianten liefert MÜLLER-HERBERS ([55]).

3.2 Virtuelle Methoden

3.2.1 Einsatz der numerischen Simulation

Der Einsatz virtueller Methoden im Produktentstehungsprozess erlaubt die Verkürzung der Entwicklungszeit. Durch den gezielten Einsatz numerischer Berechnungsverfahren, die im weiteren Verlauf noch näher spezifiziert werden, kann zudem die Ergebnisqualität im Ver-



gleich zu einer rein analytisch-experimentellen Entwicklung deutlich gesteigert werden. Die Bedeutung der numerischen Simulation in der Automobilentwicklung ist [71], [90], [76], [77], [78] und [88] umfänglich dargelegt.

Auch in der hier vorliegenden Forschungsfrage ist die richtige Wahl der Werkzeuge eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendbarkeit der vorgestellten Systematik zur Entwicklung eines Versuchsfeldes.

Die numerische Simulation verwendet Modelle, deren Gestalt hinsichtlich Detaillierung und Parametrierung vom vorgesehenen Einsatzzweck des Modells abhängen. Modelle sind daher stets ein unvollkommenes Abbild eines realen physikalischen Systems.

Zitat: *“It does require maturity to realize that models are to be used but not to be believed.”*
(HENRI THIEL in [139])

Das breite Spektrum an physikalischen Fragestellungen bei der Konzeption eines Versuchsfeldes erfordert den Einsatz von Simulationswerkzeugen aus unterschiedlichen Simulationsbereichen. Stellvertretend werden in Tab. 3.1 drei wesentliche Bereiche benannt, in denen die numerische Simulation eine erhebliche Bedeutung hat.

Simulationsbereich	Werkzeugart	Programme/Software
Geometrische Konstruktion	CAD (Computer Aided Design)	Pro Engineer [®] , Catia [®] , Solid Works [®]
Mechanische Berechnung	MKS (Mehrkörpersystem); FEM (Finite Elemente Methode)	ADAMS [®] , Simpack [®] , SimulationX [®] ; ANSYS [®] , FALT-FEM [®] , NASTRAN [®]
Energetische Berechnung	MDS (Multi-Domain-Simulation)	Matlab/Simulink [®] , SimulationX [®]

Tab. 3.1 Übersicht zu Berechnungs- und Konstruktionswerkzeugen (CAE-Werkzeuge)

Für die Bearbeitung der hier beschriebenen Entwicklungsaufgaben kommen meist Werkzeuge mehrerer Simulationsbereiche zum Einsatz. Dazu werden diese Werkzeuge sowohl iterativ in Entwicklungsschleifen als auch in gekoppelter Simulation verwendet. Am Beispiel der mechanischen Berechnung soll die Bedeutung der Wahl der Werkzeuge veranschaulicht werden.

Für die Wahl der eingesetzten Werkzeuge lassen sich nach [117] folgende Ziele hinsichtlich einer bevorstehenden Modellbildung formulieren.



- Hinreichend genaue Abbildung des Systems unter Beachtung der Fragestellung. (physikalische Wirkung, Frequenzbereich, Festigkeit, Verformung, etc.)
- Einfache Modellierung für angemessene Rechenzeiten

Zur Bestimmung der erforderlichen Modelltiefe und zum Diskretisierungsgrad ist Erfahrung notwendig. Hier spielt die Art der Fragestellung, die mit dem Modell beantwortet werden, soll eine wichtige Rolle.

- Welche Aussagen zum Systemverhalten sollen beantwortet werden?
 - Frequenz und Amplitude der Fundamentbewegung
 - Übertragene Lasten an das Gebäude
 - Verformungen und Maßhaltigkeit
- Welche Genauigkeit sollen die Ergebnisse haben?
 - Geringe Genauigkeit für den Entwurf und die Abschätzung von Raum- und Massenverhältnissen
 - Hohe Genauigkeit für die Absicherung der Gebrauchstauglichkeit

Eine erste Abschätzung der erforderlichen Modelltiefe erfolgt anhand der laut Lastfall zu erwartenden Erregerfrequenzen. Für diskrete Systeme gilt nach DRESIG ([142]) dabei für starre Körper, welche in diesem Fall für die folgend benannten Elemente stehen:

Zitat: „Die Eigenfrequenz des Elementes soll größer sein als die größte in das System eingebrachte Erregerfrequenz.“ (DRESIG in [142])

Zur Berechnung stehen die in Tab. 3.1 aufgeführten Werkzeugarten zur Verfügung.

Da auch der Aufwand zur Parametrierung und numerischen Berechnung mit dem Diskretisierungsgrad im Modell steigt, ist vorher zu klären, wie detailliert die Modellbildung erfolgen soll. Oft reicht für die Konzeptphase schon ein sehr grobes Modell mit wenigen Freiheitsgraden. Weiterhin ist zu klären, ob sich die für die Modellbildung erforderlichen Parameter bestimmen lassen.

3.2.2 Modellbasierte Produktentwicklung

Die Entwicklung des Prüfstandes stellt eine erhebliche Investition dar. Der Einsatz komplexer und teurer Komponenten erzeugt damit einen hohen Erfolgsdruck im Entwicklungsprojekt. Bevor die Entscheidung zum Kauf der Komponenten getroffen werden kann, müssen alle Einflüsse der jeweils zu beschaffenden Komponente auf die Gesamtfunktionalität



des Prüfstandes bekannt sein. Dies betrifft besonders dynamische Eigenschaften, welche Einfluss auf die Regelbarkeit des Prüfstandes haben. Hinzu kommt, dass die Erstellung eines physikalischen Prototyps im Entwicklungsbudget meist nicht vorgesehen ist. Dennoch wird vom späteren Nutzer des Prüfstandes vorausgesetzt, dass der Prüfstand so hergestellt ist, dass er das Systemverhalten des Prüflings in der gewünschten Weise darstellt. Einflüsse durch systemimmanente Prüfstandeigenschaften wie Eigenschwingungen im Untersuchungsbereich müssen vermieden oder zumindest hinreichend bekannt sein. Diese Forderung impliziert ein hohes Maß an Systemverständnis bereits vor der eigentlichen Herstellung des Prüfstandes. Dieses Systemverständnis kann bei komplexen Systemen nicht mehr analytisch hergeleitet werden. Besonders im Bereich dynamischer Systemanforderungen wird dies deutlich. Das führt in konventionell gestalteten Entwicklungsprojekten dazu, dass Zielgrößen zur Dynamik der Anlage im Lastenheft nicht spezifiziert werden können. Die Methode der modellbasierten Produktentwicklung bietet zur Lösung dieses Problems eine gute Alternative. Durch den Aufbau einer modularen Modellstruktur am Anfang und die konsequente Modellpflege während des gesamten Entwicklungsprozesses lassen sich sukzessive die meisten Wechselwirkungen und Abhängigkeiten im und um das System herum berücksichtigen. Es entsteht damit ein Simulationsmodell des Versuchsfeldes oder des Prüfstandes, welches später im Betrieb für komplexe HiL-Anwendungen zwingend erforderlich ist. Der Ablauf der Methode ist in Abb. 3.5 schematisch dargestellt.

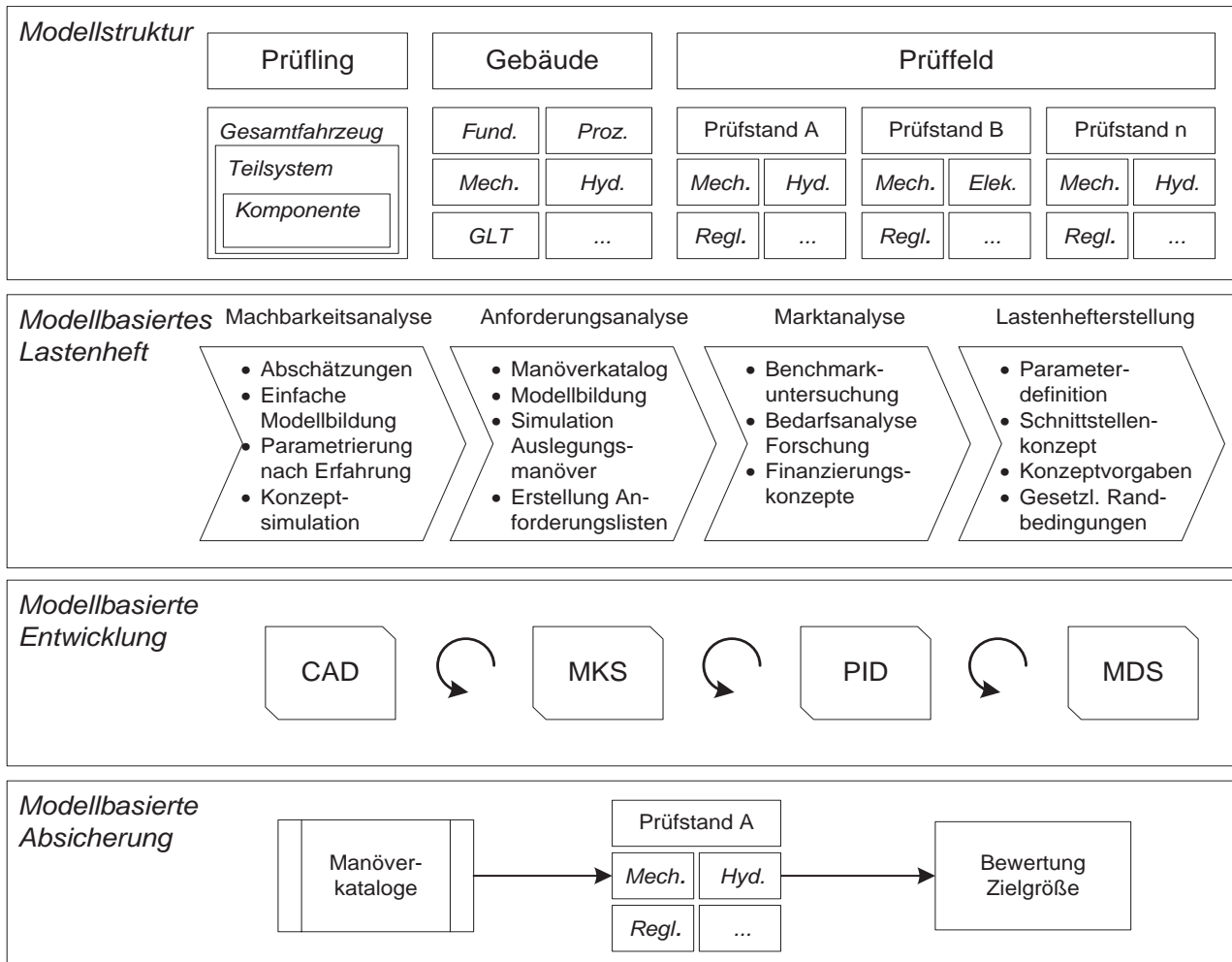


Abb. 3.5 Modellbasierte Produktentwicklung am Beispiel Prüfstand

Modellbasierte Entwicklungsprozesse sind heute bereits in einigen Technologiebereichen Stand der Technik. Eine Auswahl davon ist in [104] und [47] zu finden.

Weiterführende Literatur zu diesem Bereich: [63], [49].

3.3 Schwingungstechnik

Alle in dieser Arbeit betrachteten Eigenschaftsfelder der Krafftfahrzeugentwicklung haben einen direkten Bezug zu Schwingungen. Für die Auslegung eines Versuchsfeldes sind daher grundlegende Kenntnisse der Schwingungstechnik vorausgesetzt. Im folgenden Kapitel werden die beiden Themengebiete Schwingungsmessung und Schwingisolierung, welche für die schwingungstechnische Auslegung des Versuchsfeldes zur Anwendung kommen, genauer erläutert.



3.3.1 Schwingungsmessung

Mechanische Schwingungen lassen sich mit Hilfe von Kraft- und Bewegungsgrößen beschreiben. Die messtechnische Erfassung erfolgt mittels Beschleunigungsaufnehmern. Je nach Anwendungsfall wird in Abhängigkeit von der erforderlichen Genauigkeit, dem Messbereich oder der Anzahl der Messrichtungen, die gleichzeitig erfasst werden müssen, auf unterschiedliche Messprinzipien zurückgegriffen. Es kommen dabei kapazitive, induktive und piezoelektrische Verfahren zum Einsatz. Allen Messprinzipien gemein ist, dass sie nicht die Beschleunigung an sich, sondern die Relativbewegung einer Seismischen Masse, mechanisch gefesselt oder zwischen zwei Elektrodenplatten aufgehängt, relativ zu einem inertialen Gehäuse erfassen. Alle Verfahren nutzen somit das zweite Newton'sche Axiom gemäß Gl. 3.1

$$F = m \cdot a \qquad \text{Gl. 3.1}$$

für die Übersetzung einer Bewegung im Sinne der Mechanik in ein auswertbares elektrisches Signal. In [190] sind die Messprinzipien mit schematischem Aufbau der Sensoren dargestellt. Für die Ermittlung der Beschleunigung werden die Änderungen folgender elektrischer Größen zur Kalibrierung herangezogen:

- a) induktiv: die Beschleunigung wird kalibriert an der Spannungsänderung
- b) kapazitiv: die Beschleunigung wird kalibriert an der Kapazitätsänderung
- c) piezoelektrisch: die Beschleunigung wird kalibriert an der Ladungsänderung
- d) piezoresistiv: die Beschleunigung wird kalibriert an der Widerstandsänderung.

Als Sonderbauform sei noch die Gruppe der sogenannten Servo-Beschleunigungssensoren genannt. Bei diesem Prinzip wird ebenfalls eine seismische Masse verwendet, die zwischen zwei Elektroden aufgehängt wird. Jedoch wird der Lageänderung durch die Beaufschlagung der Elektrodenplatten entgegengewirkt. Die angelegte Spannung ist proportional zur Beschleunigung. Als weiterführende Literatur im Bereich der Schwingungsmessung wird auf [153] und [164] verwiesen.

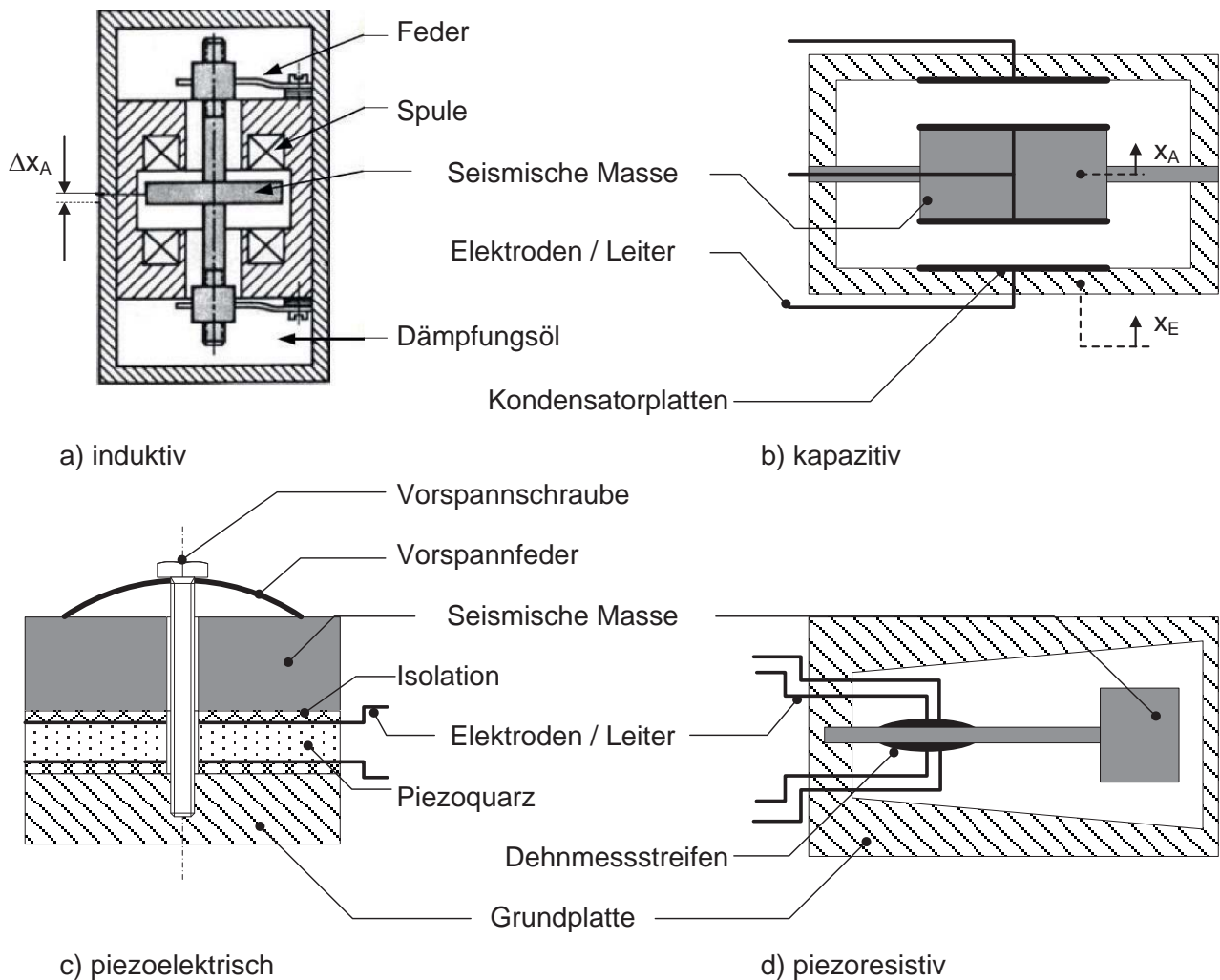


Abb. 3.6 Beschleunigungsaufnehmer nach [153]

Beschleunigungsaufnehmer sind demnach schwingungsfähige Systeme. Für die Auswahl bei einer messtechnischen Aufgabe muss das Übertragungsverhalten des Sensors berücksichtigt werden. Das mechanische Prinzip führt bei allen Messprinzipien auf den Einmassenschwinger zurück. Sensoren mit dem piezoelektrischen und piezoresistiven Prinzip (vgl. Abb. 3.6 (c) und (d)) sind heute am weitesten verbreitet. Bei diesen gilt, dass die Höhe der Wegamplitude der seismischen Masse proportional der Beschleunigungsamplitude am Sensorgehäuse ist. Für diese Sensoren gilt daher die Differenzialgleichung zweiter Ordnung:

$$\ddot{x}_A + \frac{b}{m} \cdot \dot{x}_A + \frac{c}{m} \cdot x_A = -\ddot{x}_E \quad \text{Gl. 3.2}$$



mit den Kenngrößen

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}; \quad \frac{b}{m} = 2 \cdot D \cdot \omega_0. \quad \text{Gl. 3.3}$$

Durch Einsetzen ergibt sich

$$\ddot{x}_A + 2D\omega_0\dot{x}_A + \omega_0^2 x_A = -\ddot{x}_E. \quad \text{Gl. 3.4}$$

Mit dem Frequenzverhältnis $\eta = \frac{\Omega}{\omega_0}$ ergibt sich, dass für $\eta \ll 1$ der dritte Term von Gl. 3.4 dominant wird und so dem Messprinzip $x_A \approx -x_E$ genügt. Diese Sensoren werden hoch abgestimmt eingesetzt.

Dabei sind:

b	....	Dämpfungskonstante
c	....	Federsteifigkeit der Fesselung
m	....	seismische Masse im Sensor
x_A	....	Weg der Seismischen Masse
x_E	....	Weg des Sensorgehäuses
ω_0	....	Eigenfrequenz des Systems
D	....	Dämpfungsgrad

3.3.2 Schwingungsisolierung

Als Schwingungsisolierung werden nach der Richtlinie VDI 2062-1 ([186]) Maßnahmen verstanden, bei denen mit dem Ziel, die Übertragung mechanischer Schwingungen zu verringern, Schwingungsisolierungselemente (vgl. [187]) entweder in Verbindung mit einer Zusatzmasse oder ohne ebendiese eingesetzt werden. Es kann grundsätzlich zwischen der Quellisolierung und der Empfängerisolierung unterschieden werden. Dabei ist speziell für die in dieser Arbeit verwendeten Ansätze für Blockfundamente der Einmassenschwinger die Grundlage der weiteren Ausführungen.

Quellisolierung ...

bezeichnet die Verringerung der Übertragung von Schwingungen in Form von Weg- oder Kraftgrößen von der Anlage (Quelle) an die Umgebung (Emission). Der Erregungsmecha-



nismus kann in diesem Fall eine Krafterregung sein. Diese wiederum kann zum Beispiel durch Unwuchten oder andere oszillierende Massen hervorgerufen werden. Bei harmonischer Krafterregung mit

$$F(t) = \hat{F} \sin(\Omega t) \quad \text{Gl. 3.5}$$

ergibt sich nach [33] die dynamische Fundamentkraft $F_F(t)$ auf dem Boden aus

$$F_F(t) = \hat{F} \sqrt{\frac{1 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \sin(\Omega t - \varphi). \quad \text{Gl. 3.6}$$

Dabei sind:

\hat{F} Amplitude der Krafterregung

φ Phasenwinkel

Diese kann als eines der Gütekriterien für die Bewertung der Schwingungsisolierung bei Quellisolierung herangezogen werden.

Empfängerisolierung ...

beschreibt Maßnahmen zur Abschirmung einer Anlage gegenüber Schwingungseinträgen von außen (Immission). Für die Modellvorstellung ist die reine Weg- oder auch Fußpunktanregung zu wählen. Mit der harmonischen Wegerregung

$$u(t) = \hat{u} \sin(\Omega t) \quad \text{Gl. 3.7}$$

ergibt sich nach [33] der Schwingweg $z(t)$ des Fundamentkörpers (seismische Masse) zu

$$z(t) = \hat{u} \sqrt{\frac{1 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \sin(\Omega t - \varphi). \quad \text{Gl. 3.8}$$

Dabei ist:

\hat{u} Amplitude der Wegerregung



Der Schwingweg kann als Gütekriterium für die Bewertung der Schwingungsisolierung bei Empfängerisolierung herangezogen werden.

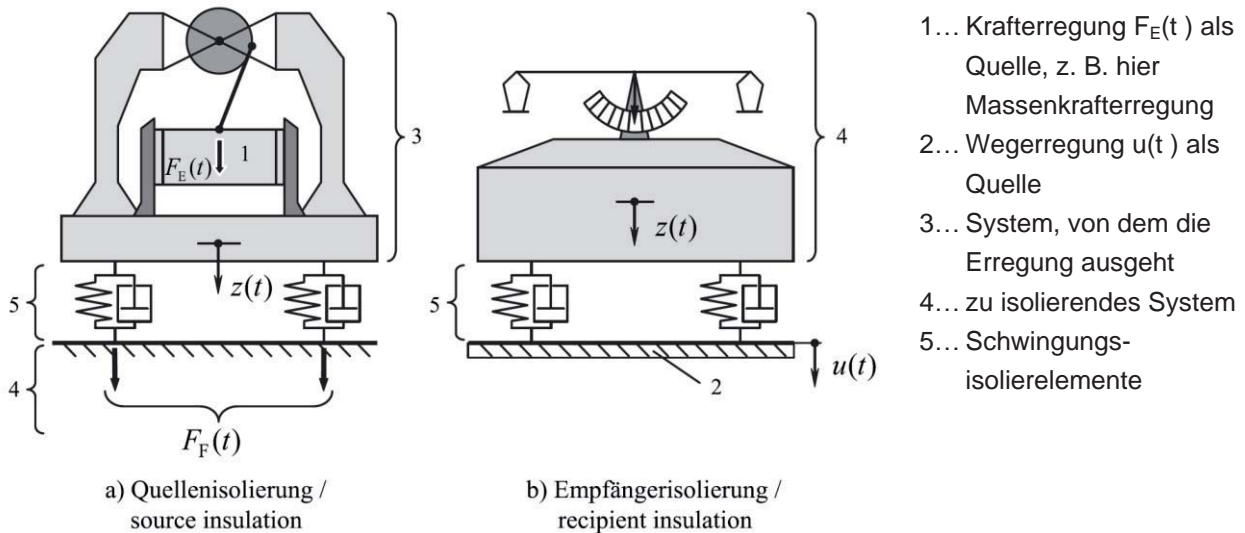


Abb. 3.7 Schemata Quellisolierung (a) und Empfängerisolierung (b) aus [186]

Die Abb. 3.7 zeigt die Erregungsmechanismen für die beiden hier vorgestellten Arten der Schwingisolierung. Für beide gilt die Vergrößerungsfunktion

$$V = \sqrt{\frac{1 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \quad \text{Gl. 3.9}$$

Die Darstellung der Vergrößerungsfunktion zeigt den Bereich der Isolierung, welcher für die in Gl. 3.6 und Gl. 3.8 aufgeführten Erregungsmechanismen bei einem Frequenzverhältnis $\eta = \frac{\Omega}{\omega_0} = \sqrt{2}$ beginnt. Der Einbezug der Dämpfung in Abb. 3.8 lässt deren Einfluss auf die Gestaltung der Schwingisolierung erkennen.

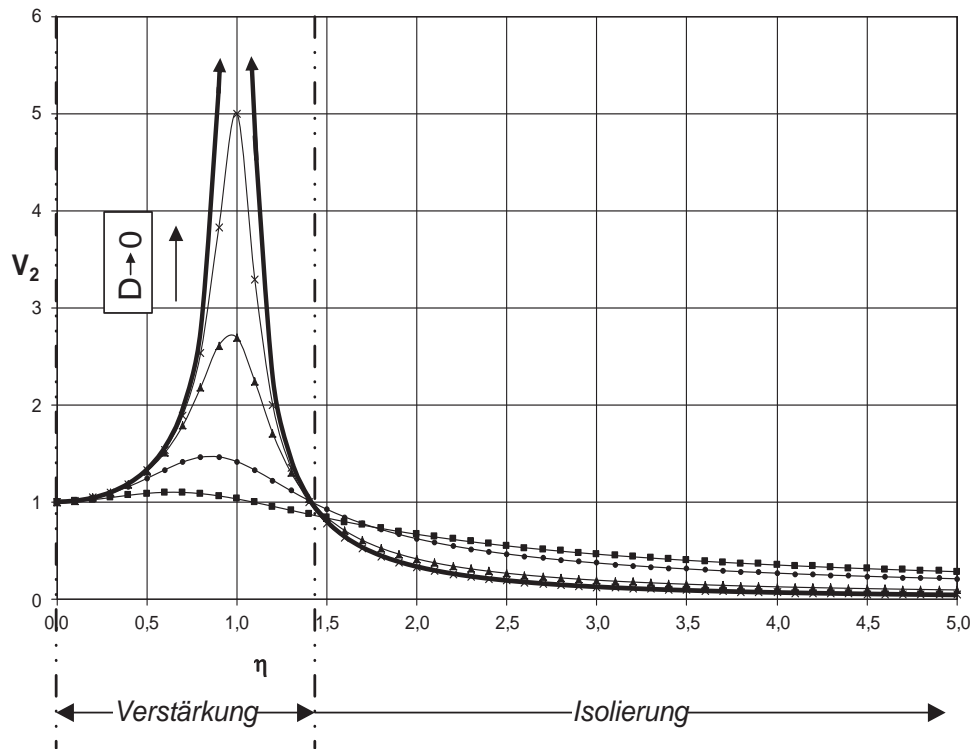


Abb. 3.8 Darstellung der Vergrößerungsfunktion für verschiedene Dämpfungen

Der Isolierungsgrad i beschreibt das Verhältnis von Erregergröße zu Antwortgröße. Bezogen auf die Erregung gibt er den prozentualen Wirkungsgrad der Isolierungsmaßnahme an.

Er berechnet sich nach [163] aus der Vergrößerungsfunktion in Gl. 3.9 zu

$$i = \left(1 - \sqrt{\frac{1 + 4D^2\eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}} \right) \cdot 100\%. \quad \text{Gl. 3.10}$$

Unter Vernachlässigung der Dämpfung D ergibt sich bei $\eta^2 \geq 2$ aus Gl. 3.10

$$i = \frac{\eta^2 - 2}{\eta^2 - 1} \cdot 100\%. \quad \text{Gl. 3.11}$$

Für die Auslegung der Schwingisolierung in Kap. 5.4 kann die Dämpfung jedoch nicht vernachlässigt werden. Aus Abb. 3.8 geht hervor, dass für hochabgestimmte Systeme die Ausgangsamplitude im Isolierungsbereich mit steigender Dämpfung zunimmt.



3.3.3 Modale Analyse

Mit Hilfe der Modalanalyse wird nach BEER ([140]) das räumliche und zeitliche Bewegungsverhalten von schwingungsfähigen Systemen untersucht. Dabei werden die für das jeweilige System charakteristischen Frequenzen und Moden, die Eigenfrequenzen und -moden ermittelt.

Schwingt das System in seinen Eigenfrequenzen, so stellen sich Moden ein, welche Eigenschwingformen genannt werden und bei diskreten Schwingern durch die Eigenvektoren des Systems beschrieben werden. Die Anzahl und Ausprägung der Eigenschwingformen werden unabhängig von jedweder Erregung nur von der spezifischen Struktur des Systems bestimmt. Freie Schwingungen ergeben sich bei beliebigen Anfangsbedingungen als Überlagerung aller Eigenschwingungsformen. Die Eigenschwingungsformen stellen das freie Schwingungsverhalten des Systems dar. Im späteren Verlauf der Arbeit werden neben Eigenschwingformen auch Betriebsschwingformen eine Rolle spielen. Dieses als erzwungene Schwingung bezeichnete Systemverhalten wird durch eine spezifische äußere Erregung hervorgerufen und ist sowohl vom Systemaufbau als auch von dem Ort und der Art, also der Erregerzeitfunktion abhängig. Liegt für das zu betrachtende System ein mechanisches, lineares Modell vor, so können Bewegungsgleichungen aufgestellt und die modalen Parameter mit Hilfe der Lösung eines Eigenwertproblems berechnet werden.

Bei einer experimentellen Modalanalyse werden diese Parameter rein experimentell ermittelt. Dazu wird das System in definierter Form angeregt und aus dem Verhältnis der Fouriertransformierten von Antwort und Erregung das Übertragungsverhalten bestimmt. Mit dem Satz von Übertragungsfunktionen, dessen Umfang vom betrachteten Systemfreiheitsgrad abhängig ist, wird anschließend eine Anpassungsrechnung – auch Curve Fitting genannt – durchgeführt und die modalen Parameter Eigenwert, Eigenvektor und modale Dämpfung bestimmt. Mit Hilfe der so ermittelten modalen Parameter ist die grafische Darstellung der Eigenschwingungsformen möglich.

Die Bewegungsgleichung kann durch Anwendung von Schwerpunkt- und Momentensatz mit einer Differentialgleichung zweiter Ordnung mit der Massenmatrix \underline{M} , der Dämpfungsmatrix \underline{K} und der Steifigkeitsmatrix \underline{C} beschrieben werden als

$$\underline{M}\ddot{\underline{q}}(t) + \underline{K}\dot{\underline{q}}(t) + \underline{C}\underline{q}(t) = \underline{f}(t). \quad \text{Gl. 3.12}$$

Nach der Anwendung einer Fouriertransformation ergibt sich



$$\underline{F}(\Omega) = \{-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{K} + \mathbf{C}\} \cdot \underline{Q}(j\omega) = \mathbf{Z}(j\omega) \cdot \underline{Q}(j\omega) \quad \text{Gl. 3.13}$$

Mit der Einführung der Übertragungsfunktionsmatrix $\mathbf{H}(j\omega)$ und Umstellen folgt daraus

$$\mathbf{H}(j\omega) = \{-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{K} + \mathbf{C}\}^{-1} = \mathbf{Z}(j\omega)^{-1} \quad \text{Gl. 3.14}$$

und die Antwort des Systems

$$\underline{Q}(j\omega) = \mathbf{H}(j\omega) \cdot \underline{F}(j\omega) \quad \text{Gl. 3.15}$$

Die Übertragungsfunktionsmatrix $\mathbf{H}(\Omega)$ enthält die Übertragungsfunktionen $H_{ik}(\Omega)$ und stellt damit die vollständige Beschreibung im Frequenzbereich dar.

Die Übertragungsfunktionsmatrix \mathbf{H} hat dann die Form

$$\mathbf{H}(j\omega) = \frac{1}{\det\{-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{K} + \mathbf{C}\}} \begin{bmatrix} \text{Adj}_{11}\{\mathbf{Z}(j\omega)\} & \cdots & \text{Adj}_{1n}\{\mathbf{Z}(j\omega)\} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Adj}_{n1}\{\mathbf{Z}(j\omega)\} & \cdots & \text{Adj}_{nn}\{\mathbf{Z}(j\omega)\} \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 3.16}$$

Die Elemente der Übertragungsmatrix $\mathbf{H}(j\omega)$ sind die Übertragungsfunktionen $H_{ik}(j\omega)$.

Die Übertragungsfunktionen lassen sich nach WOELFEL ([65]) auch beschreiben mit

$$H_{ik}(j\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_{ir} \varphi_{kr}}{k_r} \frac{1}{1 - \eta_r^2 + j2D_r \eta_r} \quad \text{Gl. 3.17}$$

Mit $\eta_r = \frac{\Omega}{\omega_r}$ und der modalen Dämpfung $D_r = \frac{d}{2m\omega_r}$ folgt für die Übertragungsfunktionsmatrix dann

$$\mathbf{H}(\Omega) = \sum_{r=1}^n \underline{\varphi}_r \underline{\varphi}_r^T \frac{1}{k_r} \frac{1}{1 - \eta_r^2 + j2D_r \eta_r} \quad \text{Gl. 3.18}$$

Die Übertragungsfunktionen $H_{ik}(j\omega)$ lassen sich als gebrochen rationale Funktionen mit dem Zählerpolynom

$$HZ_{ik}(j\omega) = \sum_{l=0}^{MZ} a_l \cdot (j\omega)^l \quad \text{Gl. 3.19}$$

und dem Nennerpolynom



$$HN(j\omega) = \sum_{l=0}^{MN} b_l \cdot (j\omega)^l \quad \text{Gl. 3.20}$$

darstellen. MZ ist dabei der Grad des Zählerpolynoms und MN der Grad des Nennerpolynoms. Die Übertragungsfunktionen $H_{ik}(j\omega)$ ergeben sich aus der auf die Erregung normierte Antwort des Systems. Sie lassen sich für die Erregung $F_k(j\omega)$ an der Stelle k und die Fouriertransformierte der Antwort $Q_i(j\omega)$ des Systems an der Stelle i bestimmen als

$$H_{ik}(j\omega) = \frac{Q_i(j\omega)}{F_k(j\omega)} \quad \text{Gl. 3.21}$$

Die Bestimmung der Eigenwerte erfolgt durch die Suche der Nullstellen des Nennerpolynoms (Gl. 3.20). Sie sind globale Parameter des Systems.

Die Eigenvektoren beschreiben das lokale Systemverhalten an den Stellen i infolge der Erregung an der Stelle k und werden aus den Zählerpolynomen $HZ_{ik}(j\omega)$ (Gl. 3.19) berechnet.

Die Rücktransformation von $H_{ik}(j\omega)$ aus Gl. 3.21 vom Bildbereich in den Zeitbereich ergibt die Gewichtsfunktion $h_{ik}(t)$. Sie ist die Systemantwort auf den Dirac-Impuls. Als Dirac-Impuls wird die zeitliche Änderung der Sprungfunktion bezeichnet. Er ist unendlich kurz und hat eine unendlich hohe Amplitude. Mithilfe der Distributionentheorie lässt sich nachweisen, dass bei Einwirkung eines Dirac-Impulses auf ein System alle Eigenfrequenzen angeregt werden.

Auf dem zu untersuchenden System werden zunächst mehrere Messstellen $i = 1 \dots m$ vorbereitet, wobei $m \geq 3$, an denen zum Beispiel Beschleunigungsaufnehmer (vgl. Kap. 3.3.1) platziert werden. Die Verteilung der Messstellen sollte dabei der räumlichen Ausdehnung entsprechen. Zunächst wird ein vollständiger Satz von Übertragungsfunktionen $H_{ik}(j\omega)$ bestimmt. Dazu stehen drei mögliche Vorgehensweisen zur Verfügung.

1. Erregung an der Stelle $k = \text{const.}$ mit $f_k(t)$ und Messung der Systemantworten $q_i(t)$ an allen Messstellen $i = 1 \dots m$.



2. Erregung an den Stellen $k = 1 \dots m$ mit $f_k(t)$ und Messung der Systemantworten $q_i(t)$ an der Messstelle $i = \text{const.}$.
3. Erregung an allen Stellen $i = k = 1 \dots m$ mit $f_k(t)$ und Messung der Systemantworten $q_i(t)$.

Die Erregung $f_k(t)$ erfolgt für ein transientes Eingangssignal üblicherweise mit einem Impulshammer.

Das Ergebnis ist dann ein vollständiger Satz an Zeitfunktionen $f_k(t)$ und $q_i(t)$. Diese werden dann mit einer diskreten Fouriertransformation punktweise in Übertragungsfunktionen $H_{ik}(j\omega_l), l = 1, \dots, NP$ überführt.

Die Summation aller Übertragungsfunktionen ergibt einen ersten Eindruck zum Systemverhalten. Daran lassen sich bereits dominierende Resonanzen erkennen. Aufbauend auf den bereits beschriebenen Grundlagen wird für die dominanten Frequenzbereiche die diskrete Übertragungsfunktion $H_{ik}(j\omega_l)$ mit der dazugehörigen Frequenz ω_l durch analytische, gebrochen-rationale Polynome approximiert zu

$$H_{ik}(j\omega) = \frac{HZ_{ik}(j\omega)}{HN(j\omega)}. \quad \text{Gl. 3.22}$$

Anschließend erfolgt eine Partialbruchzerlegung in

$$H_{ik}(j\omega) = \sum_{r=1}^{MN} \left(\frac{d_{ijr}}{(j\omega) - p_r} + \frac{d_{ijr}^*}{(j\omega) - p_r^*} \right). \quad \text{Gl. 3.23}$$

Daraus ergeben sich die Eigenwerte des Systems als konjugiert komplexe Paare mit

$$p_r = \delta_r + j\omega_r, \quad p_r^* = \delta_r - j\omega_r. \quad \text{Gl. 3.24}$$

dabei ist δ_r die Abklingkonstante (modale Dämpfung) der r -ten Eigenform und ω_r die r -te Eigenkreisfrequenz. Für die Eigenfrequenzen ω_r werden anschließend noch aus den Residuen d_{ijr} die Elemente des Eigenvektors u_{ijr} berechnet.

Eine verkürzte Darstellung dieser Herleitung im Zustandsraum beschreibt HARDTKE in [144] (S. 49 – 52).

Die praktische Durchführung der experimentellen Modalanalyse wird in Kap. 5.4 beschrieben. Hier findet sie bei der Fundamentierung der Prüfstände eine Anwendung. Die expe-



rimentelle Modalanalyse ist ein wertvolles Werkzeug zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens von mechanischen Strukturen und wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit neben der in Kap. 5.4 beschriebenen Anwendung an weiteren Stellen eingesetzt. So konnte die Strukturanalyse bei der Bestandsanalyse bestehender Prüfstände und der Absicherung neu entwickelter Prüfstandlösungen für die Beurteilung der Steifigkeiten angewendet werden.



4 Entwicklungsprozess „Versuchsfeld“

Im Kapitel 4 wird der Entwicklungsprozess des Versuchsfeldes beschrieben. Dazu werden zunächst die Abläufe des gesamten Anforderungsprozesses schematisch in Abb. 4.1 aufgezeigt. Im oberen Teil der Abbildung sind erneut die drei Anforderungsbereiche dargestellt, welche die allgemeine Anforderung im Sinne des Nutzungskonzeptes für das gesamte Fahrzeugtechnische Versuchszentrum liefern. Die daraus abgeleitete Zielformulierung bildet die Ausgangsbasis für die sich anschließende detaillierte Anforderungsanalyse. Die Anforderungen zur Gestaltung des Versuchsfeldes lassen sich in drei Kategorien unterteilen.

Mit den technischen Anforderungen der Prüfstände werden konkrete Vorgaben zum Beispiel an den Bauraum, die Anschlüsse oder die zu erwartenden Emissionen des jeweiligen Prüfstandes gemacht. Diese ergeben sich aus der individuellen Gestaltung des Prüfstandes und den dafür heranzuziehenden Regelwerken und werden im Betreiberkonzept (vgl. Kap. 4.5.2) und im Anlagenplan (vgl. Kap. 4.5.1) des Prüfstandes dokumentiert.

Die bauspezifischen Anforderungen ergeben sich zum Beispiel aus dem Vorplanungsprozess oder vorangegangenen Machbarkeitsanalysen. Häufig liegen die Ursachen für bauspezifische Anforderungen, so wie im vorliegenden Fall, in nichttechnischen Randbedingungen. Hier sollte das Versuchsfeld in ein Bestandsgebäude integriert werden. Dafür müssen technisch theoretisch realisierbare Lösungen auch auf ihre Wirtschaftlichkeit hin überprüft werden und schränken dadurch den Gestaltungsspielraum für das Versuchsfeld ein.

Die dritte Kategorie sind die im Versuchsfeld ablaufenden Prozesse. Dazu zählen die Bestückung mit Prüflingen ebenso wie die Wartung oder Entsorgungsabläufe.

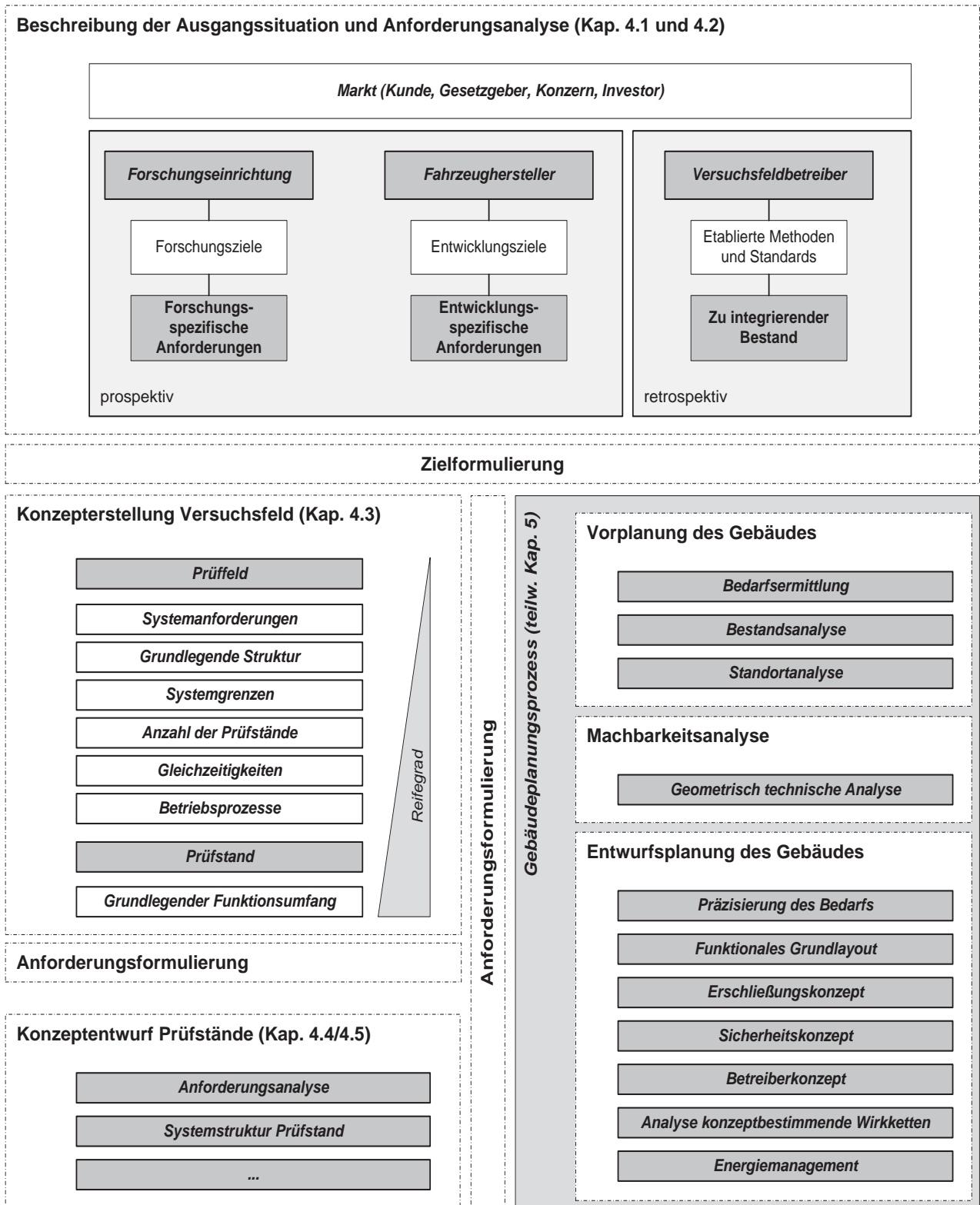


Abb. 4.1 Vorgehensweise Systementwicklung Versuchsfeld



4.1 Beschreibung der Ausgangssituation

Der Anlass für den Start eines Entwicklungsprozesses ist stets das Streben nach Veränderungen. Es können dazu zwei Beweggründe unterschieden werden, welche den Anstoß für eine Veränderung geben können. Existiert bereits eine Lösung, ein Vorgehen oder ein Produkt und kann damit nicht der aktuelle bestehende Bedarf gedeckt werden, so ergeben sich daraus *Probleme*, welche mit einem Entwicklungsprozess gelöst werden sollen. Dazu ist eine retrospektive Vorgehensweise erforderlich, die mit einer Ursachenermittlung zum Beispiel im Bereich Betriebssicherheit in Form einer Gefährdungsbeurteilung umgesetzt werden kann. Eine Anleitung zur Durchführung ist in [173] zu finden. Für die hier betrachtete Forschungseinrichtung wird die Situation im folgenden Kap. 4.1.1 vorgestellt.

Ein zweiter Beweggrund kann das Aufkommen neuer Interessen oder Möglichkeiten sein, deren Realisierung die Anpassung bestehender Lösungen oder grundsätzlich neu zu schaffende Lösungen zugrunde liegen. Für den Nutzer ergeben sich *Chancen* mit der Einführung einer neuen Lösung. Oft liegt zu Beginn eines Entwicklungsprozesses lediglich eine Idee oder ein oberflächlich strukturierter Entwurf vor, der beschreibt, wie die *Chancen* realisiert werden sollen. Für eine weiterverwertbare Beschreibung der Ausgangssituation kann hier je nach Höhe des Veränderungsgrades ein deutlich aufwendigeres, oft prospektives Analyseverfahren erforderlich sein.

4.1.1 Ausgangssituationsanalyse

Der erste Schritt zum Entwicklungsprozess ist die gründliche Analyse der Ausgangssituation. Sie bildet die Voraussetzung für Zielformulierung im Entwicklungsprojekt. Dafür werden in der Literatur ([53], [174], [175], [150]) verschiedene Techniken beschrieben.

Das Vorgehen wird am konkreten Beispiel einer universitären Forschungseinrichtung beschrieben. Es handelt sich im Beispiel um einen Lehrstuhl für Kraftfahrzeugtechnik, der gemeinsam mit einem weiteren Lehrstuhl für Fahrzeugmechatronik und einem Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren eine Institutsstruktur bildet. In Abb. 4.2 wird die Gesamtstruktur des Institutes samt der inneruniversitären Verflechtungen dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei der Durchführung einer Anforderungsanalyse nicht ausschließlich die Belange und Forschungsziele eines Lehrstuhles, sondern auch universitäre Interessen eine Rolle spielen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Fokus jedoch auf den in Abb. 4.2 grau markierten Bereich der Kraftfahrzeugtechnik gelegt.

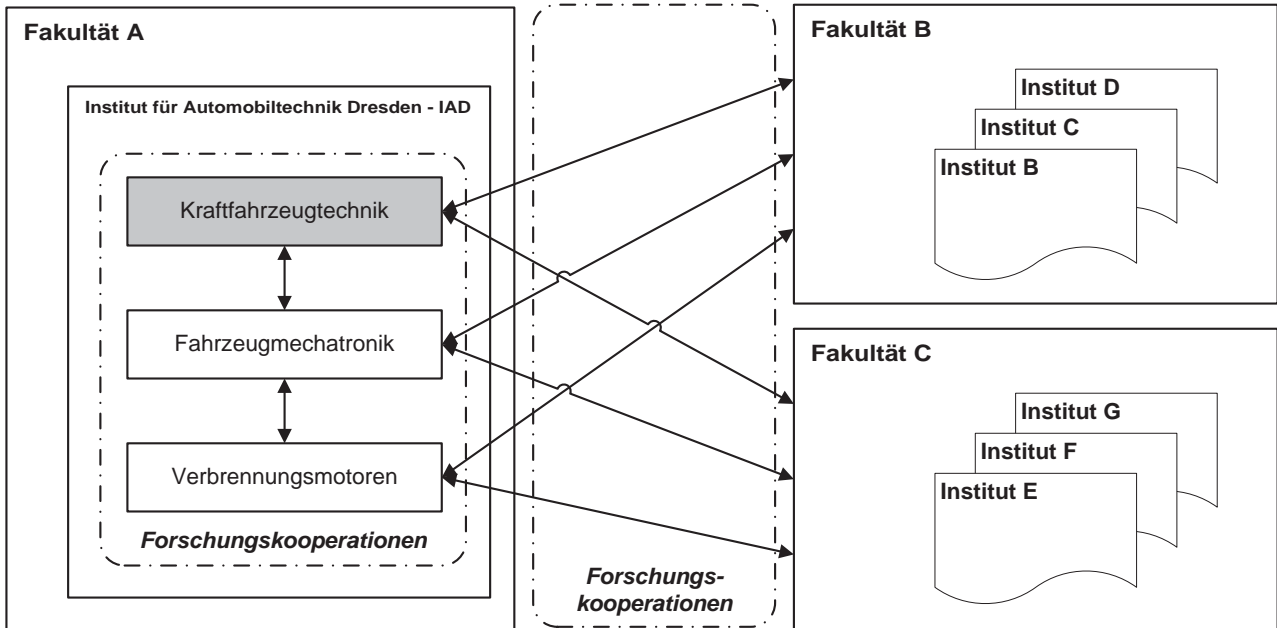


Abb. 4.2 Institutsstruktur der Forschungseinrichtung

Die Ausrichtung der Forschungsbereiche war bisher stark komponentenorientiert. Die dabei übernommenen Aufgaben waren im Bereich der Grundlagenforschung zu finden. Die Forschungseinrichtung war vom termingebundenen Fahrzeugentwicklungsprozess weitgehend entkoppelt. Es existierten bereits mehrere Prüfstände und daran angepasste Methoden, welche im weiteren Verlauf noch genauer vorgestellt werden. Die bestehenden Versuchseinrichtungen befinden sich an zwei Standorten etwa zehn Kilometer voneinander entfernt. Diese Anlagen sollen nach Möglichkeit adaptiert und verbessert in ein neues Versuchsfeld integriert werden. Darauf wird in Kap. 4.4 noch einmal genauer eingegangen. Sowohl der anlagentechnische Zustand der Prüfstände als auch der allgemeine gebäudetechnische Zustand der Infrastruktur entsprach nicht mehr dem Stand der Technik und konnte daher auch nicht die Bedarfe einer zeitgemäßen Forschungseinrichtung decken. Dieser Zustand entspricht einem *problemgetriebenen* Entwicklungsprozess. Die Analyse der Ausgangssituation ergab folgende Problemzustände:



Problemzustand	Handlungsfeld
Anlagensicherheit Prüfstände	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfstandaufbau überarbeiten - Sicherheitsanlagen (Not-Aus, Zugangssicherungen, Anlagenüberwachung) einbauen - Sicherheitsbereiche / -zonen am Prüfstand einrichten
Betriebssicherheit Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> - Neuordnung der Räume - Verkehrswege schaffen - Lärmschutz schaffen
Umweltschutz	<ul style="list-style-type: none"> - Sicherheitsmaßnahmen gegen Bodenkontamination - Entsorgungskonzept erstellen - Energetisches Betriebskonzept erstellen
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Verfügbarkeit der Prüfstände durch Separation der Prüf- und Bedienräume erhöhen - Energetisches Betriebskonzept erstellen - Verkehrswege schaffen - Anlagen zentralisieren
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> - Wartungsbereiche einrichten - Zentralisierung der Energieversorgung - Verkehrswege schaffen
Leistungsfähigkeit der Prüfstände	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfstandaufbau überarbeiten - Energieinfrastruktur (elektrisch, hydraulisch) verbessern - Anschlussleistungen erhöhen - Energiemanagement erarbeiten - Kühlsysteme verbessern

Tab. 4.1 Ergebnisse Analyse Ausgangssituation



4.1.2 Bestandsanalyse

Die Tab. 4.2 zeigt einen Auszug einer Übersicht der vor Beginn des Planungsprozesses vorhandenen Prüfstände.

Prüfstandbezeichnung	Einsatzbereich	Beschreibung / Literatur
Stoßdämpferprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> - mechanisches Übertragungsverhalten für Aufbauswingungsdämpfern, Elastomerbauteile - einaxiale statische und dynamische Bauteilprüfung 	[189]
Antriebsstrangprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> - Wirkungsgradmessung 	
Reifenprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> - mechanisches Übertragungsverhalten für Reifen - Rollgeräusch - Rollwiderstand - Schädigungsverhalten 	[117], [128], [107], [114], [123]
Radaufhängungsprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> - mechanisches Übertragungsverhalten für Reifen-Rad-Radaufhängung-Lenkung 	[117], [30],
Achsprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> - mechanisches Übertragungsverhalten für Radaufhängung-Lenkung-Karosserie 	[106], [30]
Bremsenprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> - Reibpaarungsmessung 	[111]
4-Rollenprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> - Geräuschuntersuchung für Gesamtfahrzeug (beschränkt auf Bereich mit sehr kleiner Geschwindigkeit) - Funktionsprüfung ABS 	

Tab. 4.2 Bestand Prüfstände vor der Planung

Die Prüfstände wurden in mehreren kleineren Bauphasen in eine aus den 1930er Jahren stammende Gebäudestruktur integriert. Mit wachsenden Anforderungen hinsichtlich der Funktionalität und der Leistungsbereiche der Prüfstände wurden die räumlichen Gegebenheiten ausgeschöpft. Dies ging schließlich zu Lasten der Betriebssicherheit der Anlagen und führte zu Einschränkungen im Betrieb. Ein weiterer Ausbau der Prüfstände mit den erforderlichen funktionalen Erweiterungen, um den Anforderung in der Automobilentwicklung gerecht zu werden, war nicht möglich.



Außerdem wurden an der Forschungseinrichtung bereits in der Vergangenheit Versuchsmethoden und an Prüfstände gekoppelte Simulationsmethoden entwickelt, welche in die neu zu entwickelnde Versuchsumgebung zu integrieren sind. In Tab. 4.3 ist eine Auswahl an bisher in der Forschungseinrichtung vorhandenen Methoden aufgeführt, die im zukünftigen Versuchsfeld wieder eingesetzt und weiterentwickelt werden sollen.

Methodenbezeichnung	Erklärung
Kennlinienbestimmung Elastomerlager	<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung mechanischer Bauteilkennwerte an Elastomerbauteilen (statische und dynamische Steifigkeit, Verlustwinkel) - Temperaturempfindlichkeit
Parameteridentifikation Reifenmodelle	<ul style="list-style-type: none"> - experimentelle Ermittlung von Modellparametern für SWIFT-, FTIRE-, und andere Modellansätze
Parameteridentifikation für Fahrdynamik	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung von Modellparametern an Fahrzeugachsen für Mehrkörpermodelle in der Fahrdynamiksimulation an verschiedenen Prüfständen
VDA-Kennlinienbestimmung an Aufbauswingungsdämpfern	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung von: Kraft-Weg-Kennlinie, Reibkraftkennlinie, Kraft-Geschwindigkeits-Kennlinie
Wirkungsgradermittlung an Fahrzeuggetrieben	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung des Wirkungsgradkennfeldes durch Prüfstandmessung
Lastpfadanalyse an Fahrzeugachsen	<ul style="list-style-type: none"> - prüfstandgestützte Simulation von Lastpfaden bei Fahrzeugachsen zur Ermittlung von Bauteillasten
Reibwertbestimmung	<ul style="list-style-type: none"> - experimentelle Reibkraftermittlung bei Fahrzeugbremsen - Ermittlung der Temperaturverteilung

Tab. 4.3 Bisher bestehende Methoden mit Versuchsbezug

4.1.3 Neuausrichtung der Forschungseinrichtung

Die Neuausrichtung der Forschungseinrichtung sieht nach PROKOP ([156], [157]) vor, eine stärker interdisziplinär geprägte Denkweise bei Forschungsaufgaben zu etablieren. Das zukünftige Aufgabenfeld soll vielfältiger in den Fahrzeugentwicklungsprozess integriert werden und physikalische Zusammenhänge im Gesamtfahrzeug behandeln. Es sollen Me-



thoden entwickelt werden, die sowohl in der Konzeptauslegung als auch in der Absicherung eingesetzt werden können. Dennoch sollen die Voraussetzungen für die Entwicklung neuer Technologien im Sinne einer Vorentwicklung erhalten bleiben. Es ergibt sich ein Leistungsspektrum für Forschungsaufgaben, das wie folgt zusammengefasst werden kann:

Leistungsspektrum für Forschungsaufgaben

- Entwicklung methodischer Werkzeuge für den Kraftfahrzeugentwicklungsprozess
 - Parametrierungsprozesse für die virtuelle Entwicklung
 - Prozesse zum Erlangen von physikalischem Wirkkettenverständnis
 - Werkzeuge zur gesamtheitlichen virtuellen Entwicklung
- Erforschung und Nutzbarmachung von Grundlagentechnologien
 - Fahrerassistenzsysteme
 - Adaptronik in der Schwingungstechnik
- Erforschung der Wechselwirkungen des Kraftfahrzeuges mit dem gesamten Verkehrssystem (vgl. Kap. 1)

Abb. 4.3 zeigt die Struktur der Forschungsfelder, welche die Forschungseinrichtung bearbeitet. Darin sind fünf Forschungsbereiche benannt, die später im Anforderungsmanagement berücksichtigt werden müssen. Die Bearbeitung von Forschungsaufgaben erfolgt innerhalb der Forschungsfelder unter der Betrachtung von drei Forschungsaspekten. Diese Strukturierung führt letztlich zu den einzelnen Arbeitsgebieten der Forschungseinrichtung. Aus diesen Arbeitsgebieten lassen sich später konkrete Anforderungen für die zukünftige Gestaltung des Versuchsfeldes ableiten. Die hellgrau geschriebenen Arbeitsgebiete werden im weiteren Verlauf der Gestaltung des Versuchsfeldes nicht berücksichtigt. Die Forschungsfelder werden im weiteren Verlauf der Arbeit auch als Kompetenzbereich der Forschungseinrichtung bezeichnet.



Forschungs- felder / Forschungs- aspekte	Fahrer	Fahrzeug	Umgebung
Transport- und Energieeffizienz	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrerverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienz Antriebstrang • Rollwiderstand 	<ul style="list-style-type: none"> • Car-2-X • Assistenzsysteme • Automatisiertes Fahren
Erlebnis und Dynamik	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrerverhalten • Wahrnehmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrdynamik 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>keine</i>
Komfort	<ul style="list-style-type: none"> • Wahrnehmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwingungskomfort 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>keine</i>
Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrerverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrdynamik • Assistenzsysteme • Automatisiertes Fahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Car-2-X • Assistenzsysteme • Automatisiertes Fahren
Haltbarkeit und Kosten	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrerverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsfestigkeit • Lastdaten • Degradationsverhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Korrosionsverhalten

Abb. 4.3 Struktur der Forschungsfelder in der Forschungseinrichtung

Die inhaltlichen Ziele der Forschungseinrichtung leiten sich größtenteils am wissenschaftlichen Bedarf der Automobilindustrie ab und müssen in einer Anforderungsanalyse (vgl. Kap. 4.2) weiter präzisiert werden. Sie bilden dann die Basis der Bedarfsermittlung für die zu erstellende Ausstattung der Forschungseinrichtung. Jedoch kann bereits nach den in Kap. 2.1.1 beschriebenen Trends in der Automobilentwicklung festgestellt werden, dass in den Eigenschaftsbereichen:

- *Fahrdynamik,*
- *Schwingungskomfort,*
- *Haltbarkeit und Lastdaten*

weiterhin erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Für den weiteren Prozess zur Erstellung des Versuchsfeldes stehen diese Bereiche im Fokus bezüglich ihrer speziellen Anforderungen. Die Forschungseinrichtung beabsichtigt,



daneben weitere Forschungsbereiche (Integrale Fahrzeugsicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion) auszubauen, die später in die gesamte Forschungsinfrastruktur integriert werden sollen, in den nun folgenden Betrachtungen jedoch nicht weiter berücksichtigt werden.

Die ausführliche Darstellung der Ausgangssituation und die daraus abgeleiteten Anforderungen werden in einer Bedarfsermittlung zusammengefasst. Das Vorgehen dazu und die planerisch zu erstellenden Unterlagen sind in der Norm [173] beschrieben. Darin werden die für die Planung des Gebäudes wesentlichen Parameter erfasst. Der Prüfstand wird dabei als ein in sich abgeschlossenes System betrachtet, dessen Schnittstellen zum Gebäude allesamt bekannt und definierbar sind. Da dieser Zustand nicht zu jedem Beginn einer Versuchsfeldentwicklung eintritt, ist es u.a. Aufgabe der vorliegenden Ausarbeitung, Methoden und Prozesse bereitzustellen, um dieses sonst rein sequenziell ablaufende Verfahren partiell zu parallelisieren.

Für den vorliegenden Fall wurden die bis hierher erforderlichen Informationen der Bedarfsanmeldung für das Fahrzeugtechnische Versuchszentrum der TU Dresden ([67]) entnommen. Daraus ergeben sich grundsätzlich neue Bedarfe, mit deren Bereitstellung neue Möglichkeiten für die Forschungseinrichtung entstehen. Daher handelt es sich bei der Bereitstellung dieses Teiles des Versuchsfeldes um den *chancengetriebenen* Teil des Entwicklungsprozesses.

Verallgemeinerung:

Das erste Ziel der Analyse der Ausgangssituation ist die Herstellung eines allgemeinen Grundverständnisses für die bevorstehende Aufgabe bei allen Planungs- und Entwicklungsbeteiligten. Dazu steht zunächst die Informationsbeschaffung im Vordergrund. Am Entwicklungsprozess ist eine Vielzahl von Experten aus unterschiedlichen Fachgebieten beteiligt. Daher ist es wichtig, von Beginn an gemeinsame Dokumente und Informationsaustauschplattformen zu installieren. Ferner sind in den Fachbereichen spezifische Bezeichnungen und Notationen zu finden. Diese sollten in zentralen Arbeitsdokumenten formalisiert werden.

Das zweite Ziel ist die Klärung des Informationsumfanges. Die Analyse der Ausgangssituation kann erst dann abgeschlossen werden, wenn sichergestellt wurde, welche Informationen vorhanden sind, wie die Verwendbarkeit der Informationen ist und welche Informati-



onen noch beschafft werden müssen. Dazu sind alle Experten angehalten, bei der Erstellung und Befüllung entsprechender Fragenkataloge mitzuwirken.

Methoden:

1. *Erstellung einer Projektskizze in Form eines Handbuches*
 - *Übergreifende Projektziele: Was soll mit der Entwicklung verbessert / erreicht werden?*
 - *Vorschläge zur Strukturierung des Systems*
2. *Durchführung von Projektgruppenarbeit*
 - *Aufstellung von Arbeitshypothesen durch erfahrene Projektmitarbeiter*
 - *Strukturierung des Gesamtsystems*
 - *Ableitung von Systemelementen*
3. *Erstellung von Fragekatalogen*
 - *Zusammentragen des fachspezifischen Informationsbedarfes*
 - *Zentralisierung von Systemparametern*

Ergebnisse der Ausgangssituationsanalyse:

Die Ergebnisse der Ausgangssituationsanalyse und die sich daraus ableitenden *Aufgaben* können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die existierenden Prüfstände der Forschungseinrichtung sind auf eine weitere Verwendung nach einem Umzug in ein neu zu erstellendes Gebäudeumfeld zu prüfen.
 - *Bestandsanalyse*
- Die vorhandenen und weiter nutzbaren Prüfstände sind zu einem Versuchsfeld zusammenzuführen.
 - *Synthese*
- Das Versuchsfeld ist entsprechend der Anforderungen aus aktueller und zukünftiger Forschung und Entwicklung mit neuen Elementen (Prüfstände, Versuchsmethoden, Simulationsstrukturen) zu erweitern. Zum Zeitpunkt der Ausgangssituationsanalyse liegen grobe Vorstellungen der zu integrierenden neuen Prüfstände vor. Zur weiteren Detaillierung ist ein systematischer Anforderungsprozess durchzuführen.
 - *Anforderungsanalyse Fahrzeugentwicklungsprozess*
 - *Entwurf einer neuen Systemarchitektur für das Versuchsfeld*



- Für das Versuchsfeld ist entsprechend seiner systemspezifischen Anforderungen eine Gebäudestruktur einschließlich der erforderlichen Versorgungsnetze zu planen und umzusetzen.
 - *Anforderungsanalyse Versuchsfeld*
 - *Identifikation konzeptbestimmender Wirkketten*
 - *Präzisierung der Systemarchitektur*
- Bestehende Prüfstände sind entsprechend der neu zgedachten Funktionsumfänge zu erweitern. Dazu sind separate Entwicklungsprozesse zu konzipieren und durchzuführen.
 - *Bestandsanalyse*
 - *Anforderungsanalyse Prüfstände*
 - *Soll-Ist-Vergleich*
 - *Prüfstandentwicklung*
- Für zusätzlich erforderliche Prüfstände und Versuchsmethoden sind separate Entwicklungsprozesse zu konzipieren und durchzuführen.
 - *Anforderungsanalyse Prüfstände*
 - *Prüfstandentwicklung*
 - *Erstellung einer Schnittstellendokumentation*
- Ein gesamtheitliches Konzept für die informationstechnische Vernetzung der Prüfstände untereinander für die Anwendung virtueller Methoden ist zu entwerfen.

4.1.4 Systemdarstellung

Eine Systemdarstellung ist immer dann erforderlich, wenn komplexe Wechselwirkungen oder Beziehungen innerhalb des Systems oder über die Systemgrenzen hinaus vermutet werden. Dies gilt für den Entwurf der Systemarchitektur ebenso wie für den Anforderungsprozess. Für die richtige Interpretation und Wichtung der Anforderungen ist es oft von Bedeutung, den Ursprung zu kennen. Auch wenn bereits fest definierte Anforderungen in Form von Zielgrößen vorliegen, kann eine schematische Darstellung helfen, Prozesse und Beziehungen für alle an der Entwicklung beteiligten Personen verständlich zu machen.

Ein weiteres Ziel, welches bei der Beschreibung der Ausgangssituation verfolgt wird, ist die Vorbereitung von Entscheidungen zur Zusammensetzung des Projektteams. Es ist zu definieren, welche Experten hinzuzuziehen sind. Dazu muss das zu entwickelnde System



grob strukturiert werden. Die Struktur des Systems kann von der Art der interagierenden Elemente und der an der Entwicklung des Systems beteiligten Wissenschafts- oder Entwicklungsdisziplinen abhängen. Die Art der Darstellung ist so zu wählen, dass wesentliche Wechselwirkungen und Beziehungen erkennbar sind. Ferner sollte anhand der Systemstruktur erkennbar sein, welche Teilsysteme und Elemente im Gesamtsystem enthalten sein werden. Später soll daran abgeleitet werden, welche davon separat entwickelt werden können.

Für das fahrzeugtechnische Versuchszentrum wurden detaillierte Dokumentationen der bestehenden Prüfstände erstellt. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte zunächst eine vorläufige Systemstruktur entstehen. Als Darstellungsform wurde die in [42] beschriebene Graphenform angewendet. Abb. 4.4 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung der Systemstruktur. Darin wird in die zwei Subsysteme „*Versuchsfeld*“ und „*Gebäudestruktur*“ unterschieden. Diese Teilung wurde gewählt, um die Zuständigkeit im Projektteam darzustellen. Die Entwicklung der Gebäudestruktur wird federführend durch einen Stab an Fachplanern und Architekten durchgeführt. Die Entwicklung des Versuchsfeldes übernimmt die Forschungseinrichtung. Weiterhin sind in dieser Betrachtungsebene die Prüfstände und gebäudetechnischen Anlagen als Elemente der Subsysteme deklariert. Die Verbindungslinien symbolisieren Beziehungen der einzelnen Elemente. Diese können gerichtet oder wechselseitig wirken. Konzeptbestimmende Wirkketten können grafisch anhand der Liniestärke von nicht-konzeptbestimmenden Wirkketten unterschieden werden. Grundsätzlich kann diese Darstellung für unterschiedliche Systemaspekte, wie Platzbedarf, Energieversorgung, Gefährdung und andere mehr erstellt werden.

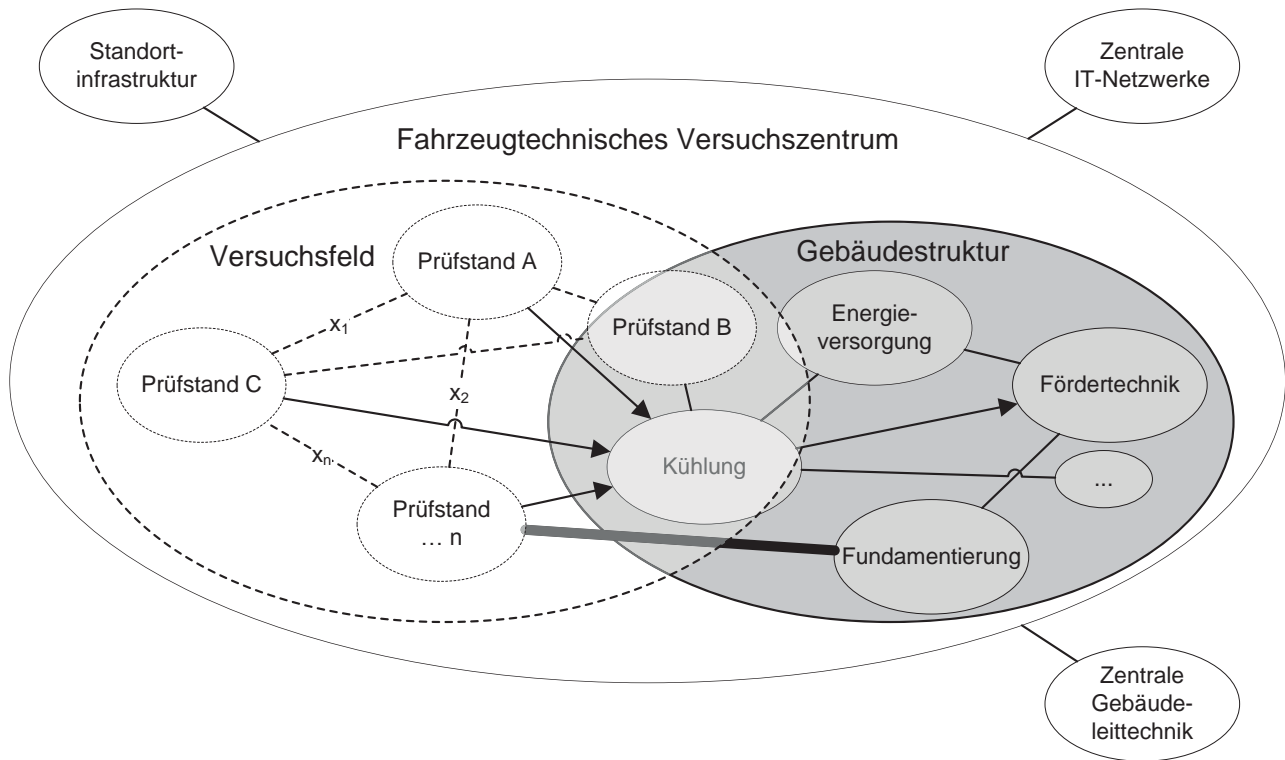


Abb. 4.4 Systemmodell „Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum“ (schematisch)

Für den konkreten Fall des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums werden die Graphen für verschiedene Systemaspekte verwendet. Die Systemdarstellung in Form von Graphen wird in der vorliegenden Arbeit als funktionales Blockschaubild erweitert und wird in Kap. 5.3.2 erläutert. Für die Erweiterung des Versuchsfeldes mit neuen Prüfständen kommen lediglich weitere Elemente in die Darstellung. Die Struktur bleibt erhalten.

Die Darstellung funktionaler Abläufe und Zusammenhänge kann mit Tabellen oder Matrizen erfolgen. Damit können zum Beispiel geometrische oder funktionale Gleichzeitigkeiten ermittelt werden. Diese Methode wird im Kap. 5.3.3 angewendet.

Die Systemdarstellung bildet damit den Abschluss der Beschreibung der Ausgangssituation.

4.2 Anforderungsanalysen

Zu Beginn des Entwicklungsprozesses für das Versuchsfeld wurde eine Analyse der Ausgangssituation durchgeführt und in Kap. 4.1.1 beschrieben. Diese ergab die Erforderlichkeit einer Anforderungsanalyse der Fahrzeugentwicklung, um daraus konkrete Angaben



für eine effektive Zusammensetzung des Versuchsfeldes zu gewinnen. Das heißt, die Systemgrenzen müssen nun weiter gefasst werden. Dafür wird die Fahrzeugentwicklung mit ihren äußeren Zwängen und Randbedingungen betrachtet.

Bereits in der Einleitung (Kap. 1) zu dieser Arbeit wurden Veränderungen im Mobilitätsmarkt erwähnt. In Kap. 2.1.1 wurden dazu neue Trends und Herausforderungen für die Automobilindustrie beschrieben.

Daraus leiten sich weitere Randbedingungen für das in dieser Arbeit beispielhaft vorgestellten Entwicklungsvorhaben ab.

ist die Konzeption eines zukunftsfähigen Versuchsfeldes für die Eigenschaftsbereiche *Fahrdynamik*, *Schwingungskomfort* und *Haltbarkeit und Lastdaten*. Um die Frage nach Bedürfnissen und Trends für neue Methoden in diesen Eigenschaftsbereichen der Fahrzeugentwicklung zu beantworten und daraus Anforderungen abzuleiten, sind grundlegende Ziele und äußere Zwänge der Automobilhersteller und der mobilen Gesellschaft einzubeziehen.

Die Abb. 4.5 stellt die wesentlichen Beziehungen und Einflussfaktoren im Anforderungsprozess an das Versuchsfeld dar. Die Darstellung ist als kausaler Ablauf aufgebaut. Kursiv geschrieben sind konkrete Institutionen oder Personen, die im Verlauf eine Rolle als Anforderer übernehmen. Die in Strich-Punkt-Linie umrandeten Bereiche stellen Arbeitsschritte dar, die zur durchgängigen Informationsbeschaffung durchgeführt werden müssen.

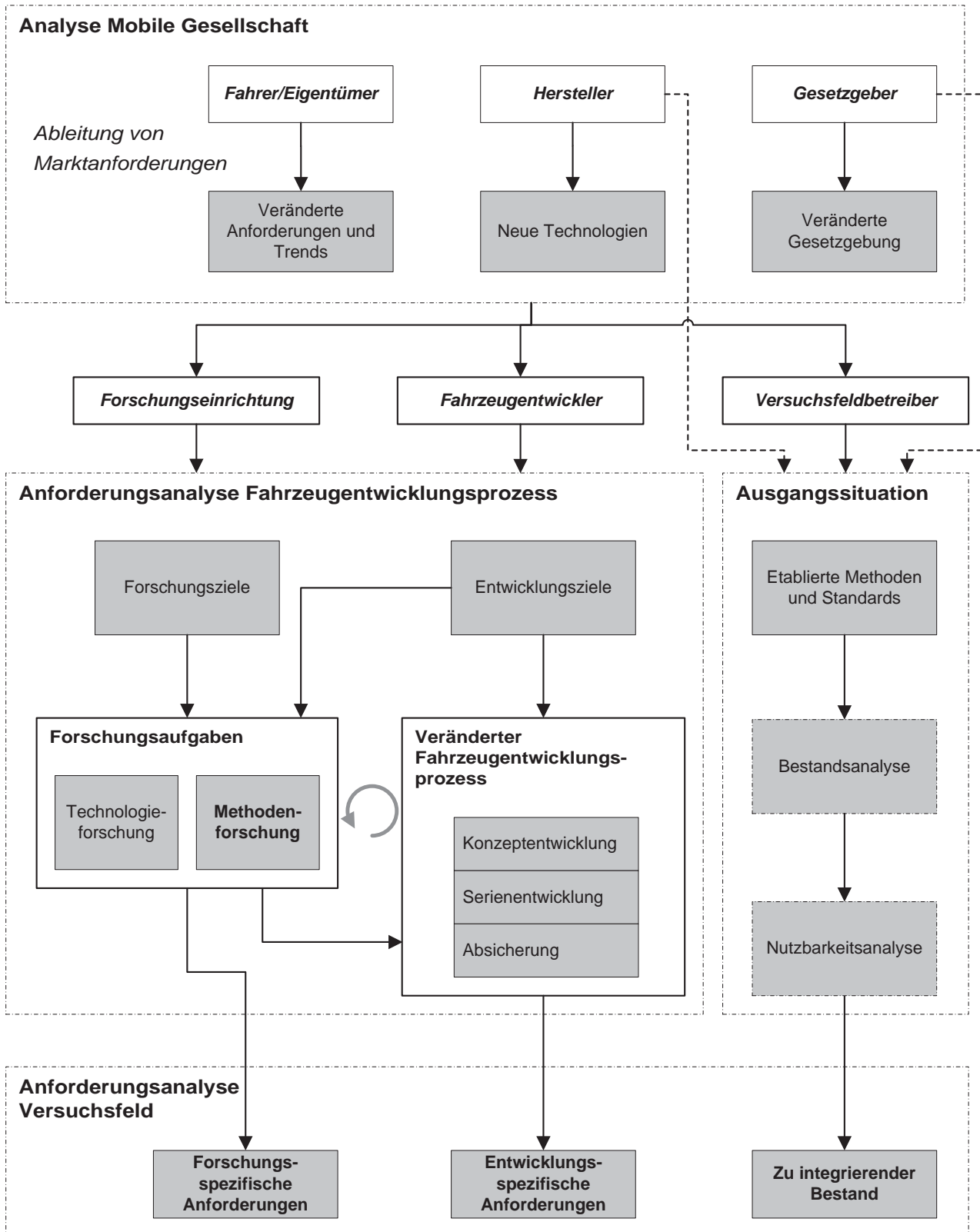


Abb. 4.5 Beziehungen und Einflussfaktoren im Anforderungsprozess des Versuchsfeldes



Rollenverteilung:

- Der Fahrer* ... stellt individuelle Anforderungen an das Produkt „Kraftfahrzeug“. Diese können das Design, die Platzverhältnisse, die Fahrleistungen, die Betriebskosten oder andere sogenannte kundenwerte Eigenschaften betreffen. Der Begriff „Kunde“ umfasst sowohl den Nutzer als auch den Eigentümer. (Vgl. Kap. 2.1)
- Der Hersteller* ... umfasst hier als Begriff die Gesamtheit der als privatwirtschaftliche Unternehmungen an der Wertschöpfung des Kraftfahrzeuges beteiligten Einrichtungen. Er verfolgt vor allem kommerzielle Ziele. Diese umfassen auch Ziele wie die Markenbindung und –dominanz oder die Image-Pflege, welche direkt oder indirekt der Gewinnsteigerung der Unternehmung dienen.
- Der Gesetzgeber* ... gibt Richtlinien und Gesetze heraus, welche den Vertrieb und den Betrieb der Kraftfahrzeuge regeln. Er verfolgt Ziele wie die Umwelt- und Ressourcenschonung und andere dem Allgemeinwohl dienliche Absichten. Weiterhin werden im hier vorliegenden Zusammenhang auch Institutionen zum Verbraucherschutz und Versicherungen zusammengefasst, die mit dem Betrieb des Kraftfahrzeuges in Verbindung stehen.
- Der Fahrzeugentwickler* ... ist eine Teilmenge des *Herstellers* und wird hier aus Gründen der Veranschaulichung des in Abb. 4.5 dargestellten Prozesses mit aufgeführt. An dieser Stelle des Prozesses sind die Anforderungen des Fahrzeugherstellers bereits spezifisch am Fahrzeugentwicklungsprozess ausgerichtet. Er ist dabei vordergründig produkt- und prozessorientiert.
- Die Forschungseinrichtung* ... richtet ihre Ziele am Erkenntnisgewinn aus. Es werden Anforderungen gestellt, welche das Versuchsfeld in die Lage versetzen sollen, methodische Vorgehensweisen und verallgemeinerungsfähige Forschungsergebnisse hervorzubrin-



gen. Sie tritt als Nutzer für wissenschaftliche Zwecke auf und ist in ihren Anforderungen hauptsächlich erkenntnisorientiert.

Der Versuchsfeldbetreiber ... stellt zum einen Anforderungen in Form von zu integrierenden Beständen aus dem bisherigen Zustand. Weiterhin gibt er im konkreten Fall des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums nichtwissenschaftliche Randbedingungen vor. Er schränkt durch seine Vorgaben den Eingriffsbereich für die Lösungsfindung ein. Die Anforderungen können hier monetäre, kapazitäre und juristische Aspekte enthalten.

Das Ziel der nun folgenden Analyse ist die Identifikation von Schnittstellen im Fahrzeugentwicklungsprozess, welche durch das Leistungsspektrum der Forschungseinrichtung zu besetzen sind und die Ableitung konkreter inhaltlicher Anforderungen an Methoden und Werkzeuge daraus. Später sollen daran technologische Anforderungen für die Gestaltung des Versuchsfeldes abgeleitet werden.

4.2.1 Analyse der mobilen Gesellschaft

Um die eigene Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen, muss der Fahrzeughersteller vor der Entscheidung zur Entwicklung eines neuen Fahrzeuges die Anforderung der zu adressierenden Märkte kennen. Der Markt für Kraftfahrzeuge wird durch die mobile Gesellschaft bestimmt. Für das zukünftige Produkt muss also zunächst eine Position im Markt gefunden werden. Dazu sind die in Kap. 2.1.1 genannten funktionalen und nicht funktionalen Wirkketten im oberen Teil der Wirkkettenmatrix aus Abb. 2.3 zu analysieren. Die Prozesse bis zur Entscheidungsfindung bezüglich der Marktposition sind durch die individuelle Konzernphilosophie des Herstellers bestimmt und von unternehmensstrategischen Gesichtspunkten geprägt und damit herstellerspezifisch. Sie sollen daher an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Jedoch sind die äußeren Zwänge und Randbedingungen für jeden Hersteller gleich, der mit seinen Produkten denselben Markt penetrieren möchte. Daher werden hier die für die Positionierung wichtigen Einflussfaktoren mit benannt. Der Produktentstehungsprozess für Automobile beginnt also, wie der für andere technische Produkte, mit der Definition technischer und nichttechnischer Anforderungen. Die Anforderungen werden durch ein Anforderungsmanagement (vgl. Kap. 2.1.1) aus fünf Bereichen abgeleitet:



- Bedürfnisse des Kunden
- Vorgaben der Gesetzgebung
- Neue technische Möglichkeiten und Lösungen
- Anpassung an Entwicklungstrends im gesamten Verkehrssystem
- Ökonomische Anforderungen

In der Literatur ([70], [53], [79], [85]) wird außerdem nach der Quelle der Anforderungen differenziert. Ausgehend vom Nutzungszweck des Automobils, der Fortbewegung zum Zweck der Mobilität aus welchem Grund auch immer, kann zum Beispiel die Rolle des Kunden auf verschiedene Personen verteilt sein.

- Mobilitätskunde: Nutzer des Kraftfahrzeuges im Sinne der Fortbewegung. Er stellt die Transportaufgabe in den Vordergrund. Dabei kann es sich um Personen- oder Gütertransport handeln. Der Mobilitätskunde kann selbst befördert werden oder diese Aufgabe für andere Personen stellen.
- Fahrer: Nutzer des Fahrzeuges zur Erfüllung der Transportaufgabe. Er kann die zu erfüllende Transportaufgabe dabei für den Mobilitätskunden oder sich selbst erfüllen.
- Fahrzeugeigentümer: Er stellt das Fahrzeug zur Erfüllung der Transportaufgabe bereit. Dabei kann er sowohl Fahrer als auch Mobilitätskunde sein.

Für den Fahrer oder Insassen, der letztlich im Fahrzeug sitzt, ergeben sich differenzierte Anforderungen an das Produkt. Daher ist eine Unterscheidung hier sinnvoll.

Die Kenntnis darüber, von wem die Anforderungen stammen, kann wesentliche Informationen für den Hintergrund und die Wichtung der Anforderung liefern. Weiterhin sind bei der Definition der Anforderung wichtige Trends und mögliche Veränderungen zu berücksichtigen. Als weiterführend auf diesem Gebiet sei BACKHAUS ([70]) genannt.

4.2.2 Analyse des Fahrzeugentwicklungsprozesses

In Kap. 4.2.1 wurden Quellen für Anforderungen an das Kraftfahrzeug, sowie einige Einflussfaktoren und in Kap. 2.1.1 bereits einige Trends und Herausforderungen für die Automobilindustrie beschrieben, die sich auf die Gestaltung des Entwicklungsprozesses auswirken werden. Ein gemeinsames Ziel aller Fahrzeughersteller ist die effiziente und nachhaltige Gestaltung der technologischen Entwicklungsschritte.



Das Fahrzeug ist heute ein überaus komplexes technisches Produkt. Dies ermöglicht dem Nutzer auf der einen Seite einen erheblichen Zugewinn an Komfort, Sicherheit und durch eine deutliche Effizienzsteigerung moderner Kraftfahrzeuge auch an Nachhaltigkeit, führt aber auch zu einem stetig wachsenden unternehmerischen Risiko in der Entwicklung. Dieses Risiko lässt sich senken, indem grundlegende physikalische Zusammenhänge im Kraftfahrzeug analysiert und damit aus der Sicht des Risikomanagements berechenbarer werden. Auch die eben genannten Ziele nach Effizienz und Nachhaltigkeit werden umso eher erreicht, je eher die physikalischen Zusammenhänge im Fahrzeug analysiert sind. Dazu sind neue Methoden und Werkzeuge erforderlich. In Kap. 2.1.1 Abb. 2.3 entspricht das den konzeptbestimmenden und nicht konzeptbestimmenden physikalischen Wirkketten im unteren Teil der Darstellung.

Die erste übergreifende Anforderung an das Versuchsfeld, die sich aus der Betrachtung des Entwicklungsprozesses gewinnen lässt, ist demnach die Forderung nach Möglichkeiten zur Analyse physikalischer Wirkketten außerhalb des Serienentwicklungsprozesses. Aus der Analyse der Wirkkette sollen später Methoden zur Konzeptauslegung und Absicherung abgeleitet werden, welche für die effektivere Durchführung der Prozessschritte im Serienentwicklungsprozess benötigt werden.

Unter Berücksichtigung der in Kap. 2.1.3 und 2.1.4 beschriebenen Randbedingungen und den hier genannten Zusammenhängen lassen sich jetzt zwei zentrale Handlungsgebiete ableiten, in denen Methoden und Werkzeuge benötigt werden.

- Steigerung von Effektivität und Qualität in Prozessschritten für bekannte Wirkketten.
- Zuwachs an Systemverständnis durch Analyse unbekannter Wirkketten.

Beide Handlungsgebiete werden für die Gestaltung des Versuchsfeldes zum Teil gegensätzliche Anforderungen liefern. Um einen Zielkonflikt zu vermeiden, müssen diese in einer Synthese (vgl. Kap. 4.3.2) betrachtet werden.

Steigerung von Effektivität und Qualität in Prozessschritten für bekannte Wirkketten

Aus heutiger Sicht eignen sich besonders Methoden und Werkzeuge mit einem hohen simulativen Anteil für diese Anforderungen. DEUSCHL ([95]) benennt dafür ein Szenario „Fortgeschrittene Simulation“, welches er als die mittelfristig anzustrebende Kombination aus Simulations- und Versuchswerkzeugen bezeichnet. Diese eignet sich mit Blick auf die



Möglichkeiten und Interessen der Forschungseinrichtung gut für das weitere Vorgehen. In Abhängigkeit von der bereits bestehende Ausrüstung, welche bereits in Kap. 4.1.1 vorgestellt wurde und der fachlichen Spezialisierung in den Eigenschaftsbereichen werden später Anpassungen erfolgen.

Die Forschungseinrichtung wird im Fahrzeugentwicklungsprozess als externer Forschungsdienstleister auftreten. Sie wird besonders bei in sich abgeschlossen Teilprozessen zum Einsatz kommen und dort durch die Vorteile von Entwicklungsmethoden mit hohem simulativen Anteil Vorteile gegenüber interner Durchführung beim Fahrzeughersteller bieten. Der Teilprozess muss zunächst durch die stringente Definition von Prozessschnittstellen aus dem Gesamtprozess herauslösbar gemacht werden. (vgl. [29])

Soll der Anteil der virtuellen Entwicklung von Subsystemen und Baugruppen erhöht und damit der Gesamtaufwand reduziert werden, müssen vor allem Versuchsmethoden zur Parametrierung und Validierung bereitgestellt werden. Dazu sind Komponenten- und Teilsystemprüfstände erforderlich. Zur Parameteridentifikation an Komponenten sind möglichst einfache Versuchsaufbauten zu bevorzugen. Durch komplexe Versuchsanordnungen können unbeabsichtigt Effekte auftreten, welche das zu beobachtende Verhalten zur Identifikation einzelner Parameter verfälschen.

Die Validierung sollte dagegen möglichst unter realitätsnahen Randbedingungen erfolgen. Dazu muss der Prüfstand im besten Fall in der Lage sein, das Systemverhalten des Fahrzeuges bezüglich der jeweiligen Schnittstellen abzubilden. Ist dies nicht möglich, so sollten dessen Abweichungen hinreichend bekannt sein. Entsprechend der im Eigenschaftsfeld vorhandenen Wirkketten sind dafür bestehende Prüfstände auf ihre Eignung zu prüfen und entsprechend zu erweitern oder durch neue Systeme zu ersetzen. Es ist ein virtuelles Abbild der Prüfstände zu erstellen, welches das Systemverhalten der Prüfstände im Anwendungsbereich hinreichend genau beschreibt. Für die Untersuchung z.B. zum Übertragungsverhalten von Komponenten können durch die Integration virtueller Prüfstände auch die systemimmanenten Wechselwirkungen zwischen Prüfling und Prüfstand einbezogen werden, (vgl. SELL [130]). Darauf wird in Kap.4.4 noch genauer eingegangen.

Während der Konzeptentwicklung (vgl. Kap. 2.1) werden für die Beschreibung von Auslegungskorridoren oft Aussagen zum Systemverhalten einzelner Komponenten oder Subsysteme benötigt, die noch nicht entwickelt wurden und damit auch physisch noch nicht existieren. Dafür werden dann meist Subsysteme und Komponenten von Vorgängerfahr-



zeugen verwendet. Diese werden dann entsprechend der zu erwartenden Zielwerte für das neu zu entwickelnde Fahrzeug anders identifiziert. Dafür sollte im Versuchsfeld die Möglichkeit zum Austausch von realen durch virtuelle Komponenten geschaffen werden. Dies kann auf Komponenten- und Subsystemebene durch die Schaffung von Versuchsbedingungen erfolgen, welche die Integration realer Hardware in Iterationsschleifen der numerischen Simulation, s.g. Hardware-In-the-Loop Anwendungen (HiL) erlauben. BRAUNER und HEPPNER ([137]) geben dazu einen Einblick in die Praxis und leiten weitere Anforderungen ab.

Auch für die funktionale Absicherung werden diese Möglichkeiten benötigt. So können zum Beispiel Funktionen und Eigenschaften von Komponenten und Subsystemen bereits unter realitätsnahen Fahrzeugeinbaubedingungen untersucht werden, wenn diese durch eine XiL-Umgebung bereitgestellt werden. Daraus ergeben sich zwei Anforderungen für die Gestaltung der Produktentwicklung:

- Austauschbarkeit vom virtuellen und realen Bauteile
- Integration virtueller Prüfstände.

Zuwachs an Systemverständnis durch Analyse unbekannter Wirkketten

Als zweites Handlungsgebiet für die Forschungseinrichtung wurde die Unterstützung der Fahrzeugentwicklung durch Forschungsarbeiten identifiziert, welche dem Zuwachs an Systemverständnis dienen und damit die Grundlagen für die Vorentwicklung und Konzeptentwicklung liefern. Dabei werden komplexe, funktionale Zusammenhänge im Kraftfahrzeug, sowie deren Wechselwirkungen mit dem Fahrer und der das Fahrzeug umgebenden Umwelt (vgl. Kap. 2.1.1 „Wirkkettenanalyse“) untersucht. Hier steht vor allen die Erhöhung der Prognosefähigkeit auf Subsystem- und Komponentenebene im Vordergrund. In Abb. 4.6 ist dazu eine Vorgehensweise skizziert, die es erlauben soll, bereits qualitativ beschriebene physikalische Wirkketten zu quantifizieren.

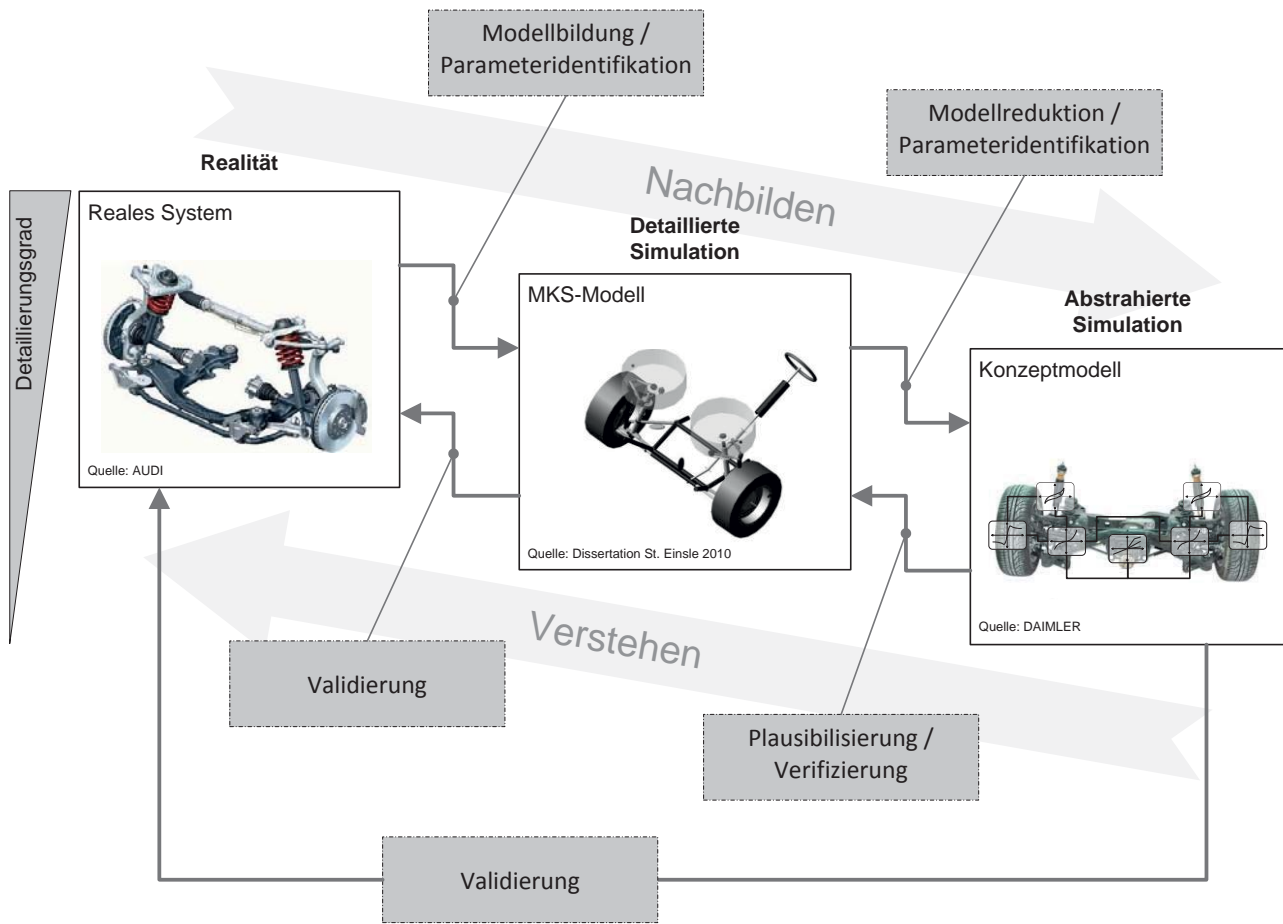


Abb. 4.6 Vorgehensweise zur systematischen Analyse physikalischer Wirkketten

Die Wirkkettenanalyse wird hier an real existierenden Fahrzeugen durchgeführt. Ausgangspunkt für dieses Vorgehen ist die detaillierte Beobachtung des Systemverhaltens am realen System. Das Phänomen wird anhand physikalischer Messgrößen beschrieben. Dazu werden Fahrversuche, Gesamtfahrzeug- und Teilsystemprüfstände eingesetzt. Ziel ist es, ein möglichst realitätsnahes, reproduzierbares Belastungsszenario bereitzustellen. Dafür eignen sich besonders HiL-Ansätze auf komplexeren Prüfstandsystemen, die reale Fahrmanöver gut nachbilden können. In Kap. 4.4 wird die Entwicklung eines solchen Prüfstandes beschrieben. Ein nächster Schritt ist die Modellbildung. Zunächst werden hier Teilmodelle von Komponenten oder Subsystemen mit einem hohen Detaillierungsgrad erstellt. Dafür sind einfache, flexibel einsetzbare Versuchssysteme erforderlich, um einen durchgängigen Parametrierungsprozess zu gewährleisten. Die Validierung der Teilmodelle erfolgt an komplexen Gesamtfahrzeug- und Subsystemprüfständen oder im Fahrversuch.



Nach erfolgreicher Modellvalidierung wird das Teilmodell soweit reduziert, dass die Modellgültigkeit zum jeweiligen Untersuchungsgebiet erhalten bleibt, der Parametrierungsaufwand jedoch deutlich sinkt. Das Übertragungsverhalten der Komponente oder des Subsystems ist unter vorgegebenen Radbedingungen mit einem Konzeptmodell beschreibbar. Danach werden Wechselwirkungen zwischen mehreren Subsystemen und schließlich im Gesamtfahrzeug ermittelt. Zur Darstellung tatsächlicher physikalischer Wirkketten muss dieser Prozess in beide Richtungen durchführbar sein. Die Wirkung des Bauteilverhaltens auf das Systemverhalten muss ebenso berechenbar sein wie die Schnittgrößen und Zwänge, welche sich aus dem jeweiligen Systemzustand für das Bauteil als Eingangsgröße ergeben.

Experimentell lässt sich jedoch dieser Prozess noch unzureichend oder nur mit erheblichen Einschränkungen und Veränderungen in der mechanischen Struktur des Systems darstellen. Abhilfe soll hier zukünftig die Berücksichtigung der Systemeigenschaften des jeweiligen Prüfstandes in virtuellen Modellen erbringen, welche später mit dem virtuellen Prüfling gekoppelt werden. So können Untersuchungen unter bekannten Wechselwirkungen zwischen Prüfling und Prüfstand durchgeführt werden.

4.2.3 Anforderungen Eigenschaftsfeld „Fahrdynamik“

Die Entwicklungsaufgaben im Eigenschaftsfeld „Fahrdynamik“ beziehen sich aufgrund der subsystemübergreifenden Wirkketten in der Regel auf das Gesamtfahrzeug. Die Ableitung von Entwicklungszielen im Bereich Fahrdynamik erfolgt bei den meisten Automobilherstellern auf der Basis von Vorgängerfahrzeugen oder Fahrzeugen von Mitbewerbern. Wie auch im Bereich Schwingungskomfort (vgl. Kap. 4.2.4) stehen also Aufgaben zur Objektivierung von subjektiv wahrnehmbaren Eindrücken im Fahrzeug am Anfang des Entwicklungsprozesses. Dazu kann bereits an dieser Stelle die Erforderlichkeit von Versuchsstrecken zur Durchführung fahrdynamischer Manöver festgestellt werden. Für die folgende Entwicklung nutzbare physische Prototypen liegen in der Regel zu Beginn des Entwicklungsprozesses noch nicht vor. Dies hat zur Folge, dass ein großer Teil der Entwicklungsarbeit in diesem Eigenschaftsfeld durch simulative Werkzeuge abzudecken ist.

In beiden Fällen werden Prüfmethode in Verbindung mit Simulationswerkzeugen eingesetzt, um funktionale Abhängigkeiten im Fahrzeug zu identifizieren und diese an einfachen Ersatzmodellen studieren zu können. Für die Erstellung dieser Ersatzmodelle ist ein stark



iterativer Prozess erforderlich, der bereits in Kap. 4.2.2 anhand von Abb. 4.6 erläutert wurde. Daran kann abgeleitet werden, dass die Anforderungen an ein Versuchsfeld, welche die Konzeptentwicklungsphase des FEP betreffen, vordergründig aus den Aufgabenbereichen Parameteridentifikation und Modellvalidierung hervorgehen. Die Modellidentifikation beginnt jedoch auf Gesamtfahrzeugebene im Fahrversuch. Dazu werden die Fahrzeuge mit mobiler Messtechnik ausgerüstet und charakteristischen Fahrmanövern unterzogen. Dazu übliche Beurteilungsgrößen sind zum Beispiel der Lenkwinkelbedarf, das Wankverhalten, die Stabilität oder der Frequenzgang des Fahrzeuges. Anhand dieser Größen können grundlegende Eigenschaften des jeweiligen Fahrzeuges beschrieben werden. Für ausgewählte Fahrzeuge, s.g. Zielfahrzeuge, wird dann ein detaillierter Vergleich zur Ermittlung technologischer Maßstäbe (im internationalen Sprachgebrauch Benchmark genannt) auf verschiedenen Ebenen durchgeführt. Dabei werden auch Modelle vom Gesamtfahrzeug und dessen Subsystemen in variabler Detaillierung erstellt, um so das physikalische Verständnis der Fahrzeugeigenschaften zu verbessern. Für die Parametrierung dieser Modelle sind Gesamtfahrzeugprüfstände erforderlich, die zum Beispiel Massen- und Trägheitsparameter des Fahrzeuges oder die kinematischen und elastokinematischen Kenngrößen des Fahrwerkes ermitteln können. Weiterhin sind Prüfstände notwendig, die einzelne Komponenten, welchen eine besondere Bedeutung in der Wirkkette zukommt, detailliert untersuchen können. Dies sind in der Fahrdynamik vor allem Reifen- und Elastomerlagerprüfstände. Daneben werden im Bereich Fahrdynamik für die Absicherung auf Subsystemebene auch Prüfstände eingesetzt. Hier werden zum Beispiel funktionale Eigenschaften von Lenksystemen und kompletten Achskörpern untersucht. Außerdem werden auch für die Absicherung von Fahrwerksregelsystemen verstärkt Prüfstände eingesetzt, da hier einzelne synthetische Prüfstandmanöver bereits eine hohe Aussagequalität liefern können. Sowohl in der Konzept- als auch in der Absicherungsphase werden Prüfstände verwendet, die eine hohe Systemtransparenz zulassen. Dazu müssen die Prüfstände über Möglichkeiten zum flexiblen Einsatz von Messtechnik über die Regelungsaufgaben des Prüfstandes hinaus verfügen.



Untersuchungsgebiet / Phänomenologie	Charakteristische Manöver	
	Fahrversuch	Prüfstandversuch
Modellbildung / Zielgrößenableitung und Absicherung		
<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von Ersatzmodellen für Fahrdynamische Grundauslegung und Ableitung von Detailmodellen für die Subsystementwicklung • z.B. Wankverhalten, Stabilität, Anlenkverhalten, • Open-Loop-Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrprofil Handlingkurs - Spurwechsel - Fishhook - Wedeltest - Sinuslenken - Stationäre Kreisfahrt 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesamtfahrzeug: Kinematics & Compliance - Reifen: Scheitelrolle - Rad und Achse auf Flachbahn oder Scheitelrolle - Aufbaudämpfer: statische und dynamische Belastung - Elastomerlager: mehrachsige statische und dynamische Belastung
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Übertragungsglieder</u>: Rad-Reifen / Fahrwerksbauteile Vorderachse (Lenker, Elastomerlager, Gelenke) / Lenkung / Karosserie / Hinterachse 		
Abgeleitete Anforderungen:		
Fahrversuch:		
<ul style="list-style-type: none"> - Handling Kurs, Fahrdynamikfläche 		
Prüfstandversuch		
<ul style="list-style-type: none"> - Dynamischer KnC-Prüfstand (Gesamtfahrzeug) - Schwerpunkt- und Trägheitsmomentenprüfstand (Gesamtfahrzeug) - Rad-Achsprüfstand mit Fahrzeugbewegung (Subsystem Achse) - Reifenprüfstand Flachbahn und Scheitelrolle (Komponente Reifen) - Elastomerlagerprüfstand (Komponente Elastomerlager) - Lenkungsprüfstand (Subsystem Lenkung) - Hydropulsprüfstand (Komponenten Rad-Reifen stehend, Aufbaufeder, Aufbauschwingungsdämpfer) - <u>Spezifika</u>: Phasenrichtige Regelung von Kraft- und Weggrößen an allen Prüfständen 		
Simulation		
<ul style="list-style-type: none"> - Mehrkörpersimulation - Kennlinienmodelle - Gekoppelte Simulation - Hardware in the Loop 		

Tab. 4.4 Methoden Bedarf im Bereich Fahrdynamik



Weitere Untersuchungsbereiche sind den Literaturstellen [46], [88], [102], [106] und [117] zu entnehmen.

4.2.4 Anforderungen Eigenschaftsfeld „Schwingungskomfort“

Das Eigenschaftsfeld Schwingungskomfort umfasst ein deutlich größeres Untersuchungsspektrum als die anderen beiden hier adressierten Eigenschaftsfelder. Wird eine Gliederung nach Frequenzbereichen eingeführt, so kann die Anzahl der Untersuchungsbereiche mit dem untersuchungsrelevanten Frequenzspektrum theoretisch beliebig bis zu den Grenzen der menschlichen Wahrnehmbarkeit (vgl. [82] und [188]) erweitert werden. Hinzu kommt die Vielfalt der Erregungsmechanismen für Schwingungen im Fahrzeug. Sollten alle Untersuchungsbereiche des Schwingungskomforts abgedeckt werden, zöge diese Vielschichtigkeit eine im Rahmen eines Versuchszentrums für eine Forschungseinrichtung nicht zu bewältigende Fülle an Anforderungen nach sich. Aus diesem Grund werden hier thematische Einschränkungen getroffen, die sich aus den individuellen Interessen der Forschungseinrichtung ergeben. Das Eigenschaftsfeld wird auf die Bereiche *Fahrkomfort* und *Vibroakustik* aufgeteilt. In der Literatur werden unter dem Begriff NVH auch einige Aspekte des Fahrkomforts zusammengefasst. In diesen Bereichen werden wiederum nur ausgewählte Teilgebiete abgedeckt.

Für die Konzeptentwicklung werden für beide o.g. Bereiche ebenso wie in der Fahrdynamik verstärkt simulative Werkzeuge zur Positionierung des Fahrzeuges im Markt eingesetzt (vgl. [73]). Dies zieht den schon in Kap. 4.2.3 beschriebenen Bedarf an Versuchseinrichtungen für die Modellbildung und Parameteridentifikation nach sich. Für die Ermittlung konkreter Anforderungen eignet sich die qualitative Beschreibung von Wirkketten im Fahrzeug. Dazu bietet die von ZELLER ([93]) durchgeführte und auch in [73] weiterverfolgte Betrachtung der Schwingungsphänomene im Kraftfahrzeug einen umfassenden Fundus als Grundlage für die Anforderungsableitung. In Anlehnung daran wird hier die Unterteilung in raderregte, fahrbahnerregte und antriebsstrangerregte Schwingungsphänomene eingeführt. Die Gesamtheit der Schwingungsphänomene lässt sich wiederum anhand ihrer Charakteristika in Frequenzbereiche unterteilen. Abb. 4.7 zeigt eine Auswahl an Schwingungsphänomenen mit der entsprechenden Zuordnung.

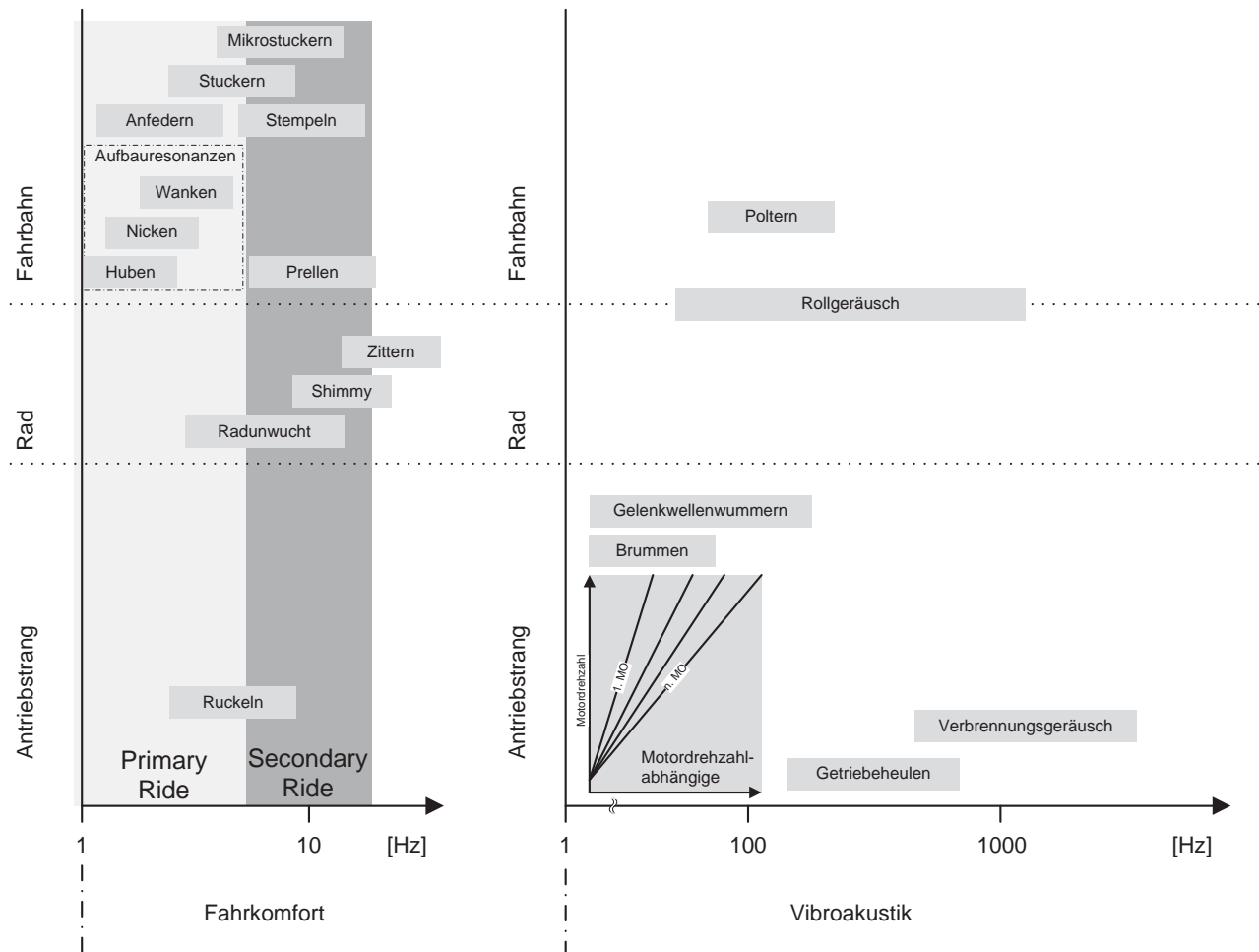


Abb. 4.7 Einordnung von Schwingungsphänomenen

Im niederfrequenten Bereich sind vor allen Eigenschaften des *Fahrkomforts* von Bedeutung. Für Untersuchungen im s.g. Primary Ride bis etwa fünf Hertz entspricht die Vorgehensweise im Wesentlichen der der Fahrdynamik. Ein großer Anteil der Eigenschaftsidentifikation findet im Fahrversuch statt. Zusätzlich werden Gesamtfahrzeugprüfstände benötigt, welche die Identifikation des Aufbauschwingungsverhaltens zulassen. Für den Secondary Ride bis etwa 20 Hz können neben dem Fahrversuch bereits Subsystemprüfstände für Abschnitte der Wirkketten zum Einsatz kommen. Instrumentelle Kenngrößen zur Beurteilung der Fahrzeugeigenschaften in beiden Bereichen sind hier z.B. der Anfahrwinkel, die Kopfbeschleunigung, die K-bewertete Schwingstärke (vgl. [188]), oder Beschleunigungen an anderen Stellen wie Lenkrad oder Sitzschiene. Der Einsatz von Prüfständen für die Absicherung im Bereich Fahrkomfort ist mit dem Vorgehen der Haltbarkeitsanalyse (vgl. Kap. 4.3.5) vergleichbar.



Der Bereich „*Vibroakustik*“ umfasst höherfrequente Schwingungsphänomene ab etwa 20 Hz. Die Ableitung von instrumentellen Kenngrößen am Anfang des Entwicklungsprozesses erfolgt ebenfalls stark simulationsbasiert und beginnt allgemein mit Experteneinschätzungen. Diese sind zum Beispiel der Luftschallpegel am Fahrerohr oder Beschleunigungen an diversen Indikatorstellen. Zur Quantifizierung der Kenngrößen sind hier ebenfalls Gesamtfahrzeugprüfstände entsprechend der in einer qualitativen Wirkkettenbeschreibung identifizierten Erregungsmechanismen (vgl. Abb. 4.7) erforderlich. Die Entwicklung und Absicherung von Komponenten- und Subsystemeigenschaften kann bei geeigneter Schnittstellendefinition mit dem Einsatz von Subsystemprüfständen durchgeführt werden. In der Vibroakustik bestehen jedoch sehr komplexe Wechselwirkungen zwischen einzelnen Kenngrößen. Daraus leitet sich das Bestreben nach detailliertem Wirkkettenverständnis ab, um so bereits in der frühen Konzeptphase Auslegungskorridore bestimmen zu können. Im heutigen Entwicklungsprozess treten einige Schwingungsphänomene oft erst in einem fortgeschrittenen Reifestadium auf. Sind die erforderlichen konstruktiven Variationsbereiche dann bereits durch andere Zielwerte aufgebraucht, kann die Erfüllung der Eigenschaft nur noch durch symptomatische Maßnahmen erreicht werden. Dies lässt auch die Absicherung des Eigenschaftskomplexes erst mit Prototypen höheren Reifegrades zu.

Eine scharfe Trennung der Bereiche ist für die versuchstechnische Umsetzung jedoch nicht sinnvoll. So können niederfrequente Schwingungsphänomene in Kombination mit transienten Vorgängen Auslöser für höherfrequente Schwingungsphänomene sein. Zudem existieren zahlreiche Verbindungen und Abhängigkeiten auf Übertragungspfaden im Fahrzeug.



Untersuchungsgebiet / Phänomenologie	Charakteristische Manöver	
	Fahrversuch	Prüfstandversuch
Fahrkomfort		
(Primary Ride / Secondary Ride)		
<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von Ersatzmodellen für Grundauslegung von Fahrkomforteigenschaften und Ableitung von Detailmodellen für die Subsystementwicklung • z.B. Anfahrbewegung, Aufbauresonanzen und –isolation, Nickverhalten, Wankverhalten, Karosserieschwingungen • Open-Loop-Anwendung • Closed-Loop-Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> - Stochastisches Fahr- bahnprofil - Anfahren - Lastwechsel - Überfahrt Einzelhinder- nis - Harmonisches Fahr- bahnprofil 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesamtfahrzeug: Kine- matics & Compliance - Reifen: Scheitelrolle mit Schlagleiste - Rad und Achse auf Flachbahn oder Scheitel- rolle - Aufbaudämpfer: statische und dynamische Weg- Anregung - Elastomerlager: mehr- achsige statische und dy- namische Belastung
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Übertragungsglieder</u>: Rad-Reifen / Fahrwerksbauteile Vorderachse und Hinterachse (Lenker, Elastomerlager, Gelenke) / Lenkung / Antriebsstrang / Karosserie / Interieur 		
Vibroakustik		
Raderregte Phänomene		
<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung von Betriebspunkten, physikalische Beschreibung, Parameteridentifikation • z.B. Achsstempeln, Wheel Hop, Transferpfadanalyse • Open-Loop-Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> - Anfahren, Bremsen (Handlingkurs) - Knallstart 	<ul style="list-style-type: none"> - Reifen: Scheitelrolle - Achse: Rad und Achse auf Flachbahn oder Scheitelrolle - Antriebsstrang: Anfahren mit Reifenschlupfsimula- tion - Elastomerlager: mehr- achsige statische und dy- namische Belastung
Fahrbahnerregte Phänomene		
<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung von Betriebspunkten, physikalische Beschreibung, Parameteridentifikation • Ermittlung des Übertragungsverhaltens und Transferpfadanalyse 	<ul style="list-style-type: none"> - Überfahrt Einzelhinder- nis - Sinus-Fahrbahn - Stochastische Fahr- bahn 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesamtfahrzeug: dyna- mische Kinematics & Compliance Untersu- chung - Reifen: Scheitelrolle mit Schlagleiste - Achse: radnabengebun-



- dener Straßensimulator
- Achse: Rad und Achse auf Flachbahn oder Scheitelrolle
- Gesamtfahrzeug auf Rollenprüfstand mit Fahrbahnoberflächenprofil

- Übertragungsglieder: Rad-Reifen / Fahrwerksbauteile (Lenker, Elastomerlager, Gelenke) / Lenkung / Antriebsstrang / Karosserie / Interieur

Antriebsstrangerregte Phänomene

- Ermittlung von Betriebspunkten, physikalische Beschreibung, Parameteridentifikation
 - Anfahren / Lastwechsel
 - Gangwechsel
 - Sinus-Fahrbahn
 - Reifen: Scheitelrolle mit verschiedenen Oberflächen
- Ermittlung des Übertragungsverhaltens und Transferpfadanalyse
 - Stochastische Fahrbahn
 - Antriebsstrang: Anfahren / Lastwechsel mit Reifenschlupfsimulation
- Übertragungsglieder: Antriebsaggregat / ZMS / Kupplung / Wandler / Getriebe / Gelenkwelle / Seitenwellen / Fahrwerksbauteile (Lenker, Elastomerlager, Gelenke) / Lenkung / Antriebsstrang / Rad-Reifen / Karosserie / Interieur

Abgeleitete Anforderungen:

Fahrversuch:

- Fahrbahnen mit verschiedener Oberflächenbeschaffenheit (stochastisches Profil), Fahrdynamikfläche, Sinusbahn, Fahrwege mit Einzelhindernissen und harmonischer Erregung, Handlingkurs

Prüfstandversuch

- 4-Stempelanlage (Gesamtfahrzeug)
 - Dynamischer 4-Rollen-Prüfstand (Gesamtfahrzeug)
 - Dynamischer KnC-Prüfstand (Gesamtfahrzeug)
 - Schwerpunkt- und Trägheitsmomentenprüfstand (Gesamtfahrzeug)
 - Rad-Achs-Prüfstand mit Fahrzeugbewegung (Subsystem Achse)
 - Radnabengebundener Straßensimulator-Prüfstand (Subsystem Achse)
 - Lenkungsprüfstand (Subsystem Lenkung)
 - Hochdynamischer Antriebsstrangprüfstand (Subsystem Antriebsstrang)
 - Modalanalyse-Prüffeld (Subsystem Karosserie, Reifen, div. Fahrwerk- und Antriebkomponenten)
 - Reifenprüfstand Flachbahn und Scheitelrolle (Komponente Reifen)
 - Elastomerlagerprüfstand (Komponente Elastomerlager)
 - Servohydraulisches Multifunktionsprüffeld (Komponenten/Subsysteme Lenker, Radträger, Streben. In- und Exterieurbaugruppen)
 - Hydropulsprüfstand (Komponenten Rad-Reifen stehend, Aufbaufeder, Aufbauschwingungsdämpfer)
 - Spezifika: Phasenrichtige Regelung von Kraft- und Weggrößen an allen Prüfständen
-



Simulation

- Finite-Elemente-Modelle z.B. zur Einbindung elastischer Strukturen in Mehrkörpermodelle
 - Mehrkörpersimulation
 - Kennlinienmodelle
 - Gekoppelte Simulation
 - Hardware in the Loop
-

Tab. 4.5 Methoden-Bedarf im Bereich Schwingungskomfort

Weitere Untersuchungsbereiche sind den Literaturstellen [76], [86] und [121] zu entnehmen.

4.2.5 Anforderungen Eigenschaftsfeld „Haltbarkeit und Lastdaten“

Das Eigenschaftsfeld *Haltbarkeit und Lastdaten* sollte für die Beschreibung der Anforderungen in eben diese beiden im Namen enthaltenen Bereiche unterteilt werden. Während die Lastdatenanalyse verstärkt im linken Ast des V-Modells für die Bestimmung von Bauteillasten Anwendung findet, sind Methoden zur Haltbarkeit eher zur Absicherung, d.h. im rechten Ast des V-Modells zu finden.

Ausgehend vom Fahrzeugkonzept, welches entsprechend der in Kap. 3.1.2 (V-Modell) beschriebenen Vorgehensweise mittels Markt-, Kunden- und Strategieranforderungsanalyse erstellt wurde, müssen nun Lastannahmen erstellt werden. Diese werden in die Bereiche Betriebslasten, Sonderereignisse und Missbrauchslasten unterteilt. Auch dieser Prozess findet vorrangig mit simulativen Werkzeugen statt. Wie auch in den beiden hier betrachteten Eigenschaftsfeldern (vgl. Kap. 4.2.3 und 4.2.4) sind experimentelle Methoden zur Parameteridentifikation und Modellvalidierung erforderlich. Bei der Lastdatenanalyse kann ein phänomenologisches Vorgehen angewendet werden. Viele Lasten treten als kombinierter Belastungszustand mehrerer einzelner Lastpfade auf. Für die Analyse werden zunächst iterativ im Fahrversuch auf Auslegungstrecken geeignete Fahrmanöver ermittelt. Die ermittelten Lasten stellen eine Referenz für die Bewertung der zukünftigen synthetischen Belastungsprofile dar. Anhand von Lastkennzahlen kann mit Hilfe messtechnisch gut zugänglicher Schnittgrößen, wie zum Beispiel Radnabenkräften, eine Bewertung vorgenommen werden. Die Identifikation der für die Beschreibung der Wirkkette oder des Lastpfades erforderlichen Größen bedarf gut reproduzierbarer, trivialer oder synthetischer Anregungen. Im Fahrversuch ist die Bereitstellung dieser Anregungen in ausrei-



chender Reproduzierbarkeit oft nicht möglich, sodass vor allem die quantitative Beschreibung der Lastpfade an Subsystemen auf Prüfständen fortgesetzt wird. Dieses Vorgehen bietet eine bessere messtechnische Zugänglichkeit zu Schnittgrößen im Subsystem. Dabei sollten die Subsystemprüfstände in der Lage sein, einen erweiterten Fahrzeugbereich um das Subsystem herum mit in die Übertragungskette einzubeziehen. Für die Ermittlung der detaillierten Bauteillasten sind Untersuchungen an der Komponente erforderlich. Die Lastdatenanalyse findet zu großen Teilen mit Unterstützung der Simulationen von Mehrkörper- und Finite-Elemente-Modellen statt. Dazu sind ebenfalls Modellparametrierungsvorgänge auf Subsystem- und vor allen auf Komponentenebene erforderlich. Zusammengefasst erfordert die Lastdatenanalyse Gesamtfahrzeug-, Subsystem- und Komponentenprüfstände mit der Möglichkeit, möglichst gut reproduzierbare Anregungen in den Prüfling einzuleiten.

Aussagen zur Haltbarkeit werden durch einen Absicherungsprozess beginnend auf der Bauteil- bis hin zur Gesamtfahrzeugebene gewonnen. Für die Absicherung von Missbrauchs- und Sonderereignislasten an Bauteilen werden meist einfache Prüfstände genutzt, um so zunächst die Sicherheit gegenüber der Hauptbelastung zu prüfen. Am Beispiel einer Zugstrebe mit Hydrolager wäre das die sichere Übertragung von Zug- und Druckkräften innerhalb der Strebe. Wenn dies sichergestellt ist, werden auch Nebenfunktionen abgesichert. Es werden Teile der Fahrzeugumgebung einbezogen und so realitätsnahe Umgebungsbedingungen vergleichbar mit den Einbau im Fahrzeug geschaffen. Dazu sind Subsystemprüfstände erforderlich, mit denen im Beispiel der Strebe die Verschraubungen und ggf. die Dichtigkeit des Hydrolagers geprüft werden. Für die Absicherung von Betriebslasten wird ein möglichst breites Lastspektrum benötigt. Auf Bauteilebene sind dazu aufwändige Prüfstände erforderlich, die in der Lage sind, den Einbauzustand möglichst realitätsnah abzubilden und durch Iterationsalgorithmen die im Fahrversuch ermittelten Lasten zu errechnen. Viele Absicherungsuntersuchungen können daher auch erst am Ende des Entwicklungsprozesses auf s.g. Erprobungsstrecken durchgeführt werden, wenn physische Prototypen des Fahrzeuges vorliegen. Es treten jedoch auch Schadensbilder auf, deren Ursachenforschung keiner breitbandigen Belastung bedarf. Für Komponenten mit einfach zu identifizierenden Belastungszuständen können ebenfalls Komponentenprüfstände zum Einsatz kommen. Als Beispiel sei hier das Ausknicken der Kolbenstange eines Aufbauschwingungsdämpfers unter einachsiger Belastung genannt.



Untersuchungsgebiet / Phänomenologie	Charakteristische Manöver	
	Fahrversuch	Prüfstandversuch
Lastpfadanalyse Achse		
<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung zur Übertragung von Betriebslasten von der Radaufstandsfläche über alle Fahrwerkskomponenten in den Fahrzeugaufbau, Ermittlung von Bauteillasten • z.B. Achsstempeln • Open-Loop-Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrprofil Handlingkurs - Überfahrt Einzelhörnernis - Schlechtwegstrecke - Notbremsung - Vollastbeschleunigung - Bordsteinrempeltest 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesamtfahrzeug auf Rollenprüfstand mit Fahrbahnoberflächenprofil - Achse ohne Rad: Weg-Zeit-Anregung an der Radnabe - Reifen: Schlagleiste auf Scheitelrolle - Rad und Achse auf Flachbahn oder Scheitelrolle
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Übertragungsglieder</u>: Rad-Reifen / Fahrwerksbauteile Vorderachse (Lenker, Elastomerlager, Gelenke) / Lenkung / Karosserie / Hinterachse 		
Haltbarkeit /		
Betriebslastennachfahrversuche		
<ul style="list-style-type: none"> • systematische Absicherung von Haupt- und Nebenlasten des Bauteils • Open-Loop-Anwendung und • Closed-Loop-Anwendung mit Lastiteration 	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrprofil Handlingkurs - Überfahrt Einzelhörnernis/Querrinne - Schlechtwegstrecke - Vollbremsung - Bordsteinrempeltest 	<ul style="list-style-type: none"> - Elastomerlager unter mehrdimensionaler mechanischer und thermischer Belastung - Achse ohne Rad: Weg-Zeit-Anregung an der Radnabe
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Übertragungsglieder</u>: Rad-Reifen / Fahrwerksbauteile Vorderachse (Lenker, Elastomerlager, Gelenke) / Lenkung / Karosserie / Hinterachse 		
Abgeleitete Anforderungen:		
Fahrversuch:		
<ul style="list-style-type: none"> - Handling Kurs, Schlaglochbahn, pos. und neg. Plattenstoß, Schlechtwegstrecke 		
Prüfstandversuch		
<ul style="list-style-type: none"> - Mehrdimensionale 4-Stempelanlage (Gesamtfahrzeug), - hochdynamischer Rollenprüfstand mit Anregungsprofilen oder Schlagleisten - Rad-Achsprüfstand mit Fahrzeugbewegung (Subsystem Achse) - Reifenprüfstand Flachbahn und Scheitelrolle (Komponente Reifen) - Radnabengebundener Straßensimulator-Prüfstand (Subsystem Achse) - Elastomerlagerprüfstand mit Temperaturkammer (Komponente Elastomerlager) - Lenkungsprüfstand (Subsystem Lenkung) - Hydropulsprüfstand (Komponenten Rad-Reifen stehend, Aufbaufeder, Aufbauschwungsdämpfer) 		



- Servohydraulisches Multifunktionsprüffeld (Komponenten/Subsysteme Lenker, Radträger, Streben. In- und Exterieurbaugruppen)
- Spezifika: Phasenrichtige Regelung von Kraft- und Weggrößen an allen Prüfständen und Iterationsverfahren für Betriebslastennachfahrversuche

Simulation

- Mehrkörpersimulation
- Finite-Elemente-Methode

Tab. 4.6 Methoden-Bedarf im Bereich Haltbarkeit und Lastdaten

4.2.6 Prozessspezifische Anforderungen

Neben den funktionalen Anforderungen an die einzelnen Prüfstände ergeben sich für das Versuchsfeld weitere Anforderungen aus den prüfstandspezifischen Betriebsprozessen und aus Verfahrensabläufen, welche sich über mehrere im Versuchsfeld befindliche Prüfstände erstrecken. Diese prozessspezifischen Anforderungen können anhand ihres Einflussbereiches unterschieden werden. Für die Strukturierung des Versuchszentrums müssen das Versuchsfeld betreffende *Makroprozesse* und die Prüfstände betreffende *Mikroprozesse* analysiert und in die Planung einbezogen werden. Durch die Analyse sollen Informationen zusammengetragen werden, die im weiteren Verlauf des Gesamtentwicklungsprozesses z.B. für die Anordnung der Prüfstände im Versuchsfeld, die Dimensionierung von Schnittstellen an den Prüfständen, die Erstellung von Sicherheitskonzepten oder die Auslegung der Energieinfrastruktur benötigt werden. Die Darstellung der Prozesse sollte dem Planungsstab in einer allgemeinverständlichen Form zugänglich gemacht werden. Bei komplexen Abläufen mit Kreisläufen und starker Vernetzung eignen sich Flussdiagramme besonders. Während die Darstellungen zu Makroprozessen in der frühen Phase der Gebäudeplanung (Vorplanung/Entwurfsplanung) benötigt werden, wird die Mehrzahl an Informationen aus der Mikroprozessanalyse erst zur Ausführungsplanung herangezogen. Dementsprechend sollten die Dokumentationen zu Prozessabläufen aus der Versuchsfeld- und der Prüfstandentwicklung auch entsprechend des Reifegrades aktualisiert werden. Für das vorliegende Projekt wurden verschiedene Prozessszenarien aufgestellt, welche unter den Aspekten Versuchsablauf, Reproduzierbarkeit, Handling des Prüflings, Arbeitssicherheit und Geheimhaltung analysiert wurden.

Ein *Makroprozess* ist hier ein Verfahren oder eine Prozedur, in welche mehrere Prüfstände oder Versuchseinrichtungen des Versuchsfeldes einbezogen sind. In Abb. 4.8 ist als Bei-



spiel der Prozessablauf für die prüfstandbasierte Modellbildung und Parameteridentifikation für die Fahrdynamikuntersuchungen dargestellt. Der Beginn des Prozessablaufes sieht dabei aus Gründen des Arbeitsschutzes und der Geheimhaltung eine vom Versuchsbe- reich getrennte Aufrüstzone für das zu untersuchende Fahrzeug vor. Die Gestaltung die- ser Aufrüstzone hängt von den darin ablaufenden Mikroprozessen ab und wird weiter un- ten noch beschrieben. Des Weiteren sind in der Prozesskette Gesamtfahrzeug-, Subsys- tem- und Komponentenprüfstände enthalten, die in einer bestimmten Abfolge und mit be- stimmten Umfängen des Prüflings verwendet werden. Daraus folgen Anforderungen an die Zugänglichkeit, die in Verkehrswegen berücksichtigt werden müssen. Der Prüfling wird während der Prozedur zerlegt und auf Subsystemprüfständen untersucht. Dies hat zur Folge, dass in den Versuchsbereich Möglichkeiten zur Demontage des Versuchsfahrzeu- ges integriert werden müssen.

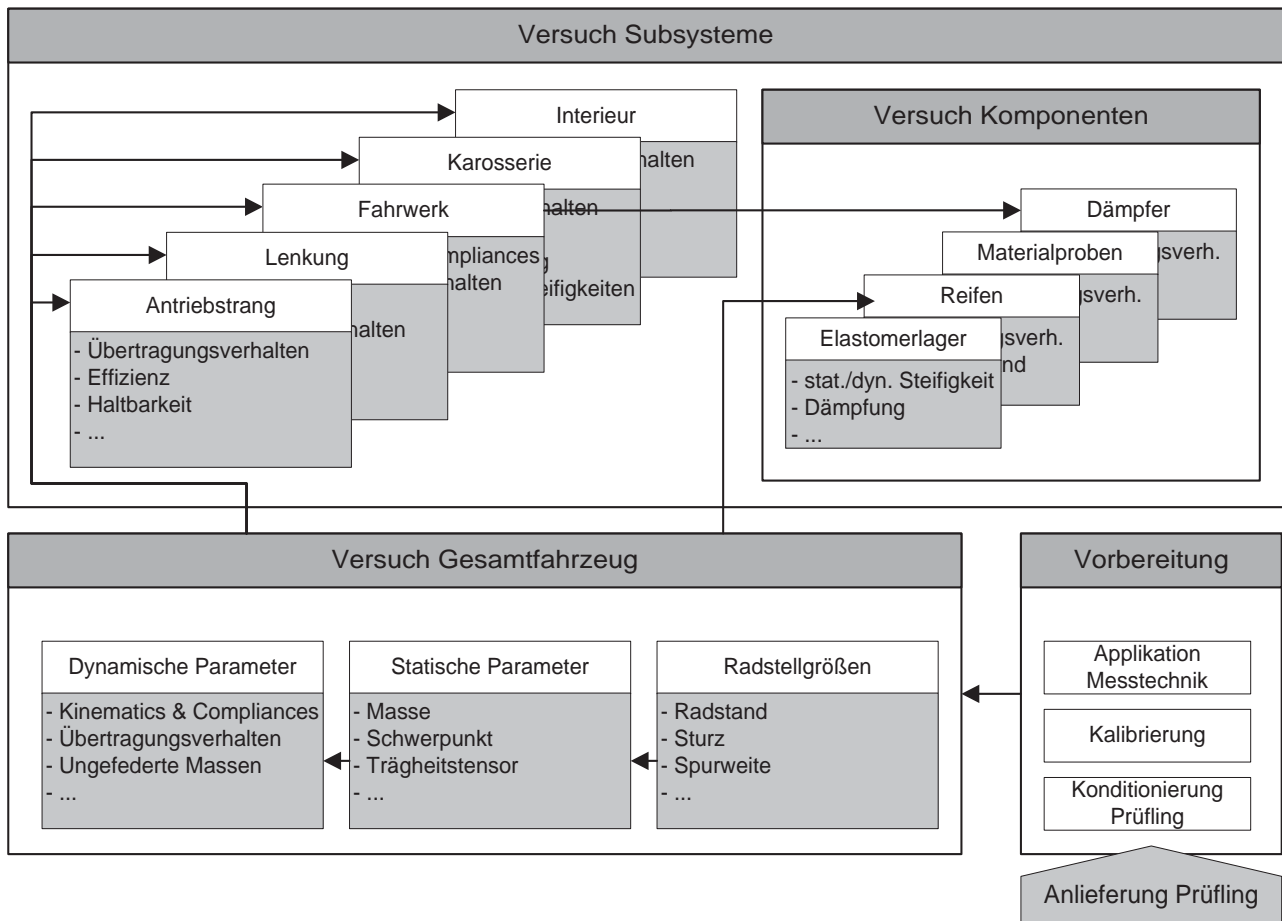


Abb. 4.8 Prozessablauf Makroprozess Bsp. Parameteridentifikation Fahrdynamikmodell



Als weitere Beispiele für Makroprozesse sind HiL-Anwendungen mit mehreren Prüfständen, aber auch größere Wartungsprozesse zu nennen.

Für den *Mikroprozess* wird in Abb. 4.9 ein verallgemeinertes Schema für Versuchsabläufe am Prüfstand gezeigt. Darin werden Stoff- und Informationsflüsse zwischen den Elementen des Prozesses gezeigt.

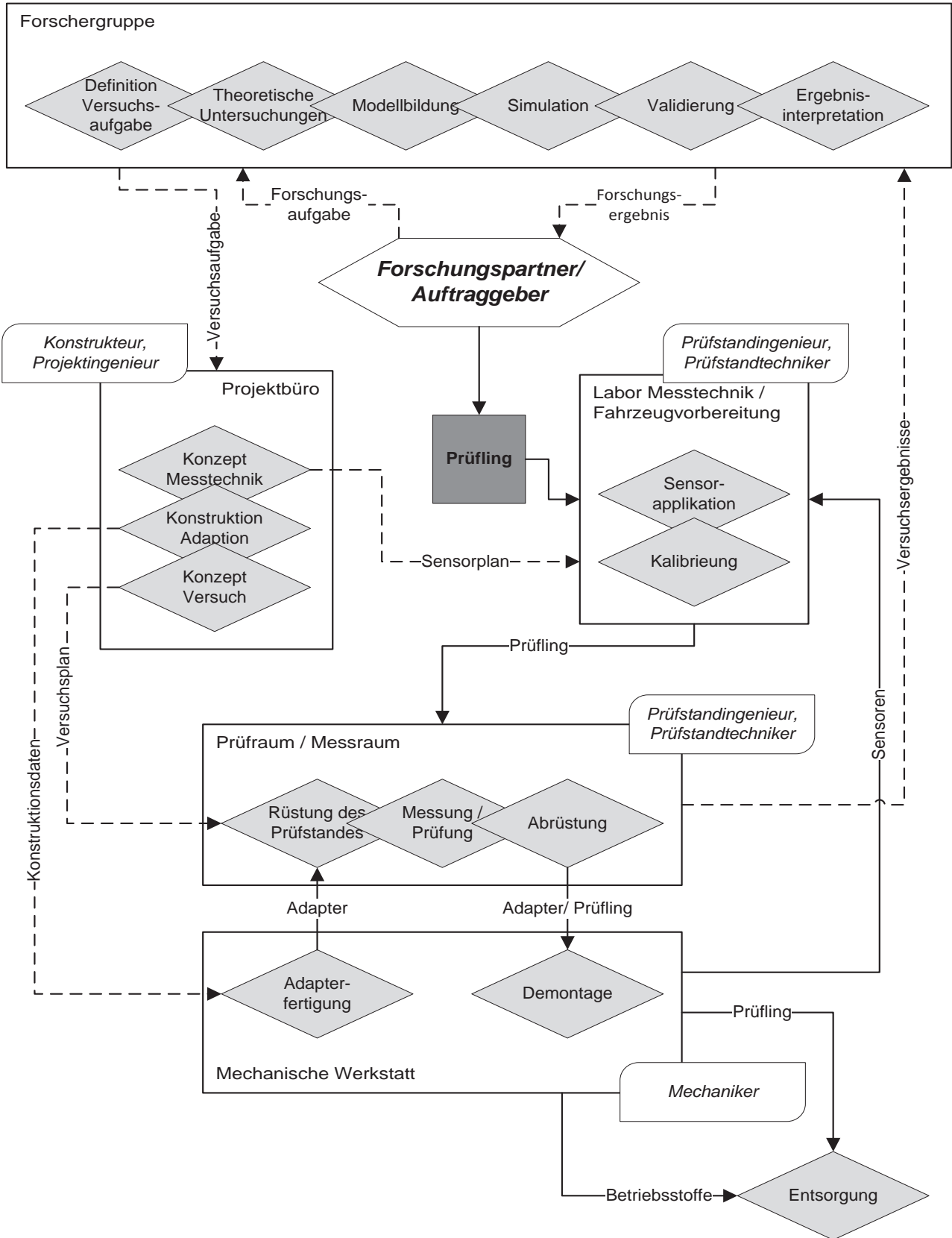


Abb. 4.9 Prozessablauf Mikroprozess verallgemeinert



Die Darstellung des Prozessablaufes muss für die weitere Verwendung im Entwicklungsprozess des Versuchsfeldes die folgenden Informationsebenen enthalten:

Der dargestellte Prozess enthält neben den Prozessschritten von der Auftragsannahme bis zur Durchführung der Prüf- oder Messaufgabe auch die Prozessschritte danach bis hin zur Entsorgung. Alle diese Schritte liefern den Fachplanern wichtige Informationen zum Betriebskonzept.

4.2.7 Fazit des Anforderungsprozesses

In Kap. 4.2.1 und 4.2.2 wurden Entwicklungsrichtungen und Trends für die Automobilindustrie beschrieben, die einen tatsächlichen Abschluss des Anforderungsprozesses nicht zulassen. Deshalb muss bei der nun folgenden Konzepterstellung des Versuchsfeldes und der Prüfstände mit besonderer Weitsicht geplant werden. Dies wird möglich, wenn erfahrene Planer und Fachexperten in den Entwicklungsprozess einbezogen werden. Diese verfügen über erfahrungsbasiertes Fachwissen, welches die Grundlage für viele fachliche Entscheidungen in einem komplexen technischen Kontext ist. So können erfahrene Fachplaner bereits anhand weniger Kenngrößen, wie Spitzenleistung und Gleichzeitigkeiten der Hauptverbraucher eine zuverlässige Abschätzung der zu installierenden Energieinfrastruktur ableiten.

Weiterhin ist in der Vorbereitung und im Verlauf der Planung die Marktbeobachtung durchzuführen. Im Kap. 2 (Stand der Technik) zu dieser Arbeit ist eine Auswahl repräsentativer Versuchszentren und Prüfstände zusammengetragen. Grundsätzlich sollten Versuchseinrichtungen im Umfeld von Forschung und Vorentwicklung so geplant werden, dass diese über die nötige funktionale Flexibilität verfügen, um sich an veränderliche Anforderungen anpassen zu können.

Für die hier gezeigte Systematik zum Entwurf eines Versuchsfeldes mit modellbasierten Methoden ist die Einführung von bewerteten Parameterintervallen in der Modellbildung hilfreich. Dadurch lassen sich zunächst unspezifische Größen in den Entwicklungsprozess einbeziehen und deren Sensitivität auf die Dimensionierung später beurteilen. Weiterhin können durch die Bewertung dieser Intervalle auch Wahrscheinlichkeiten mit einbezogen werden.



4.3 Konzepterstellung „Versuchsfeld“

In der Konzepterstellung „Versuchsfeld“ werden zunächst die bisher ermittelten Anforderungen aus Kap. 4.2 in konkrete Ziele für die Gestaltung des Versuchsfeldes überführt. Das Ergebnis der Konzepterstellung soll eine Struktur des Versuchsfeldes sein, in der bereits eine Einteilung in Prüfstände und deren Aufgabengebiete erfolgt ist. Wird das Versuchsfeld in diesem Zusammenhang als System mit den sich aus der Summe der Anforderungen ergeben Systemeigenschaften betrachtet, so ist jetzt die Festlegung der Subsysteme (Prüfstände) vorzunehmen.

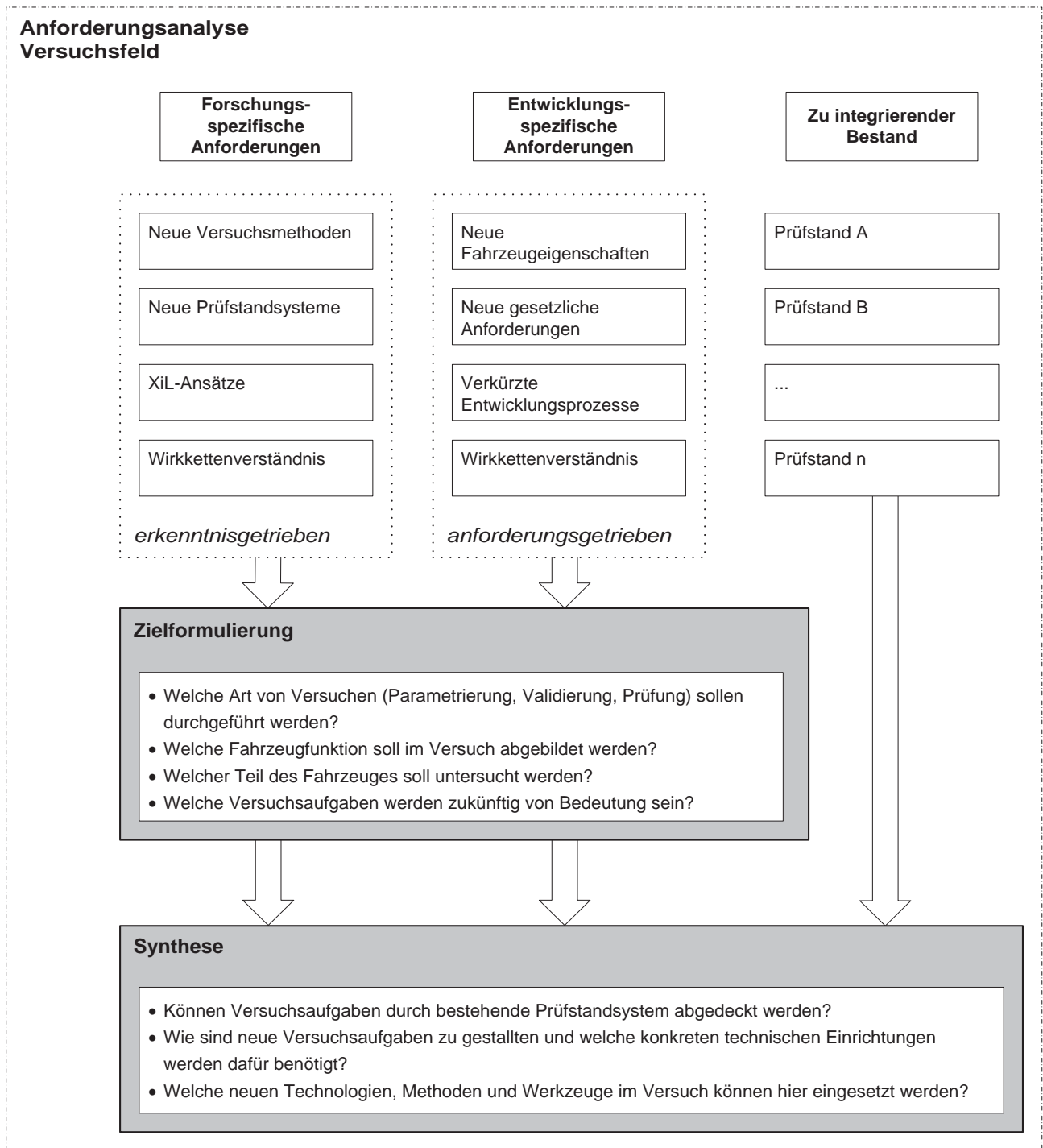


Abb. 4.10 Anforderungsanalyse für ein Versuchsfeld



4.3.1 Zielformulierung

Der Schritt der Zielformulierung erscheint zunächst formal und bei vorheriger gründlich durchgeführter Anforderungsanalyse überflüssig. Der Anforderungsprozess hat eine Vielzahl funktional unterschiedlicher Anforderungen an das Versuchsfeld hervorgebracht. Diese wurden in Kap. 4.2 hergeleitet. Alle diese Anforderungen wurden bisher als gleichrangig zusammengetragen. Wird diese Wichtung so beibehalten, besteht die Gefahr von Zielkonflikten bei der Umsetzung der festgelegten Vorgaben. Es besteht in der Projektvorbereitungsphase (Vorplanung) sowohl kapazitiv als auch fachlich nicht die Möglichkeit, jeden erdenklichen Zielkonflikt zu erkennen und gar in der Planung zu umgehen. Daher ist es zwingend erforderlich, eine Unterscheidung in der Bedeutung der Anforderungen vorzunehmen. Ferner ist in diesem Prozessschritt der Entwicklung eine Überprüfung der Vorgaben auf Präzision und Eindeutigkeit durchzuführen. Die Ableitung von Zielen kann durch die Aufstellung eines Zielkataloges erfolgen. Darin wird eine Unterscheidung in Muss-, Soll-, und Wunschziele vorgenommen. Unter Umständen kann dazu die Durchführung einer Bewertung der Anforderungen erforderlich sein. Dafür eignen sich verschiedene Bewertungsmethoden aus Kap. 3.1.3. Im vorliegenden Fall wurden die Anforderungen des Fahrzeugentwicklungsprozesses (FEP) für jedes Eigenschaftsfeld (vgl. Kap. 4.2.3 bis 4.2.5) mit den Kompetenzbereichen und den Interessen der Forschungseinrichtung verglichen. In Tab. 4.7 ist ein schematischer Zielkatalog mit Angaben zur Priorisierung dargestellt.

Eigenschaftsfeld: *Haltbarkeit und Lastdaten*

Zielklasse	Beschreibung	Wert	Priorität
Prüfling A	Gesamtfahrzeug		
Fahrzeugklassen	Kleinstwagen bis Oberklasse		M
	Leichttransporter		S
Fahrzeuggewicht	Leergewicht	3500 kg	M
		5000 kg	W
<i>weitere Zielformulierungen</i>	...		
Prüfling B	Subsysteme		
Achse	alle üblichen AchsbaufORMen einschl. LCV		M
	angetriebene Achsen		M
	Achsen für HEV/BEV		S
	Achsen für schwere Nfz.		W



Zielklasse	Beschreibung	Wert	Priorität
Lenkung	alle üblichen Bauformen einschl. LCV und Nfz.		M
<i>weitere Zielformulierungen</i>	...		
Funktionalität			
Allgemein	Abbildung von trivialen, synthetischen Manövern bis hin zu realitätsnahen Gesamtfahrzeugmanövern unter Laborbedingungen		M
Versuchsart	Parametrierungsmessung		M
	Validierungsmessung		M
	Lebensdauerprüfung		M
Lastbereiche	Betriebslasten		M
	Sonderereignisse		S
	Missbrauch		W
Charakteristische Fahrmanöver	Kantenüberfahrt		M
	Schlaglochtest		S
<i>weitere Zielformulierungen</i>	...		
Betriebszeiten			
Dauerlauf	Testzeiten	24 h	M
		48 h	M
<i>weitere Zielformulierungen</i>	...		
Gleichzeitigkeiten			
	ein Gesamtfahrzeugprüfstand		M
	mehrere Gesamtfahrzeugprüfstände		S
	mehrere Subsystemprüfstände		M
	mehrere Komponentenprüfstände		M
<i>weitere Zielformulierungen</i>	...		
Legende:	M ...Muss, S ...Soll, W ...Wunsch		

Tab. 4.7 Zielkatalog (schematisch)

Nachdem alle Ziele aus den Eigenschaftsbereichen formuliert sind, müssen die Ziele untereinander auf Schnittmengen und Zielkonflikte untersucht werden. Dazu kann erneut die Zielrelationsmatrix verwendet werden. Dieser Schritt schränkt den Aufwand der Lösungssuche ein und unterstützt die Funktionsintegration der Prüfstände für mehrere Eigenschaftsbereiche des Fahrzeugentwicklungsprozesses.



4.3.2 Synthese und Lösungsanalyse

Die Beschreibung der Ausgangssituation (vgl. Kap. 4.1) liefert die wesentlichen Informationen zu Problemfeldern und den erwarteten Chancen für die Forschungseinrichtung. Nachdem auch die Anforderungen der Eigenschaftsbereiche gewichtet und daraus Zielformulierungen abgeleitet wurden, kann mit der Lösungssuche für die Konzeption des Versuchsfeldes begonnen werden. Die Lösungssuche wird durch die Ableitung von Prüfstandmanövern aus Fahrmanövern vorbereitet. In Abb. 4.11 wird das Vorgehen schematisch skizziert.

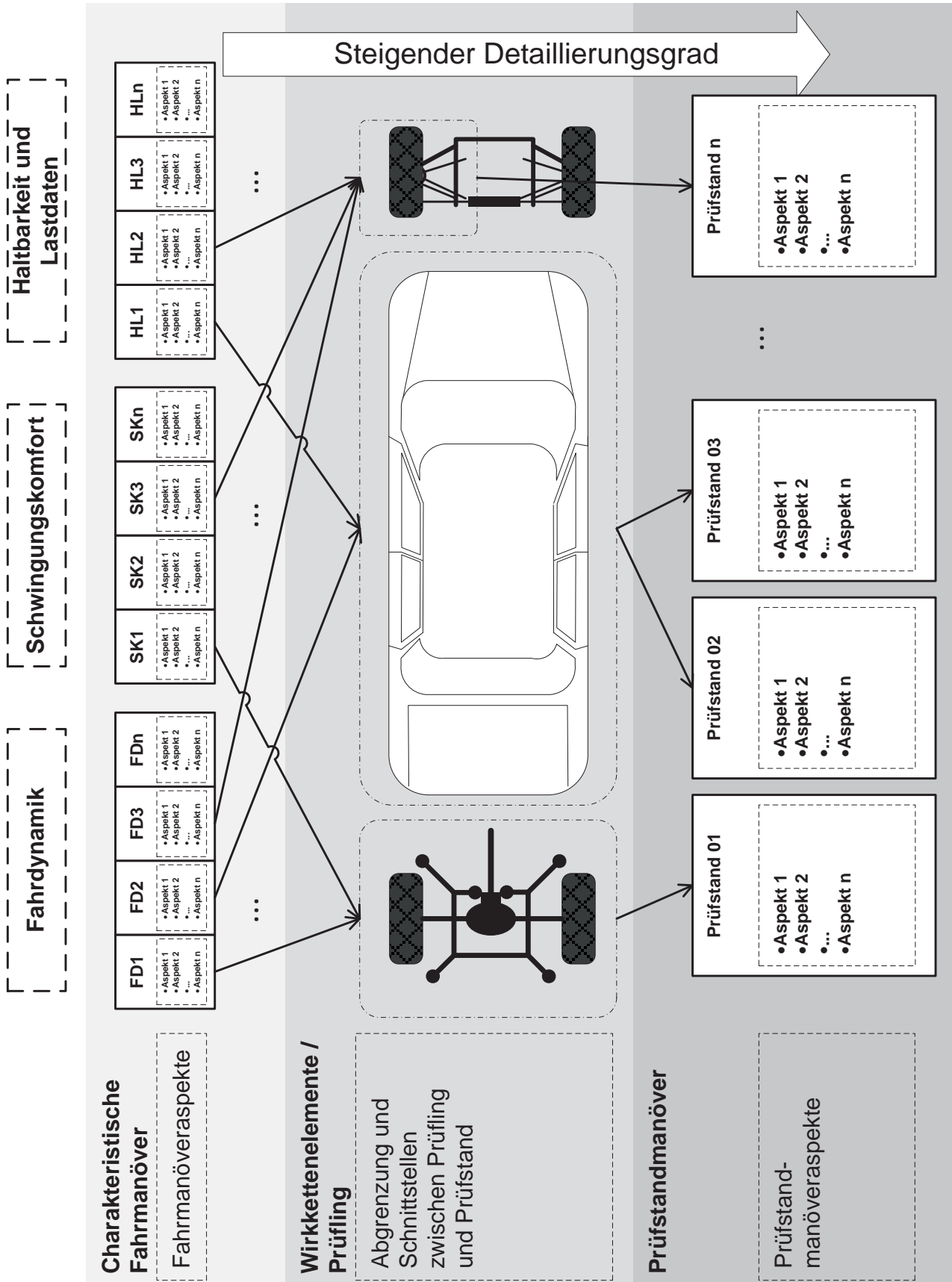


Abb. 4.11 Ablauf Konzeptentwicklung "Versuchsfeld"



Die Fahrmanöver werden mittels Fahrmanöveraspekten genauer beschrieben. Die Beschreibung erfolgt anhand konkreter physikalischer Werte auf Gesamtfahrzeugebene und ist für eine Auswahl an Fahrmanövern in Tab. 4.8 dargestellt. Die Fahrmanöver werden später noch einmal in der Anforderungsdefinition für die Prüfstände in Kap. 4.4.1 herangezogen. Im nächsten Schritt wird der Prüfling spezifiziert. Dazu wird anhand der in Kap. 4.3.1 festgelegten Einschränkungen bestimmt, welcher Teil des Fahrzeuges am Prüfstand untersucht werden soll und welche physischen Schnittstellen zwischen Prüfling und Prüfstand bereitgestellt werden müssen. Diese Informationen lassen sich aus der qualitativen Wirkkettenbeschreibung oder, sofern vorhanden, aus konkreten Anforderungen für zum Beispiel Homologationsmessungen zur Bauteilfreigabe ableiten. Bevor die Lösungsvarianten für die Strukturierung des Versuchsfeldes erarbeitet werden können, ist eine Markt- und Patentrecherche durchzuführen. Im vorliegenden Fall sind Auszüge daraus dem Stand der Technik in Kap. 2.2 und 2.3 zu entnehmen.

Eigenschaftsfeld: *Fahrdynamik*

Fahrmanöver	Priorität	Manöveraspekt (Extrema)
Stationäre Kreisfahrt	A	R=100m, Geschwindigkeit erhöhen. Kreisfahrt rechts und links
Sinussweep	A	150 km/h, LW auf 4m/s ² Quereschl.
Lenkradwinkelrampe	A	v=100km/h, δ=0-180° t=10s, rechts und links
Lenkradwinkelsprung	A	80km/h, LW auf 4m/s ² Quereschleunigung
Beschleunigen	C	0 auf 100 km/h mit maximaler Beschleunigung, beliebiges μ / μ-split
Geradeausbremsen	A	100 auf 0 km/h mit maximaler Verzögerung, beliebiges μ / μ-split
Weavetest	A	150 km/h, LW auf 4m/s ² Quereschl.
Lenkungsstößigkeit	A	Einzelhindernis, Geschw. beliebig
Parkieren	A	0 km/h, komplettes Durchlenken
Parkieren + Losrollen	B	<5km/h, komplettes Durchlenken
Spurrinnenempfindlichkeit der Lenkung	A	v=30-100km/h, Lenkrad festgehalten und mit Kursregelung durch Fahrer
	A	50 mph geradeaus, langsame Zunahme von 0 auf 270° bei 13,5°/s, 2s 270° konstant halten, Überkorrektur mit 540° entgegen links und rechts
Fishhook	A	50 mph geradeaus, Zunahme auf 6,5*Lenkwinkel bei 0,3G mit 720°/s, Warten bis die Rollrate erstmals 1,5°/s erreicht, danach gegensteuern auf -6,5*Lenkwinkel bei 0,3g mit 720°/s, danach 3s warten und langsam auf LW=0° zurücklenken
Lenkungspendeln	C	120km/h, Anreißen auf 45° mit 250-500°/s



Fahrmanöver	Priorität	Manöveraspekt (Extrema)
Lenkungsansprechen und -rückstellverhalten	C	Geradeausfahrt mit konst. Geschw., Lenkwinkel $\pm 10^\circ$ links und rechts mit 20-50°/s
	C	Kurvenfahrt mit max. Lenkeinschlag, Loslassen des Lenkrades, Fahrgeschw. angepasst
ISO-(VDA-)Spurwechsel	B	Gasse nach VDA, Schrittweise Erhöhung der Einfahrgeschw., mit ESP, keine Pylone treffen

Tab. 4.8 Fahrmanöveraspekte (Auszug schematisch)

Aus der Anforderungsanalyse in Kap. 4.2 gehen bereits erste Ansätze für Teillösungen hervor. Weitere Lösungsansätze für die Strukturierung der Funktionen im Versuchsfeld werden mit Hilfe von Kreativtechniken (vgl. [42]) erarbeitet. Dazu wurde bereits das Lösungsfeld begrenzt, indem eine Beschränkung auf die bereits genannten Eigenschaftsbereiche des Fahrzeuges festgelegt wurde. Weitere Einschränkungen gehen aus der baulichen Hülle des Versuchszentrums hervor. In Kap. 5.2 werden dazu weitere Randbedingungen für die Gestaltung der Gebäudestruktur erläutert.

Die Synthese kann auf verschiedenen Wegen durchgeführt werden. Ihre Aufgabe ist es in einem ersten Schritt, Teillösungen zu finden, die in einem zweiten Schritt zu Varianten kombiniert werden können. Abschließend sind diese Varianten zu bewerten, Dazu stehen die in Kap. 3.1.3 vorgestellten Bewertungsmethoden zur Verfügung. Im vorliegenden Fall wurde auf Basis der Prüfstandmanöver versucht, für jede Anwendung eine oder mehrere spezifische Teillösungen zu finden. Um das Variantenfeld der Teillösungen vorher weiter einzugrenzen, muss die Priorisierung der Ziele aus Kap. 4.3.1 weiterverfolgt werden.

Für die Erstellung des Versuchsfeldes sollte weitestgehend auf bereits existierende und bewährte Prüfstandsysteme zurückgegriffen werden. Damit kann zunächst ein Großteil der Anforderungen für Komponentenversuche abgedeckt werden.

Die Synthese ergab im hier betrachteten Fall des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums der TU Dresden für das Versuchsfeld des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik folgende Elemente in Form von Versuchseinrichtungen (Prüfstände und Messvorrichtungen):



Benennung	Art	Aufgaben und Einsatzgebiete
3D-Elastomerprüfstand	Komponentenprüfstand	Modellparametrierung, Messung und Prüfung von Elastomerbauteilen
Kombinierter Antriebsstrang- Fahrwerk-Prüfstand	System- und Subsystemprüfstand	Modellparametrierung, Fahrbarkeit, Schwingungsverhalten, Lastdatenanalyse, Effizienz, Betriebsstrategien, Regelsysteme
Reifenprüfstand mit Trommel oder Flachbahn	Komponentenprüfstand	Modellparametrierung, Charakterisierung, Lastdatenanalyse, Effizienz, Reifenprüfung
Reifen-Achs-Prüfstand	System- und Subsystemprüfstand	Modellparametrierung, Schwingungsverhalten, Lastdatenanalyse, Effizienz, Regelsysteme
Zug- Druck-Messmaschine	Komponentenprüfstand	Statische Zug-Druck-Versuche, Kalibrierung Kraftmesstechnik
Servohydraulisches Multifunktionsprüfstand	Komponenten-, System- und Subsystemprüfstand	statische und dynamische Untersuchungen an beliebigen Bauteil und -gruppen
Lenkungsprüfstand	Subsystemprüfstand	Modellparametrierung, Charakterisierung, Lastdatenanalyse
Bremsenprüfstand	Komponenten- und Subsystemprüfstand	Charakterisierung, Lastdatenanalyse, Verschleiß, Regelsysteme
Innengeräuschprüfstand	Gesamtfahrzeugprüfstand	NVH, Charakterisierung, Luftschallsynthese, Lastdatenanalyse
Akustikrollenprüfstand für Freifeldmessungen	Gesamtfahrzeugprüfstand	NVH, Charakterisierung, Lastdatenanalyse, Außen-geräuschuntersuchung
Achsprüfstand / Straßensimulator	System- und Subsystemprüfstand	Modellparametrierung, Schwingungsverhalten, Lastdatenanalyse, Verschleiß, Regelsysteme
Leistungsrollenprüfstand	Gesamtfahrzeugprüfstand	Modellparametrierung, Effizienz, Erprobung, Regelsysteme, Betriebsstrategie
Vier-Stempel-Prüfstand	Gesamtfahrzeugprüfstand	Modellparametrierung, Charakterisierung, Lastdatenanalyse, Erprobung
Dynamischer Kinematics and Compliance-Prüfstand	Gesamtfahrzeugprüfstand	Modellparametrierung, Charakterisierung, Lastdatenanalyse
Messvorrichtung für Schwerpunkt und Trägheitsmomente	Komponenten-, Subsystem- und Gesamtfahrzeugprüfstand	Modellparametrierung
Messvorrichtung für Radstellungsgrößen	Gesamtfahrzeugprüfstand	Modellparametrierung, Fahrzeugeinrichtung, Messvorbereitung für weitere Gesamtfahrzeugprüfstände
Linearreifenprüfstand mit Umweltsimulation	Komponentenprüfstand	Modellparametrierung, Charakterisierung, Lastdatenanalyse, Effizienz, Reifenprüfung, Wintererprobung



Benennung	Art	Aufgaben und Einsatzgebiete
Hochdynamischer Fahrsimulator	Sonderprüfstand	Mensch-Maschine-Schnittstelle, Regelsysteme, Modellparametrierung
Dynamischer Korrosionsprüfstand	Komponenten-, Subsystem- und Gesamtfahrzeugprüfstand	Modellparametrierung, Lastdatenanalyse, Erprobung

Tab. 4.9 Prüfstandbedarf nach der Synthese

In der Lösungsanalyse werden die gefundenen Teillösungen auf mögliche Argumente für ihr Ausscheiden hin untersucht. Dies kann auf der Basis von bestehenden Erfahrungen und Expertenbefragungen erfolgen. Eine Bewertung der Teillösungsvarianten wird in diesem Punkt noch nicht durchgeführt.

Der Vergleich mit den Expertenempfehlungen für ein ähnlich geartetes Prüffeld in der Fahrwerkentwicklung aus der Literatur ([95]) zeigt hier eine gute Übereinstimmung. Diese lauten:

- ½-Achs Prüfstand mit Flachbahn oder Radersatz
- 1-Achs Prüfstand mit Flachbahn oder Radersatz, mit optionaler Koppelung über HiL
- ARS-Prüfstand für aktive Stabilisierungssysteme
- Dynamischer mehraxialer Kennlinienprüfstand für Elastomerlager
- Fahrsimulator für Vertikaldynamik
- Flachbahnprüfstand (Reifenprüfung)
- LDS Prüfstand
- Prüfstände für innovative Lenksysteme (AFS, EPS)

DEUSCHL weist in seiner Arbeit ([95]) außerdem auf die Erforderlichkeit von Prüfständen mit HiL-Funktionen zum Einbeziehen verschiedener Regelsysteme in die Prüfaufgabe hin. Dieser Ansatz wird in Kap. 6 aufgegriffen und auf neue Entwicklungsmethoden am Gesamtfahrzeug erweitert.

In Kap. 4.1 wurde bereits die Position der Forschungseinrichtung in universitären und außeruniversitären Forschungsnetzwerken beschrieben. Da innerhalb dieser Netzwerke bereits mehrere Versuchsfelder existieren, wurde in die Lösungsanalyse eine Redundanzanalyse einbezogen. Eine Übersicht dazu ist dem Anhang A zu entnehmen. Dabei ist zu beachten, dass die Existenz eines bestimmten Prüfstandtyps im Forschungsnetzwerk



nicht zwangsläufig den Verzicht des gleichen Prüfstandtyps im vorliegenden Versuchsfeld rechtfertigt. Hier muss unter Einbeziehung der prognostizierten Betriebszeiten und Gleichzeitigkeiten sowie der Abschätzung des Mehraufwandes für eine Vergabe für Versuchsaufgaben innerhalb des Forschungsnetzwerkes über die Beschaffung des Prüfstandes entschieden werden. In solchen Fällen ist eine Nutzwertanalyse oder eine technisch-wirtschaftliche Bewertung (TWB) (vgl. Kap. 3.1.3) durchzuführen.

Nach der Lösungsanalyse wurden zwei der in Tab. 4.9 aufgeführten Prüfstände aus dem Teillösungsspektrum entfernt. Ein Leistungsrollenprüfstand und eine Vier-Stempel-Anlage werden gerade in zwei anderen Einrichtungen des Forschungsnetzwerkes errichtet. Daneben existieren auch mehrere Komponentenprüfstände, die hier ebenfalls erforderlich sind. Die Auslastung dieser Prüfstände wird jedoch als verhältnismäßig hoch eingeschätzt, so dass eine redundante Beschaffung gerechtfertigt ist. Zwei weitere Prüfstände aus Tab. 4.9 wurden aufgrund zu hoher prognostizierter Investitionskosten und bestehender räumlicher Einschränkungen (vgl. Kap. 5.2) ebenfalls aus dem Teillösungsspektrum entfernt. Es handelt sich dabei um den Akustikrollenprüfstand, für den ein erheblicher Mehraufwand an Nutzfläche aufgrund gesetzlicher Messvorschriften (vgl. DIN ISO 10844 [180]) erforderlich wäre. Auch der dynamische Korrosionsprüfstand kann aus Gründen mangelnder Nutz- und Funktionsflächenkapazitäten nicht in die weitere Planung einbezogen werden. Hier ist vor allem der Platzbedarf für Peripheranlagen zur Konditionierung des Prüfstandes ausschlaggebend.

Nach der Lösungsanalyse erfolgen die Variantenbildung für das Versuchsfeld und der Variantenvergleich. Hier können wieder die in Kap. 3.1.3 vorgestellten Bewertungskriterien eingesetzt werden.

4.3.3 Vorläufige Struktur des Versuchsfeldes

Nachdem die Synthese, die Lösungsanalyse, die Variantenbildung und -bewertung durchgeführt wurden, ergibt sich nun eine vorläufige Struktur des Versuchsfeldes. Darin sind die erforderlichen Elemente in Form von Prüfständen benannt. Für die weitere Verwendung wird die vorläufige Struktur nun unter baukonstruktiven Aspekten betrachtet. Dazu ist eine weitere Detaillierung erforderlich. Um eine grobe Unterteilung in Bauplanungsabschnitte vornehmen zu können, wurde für die Darstellung der vorläufigen Struktur ein Kennfeld gewählt, welches die Elemente nach Anlagenkomplexität und Flächenbedarf einordnet



und in Abb. 4.12 dargestellt ist. Diese erste auf Expertenwissen und Marktanalysen aufbauende Abschätzung muss nun in der Systementwicklung der Prüfstände detailliert werden. Als weitere Information kann dieser Darstellung entnommen werden, welche Elemente des Versuchsfeldes dynamische Beanspruchungen in die Systemumgebung einleiten können. Wie sich im weiteren Verlauf der Arbeit noch herausstellen wird, handelt es sich bei der Art der Fundamentierung dynamisch beanspruchter Prüfstände um eine für das Versuchsgebäude konzeptbestimmende Wirkkette. Informationen über eventuell erforderliche Konstruktionen zur Schwingisolierung müssen also möglichst frühzeitig in den Gebäudeplanungsprozess einfließen. Als weitere Schaubilder können auch Darstellungen erstellt werden, die gemeinsam nutzbare Verkehrs- oder Funktionsflächen verschiedener Elemente und Gefährdungsklassen erkennen lassen. Das Ziel ist dabei, eine möglichst detaillierte Spezifizierung an den Gebäudeplanungsprozess zu übergeben, damit daraus rasch Gebäudestrukturen erarbeitet werden können. Für die weitere Detaillierung von Versuchsfeld, Prüfständen und XiL-Umgebung sollte eine Darstellung der Aufgabenverteilung der Elemente gefunden werden.

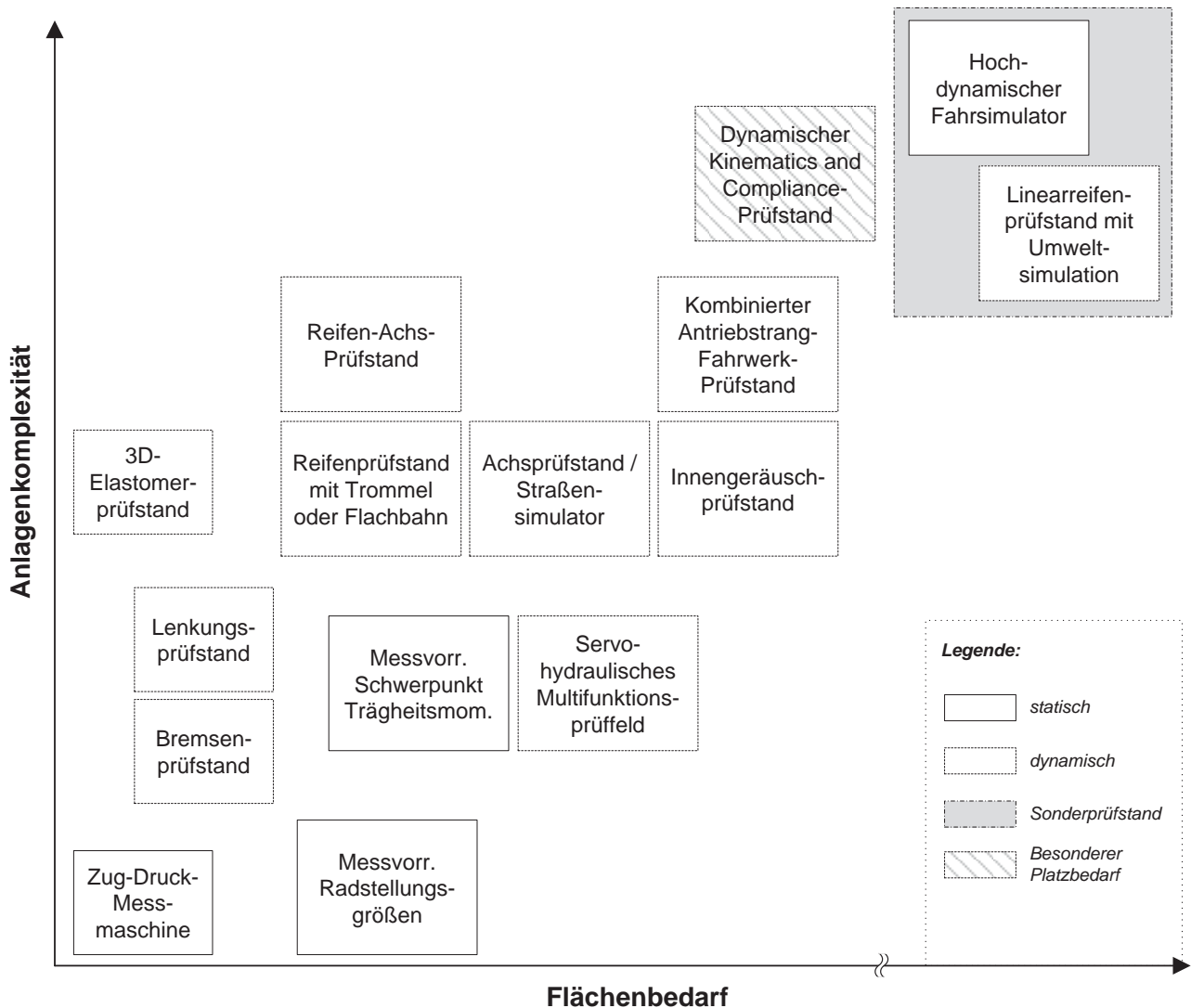


Abb. 4.12 Anlagenkomplexität-Flächenbedarf-Schaubild

4.4 Systementwicklung „Prüfstand“

Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung von Prüfständen für ein Versuchsfeld beschrieben. Zunächst wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte allgemeine Vorgehen vorgestellt. Im Anschluss daran wird der Entwicklungsprozess am Beispiel eines von Grund auf neu entwickelten Prüfsystems demonstriert. Dabei werden die für einen parallel dazu ablaufenden Gebäudeentwicklungsprozess erforderlichen Schnittstellen mit dem entsprechenden Reifegrad erläutert. Abschließend werden die für die Integration des Prüfstands erforderlichen Informationen mit einigen Dokumentationsvorschlägen aufgeführt.



Die Prüfstände sind Teilsysteme eines Versuchsfeldes. Daher setzt die parallelisierte Entwicklung der einzelnen Prüfstände, aber auch die Parallelisierung zum Entwicklungsprozess des Versuchszentrums voraus, dass zunächst die für den Gesamtplanungsablauf des Versuchszentrums erforderlichen funktionalen und terminlichen Schnittstellen definiert werden. Die funktionalen Schnittstellen ergeben sich aus dem Aufbau der Prüfstände. Die terminlichen Schnittstellen gibt der Gesamtplanungsablauf vor.

Die Aufgaben des gesamten Versuchsfeldes können, wie weiter oben bereits beschrieben, sehr vielfältig sein und von der Parametrierung einer einzelnen Komponente bis hin zu Versuchen zu Gesamtfahrzeugfunktionen in der Konzeptauslegung und funktionalen Absicherung reichen. In Kap. 4.3.3 wurde bereits beschrieben, wie die Verteilung der Prüf- und Messaufgaben auf einzelne Prüfstände als Teilsysteme des Versuchsfeldes erfolgen kann. Durch die hohe funktionale Integration im Versuchsfeld und die starke räumliche Nähe der Prüfstände, welche das Konzept der virtualisierten Entwicklung mit HiL-Anwendung (vgl. Kap. 4.2.6 und 4.2.6) erforderlich macht, sind mehr oder minder starke Wechselwirkungen zwischen den Prüfständen zu erwarten. Bei der Entwicklung des Prüfstandes ist es demnach erforderlich, dass neben den spezifischen Systemeigenschaften des einzelnen Prüfstandes für die Erfüllung der Manöveraufgabe auch Wechselwirkungen im Versuchsfeldverbund berücksichtigt werden. Dazu sind die prüfstandspezifischen Eigenschaften diesbezüglich während der Entwicklung fortlaufend mit Zielwerten abzugleichen und ggf. Maßnahmen im Gebäudeentwicklungsprozess zu ergreifen. Die Art der Zielwerte lässt sich anhand der Wirkkettenmatrix des Versuchsfeldes für die Gebäudeentwicklung in Kap. 5.2.3 bestimmen. Die Zielwerte beziehen sich zum Beispiel auf die Übertragung von Schwingungen im Gebäude oder die Regelungsgeschwindigkeit bei der Vernetzung mehrerer Prüfstände für die Umsetzung komplexer fahrdynamischer Gesamtfahrzeugmanöver im Versuchsfeld.

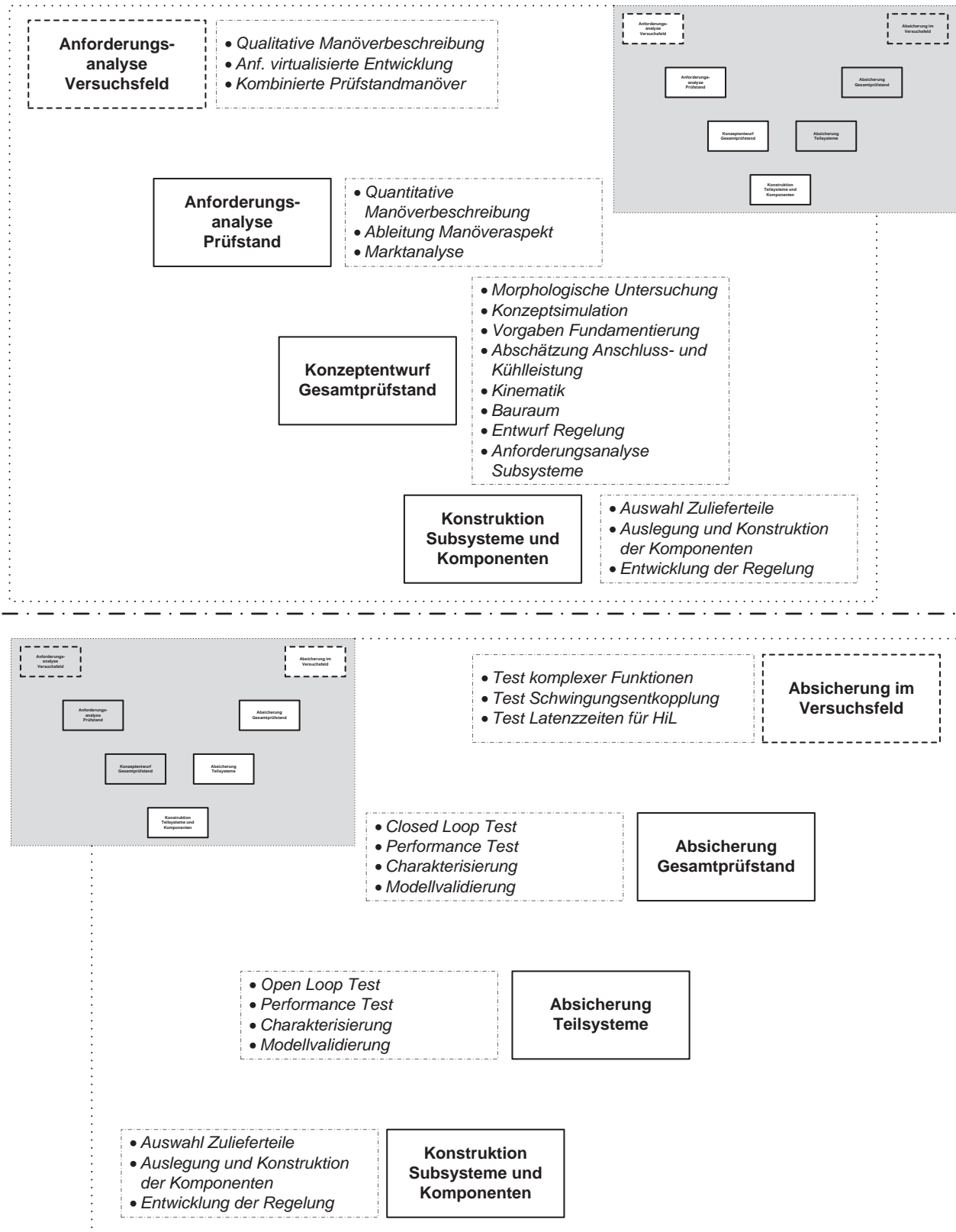


Abb. 4.13 V-Modell zum Ablauf der Systementwicklung "Prüfstand"



Im vorliegenden Fall muss bei der Entwicklung noch zwischen der Weiterentwicklung bestehender Anlagen mit entsprechender Eignung und einer grundsätzliche Neuentwicklung einzelner Prüfstände unterschieden werden.

4.4.1 Anforderungsanalyse für Prüfstände

Die Prüf- oder Messaufgaben, welche später auf den Prüfständen durchgeführt werden sollen, können anhand von Prüfstandmanövern aus den Kapiteln 4.2.3, 4.2.4 und 4.2.5 hergeleitet werden. Diese Anforderungen wurden zunächst mit grundlegenden Abschätzungen auf Basis einer qualitativen Beschreibung der Manöver definiert und müssen anhand einer erneuten detaillierten Anforderungsanalyse für die einzelnen Prüfstände abgeleitet werden.

In Abb. 4.11 wurde bereits ein Überblick über das systematische Vorgehen zur Ableitung funktionaler Anforderungen an das Versuchsfeld und die Prüfstände gegeben. Auf die darin dargestellte Ableitung von Prüfstandmanöveraspekten soll jetzt genauer eingegangen werden.

Für die weitere Verwendung in der Prüfstandentwicklung ist eine ausführliche verbale Beschreibung der mit dem Prüfstand verfolgten Untersuchungsziele erforderlich. Dazu müssen sowohl der Ablauf der Manöver als auch die physikalischen Größen, welche die Konditionierung des Prüflings und dessen Beanspruchung während der Versuchsdurchführung charakterisieren, angegeben werden. Die Schnittgrößen zwischen dem Prüfling und dem Prüfstand sind hier besonders wichtig.

Im vorliegenden Fall des Rad-Achs-Prüfstandes sollen Untersuchungen in allen drei Eigenschaftsgebieten aus Kap. 4.2 ermöglicht werden. Dabei steht vor allem die wechselseitige Beeinflussung des Systemverhaltens von Reifen und Radaufhängung im Vordergrund. Für die Untersuchung von Wirkketten soll die Versuchsumgebung in der Lage sein, sowohl einfache Einzelbelastungen als auch komplexe Belastungsabläufe, die dem Realbetrieb im Fahrzeug ähneln, abbilden zu können. Dabei sollen jedoch die in Kap. 2.1.1 benannten Vorteile des Prüfstandversuches bezüglich Reproduzierbarkeit und Messbarkeit von Schnittgrößen ausgeschöpft werden. Die weiteren Ausführungen bauen auf grundlegenden Zusammenhängen der Fahrmechanik von Kraftfahrzeugen auf. Einen detaillierten Überblick über dieses Fachgebiet verschaffen die Standardwerke vom MATSCHINSKY [81], MITSCHKE [82], REIMPELL [88] und HEIßING [76]. Zur Notation und Achsenbezeichnung der



Koordinatensysteme wird auf die DIN 70000 [178] verwiesen. Eine hinreichende Zusammenfassung der für die Entwicklung dieses Prüfstandes erforderlichen Grundlagen der Fahrmechanik gibt SCHILLER ([129]).

Die Entwicklung und Absicherung von Gesamtfahrzeugeigenschaften beginnt und endet auf Gesamtfahrzeugebene. Dafür wurden bereits in Kap. 4.2 charakteristische Fahrmanöver identifiziert. Damit für die hier beabsichtigte Anwendung der Prüfstände konkrete Anforderungen abgeleitet werden können, müssen diese Fahrmanöver in Prüfstandmanöver überführt werden. Dies geschieht wie in Abb. 4.11 dargestellt zum einen durch die qualitative Beschreibung der Wirkkette mit der Bestimmung der in den Versuch einzubeziehenden Grenzen des Prüflings. Zum andern wird anhand einer mit der Anforderung aufgestellten Hypothese der physikalischen Effekte des Fahrmanövers die grundsätzliche technische Realisierbarkeit des Manövers auf einem Prüfstand geprüft. Mit Hilfe einer Prinzip-Simulation kann festgestellt werden, ob sich durch Weglassen oder Hinzufügen kinematischer Bindungen oder Massen durch den Prüfaufbau das gewünschte mechanische Verhalten grundsätzlich ändern wird.

Der Rad-Achs-Prüfstand soll zukünftig in der Lage sein, realistische Fahrmanöver auf ein auf einer Rolle laufendes Rad aufzuprägen. Dieses Rad wird im weiteren Verlauf gemäß [106] als Primärrad bezeichnet. Dazu muss sich der gesamte Prüfling um den Radaufstandspunkt bewegen und alle kinetischen und kinematischen Verhältnisse müssen dementsprechend transformiert werden. Das dem Primärrad innerhalb der Fahrzeugachse (jeweils Vorder- oder Hinterachse) gegenüberliegende, als Sekundärrad bezeichnete Rad muss für die Bereitstellung eines realistischen Belastungszustandes des gesamten Achskörpers mit den dem Fahrzustand entsprechenden Lasten beaufschlagt werden. Weitere detaillierte Anforderungen ergeben sich aus der qualitativen Beschreibung der Prüfstandmanöver. In Tab. 4.10 sind einige charakteristische Prüfstandmanöver für den Rad-Achs-Prüfstand aufgeführt. Darin ist neben den bereits benannten Eigenschaftsbereichen zusätzlich die Kategorie *Absicherung Fahrwerkregelsysteme* aufgeführt. In Kap. 4.2.2 wurde bereits auf Anforderungen des Versuchsfeldbetreibers eingegangen. Diese Kategorie könnte mögliche Dienstleistungen für assoziierte Partner beinhalten.



	Fahrdynamik	Schwingungskomfort	Haltbarkeit und Lastdaten	Absicherung Fahwerkregelsysteme
Prüfstandmanöver	<ul style="list-style-type: none"> • ISO-Spurwechsel • Stationäre Kreisfahrt 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlagleistenüberfahrt • Stocha. Anregung 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlagleistenüberfahrt • ISO-Spurwechsel 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahren bei Seitenwind
	<ul style="list-style-type: none"> • Fishhook • Sinuslenken • Weave-Test 	<ul style="list-style-type: none"> • Kurvenfahrt mit stochastischer Reifenanregung 	<ul style="list-style-type: none"> • Bremsstempeltest • Anfahrstempeltest 	<ul style="list-style-type: none"> • Lenkwinkelsprung • Fishhook
	<ul style="list-style-type: none"> • Geradeausbremsen • Parkieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Geradeausbremsen • Lastwechsel 	<ul style="list-style-type: none"> • Durchfedern • Parkieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Geradeausbremsen • Kurvenbremsen

Tab. 4.10 Prüfstandmanöver nach Eigenschaftsbereich

Die Definition der Anforderungen basiert auf den in Kap. 4.1.1 dargestellten Forschungszielen der Forschungseinrichtung und den Entwicklungszielen der mit der Forschungseinrichtung assoziierten Entwicklungspartner. Eine bestmögliche Abdeckung der aktuellen und zukünftigen Anforderungen aus Wissenschaft und Entwicklung kann erreicht werden, wenn die Forschungseinrichtung und der Betreiber des Prüfstandes bereits intensiv in diesen Forschungsfeldern tätig sind und an der Anforderungsanalyse beteiligt werden. Darüber hinaus sollte für die Sicherstellung einer umfassenden Anforderungsrecherche auch eine Markt- und Patentanalyse durchgeführt werden. Für den Rad-Achs-Prüfstand ergab dies weitere Inspirationen und Spezifikationen. Es wurden Prüfstandsysteme im Kontext der Forschung und Entwicklung betrachtet. Anhand von Funktions- und Leistungsumfang wurde der Bedarf für ein neuartiges Prüfsystem identifiziert. Einige wesentliche Ergebnisse dieser Marktanalyse sind in den Stand der Technik im Kap. 2.3 integriert.

Die Analyse der funktionalen Anforderung bezüglich der Gesamtfunktionen des Prüfstandes ist mit der Erstellung einer Fahrmanöverliste, wie in Tab. 4.11 dargestellt und einer allgemeinen Anforderungsliste, wie sie im Anhang C zu finden ist, beendet. Später wird der Prozess der Anforderungsanalyse mit einem simulationsbasierten Lastenheft fortgesetzt. Anhand der in der Manöverliste definierten Manövern und den dazugehörigen Fahrmanöveraspekten werden mit Hilfe der Mehrkörpersimulation am Gesamtfahrzeugmodell Prüfstandmanöveraspekte berechnet. Dazu muss jedoch ein grundsätzliches Funktionsprinzip des Prüfstandes vorliegen.



Fahrmanöver	Kürzel	Fahrmanöveraspekt
Fishhook	fh202	$v = 80 \text{ km/h}$; $\delta_{LR} = 201.5^\circ$; $\omega_{LR} = 720^\circ/\text{s}$; $t_1 = 0.03 \text{ s}$; $t_2 = 3 \text{ s}$
Bremsen	gbr	$v = 200 \text{ km/h}$; $a_x = 1.2 \text{ G}$
ISO Spurwechsel	isoLC	$v = 90 \text{ km/h}$
Lenkwinkelrampe	ramp	$v = 100 \text{ km/h}$; $\delta_{LR} = 200^\circ$; $\omega_{LR} = 20^\circ/\text{s}$; math. pos.
Lenkwinkelsprung	step	$v = 100 \text{ km/h}$; $\delta_{LR} = 200^\circ$; $\omega_{LR} = 500^\circ/\text{s}$; math. pos.
Parken	park	$v = 4 \text{ km/h}$; $\delta_{LR} = 539^\circ$; $\omega_{LR} = 431.2^\circ/\text{s}$
harmonische FBA	sinFB	$v = 180 \text{ km/h}$; $h = 20 \text{ mm}$; $\lambda = 100 \dots 3.3 \text{ m}$; $f_A = 0.5 \dots 15 \text{ Hz}$
Schlagleiste	slue	$v = 120 \text{ km/h}$; $L_{SL} = 125 \text{ mm}$; $h_{SL} = 20 \text{ mm}$
Sinuslenken	swept	$v = 100 \text{ km/h}$; $\delta_{LR} = 50^\circ$; $f_A = 0 \dots 2 \text{ Hz}$; $\Delta f = 0.1 \text{ Hz}$
Kreisfahrt	crc	$v = 10 \dots 100 \text{ km/h}$; $r = 100 \text{ m}$; $a_y = 0.75 \text{ G}$; math. pos.
stochastische FBA	stoFb	$v = 180 \text{ km/h}$; $RC = \text{“D”}$; $CC = 0.5$; $w = 2$
Weavetest	wea	$v = 100 \text{ km/h}$; $\delta_{LR} = 30^\circ$; $f_A = 0.2 \text{ Hz}$; $\Delta f = 0 \text{ Hz}$

Tab. 4.11 Fahrmanöverliste Radaufhängungsprüfstand (Auszug) aus [129]

Ein weiterer Aspekt der Konzeption des Prüfstandes, der wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung des Gesamtsystems hat, ist die Kalibrierung. Da die Kalibrierbarkeit von der physikalischen Arbeitsweise des Prüfstandes und den darin verwendeten Messverfahren (vgl. Kap. 3.3.1) abhängt, bestimmt sie den Aufbau mit und muss im Entwicklungsprozess frühzeitig berücksichtigt werden.

4.4.2 Konzeptentwurf Gesamtprüfstand

Die Erstellung des Funktionsprinzips erfolgt auf der Grundlage der Anforderungsliste. Anhand der qualitativen Beschreibung der Fahrmanöver wird zunächst die kinematische Struktur entwickelt. Danach wird das Funktionsprinzip des Gesamtprüfstands anhand eines morphologischen Prozesses in Unterfunktionen zerlegt. Es werden mehrere abstrahierte Lösungsvarianten für jede Unterfunktion erarbeitet. Im vorliegenden Fall wurde das Vorgehen nach PAHL [58] angewendet. Das Vorgehen sieht eine Rekombination der einzelnen Teillösungen in Lösungsvarianten und eine anschließende Variantenbewertung vor. Für den Rad-Achs-Prüfstand wurden im Rahmen der Ausarbeitung von ABEL [102]



verschiedene Lösungsvarianten erarbeitet. Eine Auswahl dieser Konzepte ist in Abb. 4.14 dargestellt.

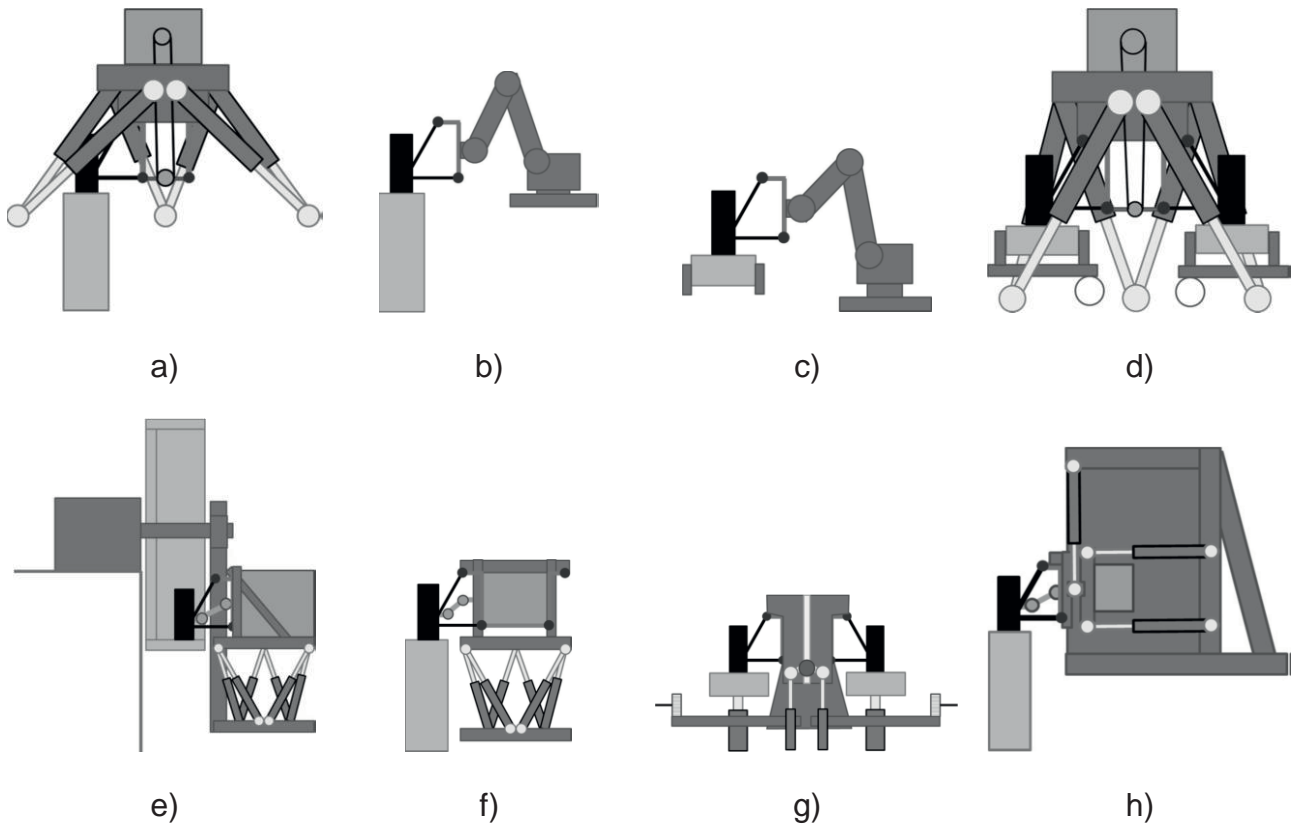


Abb. 4.14 Gesamtlösungsvarianten (Auswahl) aus [102]

Für die Erstellung der Lösungsvarianten und die anschließende Bewertung kann auch hier eine Wirkkettenmatrix (vgl. 2.1.1) für den Prüfstand aufgestellt werden. Die Bewertung erfolgte im vorliegenden Fall mit Hilfe einer Nutzwertanalyse. Zwischen den Anforderungen i wird für die Durchführung der Nutzwertanalyse hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für den Hauptfunktionsumfang differenziert. Dazu wird ein Wichtungsfaktor W_i eingeführt. Nach [58] kann dafür eine Skala von *null* bis *vier* verwendet werden. *Vier* wird dabei für Anforderung mit „höchster Wichtigkeit“ und *null* für „überflüssige Anforderungen“ im Sinne der Hauptfunktionalität verwendet. Für jede Anforderung i wird dann der erwartete Erfüllungsgrad $P_{n,i}$ der einzelnen Teillösungsvarianten n bestimmt. Auch der Erfüllungsgrad wird in einer Skala von *null* für „unbefriedigend“ bis *vier* für „sehr gut“ beschrieben. Der Einzelnutzwert $N_{n,i}$ der Teillösungsvariante n ergibt sich aus



$$N_{n,i} = W_i \cdot P_{n,i} \quad \text{Gl. 4.1.}$$

Der Nutzwert N zur Bewertung der gesamten Lösungsvariante ergibt sich dann aus

$$N = \sum_i^1 N_{n,i} \quad \text{Gl. 4.2.}$$

Anhand des Nutzwertes N aus Gl. 4.2. wird die Vorzugsvariante ausgewählt. Besteht das Lösungskonzept der Vorzugsvariante eine Plausibilitätskontrolle und wird das in einer Entwicklungskostenabschätzung ermittelte Budget bewilligt, wird die Vorzugsvariante weiter spezifiziert.

Für die Ableitung der Prüfstandmanöveraspekte werden neben der bereits erwähnten physischen Abgrenzung des Prüflings und einer Plausibilisierung zur grundsätzlichen Machbarkeit noch Fahrmanöveraspekte aus Tab. 4.11 benötigt. Diese müssen nun hinsichtlich der Schnittstellen zwischen Prüfstand und Prüfling weiter detailliert werden. Dazu sind Ableitungen anhand des Einspur- oder Zweispurmodells durchzuführen. Anhand charakteristischer Größen wird die Beschreibung eines detaillierten Systemzustandes des Prüflings möglich. Die virtuelle Durchführung von Fahrmanövern durch Mehrkörpersimulation erhöht den Detaillierungsgrad und verbessert die Prognosesicherheit der Anforderungen. Für den Rad-Achs-Prüfstand wurde die Methode des modellbasierten Lastenheftes angewendet (vgl. Kap. 3.2.2).

Bevor eine weitere Detaillierung des Prüfstandes erfolgt, müssen an dieser Stelle die Randbedingungen aus dem Entwicklungsprozess des Gebäudes mit einbezogen werden. Im Planungsprozess des Gebäudes wurden bereits Abschätzungen für Funktions- und Verkehrsflächen getroffen. In der Entwurfsplanungsphase geschieht das auf der Grundlage der Marktanalyse und Erfahrungen aus vergleichbaren Prüfständen. Dazu werden Benchmarking-Untersuchungen durchgeführt und deren Ergebnisse mit dem Lösungskonzept abgeglichen. In Abhängigkeit der sich einstellenden Übereinstimmung, können die oben genannten Abschätzungen bestätigt oder müssen korrigiert werden. Dieser Prozessschritt stellt eine weitere wesentliche Schnittstelle zwischen Versuchsfeld- und Gebäudeentwicklung dar. Für die weitere Präzisierung wird auf Basis der definierten Prüfstandmanöver und der kinematischen Struktur des Prüfstandes eine Überschlagsrechnung durchgeführt. Dabei sollten folgende Anlagenparameter überprüft werden:



Parameter	Beschreibung	Genauigkeit
Funktionsflächen	räumliche Abmessungen des Versuchsraumes (LxBxH)	± 20%
Verkehrsflächen	Abmessung und Lage in Bezug zur Versuchsanlage	± 30%
Anschlussleistung	Angaben zur Primärenergie (meist elektrische Energie)	± 30%
Sicherheit	Angaben zur Gefährdungsklasse der Anlage (vgl. Kap. 4.5.7) und zu konzeptentscheidenden Anforderungen zur Sicherheit, z.B. ist eine anlagenseitige Sicherung nicht möglich und ist eine gebäudeseitige Schutzhäuserung erforderlich.	-
Fundamentierung	Angaben zur dynamischen Masse, Frequenzspektrum des Arbeitsbereiches und zu Anforderung bezüglich des Isolierungsgrades (vgl. Kap. 3.3.2)	± 30%

Tab. 4.12 Übergabe Anlagenparameter für Gebäudeentwicklung Nr. 2

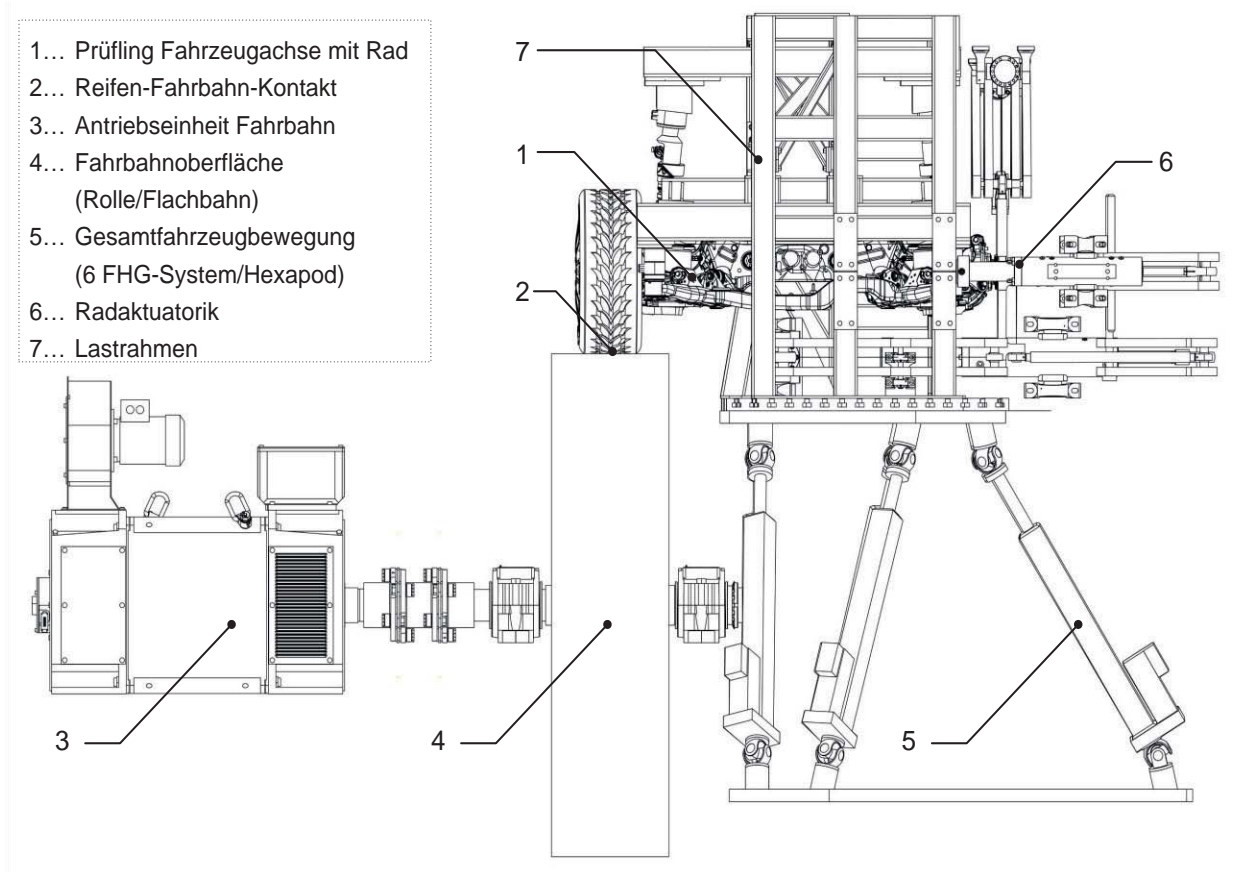
Für die Ermittlung dieser Parameter sind oft einfache Handformeln ausreichend. Erste Abschätzungen zur Fundamentierung können mit Hilfe einfacher Starrkörpermodelle erzeugt werden. Dieses Vorgehen wird ausführlich in Kap. 3.3.2 beschrieben. Auch für die Ermittlung von Bewegungsräumen und Sicherheitsabständen kann eine modellbasierte Analyse höhere Genauigkeiten liefern. Wenn die Synchronisation mit dem Gebäudeentwicklungsprozess erfolgreich verlief, kann die Entwicklung des Prüfstandes in der vorgesehenen Weise fortgesetzt werden. Ist dies nicht der Fall, muss ein Änderungsprozess gestartet werden.

Parallel zur Erstellung der Anforderungslisten wurde bereits untersucht, ob ein bestehendes Komplettsystem zum Kauf bereitsteht oder ob ein bereits im Haus vorhandener Prüfstand entsprechen ertüchtigt werden kann, sodass er die Anforderungen erfüllen kann. Beides konnte nicht bestätigt werden. Bestehende, zum Teil kommerziell verfügbare Komplettlösungen erfüllen einen großen Teil der Hauptfunktionalität nicht und sind im Stand der Technik Kap. 2.3 aufgeführt. Der Radaufhängungsprüfstand, welcher bereits in der



Bestandsanalyse Kap. 4.1.2 vorgestellte wurde, verfügt nicht über die kinematische Struktur für die Abbildung der geforderten Gesamtfahrzeugbewegungssimulation. Ferner ist die Konstruktion des Prüfstandaufbaus hinsichtlich der Steifigkeiten und dem damit verbundenen Eigenschwingungsverhalten nicht für die Abbildung dynamischer Fahrmanöver und die uneingeschränkte Messung von Schwingungsübertragung geeignet. Die wurde in einer experimentellen Modalanalyse bestätigt. Eine ausführliche Beschreibung der Eignungsuntersuchung des Radaufhängungsprüfstandes ist bei ABEL ([102]) zu finden. Die Neuentwicklung des Systems erscheint zu diesem Zeitpunkt als unumgänglich und wird daher weiter verfolgt.

Die Detaillierung des Rad-Achs-Prüfstandes wird durch die Gliederung des Lösungskonzeptes in Subsysteme fortgesetzt. Im vorliegenden Fall wurde eine Teilung in die drei Subsysteme Bewegungssystem, Antriebeinheit und Radaktuator vorgenommen (vgl. Abb. 4.15). Mit dieser Gliederung in Subsysteme wird nun die Anforderungsanalyse fortgesetzt. Die Abgrenzung des Prüflings für den Rad-Achs-Prüfstand erfolgt mit den in Tab. 4.13 dargestellten Konfigurationen.



- 1... Prüfling Fahrzeugachse mit Rad
- 2... Reifen-Fahrbahn-Kontakt
- 3... Antriebseinheit Fahrbahn
- 4... Fahrbahnoberfläche (Rolle/Flachbahn)
- 5... Gesamtfahrzeugbewegung (6 FHG-System/Hexapod)
- 6... Radaktuatorik
- 7... Lastrahmen

Abb. 4.15 Subsysteme des Rad-Achs-Prüfstandes vgl. [106]

Prüfling	Bauteile	Schnittstellen
<i>Halbsachse mit Bremse und / oder Antrieb</i>	(1x) Reifen, Felge, Bremse, Radaufhängung einschließlich Feder und Dämpfer, Lenkung	1. Reifenlatsch, 2. Topmount, 3. karoserieseitige Anbindungspunkte für Fahrwerkstreben und –lenker 4. Lenkung 5. ggf. Einspannung Wankstütze
<i>Vollachse mit Bremse und / oder Antrieb</i>	(1x) Reifen, Felge, (2x) Bremse, (2x) Radaufhängung einschließlich Feder und Dämpfer, Wankstütze Antrieb Lenkung	1. 1x Reifenlatsch, 2. 2x Topmount, 3. karoserieseitige Anbindungspunkte für Fahrwerkstreben und –lenker oder Hilfsrahmen 4. Lenkung 5. Radnabe für Sekundärrad 6. Antrieb

Tab. 4.13 Abgrenzung Prüfling am Rad-Achs-Prüfstand



Das weitere Vorgehen zur Entwicklung der Subsysteme wird vordergründig anhand des Radaktuators aus der Arbeit von SCHILLER [129] beschrieben. Mit der beschriebenen kinematischen Struktur aus Abb. 4.15 werden nun die Anforderungen der Kinematik und Kinetik für die Schnittstellen zwischen Prüfstand und Prüfling abgeleitet. Dazu können zunächst analytische Methoden der Fahrmechanik eingesetzt werden und einschlägige Literaturstellen genutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass bereits einfache Radführungssysteme zu nichtlinearen Bewegungsgleichungen führen. Für das zukünftige Funktionsspektrum sollen auch Untersuchungen an komplexen Radführungen mit Elastokinematik möglich sein. Daher wurde im Fall des Rad-Achs-Prüfstandes die Methode des modellbasierten Lastenheftes gewählt (vgl. Kap. 3.2.2). Dazu werden zunächst parametrische Modelle des Fahrzeugs erstellt. Für die numerische Simulation der Fahrmanöver wird hier ein Gesamtfahrzeugmodell in der Simulationsumgebung ADAMS[®]/Car verwendet, welches sich aus den acht Subsystemen Chassis, Antriebsstrang, Vorderachse, Hinterachse, Lenkung, Vorderräder, Hinterräder und Bremse zusammensetzt. Außerdem wird ein Reifen-Fahrbahnkontakt genutzt, der auf den Magic-Formula-Ansatz von PACEJKA ([83]) zurückgeht. Weiterführende Informationen dazu sind der Literatur [90] und [117] zu entnehmen.

Die für die Prüfstandauslegung relevanten Fahrmanöver werden dann als Zeitschrittintegration berechnet. Dazu werden die in Tab. 4.11 definierten Fahrmanöver simuliert. Das Ziel der numerischen Simulation ist die Identifikation von fahrzeuginternen Zustandsgrößen, mit welchen die Anforderungen an den Schnittstellen zwischen Prüfstand und Prüfling beschrieben werden können. Auf diese Weise werden alle für die Ableitung der Schnittstellengrößen relevanten Zustandsgrößen während der simulierten Fahrmanöver ermittelt. Abb. 4.16 zeigt die absoluten Maxima für die Radverschiebung während der Simulation der in Tab. 4.11 definierten Fahrmanöver als Beispiel für alle relevanten Zustandsgrößen. Die Zustandsgrößen aus der Gesamtfahrzeugsimulation während der Fahrt werden als Fahrmanöveraspekte und jene bezogenen Zustandsgrößen für die Nachbildung des Fahrzustandes am Prüfstand als Prüfstandmanöveraspekte bezeichnet.

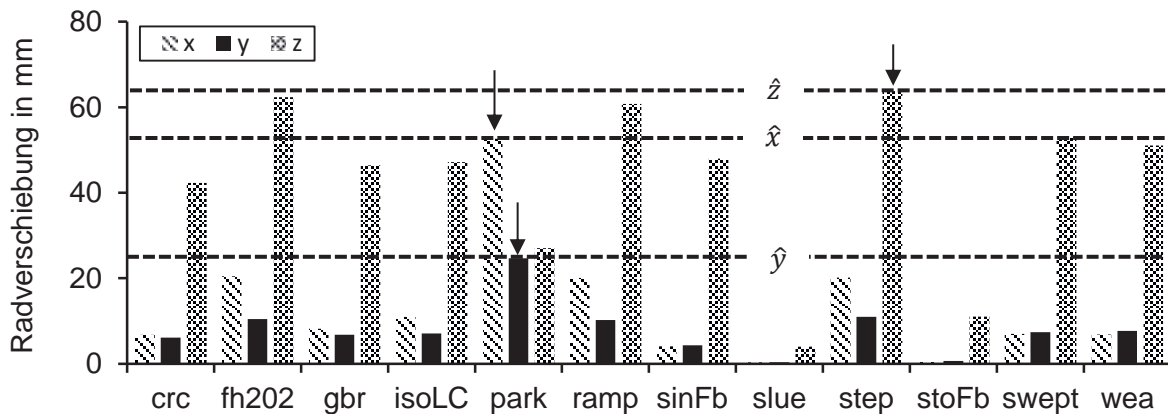


Abb. 4.16 Absolute Maximalwerte der Radverschiebung aus [129]

Alle zu ermittelnden Zustandsgrößen werden in einer Spezifikationsmatrix (Abb. 4.17) zusammengefasst. Für jedes der genannten Subsysteme werden darin die Bewegungs- und Kraftgrößen an den Schnittstellen zum Prüfling dokumentiert.

Fahrmanöver	x [mm]	y [mm]	z [mm]	Rx [°]	Rz [°]	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [Nm]	My [Nm]	Mz [Nm]
crc	6,76	6,10	42,33	1,62	4,27	0,75	4,95	6,46	66,08	22,41	136,11
fh202	20,52	10,46	62,35	2,21	13,79	0,11	6,17	7,74	114,34	26,23	162,59
gbr	8,21	6,79	46,47	1,55	0,29	6,95	0,33	6,48	19,06	22,45	34,83
isoLC	11,01	7,06	47,19	1,88	6,69	0,29	5,41	6,8	83,28	23,45	155,48
park	52,63	24,67	27,05	15,03	48,14	1,68	2,63	4,53	82,31	16,13	75,28
ramp	20,13	10,23	60,83	2,00	13,64	0,08	5,87	6,98	98,66	24,00	155,43
sinFb	4,14	4,33	48	2,4	0,38	0,1	0,63	8,22	27,88	0,29	22,81
slue	0,36	0,33	4,06	1,62	0,09	0,16	0,28	8,01	30,96	27,01	5,31
step	20,17	10,98	63,76	2,04	13,67	0,14	6,02	7,31	112,39	24,97	115,83
stoFb	0,45	0,63	11,03	1,74	0,11	0,06	0,24	4,72	14,5	13,4	8,06
swept	6,99	7,40	53,00	2,00	3,63	0,45	4,96	7,44	63,27	25,35	202,85
wea	6,88	7,67	51,06	1,67	3,00	0,41	4,92	6,59	63,66	22,79	155,59
Minimum	0,36	0,33	4,06	1,55	0,09	0,06	0,24	4,53	14,50	0,29	5,31
Mittelwert	13,19	8,05	43,09	2,98	8,98	0,93	3,53	6,77	64,70	20,71	102,51
Maximum	52,63	24,67	63,76	15,03	48,14	6,95	6,17	8,22	114,34	27,01	202,85

Abb. 4.17 Spezifikationsmatrix Radaktuatorik für Fahrmanöveraspekte aus [129]

Mit Hilfe dieser Auswertung lassen sich die auslegungsrelevanten Anforderungen schnell ermitteln. Wird das Ergebnis einer Durchführungswahrscheinlichkeit für die Maximalmanöver im Betreiberkonzept gegenübergestellt, kann entschieden werden, ob dieser Maximalwert zum Auslegungskennwert des Prüfstands erhoben wird oder ob das Manöver aus dem Funktionsspektrum des Prüfstandes gestrichen wird.



Nach dem Abschluss der Anforderungsanalyse wird analog zum Vorgehen des Gesamtprüfstandkonzeptes mit der Erstellung eines Lösungskonzeptes begonnen. Dabei werden erneut Varianten gebildet und deren Nutzwert für die spezifischen Anforderungen ermittelt. Abweichend vom bisherigen Vorgehen müssen hier noch Randbedingungen der anderen Subsysteme Beachtung finden. In Abb. 4.18 sind zwei Lösungsvarianten dargestellt, anhand derer die starke Abhängigkeit bei der Auslegung der Subsysteme deutlich wird. Während bei Variante A nur die verhältnismäßig kleinen Relativbewegungen zwischen Radträger und Karosserie abgedeckt werden müssen, sind bei Variante B Bewegungen aus der Überlagerung von Gesamtfahrzeugbewegung und Relativbewegung zwischen dem Radträger und der Karosserie darzustellen. Jedoch erfordert die Variante A eine Integration des Radaktuators auf der Plattform des Bewegungssystems, was zu einer deutlichen Erhöhung der bewegten Massen und damit zu höheren Leistungsanforderungen führt.

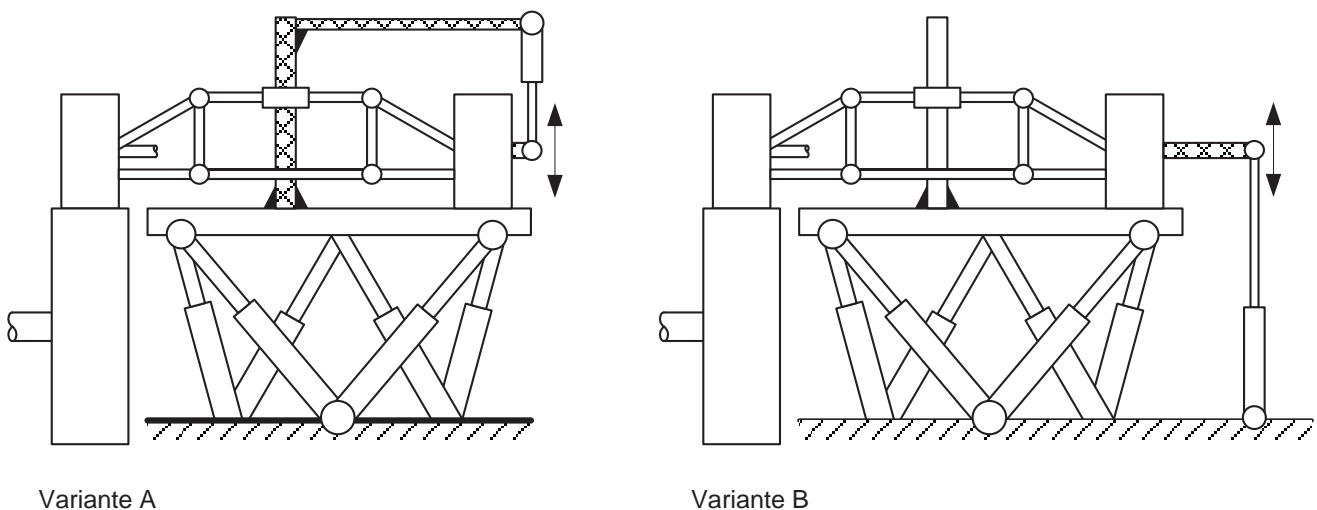


Abb. 4.18 Lösungsvarianten für den Radaktuator aus [129]

Aus der Nutzwertanalyse der Lösungsvarianten wird letztlich die Vorzugsvariante abgeleitet und im Auslegungs- und Konstruktionsprozess entwickelt. Für den Radaktuator am Rad-Achs-Prüfstand wurde ein tischgebundener Mechanismus (Variante A) ausgewählt. Dieser wird auf der Plattform des Bewegungssystems montiert und besteht aus einem Radersatzsystem und einem orthogonalen, räumlichen Koppelgetriebe. Abb. 4.19 zeigt das Ergebnis der virtuellen Entwicklung für den Radaktuator. Auch hier ist die Systemdarstellung ein unerlässliches Hilfsmittel für die Informationsstruktur im Entwicklungsteam. Neben



der in Abb. 4.19 gezeigten Darstellungen können bei mechanischen Systemen auch Pläne der Modelltopologie eingesetzt werden.

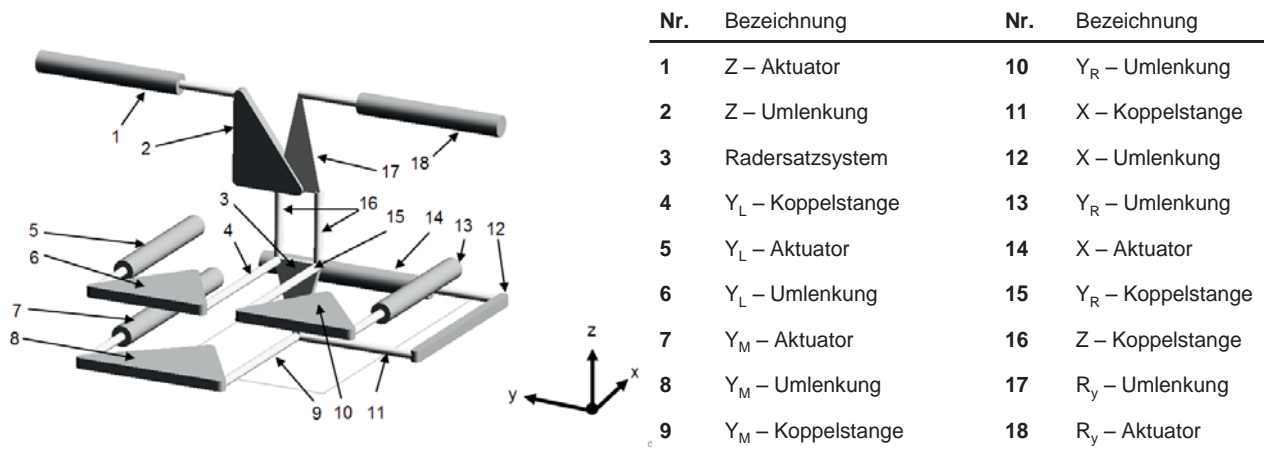


Abb. 4.19 Abbildung des Koppelgetriebes für den Radaktuator als MKS-Modell vgl. [106]

Auf Basis der in Abb. 4.19 dargestellten kinematischen Struktur können die Komponenten hydraulische Servozyylinder, Gelenke, Umlenkhebel und Koppelstangen ausgelegt oder für den Zukauf konfiguriert werden. In einem Iterationsprozess werden die Vorgaben der Kinematik an die konstruktiv umsetzbare Gestalt der Komponenten angepasst.

4.4.3 Virtuelle Konzeptabsicherung und Integration

Nach dem Abschluss der Auslegung und der Konstruktion erfolgt die virtuelle Absicherung. Für die Entwicklung des Radaktuators wurden Absicherungsschritte auf Komponenten-, Subsystem- und Gesamsystemebene durchgeführt. Dazu wurde das bereits erwähnte MKS-Modell des Radaktuator mit dem Modell des Bewegungssystems von STEINBEIß, [131], und dem Gesamtfahrzeugmodell gekoppelt. Die nach der Konstruktion angepasste Kinematik und die mit Hilfe der CAD-Konstruktion gewonnenen Massen- und Trägheitsparameter konnten als präzisierte Parameter in das Mehrkörpermodell zurückgeführt und eine erneute Zeitschrittintegration der Prüfstandmanöver durchgeführt werden. Darin wurden bereits konkrete Leistungs- und Kraftgrößen der aktiven Komponenten berücksichtigt. Es wurde ein CAD-Modell des Gesamtprüfstandes erstellt. Einzelne Bauteile wie Koppelstangen oder Umlenkhebel, aber auch Baugruppen wie der Lastrahmen für die Aufnahme des Prüflings und des Radaktuators wurden so detailliert modelliert, dass eine strukturdynamische Analyse zur Spannungsverteilung und zu Eigenmoden möglich war. Aus der



Manöversimulation konnten anhand der Produktspezifika der aktiven Komponenten die manöverspezifische Gesamtleistungsaufnahme und der dazugehörige Lastgang ermittelt werden, die als Eingangsgrößen für die Berechnungen im Energiemanagement erforderlich sind. Ebenfalls aus der MKS-Simulation können die erforderlichen statischen und dynamischen Lastverläufe für die Berechnung der Fundamentierung in der Ausführungsplanung erzeugt werden. Es wurde ferner eine virtuelle Prozessanalyse zum Rüsten des Prüfstandes mit Hilfe des CAD-Modells durchgeführt. In Tab. 4.14 ist eine Auswahl der durchgeführten Absicherungsschritte mit der Zuordnung zur jeweiligen Systemebene dargestellt. In den Abbildungen Abb. 4.20 bis Abb. 4.23 sind einige Absicherungsschritte dargestellt. Mit der virtuellen Absicherung und Integration wird erneut eine Schnittstelle zum Planungsprozess des Gebäudes bedient. Abschließend zum Kapitel Systementwicklung „Prüfstand“ ist das virtuelle entstandene Gesamtsystem des Rad-Achs-Prüfstandes in Abb. 4.24 dargestellt.



Integrationssebene	Virtuelle Absicherungsmaßnahme
<i>Komponenten</i>	<ul style="list-style-type: none"> Strukturdynamische Analyse zu Spannung und Eigenmoden der Kopplstangen (<i>FEM-Analyse im CAD</i>)
<i>Subsystem Radaktuator</i>	<ul style="list-style-type: none"> Einhaltung der Kraft- und Geschwindigkeitsgrenzwerte der Servozylinder (<i>MKS</i>) Einhaltung der zulässigen Gelenkverdrehung (<i>MKS</i>) Numerische Spannungsanalyse (<i>FEM-Analyse im CAD</i>)
<i>Subsystem Bewegungssystem</i>	<ul style="list-style-type: none"> Geometrische Integration / Kollisionsanalyse (<i>CAD</i>) Einhaltung der Kraft- und Geschwindigkeitsgrenzwerte der Servozylinder (<i>MKS</i>) Einhaltung der zulässigen Leistungsaufnahme (<i>Energetische Simulation</i>)
<i>Subsystem Prüfstand</i>	<ul style="list-style-type: none"> Geometrische Integration / Kollisionsanalyse (<i>CAD</i>) Einhaltung der zulässigen bewegten Massen (<i>MKS</i>) Einhaltung der zulässigen Leistungsaufnahme (<i>Energetische Simulation</i>) Numerische Spannungsanalyse (<i>FEM-Analyse im CAD</i>)
<i>Gesamtsystem Versuchszentrum</i>	<ul style="list-style-type: none"> Bewegungsraumuntersuchung mit Vorgaben aus dem Prüfraumentwurf (<i>CAD</i>) Lastgangsimulation Hydraulik und Elektrik zur Vorbereitung für die Gebäudeintegration (<i>Energetische Simulation</i>) Kontrolle der zulässigen dynamische Fundamentanregung (<i>MKS</i>)

Tab. 4.14 Durchgeführte Absicherungsschritte für den Rad-Achs-Prüfstand (Auszug)

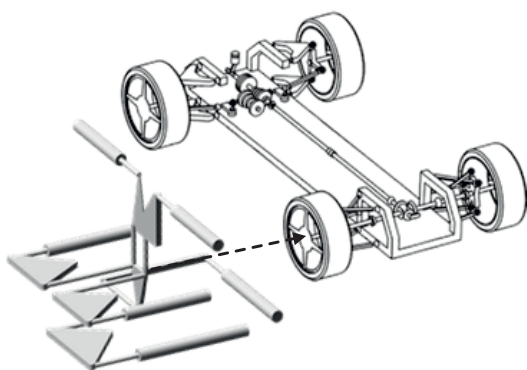


Abb. 4.20 Kopplung von Vollfahrzeug- und Radaktuator-MKS-Modell aus [129]

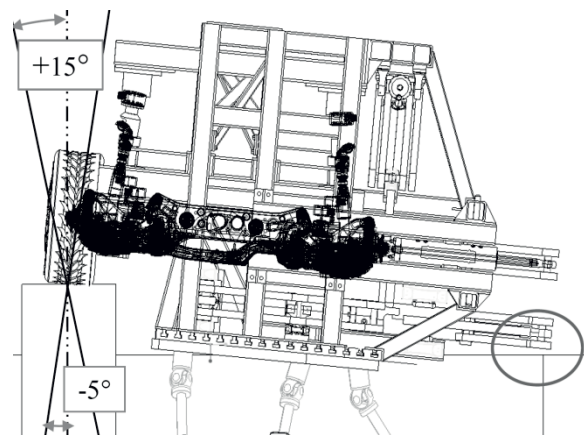


Abb. 4.21 Kollisionsanalyse Gesamtprüfstand im Prüfraum aus [113]

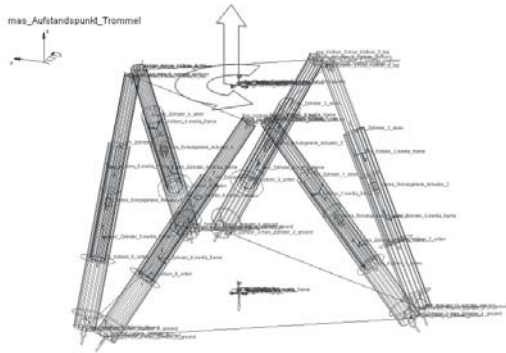


Abb. 4.22 MKS-Modell Bewegungssystem aus [131]

Abb. 4.23 Strukturdynamische Analyse Lastrahmen aus [113]

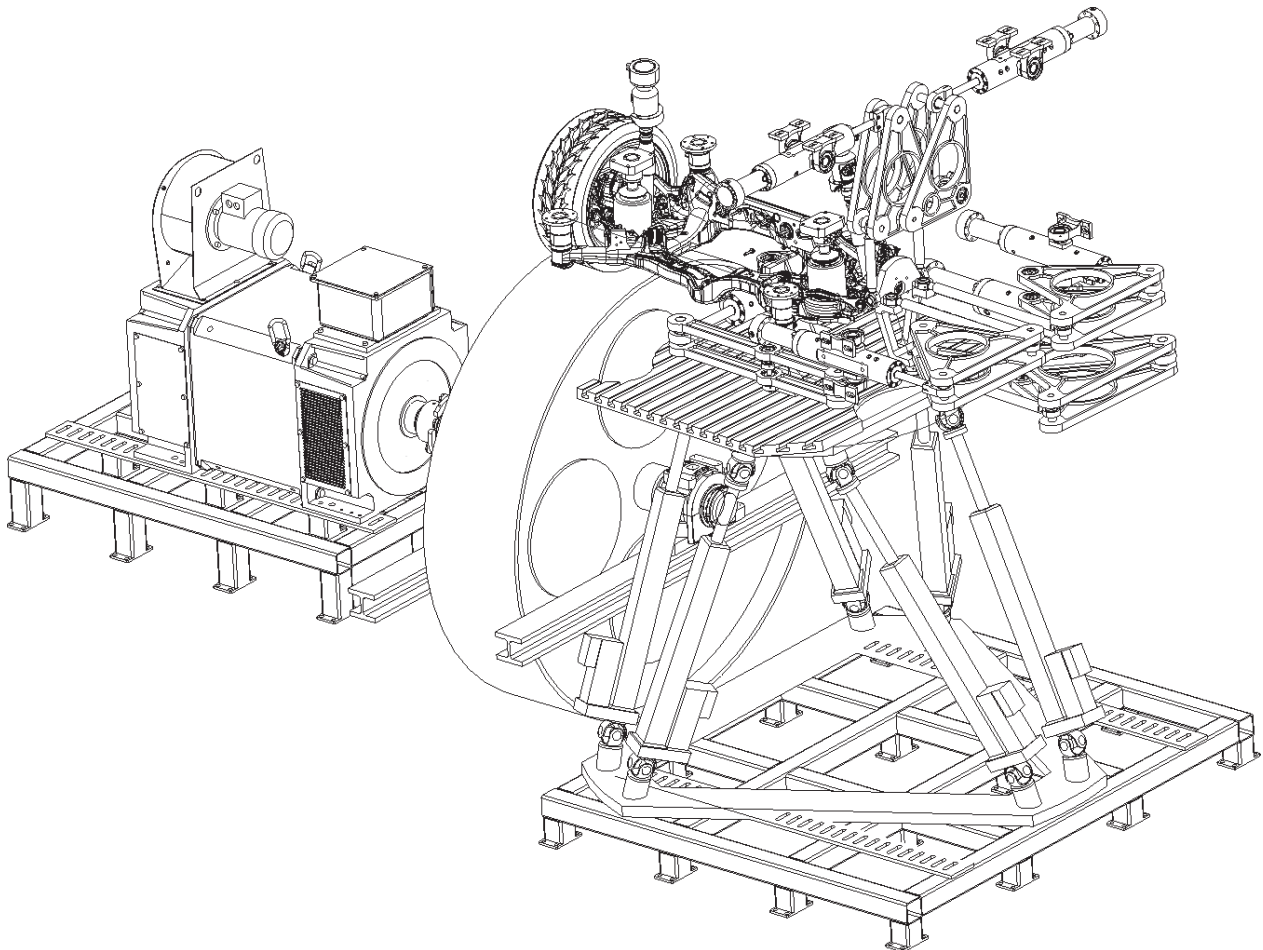


Abb. 4.24 Gesamtsystem Rad-Achs-Prüfstand ([129])



4.5 Vorbereitung zur Gebäudeintegration

Die Integration der Prüfstandsysteme in das Versuchsfeld und in die Gebäudestrukturen erfolgt im Entwicklungsprozess „Gebäude“. Damit ein effektiver Informationsaustausch im Projektteam aus Fachplanern, Anlagenplanern und Forschern entstehen kann, werden formale Informationsübergabepunkte in der Projektstruktur installiert. Im Laufe der Entwicklungsprozesse für das Gebäude, das Versuchsfeld und die Prüfstände entsteht ein großes Datenvolumen. Nicht alle Informationen sind für eine übergreifende Verteilung im Projektteam geeignet. Die Informationsübergabe erfolgt durch formalisierte Dokumentationen. Im folgenden Abschnitt werden Vorschläge zur Dokumentation vorgestellt. Grundsätzlich sollte die Dokumentation an die Bedürfnisse des Planungsteams und die Umstände des Planungsprozesses angepasst werden. Der Detaillierungsgrad in den Dokumenten richtet sich nach dem Reifegrad und der jeweiligen Planungsphase. Die Dokumentationen werden im Laufe des Entwicklungsprozesses mehrfach aktualisiert und präzisiert. Nicht alle Dokumente sind zu jeder Planungsphase erforderlich. Auf die Unterschiede wird nachfolgend eingegangen.

Bau- und haftungsrechtliche Randbedingungen werden in der hier vorgestellten Systematik ausdrücklich nicht betrachtet.

4.5.1 Anlagenplan

Der Anlagenplan ist eine grafische Darstellung der Anlage oder im vorliegenden Fall des Prüfstandes. Er wird als technische Zeichnung ausgeführt. Alle Bestandteile des Prüfstandes, die für die Erstellung der baulichen Hülle wesentlich sind, müssen darin enthalten sein. Die Darstellung sollte mindestens einen Grundriss mit Höhenangaben enthalten. Für eine raumeffiziente Planung zum Beispiel für die Gestaltung von Leitungstrassen und Krananlagen sind jedoch ein Auf- und ein Seitenriss zu empfehlen. Weiterhin sind alle für die Integration der Anlage oder des Prüfstandes in die Gebäudestruktur erforderlichen Informationen enthalten. Diese sind:

- räumliche Hauptabmessungen und Bewegungsräume des Prüfstandes
- Funktionsflächen
- Verkehrsflächen und –wege
- Sicherheitsbereiche und sicherheitstechnische Einrichtungen
- Zuwegung für Einbringung und Betrieb



- Position und Art der Medienanschlüsse
- Signaltechnische Einrichtungen
- Fördertechnische Anlagen
- Sonstige bauliche Anforderungen

Aus den räumlichen Hauptabmessungen des Prüfstandes wird gemeinsam mit den Angaben zu Bewegungsräumen der Anlage und Sicherheitsbereichen die Grundabmessung der baulichen Hülle bestimmt.

Die Funktionsflächen sind Bereiche, die unmittelbar zum Betrieb des Prüfstandes erforderlich sind. Für die Konzeption des gesamten Versuchsfeldes stehen diese Flächen nur einmal zur Verfügung.

Als Verkehrsflächen werden all jene Flächen im Grundriss bezeichnet, die zur Rüstung und Wartung des Prüfstandes erforderlich sind.

Unter sonstige bauliche Anforderungen werden hier Anforderungen zur baulichen Hülle zusammengefasst, die nicht den o.g. Punkten zuzuordnen sind. Dies können zum Beispiel Angaben zur besonderen Beschaffenheit einzelner Bereiche des Bodens oder der Wände oder besonders zu beleuchtende Bereiche des Prüfstandes sein.

4.5.2 Betreiberkonzept Prüfstände

Der Begriff Betreiberkonzept stammt aus der Gebäudeplanung und wurde hier für die Informationsübergabe an den Prüfstandentwicklungsprozess adaptiert. PREUß und SCHÖNE ([155]) beschreiben das Betreiberkonzept als ein ganzheitliches Facility-Management-Konzept, welches die für den Betrieb und die Bewirtschaftung von Gebäuden und den damit zusammenhängenden Anlagen und Objekten erforderlichen Leistungen und Prozesse umfasst. Es wird in erste Linie nach den Bedürfnissen des Nutzers und nicht nach der technischen Machbarkeit erstellt. Wichtige Bestandteile des Betreiberkonzeptes sind Prozess- und Schnittstellendefinitionen. Das adaptierte Betreiberkonzept für Prüfstände wird von diesem Vorschlag geringfügig abweichen. Die Komplexität der anlagenspezifischen Schnittstellen des Prüfstandes und der simultane Entwicklungsablauf lassen die Ergänzung der Dokumentation um eine Schnittstellenliste als sinnvoll erscheinen. Diese wird in Kap. 4.5.3 vorgestellt.



Das Betreiberkonzept für den Prüfstand soll Informationen in allen Phasen des Entwicklungsprozesses liefern. Darauf aufbauend werden das Betriebskonzept des Versuchsfeldes und schließlich die Betriebskonzeption des Versuchszentrums entwickelt. Darüber hinaus werden darin Informationen für den Betrieb des Prüfstandes in der Nutzungsphase zusammengestellt. Es bildet außerdem die Grundlage für spätere Optimierungsschritte in der Energieinfrastruktur des gesamten Versuchszentrums. Bezogen auf die genannten Anwendungen werden die folgenden Gliederungspunkte im Betreiberkonzept benötigt:

- Grundlegende, allgemeinverständliche verbale Funktionsbeschreibung der Anlage
- Betriebszeiten der Anlage / des Prüfstandes
- Erforderliche Peripheranlagen
- Darstellung des prozesstechnischen Ablaufs und der zeitlichen Verteilung der Betriebszyklen hinsichtlich Leistungsaufnahme und Sicherheitsspezifika
- Emission von Lärm und Gefahrenstoffen
- Beschreibung der verwendeten Prüflinge zu Abmessungen, Gewicht, und Sicherheitsspezifika
- Beschreibung der Anforderungen zur Raum-, Anlagen- und Prüflingskonditionierung

Die Beschreibung der Betriebszyklen beinhaltet den gesamten Ablauf einer Prüf- oder Messaufgabe am Prüfstand. Dazu gehören neben dem reinen Manöverbetrieb auch die Rüstung, Einrichtung, Kalibrierung, Abrüstung und Wartung.

4.5.3 Schnittstellenliste

Die Schnittstellenliste wird in der Konzeptphase der Anlagenplanung angelegt. Darin werden alle erforderlichen Informationen und Kennzahlen aufgeführt, welche die Einbindung der Anlage in Energie- und Datennetzwerke beschreiben. Darüber hinaus ist es bei komplexen Anlagen wie Prüfständen hilfreich, auch die Schnittstellen für mechanische Wechselwirkungen wie etwa Lagerpunkte für die Schwingisolierung darin mitzuführen. Die Schnittstellenliste erleichtert später die Erstellung des anlagentechnischen Raumbuches. Besteht für die Anlage oder den Prüfstand eine starke bauliche oder funktionale Abhängigkeit zu anderen Versuchseinrichtungen im Prüffeld, kann die Schnittstellenliste parallel zum anlagentechnischen Raumbuch weitergeführt werden. Weiterhin wird die Schnittstellenliste für die Vernetzung von Prüfständen im Versuchsfeld benötigt. Sie kann durch eine grafische Systemdarstellung ergänzt werden.



4.5.4 Energetische Anforderungen

Auf die Dokumentation der energetischen Anforderungen muss von Beginn des Entwicklungsprozesses an besonders Wert gelegt werden. Die Dimensionierung und Auslegung der Energieversorgung stellt eine konzeptentscheidende Wirkkette dar und muss daher bereits früh im Gebäudeentwicklungsprozess einen hohen Reifegrad erreichen. Für die Ableitung energetischer Anforderungen der Prüfstände kommen je nach Reifegrad verschiedene Methoden zum Einsatz. Während in der Konzeptphase der Prüfstand- oder Anlagenentwicklung Abschätzungen auf Basis einer Betrachtung der Hauptenergiewandlungsprozesse im Prüfstandkonzept eine gute Näherung liefern, werden mit steigendem Reifegrad simulative Lastganganalysen detaillierte Anforderungen erbringen. Auch hier begünstigt der Einsatz numerischer Simulation (vgl. Kap. 5.5) die erreichbare Genauigkeit bei der Festlegung der Anforderungen an das Gebäude.

4.5.5 Anlagentechnisches Raublatt und Raumbuch

Das anlagentechnische Raublatt kann als eine detaillierte Ergänzung zu Anlagenplan und Betreiberkonzept bezeichnet werden. Während die Schnittstellenliste ein Instrument in der Konzeptphase für die Entwicklung des Versuchsfeldes ist und damit nur indirekt im Gebäudeplanungsprozess, genauer der Entwurfsplanung, eingesetzt wird, ist das Raublatt deutlich umfangreicher und auch stärker detailliert. Die Angaben beziehen sich jedoch im Gegensatz zur Schnittstellenliste ausschließlich auf bauliche und gebäudetechnische Zusammenhänge. Abhängigkeiten der Prüfstände untereinander werden darin nicht berücksichtigt. Die Raublätter aller im Versuchsfeld befindlicher Prüfstände werden im anlagentechnischen Raumbuch des Versuchsfeldes zusammengefasst. Das anlagentechnische Raublatt kann durch die Redundanz der darin aufgeführten Schnittstelleninformationen aus der Schnittstellenliste abgeleitet werden. Der Aufbau entspricht im Wesentlichen dem eines nutzungsorientierten Raumbuches nach DIN 32835-2 ([175]). Abweichend von diesem Vorgehen ist das Anlegen eines Raublattes je Prüfstand oder Anlage sinnvoll. Da jedoch in einem Versuchszentrum mehrere Prüfstände in einem Raum untergebracht werden können oder sogar müssen, ist eine separate Dokumentation erforderlich. Das Raumbuch ist während des gesamten Entwicklungsprozesses von Gebäude und Versuchsfeld fortzuschreiben.



4.5.6 Anlagentechnisches Installations- und Wartungskonzept

Die bauliche Hülle wird in der Konzeptphase der Gebäudeentwicklung bei Funktionsgebäuden optimal an die funktionalen Anforderungen der Anlagen und die Prozesse in der Nutzungsphase des Gebäudes angepasst. Sie soll den Bedürfnissen des Nutzers zum Betrieb des Gebäudes gerecht werden. Dazu gehört auch die im Vergleich zur Hauptnutzungsphase des Gebäudes kurze Installationsphase der nutzerspezifischen Anlagen und Einbauten. Hinzu kommen regelmäßige, kurze Wartungsphasen, die ebenfalls mit ihren Prozess- und Anlagenspezifika von der Hauptnutzung abweichen können. In der Konzeptphase der Gebäudeplanung müssen also auch diese gebäudespezifischen Anforderungen definiert werden. Ein anlagentechnisches Installations- und Wartungskonzept ist aber darüber hinaus essenziell für den Aufbau und Betrieb des Prüfstands.

Installation / Einbringung nutzerspezifischer Anlagen

Die Einbringung der Prüfstände und anderer nutzerspezifischer Anlagen stellt meist räumliche Anforderungen bei der Zuwegung zum Prüfraum, die deutlich von jenen der Hauptnutzungsphase abweichen. Dazu muss für die Einbringung oft Fördertechnik eingesetzt werden. Dies kann zu erhöhten Lasten im Gebäude führen. Ist eine Zuwegung innerhalb des Gebäudes nicht möglich, können z.B. spezielle Dachkonstruktionen vorgesehen werden, welche die Einbringung der Hebertechnik von oben ermöglicht. Dabei sind dann Stellflächen in geeigneter Größe und Lastaufnahmefähigkeit vorzusehen. Die Grundlage für die Berücksichtigung in der Gebäudeplanung ist das Installationskonzept. Darin sind Angaben zu Grundabmessungen und Massen der ausschlaggebenden nicht demontierbaren Elemente des Prüfstandes zwingend erforderlich. Darüber hinaus sollten Angaben zu verwendbaren Anschlagmitteln und Hebezeugen ebenso darin wiederzufinden sein wie Angaben zur Schwerpunktlage mit einem leicht nachvollziehbaren geometrischen Bezugspunkt. Das Installationskonzept des Prüfstandes kann auch detaillierte Angaben zur Montage und Einrichtung des Prüfstandes beinhalten. Diese Angaben werden weniger für die Gebäudeplanung, jedoch umso mehr für die Konzeption des Versuchsfeldes und den Aufbau des Prüfstandes erforderlich. Zum Installationskonzept gehören auch die detaillierte Beschreibung einer Kalibrierungsprozedur und Angaben zu regelmäßigen Wiederholungen. Die dafür erforderlichen Werkzeuge und Hilfsmittel sind exakt anzugeben. Darüber hinaus ist zu überprüfen, ob zusätzliche Flächen zur Lagerung von Kalibrierhilfsmitteln erforderlich sind.



Wartung

Bereits im Betreiberkonzept werden Angaben zur Wartung der Prüfstände niedergeschrieben. Die Angaben zum Wartungskonzept gehen hier jedoch über die zeitliche Abfolge hinaus und umfassen Anforderungen zu benötigten Flächen, Verkehrswegen, Betriebsstoffen, Energieträgern und Leistungen. Darüber hinaus sollten darin auch Wechselwirkungen an gebäudetechnischen Schnittstellen und Angaben zu temporären Änderungen im Sicherheitskonzept für komplexe Wartungsvorgänge zu finden sein. Das Wartungskonzept enthält Wartungspläne und Fristen für regelmäßig durchzuführende Überprüfungen und Abnahmen. Es steht damit in engem Zusammenhang mit der Anlagensicherheit (vgl. Kap. 4.5.7) und dem Sicherheitskonzept (vgl. Kap. 5.2.1).

4.5.7 Anlagensicherheit

Sowohl die Montage, Inbetriebnahme, Kalibrierung und der Betrieb des Prüfstandes sind so zu konzipieren, dass Personengefährdung ausgeschlossen werden kann. Dafür ist es erforderlich, dass von Beginn der Konzeption der Anlage sicherheitstechnische Regelwerke in die Erstellung des Lastenheftes einbezogen werden. Hierzu zählen die aktuelle Fassung der Maschinenrichtlinie [182] und die DIN EN ISO 12100 [181].

Der Prüfstand muss demnach so konzipiert sein, dass von ihm keine Gefahr für den Menschen ausgeht. Die Umsetzung dieser Anforderung ist jedoch oft nicht ausschließlich durch anlageninterne Mittel umzusetzen. Daher ist es zwingend erforderlich, das Konzept zur Anlagensicherheit des Prüfstandes lückenlos auf das Sicherheitskonzept des Versuchsfeldes und des Gebäudes abzustimmen.

Die Grundlage für die Erstellung eines Konzeptes zur Anlagensicherheit ist die Gefahren- und Gefährdungsanalyse. Nach NEUDÖRFER ([126]) ist eine Gefahr dabei ein energetisches oder stoffliches Potenzial, welches objektiv vorhanden ist und dadurch zu unterschiedlichen Beeinträchtigungen oder Schäden führen kann. Als Gefährdung wird das örtliche und räumliche Zusammentreffen von Gefahr und Mensch bezeichnet. Das Risiko ist nach NEUDÖRFER eine kalkulierte Prognose für das Eintreten einer Gefährdung und ihrer Folgen. Das Risiko hängt von der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Schweregrad der Gefährdung ab. Aus dieser Betrachtung lässt sich das für die Erstellung eines Konzeptes zur Anlagensicherheit und eines Sicherheitskonzeptes für das Versuchsfeld erforderliche Vorgehen grundsätzlich ableiten. Bereits in der Konzeptphase des Prüfstandes kann eine



Gefahrenanalyse durchgeführt und während des Entwicklungsprozesses sukzessive detailliert werden, um schließlich mit dem Betreiberkonzept (vgl. Kap. 4.5.2) zu einer Gefährdungsanalyse erweitert zu werden. Die Durchführung der Gefährdungsanalyse ist in [95] beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt dann die Ableitung von Schutzmaßnahmen. Da in der Konzeptphase von Prüfstand und Versuchsfeld die für eine Risikobeurteilung erforderlichen Kennzahlen nicht zur Verfügung stehen, sind oft Entscheidungen auf Basis der Gefährdungsanalyse erforderlich. IBENDORF ([138]) zeigt ein Vorgehen für die Erstellung eines Konzeptes zur Anlagensicherheit anhand eines dynamischen Antriebsstrangprüfstands.

Für komplexe Anlagen wie Prüfstände eines Versuchsfeldes werden Schutzmaßnahmen wie z.B. Umhausungen gegen umherfliegende Teile auch über die Grenzen der Anlage hinaus in die Gebäudehülle verlagert. Gerade bei großen Subsystem- und Gesamtfahrzeugprüfständen kann sonst die Funktionalität nicht gewährleistet werden. Daher sind grundlegende Gefahren, welche bei dieser Anlage vom Prüfstand ausgehen, frühzeitig zu identifizieren und bereits in die Entwurfsplanung des Gebäudes mit einfließen zu lassen. Eine ausführliche Anleitung zur Konstruktion unter Beachtung sicherheitsrelevanter Aspekte ist ebenfalls in [95] zu finden. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich die Einführung von Gefährdungsklassen als nützliches Hilfsmittel ergeben. Mit der Klassifizierung wird es dem Planer des Versuchsfeldes oder der Gebäudestruktur erleichtert, die Anordnung der Prüfstände unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten zu entwerfen. Dazu wird anhand der Gefährdungsanalyse unterschieden in:

Gefährdungsklasse 1: Der Prüfstand verfügt über alle erforderlichen Schutzeinrichtung, sodass von ihm keine Gefährdung ausgeht.

Gefährdungsklasse 2: Aufgrund der Funktionalität des Prüfstandes können nicht alle Gefährdungen innerhalb des Prüfstandes kompensiert werden. Es sind technische, organisatorische Maßnahmen beim Betrieb des Prüfstandes erforderlich. Die Gefährdung beinhaltet ein niedriges energetisches oder stoffliches Schädigungspotenzial im Sinne der Anlagensicherheit.

Gefährdungsklasse 3: Vom Prüfstand geht eine erhebliche Gefährdung aus und er verfügt damit über ein hohes energetisches oder stoffliches Schädigungspotenzial. Die erforderlichen Schutzmaßnahmen können nicht oder nur unzureichend innerhalb der Anlagengrenzen umgesetzt werden. Der Prüfstand ist durch entsprechende bauliche Lösungen zu sichern.



Nach der Fertigstellung des Versuchsfeldes ist eine erneute Gefährdungsanalyse mit Risikobeurteilung erforderlich, da sich die Verhältnisse mit der Installation des Prüfstandes im Versuchsfeld ändern können. Als weiterführende Literatur zu diesem Themenbereich wird [118] benannt.



5 Beitrag zum Entwicklungsprozess „Gebäude“

Die Integration des Versuchsfeldes in eine Gebäudehülle stellt im Gesamtprozess eine besondere Herausforderung dar. Wie bereits an mehreren Stellen dieser Arbeit erwähnt, existieren eine große Zahl an Schnittstellen und Wechselwirkungen zwischen dem Gebäude und den Anlagen des Versuchsfeldes. Es ist daher unbedingt erforderlich, die für die Entwicklung der Gebäudehülle als Teil des Gesamtsystems „Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum“ konzeptbestimmenden Wirkketten frühzeitig zu identifizieren. Dazu gehört auch die Identifikation der dazugehörigen Schnittstellen und Schnittstelleninformationen der Teilsysteme Gebäude, Versuchsfeld und Prüfstände. Nur so kann sichergestellt werden, dass die simultane Durchführung der Teilprozesse am Ende mit einer erfolgreichen Synchronisation abgeschlossen werden kann. Im folgenden Kapitel 5, Beitrag zum Entwicklungsprozess „Gebäude“, wird zuerst der in der Bauindustrie übliche, allgemeine Ablauf des Planungsprozesses erläutert. Daraus sind terminliche Schnittstellen und Informationsübergabepunkte abzuleiten. Danach wird anhand der für die Gestaltung des Versuchsfeldes wesentlichen Bereiche der Vorplanung und Ausführungsplanung gezeigt, welche konzeptionellen Schritte für die Integration des Versuchsfeldes in die Gebäudehülle durchgeführt werden müssen. Die Umsetzung der Planungsaufgaben folgt dann den in der Bauindustrie üblichen Vorschriften und hat einen formalen Charakter. Dieser nichtwissenschaftliche Teil des Gesamtentwicklungsprozesses soll daher nicht in den Fokus dieser Arbeit rücken. Da die direkte Kopplung des kreativen Konzipierens an die formalen Abläufe der Bauplanung für das Gelingen zwingend erforderlich war, müssen diese hier mit erwähnt werden. Die Einzelschritte zum Konzeptentwurf des Gebäudes unterliegen einer ständigen Rückkopplung in Form von Entwicklungsschleifen zu den parallel ablaufenden Teilprozessen des Versuchsfeldes und der Prüfstände. Der Gesamtprozess nach der Grundlagenermittlung erfolgt iterativ.

5.1 Ablauf des Planungsprozesses

Die Entwicklung von Gebäuden von der Projektidee bis zur Inbetriebnahme läuft in mehreren Phasen ab. In Deutschland orientieren sich diese an der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI). Darin sind die folgenden neun Leistungsphasen enthalten (vgl. [169]):



1. Grundlagenermittlung
2. Vorplanung und Kostenschätzung
3. Entwurfsplanung und Kostenberechnung
4. Genehmigungsplanung
5. Ausführungsplanung
6. Vorbereitung der Vergabe
7. Mitwirkung bei der Vergabe
8. Objektüberwachung – Bauüberwachung und Dokumentation
9. Objektbetreuung

Die Planung der Gebäudestruktur sowie die Steuerung des Ablaufes werden durch Architekten und Bauingenieure übernommen. Für den Ablauf des funktionalen Entwicklungsprozesses des Versuchsfeldes ergeben sich daraus konkrete Zeitpunkte, zu denen ein definierter Reifegrad des Versuchsfeldes und später auch der einzelnen Prüfstände erreicht sein muss. Zu diesen Zeitpunkten sind Informationen in entsprechender Detaillierung zu dokumentieren und in den Gebäudeplanungsprozess einzusteuern.

5.2 Grundlagenermittlung und Vorplanung

In den Planungsabschnitten Grundlagenermittlung und Vorplanung findet der größte Teil des kreativen Entwicklungsprozesses für das Fahrzeugtechnische Versuchszentrum statt. Hier wird zunächst auf Basis der in Kap. 4.3.3 erarbeiteten vorläufigen Struktur des Versuchsfeldes und der in Kap. 4.5 erstellten Dokumentationen der grundlegende Bedarf an Raum- und Energieressourcen ermittelt. Dazu werden Bedarfslisten erstellt. Daraus kann der Gesamtflächen- und Leistungsbedarf abgeleitet und mit einer Standortsuche begonnen werden. In der Vorplanungsphase müssen diese allgemeinen Anforderungen jetzt in gebäudespezifische Anforderungen überführt werden. Dazu wird zunächst ein Betriebskonzept für das Versuchszentrum erstellt. Darauf aufbauend wird eine Anforderungsanalyse für das Gebäude und Umfeld durchgeführt. Im Anschluss daran kann aus fachlicher Sicht eine Situationsbewertung zu potenziellen Standorten oder zu potenziellen Bestandsgebäuden durchgeführt werden. Da dies nicht Teil der vorliegenden Arbeit war, wird nachfolgend nicht weiter darauf eingegangen.



5.2.1 Betriebskonzept

Das Betriebskonzept beschreibt das vom Nutzer des Versuchszentrums geforderte Vorgehen im gesamten Umfeld des Versuchszentrums. Es ist eine Darstellung der prüfstand- und versuchsfeldübergreifenden Prozesse. Darin werden die Konzepte zur Betriebssicherheit, zur Bestückung der Prüfstände, zur Entsorgung und zur Reinigung zusammengefasst. Es bildet damit eine weitere wesentliche Schnittstelle zwischen den Planungsprozessen von Gebäude, Versuchsfeld und Prüfständen. Die Detaillierung dieser Konzepte muss an den jeweiligen Reifegrad der Planung angepasst werden. Das Betriebskonzept ermöglicht dem Planungsteam einen detaillierteren Einblick in die zukünftigen Abläufe innerhalb und in unmittelbarer Umgebung des Versuchsfeldes. Es ist daher Teil der Grundlagenermittlung und muss vor der Standortentscheidung vorliegen.

Sicherheitskonzept

Durch die Erstellung eines Sicherheitskonzeptes sollen alle Gefährdungen, welche sich aus der anlagenspezifischen Konstruktion der Prüfstände ergeben, im Umfeld der baulichen Hülle erneut betrachtet werden. Daraus sind dann durch eine Gefährdungsanalyse Maßnahmen zu definieren, die einen für Menschen und Sachwerte sicheren Betrieb der Anlagen im Gebäude gewährleisten.

Bestückungskonzept

Im Bestückungskonzept sind Verkehrswege zu definieren, die eine sichere Zufuhr von Prüflingen und Betriebsstoffen zu den Prüfständen gewährleisten. Dazu wird auf die im individuellen Nutzungskonzept der Prüfstände definierten Bedarfe zurückgegriffen.

Entsorgungskonzept

Das Entsorgungskonzept beinhaltet Vorgaben über Art und Umfang der während des Betriebs des Versuchsfeldes in der Hauptnutzungsphase anfallenden Reststoffe. Hieraus müssen dann Sammelplätze für Rest- und Gefahrenstoffe dimensioniert und sicherheitstechnisch ausgelegt werden.

Reinigungskonzept

Im Reinigungskonzept werden Reinigungszeiten und die Durchführung beschrieben. Dafür sind die Art und der Grad der zu erwartenden Verschmutzung von Bedeutung. Diese Angaben sind Grundlage für eine betriebssichere Gestaltung von Verkehrsflächen und wer-



den bei der Erstellung des Sicherheitskonzeptes einbezogen. Des Weiteren haben diese Angaben direkten Einfluss auf die Gestaltung von Oberflächen und die Baukonstruktion.

5.2.2 Standortwahl

Die Standortwahl erfolgt auf der Grundlage einer Standortanalyse. OTTMANN ET AL. ([57]) zeigen dazu methodische Ansätze vordergründig aus unternehmerischer Sicht. Dennoch lassen sich daraus Schlüsse für die Randbedingungen zur Erschließung und den Betrieb ziehen.

Für den vorliegenden Fall des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums standen der Umbau eines vormals militärisch genutzten Gebäudekomplexes in unmittelbarer Nähe zum Zentralcampus und ein Neubau zur Wahl. Die Forschungseinrichtung verfügt bereits über einen Standort im Zentralcampus der Universität, der auch nicht aufgegeben werden kann. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wurde der Umbau der Bestandsgebäude bevorzugt. Dieser Standort bietet vor allem durch die Möglichkeit zur Nutzung vorhandener Energie- und Informationsinfrastrukturen auch langfristig deutliche Vorteile gegenüber eines Neubaus in größerer Entfernung zum Zentralcampus.

Der Standort August-Bebel-Str. 32 in Dresden und die dort vorhandene Gebäudestruktur sind in Abb. 5.1 bis Abb. 5.4 dargestellt.

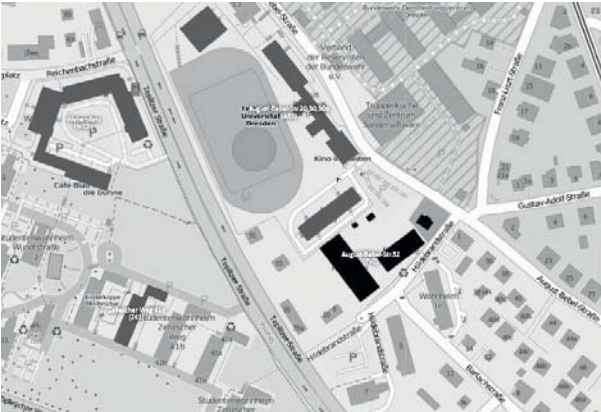


Abb. 5.1 Umfeld des Gebäudekomplexes August-Bebel-Str.32, Dresden ([191])



Abb. 5.2 Luftbild des Gebäudekomplexes August-Bebel-Str.32, Dresden ([192])



Abb. 5.3 Außenansicht Halle 127, August-Bebel-Str.32, Dresden



Abb. 5.4 Innenansicht Halle 125 August-Bebel-Str.32, Dresden

5.2.3 Anforderungsanalyse „Gebäude und Umfeld“

Aus den Konzeptentwicklungsprozessen für Versuchsfeld und Prüfstände sind bereits erste Strukturen zur Gestaltung des Gebäudes ableitbar. Aus Abb. 4.12 kann abgelesen werden, dass zwei Versuchseinrichtungen einen erheblich größeren Flächenbedarf haben und daher hier in einem separaten Gebäudekomplex untergebracht werden sollen. Die Analyse der Prozessabhängigkeiten auf Konzeptebene ergab, dass eine unmittelbare räumliche Nähe dieser Prüfstände zu den übrigen im Versuchsfeld enthaltenen Prüfständen wünschenswert, jedoch nicht zwingend erforderlich ist. Die Gebäudeentwicklung für die Prüfstände „Linearreifenprüfstand“ und „Hochdynamischer Fahrsimulator“ werden daher in einen späteren Planungsabschnitt verschoben und hier nicht weiter betrachtet.

Aus der Analyse der Makro- und Mikroprozesse der verbleibenden zwölf Prüfstände im Versuchsfeld aus Kap. 4.2.6 leitet sich unmittelbar der Bedarf an Lager- und Montagemöglichkeiten für den Betrieb der Prüfstände ab, der im weiteren Planungsverlauf mit berücksichtigt werden muss. Des Weiteren müssen in der Anforderungsanalyse all diejenigen technischen Spezifika und Eigenschaften des Versuchsfeldes bestimmt werden, die für die Entwicklung des Gebäudes eine konzeptbestimmende Rolle einnehmen. Die kann wie in anderen Produktentstehungsprozessen mit Hilfe einer Wirkkettenanalyse erfolgen.

Für die Wirkkettenanalyse im Versuchsfeld werden die technischen Spezifika der Versuchseinrichtungen oder Prüfständen in der jeweils vorliegenden Tiefe in einer Matrixstruktur zusammengeführt. Dabei werden sowohl die Parameter zu Platzbedarf, Gefah-



renklasse, Medienversorgung, Störgrößenemission (mechanisch, elektrisch, u.a.) und prozessspezifischen Randbedingungen der einzelnen Prüfstände, als auch deren Wechselwirkungen im Versuchsfeld erfasst. Dazu zählen auch geometrische und funktionale Gleichzeitigkeiten (vgl. Kap. 4.1.4). In Tab. 5.1 werden die zu untersuchenden Kriterien aufgeführt, aus denen sich konzeptbestimmenden Wirkketten ergeben können. Aus der dargestellten Reihenfolge und den Erläuterungen lässt sich eine Priorität ableiten. Der Einfluss einer nicht beachteten Wirkung innerhalb dieser Kriterien auf die Baukosten steigt in Tab. 5.1 von unten nach oben an.

Eigenschaft	Erläuterung
<i>Sicherheit</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfstände, von denen eine besondere Gefährdung ausgeht (rotierende oder wegfliegende Teile) sollten in separaten Prüfräumen untergebracht werden.
<i>Schwingisolierung</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Für die Umsetzung von Schwingisoliationsmaßnahmen sind zusätzliche Kubaturen und erhöhte Bodenlasten vorzusehen. Die Schwingisolierung nimmt unmittelbar Einfluss auf die Gebäudestruktur.
<i>Bestückungsprozess</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrswege für die Bestückung der Prüfstände nehmen unmittelbar Einfluss auf die Gebäudestruktur. (vgl. [155])
<i>Konditionierung</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Die Leitungsführung vor allem für die Konditionierung der Raumluft hat einen hohen Platzbedarf. Darüber hinaus nimmt die Aufstellung der Konditioniergeräte (Rückkühler, Wärmeübertrager, u.a.) unmittelbar Einfluss auf die Gebäudestruktur.
<i>Emission und Umweltschutz</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Technische Maßnahmen zur Schallisolation und Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung sind ebenfalls aufwändig, lassen sich jedoch gut an vorgegeben Kubaturen anpassen.
<i>Hydraulik</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Wird eine zentrale Druckölversorgung eingerichtet, sind die Verbraucher so anzuordnen, dass minimale Leitungslängen realisierbar sind. Es können hydraulische Wechselwirkungen im Hydrauliknetz entstehen.

Tab. 5.1 Konzeptbestimmende Eigenschaften des Versuchsfeldes

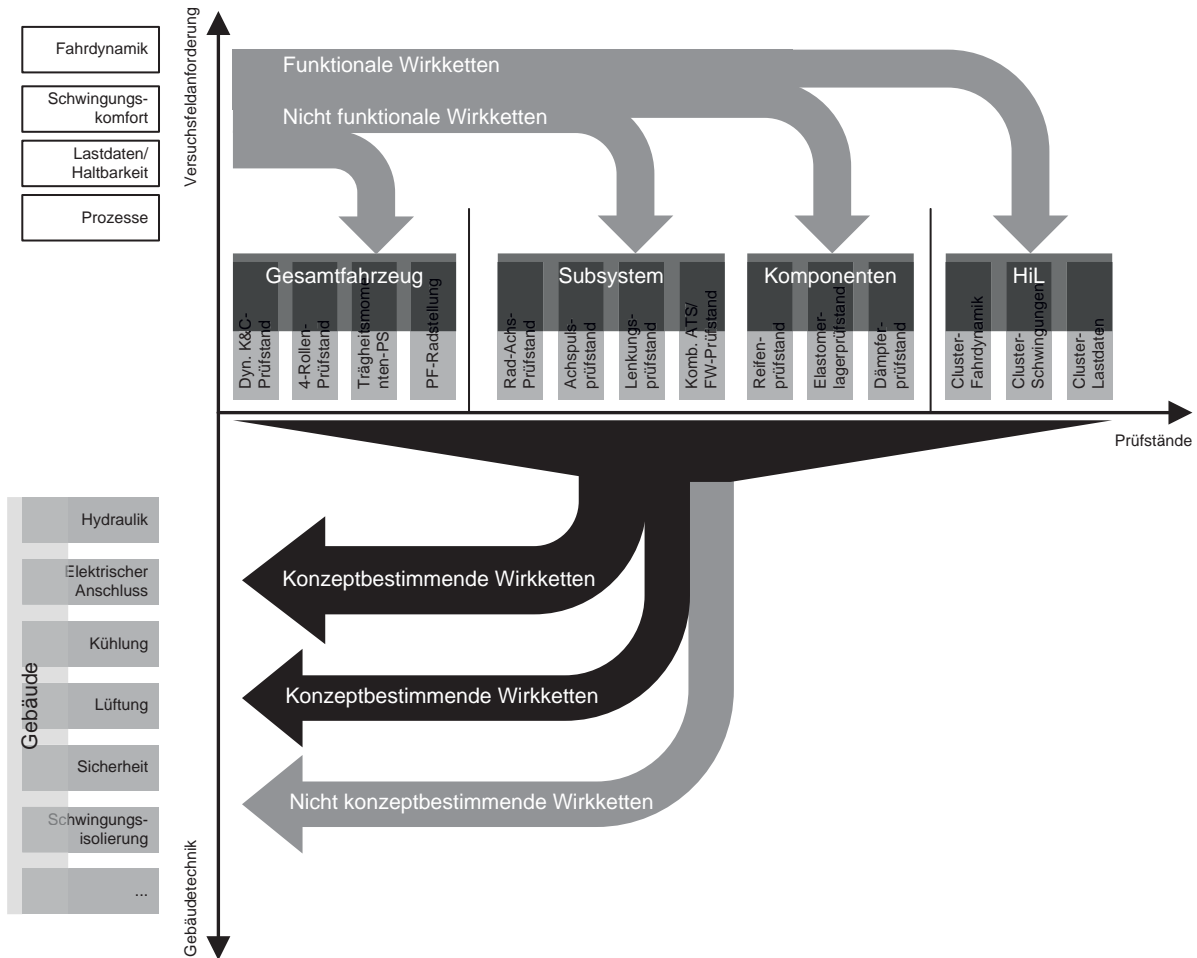


Abb. 5.5 Wirkkettenmatrix Versuchsfeld

Nachdem die konzeptbestimmenden Eigenschaften identifiziert sind, ist die technische Realisierbarkeit zu prüfen. Diese stark interdisziplinäre Aufgabe wird in der Regel von einem Planungsteam bestehend aus Experten aller Fachbereiche bearbeitet. Werden dabei kritische Bereiche identifiziert, in denen die technische oder finanzielle Realisierbarkeit nicht zweifelsfrei sichergestellt werden kann, müssen Machbarkeitsanalysen mit einem planerischen Mehraufwand durchgeführt werden.

5.2.4 Machbarkeitsanalysen

Innerhalb der Machbarkeitsanalyse werden die konzeptbestimmenden Eigenschaften des Gesamtvorhabens untersucht. Am Ende dieses Schrittes soll planerische Sicherheit über die grundsätzliche Realisierbarkeit aus technischer, geometrischer, aber auch finanzieller Sicht vorhanden sein. Kann diese Sicherheit durch die Detaillierung nicht hergestellt wer-



den, müssen die baulichen Rahmenbedingungen (Standortwahl) erneut festgelegt werden. Ein Abbruch des Vorhabens ist die letzte Konsequenz dieser Ergebnisse.

Im vorliegenden Fall konnte in der Grundlagenermittlung ein sehr detaillierter Informationsstand zum *Dynamischen Kinematics and Compliance Prüfstand* erzeugt werden. Nach Abb. 4.12 hat dieser Prüfstand besondere Anforderungen an die Funktionsfläche und bringt zugleich eine hohe Anlagenkomplexität in den Kriterien Schwingisolierung und Hydraulik mit. Des Weiteren ist dieser Prüfstand ein zentraler Bestandteil vieler Prozesse im Versuchsfeld. Dies und auch sein Funktionsprinzip begingen einen aufwendigen Bestückungsprozess.

Wie in Kap. 1.2 bereits dargestellt wurde, handelt es sich hier um die Integration in ein Bestandsgebäude. Die Machbarkeitsanalyse wurde vordergründig zum Einbau des *Dynamischen Kinematics and Compliance Prüfstands* durchgeführt. JUNKER ET AL. untersuchen in dieser Studie ([148]) geometrische und baukonstruktive Randbedingungen. Zudem werden verschiedene Varianten zum Betrieb des Prüfstands im Kontext der vorgesehenen Prozesse geprüft. In Abb. 5.6 sind drei Lösungsvarianten abgebildet, die während der Machbarkeitsanalyse erarbeitet wurden. Dargestellt ist hier der hohe Hallenbereich (vgl. Abb. 5.3 und Abb. 5.4) des Gebäudes 127. Entsprechend der im Betreiberkonzept (vgl. Kap. 4.5.2) beschriebenen Abläufe im Prüfstandbetrieb wurde untersucht, ob alle Prozessschritte einschließlich der Handhabung des Prüflings „Gesamtfahrzeug“ durchführbar sind.

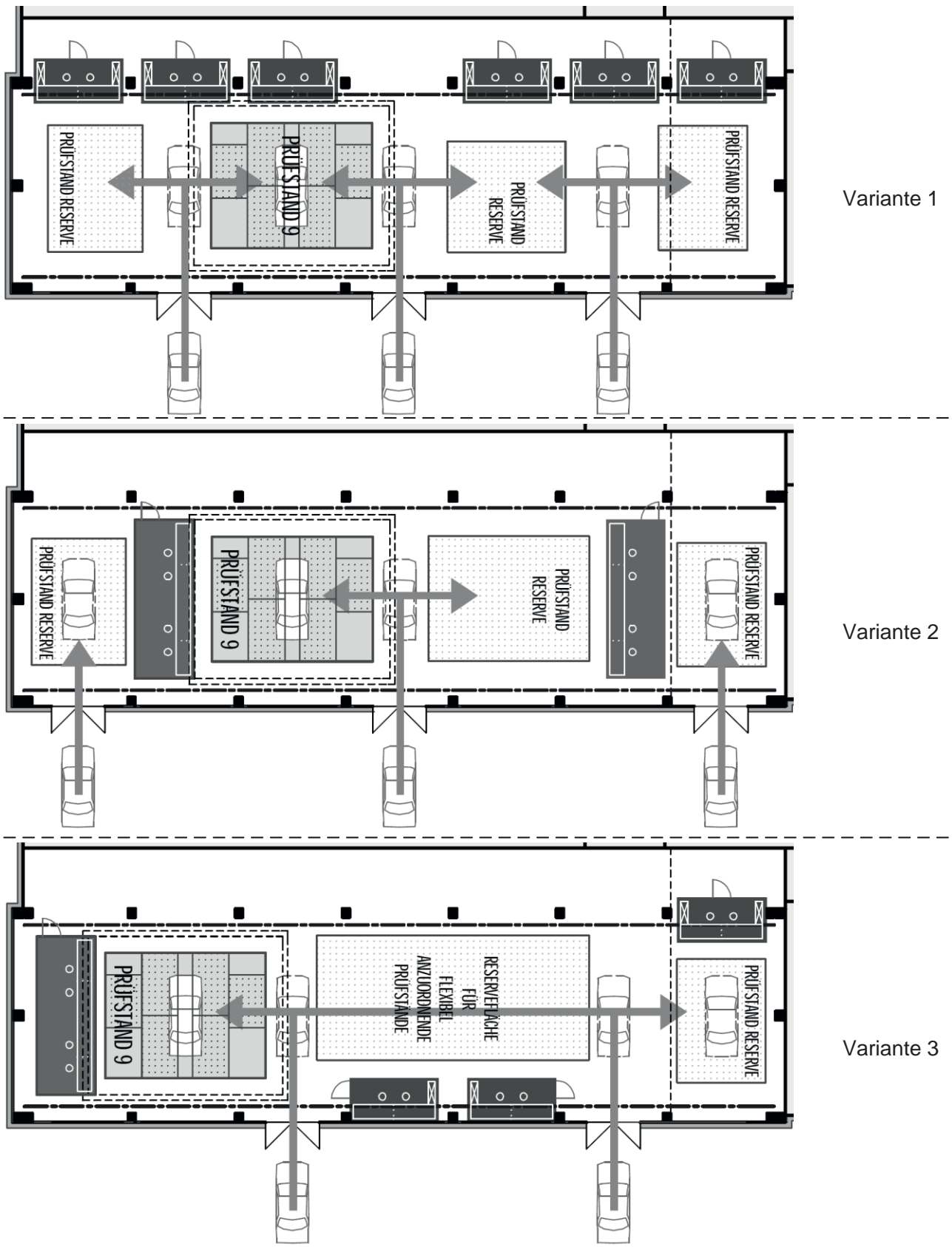


Abb. 5.6 Lösungsvarianten zur Position des Prüfstandes im Bestandsgebäude 127 aus [148]



Die Abb. 5.7 zeigt das Ergebnis der geometrischen Untersuchung. Darin ist zu erkennen, dass die erforderliche Kubatur zum Einbau des Prüfstandes mit einer Schwingisolierung möglich ist.

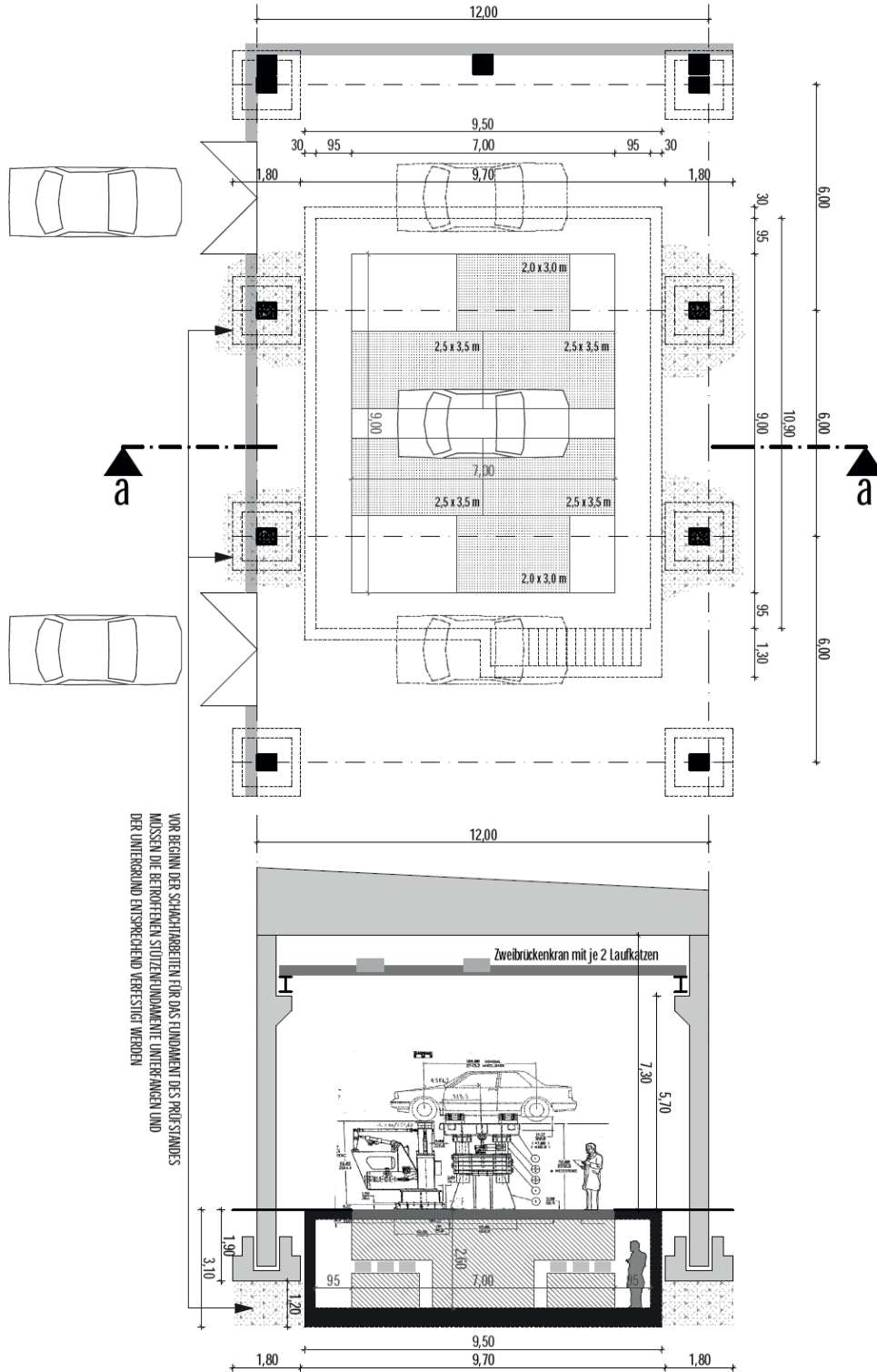


Abb. 5.7 Geometrische Untersuchung in der Machbarkeitsanalyse ([148])



5.2.5 Situationsbewertung

Nachdem die grundsätzliche Machbarkeit der kritischen Bereiche überprüft und nachgewiesen werden konnte, kann eine Situationsbewertung erstellt werden. Anhand dieser wird schlussendlich die Entscheidung für die Eignung des Standortes beziehungsweise des Bestandsgebäudes und damit die Fortsetzung der Planung oder für eine erneute Standortsuche getroffen. Für die Vorbereitung der Situationsbewertung können zum Beispiel Checklisten erstellt werden. Weiterhin kann hier ein Flächenverteilungsplan auf Basis eines Bestandsgrundrisses erstellt werden. Der Entscheidungsprozess erfordert ein hohes Maß an Erfahrung und kann mit methodischen Hilfsmitteln nur unterstützt werden. Für die Entscheidung müssen letztendlich Experten einbezogen werden. Im vorliegenden Fall wurde der Standort mit Bestandsgebäuden als geeignet für das Gesamtvorhaben befunden.

5.3 Konzeptentwurf Gebäudestruktur - Entwurfsplanung

Der Konzeptentwurf des Gebäudes ist ein hoch kreativer Abschnitt im gesamten Entwicklungsprozess. Federführend ist hier in der Regel ein Architekt oder bautechnischer Fachplaner. Die in dieser Arbeit vorgestellte Systematik beschränkt sich für diesen Abschnitt auf Aufgaben des Nutzers und des Anlagenplaners für das Versuchsfeld. Bei stark individualisierten Anlagen wie einem Versuchsfeld für Forschung und Lehre sind diese beiden Rollen stark miteinander verwoben. Auch wenn bei sequenziell ablaufenden Entwicklungsprozessen zu diesem Zeitpunkt der größte Teil der Vorarbeit des Anlagenplaners bereits durchgeführt wurde und ein detaillierter Informationsstand zu technischen Anforderungen der Anlagen an das Team zur Gebäudeplanung übergeben wird, besteht die Anforderlichkeit der stetigen Mitwirkung des Anlagenplaners und Nutzers in diesem Abschnitt. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch ein parallelisierter Ablauf beschrieben, in dem sich die Konzeptentwicklung von Gebäude, Versuchsfeld und Prüfständen zeitlich überlagern. Das impliziert eine noch stärkere Interaktion innerhalb des Planungsteams.

5.3.1 Darstellung der Ausgangssituation für den Gebäudeplanungsprozess

Nachdem für das Versuchsfeld bereits in Kap. 4.3 ein erstes Konzept erarbeitet wurde, muss in der Gebäudeplanung nun die funktionale Integration des Versuchsfeldes in das Bestandsgebäude 127 aus Abb. 5.2 erfolgen. Das Gesamtvorhaben wurde dazu in drei



Bauabschnitte unterteilt. Die Unterteilung steht nicht in einem funktionalen Zusammenhang zum Versuchsfeld und soll daher hier nicht weiter betrachtet werden. Im ersten Bauabschnitt soll der in Abb. 5.4 dargestellte hohe Hallenbereich mit Prüfständen ausgerüstet werden. Die Energieinfrastruktur soll bereits für den Endausbauzustand vorbereitet werden. Dieser wird erreicht, wenn insgesamt 15 Prüfstände und vier Labore am Standort aus Abb. 5.2 zum Ende des zweiten Bauabschnittes und zwei weitere Großprüfstände an einem nahe gelegenen zweiten Standort zum Ende des dritten Bauabschnittes umgesetzt sind. Für die Ergebnisdarstellung der methodischen Vorgehensweise wird der Fokus auf den bereits fertiggestellten ersten Bauabschnitt mit den folgenden sechs Prüfständen gerichtet.

Bauabschnitt	Prüfstand
1. Bauabschnitt	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-Elastomerprüfstand • Zug- Druck- Messmaschine • Achsprüfstand / Straßensimulator • Dynamischer Kinematics and Compliance-Prüfstand • Messvorrichtung für Schwerpunkt und Trägheitsmomente • Messvorrichtung für Radstellungsgrößen
2. Bauabschnitt	<ul style="list-style-type: none"> • Kombiniertes Antriebsstrang-Fahrwerk-Prüfstand • Reifenprüfstand mit Trommel oder Flachbahn • Reifen-Achs-Prüfstand • Servohydraulisches Multifunktionsprüffeld • Lenkungsprüfstand • Bremsenprüfstand • Innengeräuschprüfstand • Prüfstand 1 für mechatronische Systeme (nicht Gegenstand dieser Arbeit) • Prüfstand 2 für mechatronische Systeme (nicht Gegenstand dieser Arbeit) • Prüfstand 3 für mechatronische Systeme (nicht Gegenstand dieser Arbeit)
3. Bauabschnitt	<ul style="list-style-type: none"> • Linearreifenprüfstand mit Umweltsimulation • Hochdynamischer Fahrsimulator

Tab. 5.2 Gliederung der Bauabschnitte

5.3.2 Funktionales Blockschaubild

Im Kap. 4.1.4 wurde bereits eine Form der hier verwendeten Systemdarstellungen vorgestellt. Die Systemdarstellung ist auch für den Konzeptentwurf ein leistungsfähiges Hilfsmittel für den Informationstransport innerhalb des Projektteams. Die Abb. 5.8 zeigt das funktionale Blockschaubild des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums. Darin sind wesentliche Informationen der einzelnen Elemente des Versuchsfeldes (Prüfstände) und weitere



Elemente dargestellt, welche sich unmittelbar als Anforderungen auf den Gebäudeplanungsprozess auswirken. Dazu gehören auch Funktionsräume und -flächen, die zum Betrieb der Prüfstände erforderlich sind und in der Bedarfsermittlung während der Grundlagenermittlung (vgl. Kap. 5.2) festgestellt wurden.

Für die Planung des Gebäudes 127 des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums wurden die Funktionsflächen maßstäblich aufgetragen. Daneben wurden durch Piktogramme grundlegende technische Anforderungen der Prüfstände und Funktionsräume eingeführt. Außerdem wurden prüfstandübergreifende Spezifika im Versuchsfeld eingetragen. Aus Abb. 5.8 wird damit ersichtlich, für welche Prüfstände technische Gemeinsamkeiten, wie zum Beispiel Bedarfe zu Unterflureinbauten, Kraneinbauten oder hydraulische Druckölversorgung bestehen. Diese Visualisierung unterstützt den Entwurfsprozess im unter Beteiligung von Planern der einzelnen Gewerke erheblich.

Für die praktische Anwendung im Gebäudeplanungsprozess ist das Funktionale Blockschaubild ein leistungsfähiges Hilfsmittel zur Kommunikation zwischen den Fachplanern und zum Konzeptentwurf der Raumplanung.

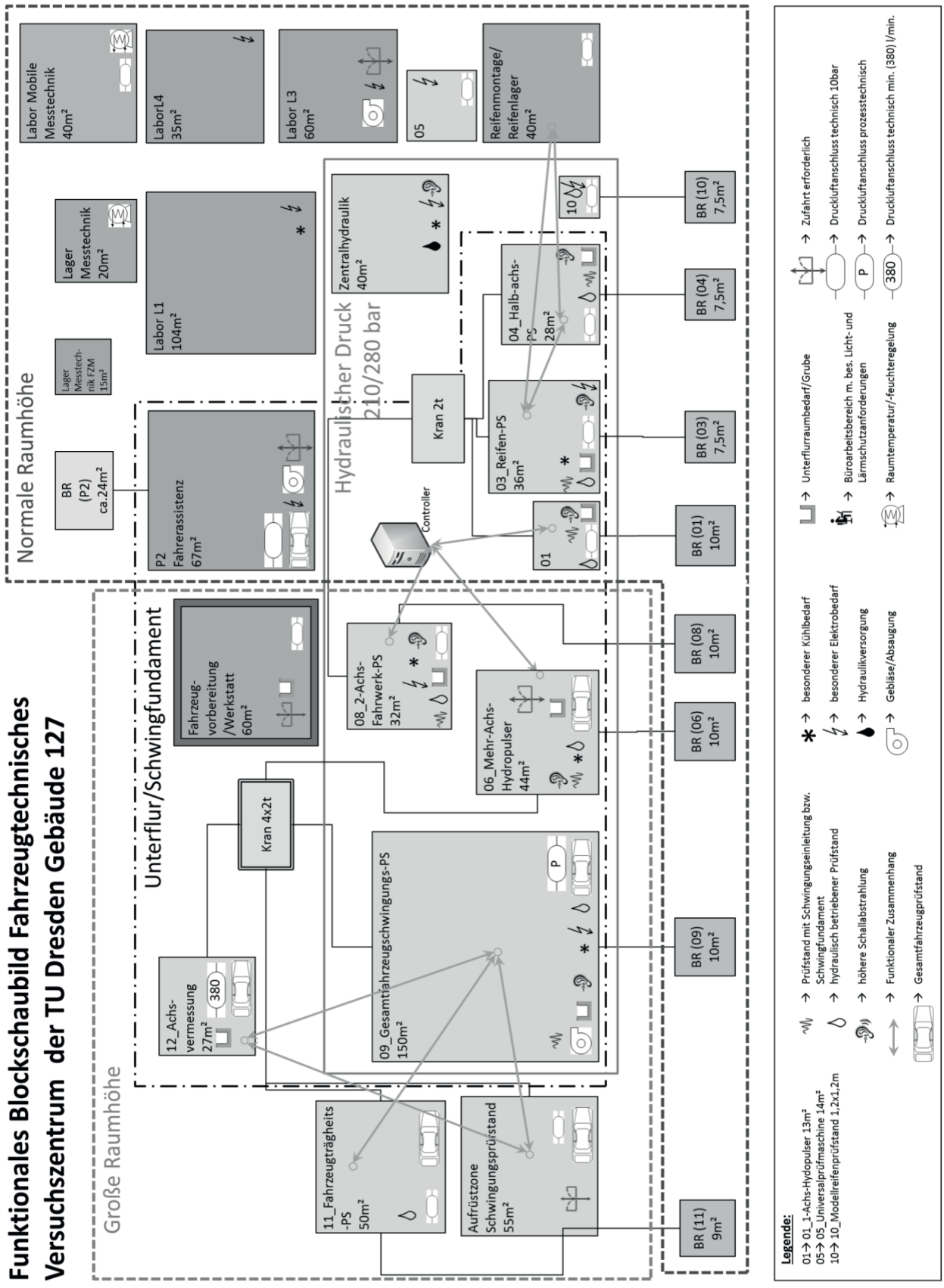


Abb. 5.8 Funktionales Blockschaubild des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums



5.3.3 Technologische und geometrische Gleichzeitigkeit

Mit Hilfe einer Gleichzeitigkeitsanalyse können in der Konzeptphase untereinander bestehende funktionale Abhängigkeiten der Prüfstände mit in den Planungsprozess einfließen. Die Analyse kann unter unterschiedlichen Systemaspekten durchgeführt werden und unabhängig voneinander Informationen für den Gebäudeplanungsprozess liefern. Eine grundsätzliche Unterscheidung wird nach technologischen und geometrischen Aspekten vorgenommen. Mit der technologischen Gleichzeitigkeitsanalyse werden erste Anforderungen für die Energieinfrastruktur erzeugt. Hier werden gemeinsam nutzbare Medien und Energieträger untersucht. Die geometrische Gleichzeitigkeitsanalyse liefert Informationen für die räumliche Gestaltung des Versuchsfeldes und für das Sicherheitskonzept. Das Ziel ist es, den tatsächlichen Raum- oder Medienbedarf und die Erforderlichkeit einer räumlichen bzw. technischen Trennung zu erarbeiten, wenn der Betrieb durch organisatorische Vorgaben zu stark eingeschränkt würde.

Die Berechnung der technologischen Gleichzeitigkeiten erfolgt auf Basis der Prozessplanung für Mikro- und Makroprozesse im Versuchsfeld. Stehen noch keine detaillierten Informationen dafür zur Verfügung, können Szenarien (Sz) auf Prüfstandebene aufgestellt werden. Dazu wird anhand des Betreiberkonzeptes (vgl. Kap. 4.5.2) die jeweilige Betriebszeit der einzelnen Prüfstände ermittelt. Unter Berücksichtigung prozesstechnischer Abhängigkeiten der Prüfstände untereinander und geometrischer Gleichzeitigkeiten werden dann verschiedene Varianten für Nutzungsszenarien erstellt. Abb. 5.9 zeigt eine Darstellung technischer Gleichzeitigkeiten in acht Varianten für Nutzungsszenarien (Sz1 – Sz8). Darin werden die einzelnen Prüfstände als Verbraucher für elektrische Energie und Kühlleistung mit ihrer spezifischen Spitzenleistungsaufnahme und den jeweiligen Betriebszeiten als bezogene Größe auf ein definiertes Zeitfenster geführt. Die Nutzungsszenarien werden hier durch logische Operationen auf Basis prozesstechnischer Gleichzeitigkeit abgebildet. Daneben wurden in gleicher Weise auch sicherheitstechnische Aspekte untersucht.

Anhand dieses Vorgehens werden Gleichzeitigkeitsfaktoren für verschiedenen Versorgungsnetze im Gebäude abgeschätzt. Eine Präzisierung dieser technologischen Gleichzeitigkeitsfaktoren wird durch die Erstellung eines Energiemanagementsystems (vgl. Kap. 5.5) erreicht. In diese Betrachtung müssen auch Funktionsräume einbezogen werden, die nur



mittelbar mit den Elementen des Versuchsfeldes in Zusammenhang stehen, jedoch Teil der Energieinfrastruktur sind.

Pos.	Bezeichnung	Leistung [kW]		Betriebszeit in %	Gleichzeitigkeit									
		Anschlussleistung elektrisch (EAL)	Kühlleistung (KL)		Sz1	Sz2	Sz3	Sz4	Sz5	Sz6	Sz7	Sz8	Su	
					88%	75%	75%	63%	63%	75%	50%	38%		
	Fahrzeuvorbereitung /Werkstatt	40,0	0,0	50,0%	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50,0%
	Labor mobile Messtechnik	20,0	0,0	25,0%	1	0	1	0	0	0	0	0	0	25,0%
	01 1-Achs-Hydropulser	18,5	16,0	75,0%	1	1	1	1	1	1	0	0	0	75,0%
	02 5-Achs-Antriebstrang-PS	500,0	260,0	87,5%	1	1	1	1	1	1	1	0	0	87,5%
	03 Reifen-PS	500,0	60,0	75,0%	1	1	1	1	1	1	0	0	0	75,0%
	04 Halbachs-PS	500,0	60,0	50,0%	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50,0%
	05 Universalprüfmaschine	10,0	0,0	25,0%	1	0	1	0	0	0	0	0	0	25,0%
	06 Mehr-Achs-Hydropulser	135,0	134,0	50,0%	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50,0%
	07 4-Rollen-PS	500,0	250,0	50,0%	0	0	0	0	1	1	1	1	1	50,0%
	08 2-Achs-Fahrwerk-PS	150,0	120,0	50,0%	0	0	0	0	1	1	1	1	1	50,0%
	09 GesamtfahrzeugSchwings-PS	350,0	250,0	12,5%	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12,5%
	10 Modellreifen-PS	10,0	0,0	25,0%	1	1	0	0	0	0	0	0	0	25,0%
	11 Fahrzeugträgheits-PS	50,0	45,0	12,5%	0	0	0	0	0	0	1	0	0	12,5%
	12 Achsvermessung	10,0	0,0	12,5%	0	0	0	0	0	1	0	0	0	12,5%
Berechnung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für die Dimensionierung von Medienversorgungen					Summe EAL	1734	1704	1724	1694	1669	1679	1200	1000	
					Summe KL	530	530	530	530	706	706	675	620	
					maximale Gleichzeitigkeit in Prüfständen									0,88
					maximale Gleichzeitigkeit in El.Anschlussleistung									0,62
					maximale Gleichzeitigkeit in Kühlleistung									0,59

Abb. 5.9 Technische Gleichzeitigkeiten im Versuchsfeld

5.3.4 Konzept zur Gebäudestruktur

Die Entwicklung der Gebäudestruktur wird maßgeblich durch Fachplaner des Baugewerbes übernommen. Hier werden die während der Grundlagenermittlung (Kap. 5.2) definierten Anforderungen planerisch detailliert und umgesetzt. Der Fachplaner erhöht stetig den Reifegrad der Gebäudeplanung, sodass die Reifegrade von Versuchsfeld und Prüfständen für das hier postulierte simultane Vorgehen kontinuierlich an die Gebäudeplanung angegliedert werden müssen. Das setzt die ständige Mitwirkung des Anlagenplaners der Prüfstände und Versuchseinrichtung ebenso wie die Mitwirkung des Nutzers bei der Erstellung eines Konzeptes zur Gebäudestruktur voraus. Auf diese Weise werden die erhalten gebliebenen Freiheitsgrade zwischen Gebäude und Versuchsfeld genutzt, um eine optimale Anpassung zwischen Gebäude und Versuchsfeld zu erreichen. Für synchronisierte geometrische Planung wird ein räumliches Modell des Versuchsfeldes in einer CAD-Umgebung erstellt. Darin sind die wesentlichen Elemente des Versuchsfeldes entsprechend ihres Reifegrades dargestellt. Da bereits während der Konzeptphase der Prüfstandentwicklung mit räumlichen Modellen gearbeitet wurde, konnten diese im vorliegenden



Fall als Submodelle zu einem Hauptmodell zusammengeführt werden. Ein Beispiel dafür ist dem Anhang E beigelegt. Durch den Einsatz modellbasierter Entwicklungswerkzeuge können die erforderlichen Reifegrade erreicht werden.

Anhand des erstellten CAD-Modells des Versuchsfeldes konnten zum Beispiel Verkehrsflächenoptimierungen durchgeführt werden. Die Submodelle der Prüfstände müssen dazu über eine Differenzierung zwischen Funktions- und Verkehrsflächen verfügen. Unter Berücksichtigung der prüfstandspezifischen Prozessanforderungen, welche aus dem Betreiberkonzept (Kap. 4.5.2) und dem Konzept für die Anlagensicherheit (Kap. 4.5.7) hervorgehen, können Verkehrsflächen verschiedener Prüfstände überlagert werden. Die Visualisierung unterstützt den Prozess zur Optimierung erheblich.

5.3.5 Konzepte zur Konditionierung und Medienversorgung

Neben der Konzeption der Gebäudestruktur müssen auch die für den Betrieb des Versuchsfeldes erforderlichen energie- und informationstechnischen Strukturen entwickelt werden. Später wird mit Kap. 5.5 Energiemanagement die enge Verflechtung der Energieträgernetze untereinander gezeigt. Für die Konzepterstellung eignet sich jedoch eine getrennte Betrachtung. Anhand der geometrischen Randbedingungen, die aus der im vorherigen Kapitel dargestellten Vorgehensweise abgeleitet werden können und der prüfstandspezifischen Anforderungen im Betreiberkonzept muss über die Installation zentral versorgter Subnetze entschieden werden. Diese Subnetze eignen sich besonders dann, wenn mehrere Verbraucher ähnliche oder gleiche Anforderungen an die Energieversorgung haben. So kann eine zentrale ölhdraulische Druckversorgung viele Vorteile im Hinblick auf Energie- und Kosteneffizienz, aber auch Flexibilität im funktionalen Einsatz bieten. Dem entgegenstehend sind die bei allen Energieversorgungsnetzen systemimmanenten Nachteile durch Wechselwirkung einzelner Verbraucher zu nennen. Neben der Ölhydraulik werden heute Kühlwasser, Kaltwasser, Raumlüftung und Druckluft in Subnetzen zusammengefasst, mit wirkungsgradoptimierten Versorgungsaggregaten ausgestattet und in das Primärenergieversorgungsnetz (hier elektrisch) integriert.

Die Erstellung der Energieversorgungsnetze erfolgt ebenfalls unter Mitwirkung der Anlagenplaner der Prüfstände und der Nutzer. Aufgrund elektromagnetischer Wechselwirkungen kann die Erstellung des elektrischen Versorgungskonzeptes nur unter Berücksichtigung des messtechnischen Konzeptes für das Versuchsfeld erfolgen. Für die Vermeidung



von Wechselwirkungen sollten die Richtlinien zur elektromagnetischen Verträglichkeit bei der Konzepterstellung von Prüfstand, Versuchsfeld und Gebäude Beachtung finden (vgl. [168]). Im Zweifel müssen hier bereits in der frühen Entwicklungsphase Experten hinzugezogen werden.

5.4 Fundamentierung von Prüfständen

Für die Aufstellung der in Kap. 4.3.3 vorgestellten Prüfstände sind Fundamentierungsaufgaben zu lösen. Die Fundamentierung ist für den Gesamtentwurf des Versuchsfeldes und der Gebäudestruktur aufgrund des hohen Beeinflussungsgrades von besonderer Bedeutung. In diesem Kapitel wird dazu aufbauend auf bekannten Grundlagen aus [183], [158] und [141] die hier angewandte Vorgehensweise erläutert. Das Verständnis dieser für das Versuchsfeld konzeptentscheidenden Wirkkette „Schwingungsübertragung“ ist essentiell für die gebrauchstaugliche Auslegung der Gebäudestruktur und die Aufstellung der Prüfstände.

5.4.1 Konzeptentwurf

Die Komplexität der Auslegung und die starke gegenseitige Abhängigkeit hinsichtlich Randbedingungen und Systemparametern sowie der genannten Zielkonflikte bedürfen einer engen Zusammenarbeit zwischen Experten des Maschinenbaus und des Bauingenieurwesens. Es sind hier umfangreiche Kenntnisse zur Systemdynamik in den Bereichen Maschinendynamik, Bodenmechanik und Baudynamik erforderlich. Es wird empfohlen, bereits in der Konzeptphase entsprechende Experten zu Rate zu ziehen.

Vorgehensweise

Analog zu allen weiteren Teilprozessen im Entwicklungsprozess des Versuchsfeldes lässt sich auch die Fundamentierung in Definition, Konzeptphase und Realisierungsphase gliedern.

Entwicklungsphase	Aufgaben und Ergebnisse
<i>Anforderungsdefinition</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung von Aufbau und grundsätzlicher Arbeitsweise des Prüfstandes - Beschreibung geometrischer und mechanischer Randbedingungen des Aufstellortes - Identifikation relevanter Lastfälle aus Prüfstandmanövern



Entwicklungsphase	Aufgaben und Ergebnisse
	<ul style="list-style-type: none"> - Identifikation relevanter Messbereiche für Prüfstandmanöver - Festlegung von Gütekriterien zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit
<i>Konzeptphase</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung einer grundsätzlichen Modellvorstellung der Fundamentierungsaufgabe - Durchführung einer Grobdimensionierung - Entscheidung zur Fundamentierungsart (Dämpfung, Isolation) - Entwurf des Fundamentierungskonzeptes - Plausibilisierung grundlegender konstruktiver Parameter (z.B. Kubatur der Seismischen Masse) - Ermittlung von Starrkörpermoden - Ggf. erste kontinuumsmechanische Vorauslegung - Wahl eines geeigneten Berechnungsverfahrens für die Auslegung
<i>Realisierungsphase</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Modellbildung für die Auslegungsberechnung - Durchführung der Auslegung durch iteratives Vorgehen zwischen Konstruktion und Berechnung - Konstruktive Umsetzung - Nachweis Standsicherheit - Nachweis Gebrauchstauglichkeit - Herstellung der Fundamentierung - Funktionsabsicherung durch Validierungsmessung

Tab. 5.3 Entwicklungsphasen in der Fundamentauslegung

Im folgenden Abschnitt wird dieser Prozess am Beispiel eines Fundamentes für den in Abb. 5.3 dargestellten Achs-Hydropuls-Prüfstand erläutert.

Zur Durchführung der Anforderungsdefinition werden die Anwendungsgebiete des Prüfstandes, der Aufbau und die Funktionsweise einschließlich angewendeter Messprinzipien sowie weitere äußere Zwänge beschrieben:

Anwendungsgebiete:

- Elastokinematik
- Untersuchung des dynamischen Übertragungsverhaltens von Fahrzeugachsen
- Ermittlung von Schnittlasten zur Bestimmung von Lastpfaden innerhalb der Achse und zu angrenzenden Baugruppen
- Parameteridentifikation für Simulationsmodelle



Aufbau und Funktionsweise:

Die Fahrzeugachse als Prüfling wird bei diesem Prüfstand karosserie-seitig auf einem Spanntisch (1) mittels individueller Adaption über Kraft- und Momentenmessstellen (2) befestigt. Die Anregung des Prüflings erfolgt in drei Raumrichtungen am linken und rechten Radträger über zwei Radersatzsysteme (12). An jedem Radersatzsystem befindet sich ein dreidimensionales Koppelgetriebe bestehend aus Servozylindern mit Umlenkhebeln und Koppelstangen für die Vertikalbewegung (3 und 8), die Longitudinalbewegung (10 und 11) und die Lateralbewegung (4, 5 und 6). Jeder der drei Freiheitsgrade ist dabei mit einem induktiven Wegmesssystem und einem DMS-basierten Kraftaufnehmer ausgerüstet. Zusätzlich werden an mehreren Stellen Beschleunigungen mittels triaxialer piezoelektrischer Beschleunigungssensoren erfasst. Entsprechend der in Kap. 3.3.1 beschriebenen Arbeitsweise erfassen diese Sensoren absolute Beschleunigungen. Die Bewegung des Aufstellungsortes etwa durch Übersprechen anderer Prüfstände oder Gebäuderesonanzen werden mitgemessen. Dies setzt eine gute Kenntnis der Systemeigenschaften des Prüfstandes einschließlich des Aufstellungsortes voraus. Der vorliegende Prüfstand hat eine quadratische Funktionsfläche von 25 m².

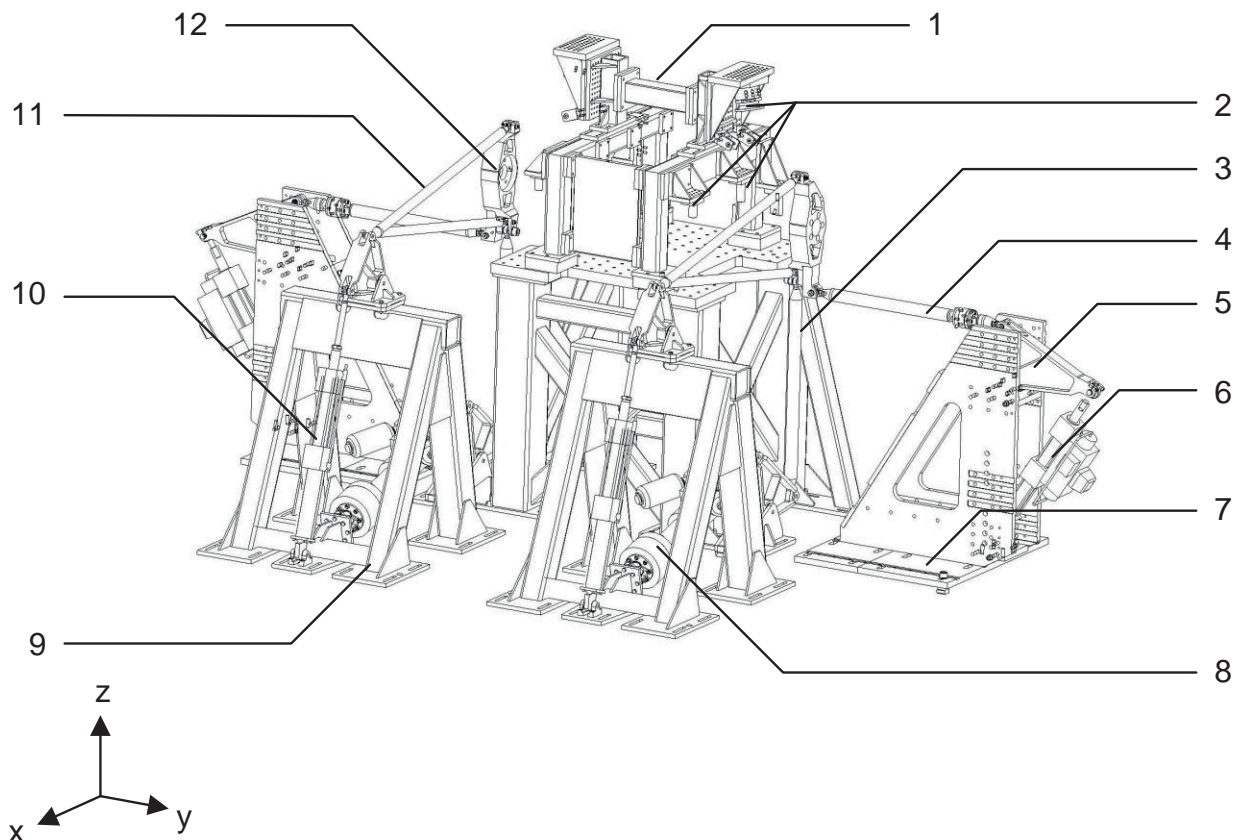


Abb. 5.10 Servohydraulischer Achspulsprüfstand

Randbedingungen am Aufstellort:

Der Prüfstand soll gemeinsam mit anderen Schwingungsprüfständen in ein Bestandsgebäude integriert werden. Eine Analyse zu externen Schwingungseinträgen am Aufstellort liegt zunächst nicht vor.

Lastfälle:

Der Prüfstand verfügt über ein bis vier Radersatzsysteme, an denen in Längs- (x), Quer- (y) und Vertikalrichtung (z) erzwungene Schwingungen mit bekannter Wegamplitude und Erregerfrequenz in den Prüfling eingeleitet werden. Die Anregung kann mehrdimensional je Einleitungsstelle erfolgen. Die Anzahl der Krafterleitungsrichtungen hängt vom Untersuchungsfall ab und wird im vorliegenden Fall mit zwei oder vier Radersatzsystemen betrachtet. Bei der gleichzeitigen Nutzung mehrerer Radersatzsysteme können Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Einleitungsstellen vorhanden sein. Aus dem Lastfall



soll hervorgehen, welche dynamischen Massen vorhanden sind, wie sich diese hinsichtlich Amplitude und Frequenz bewegen und wo sich die Lasteinleitungsstellen befinden. Liegen noch keine Last-Zeit-Verläufe vor, können für die Wegamplituden und Erregerfrequenzen auch Annahmen aus der Anschlussleistung der Versuchssysteme entwickelt werden. Es ist hierbei zum Beispiel anhand eines Leistungsdiagrammes die theoretisch mögliche Maximalfrequenz bei der Maximalamplitude zu ermitteln. Ein alternativer Weg zur Abschätzung führt über die Betrachtung der kinetischen Energie. Dazu können die erforderlichen Aussagen dann anhand von einfachen Variationsrechnungen gewonnen werden. Die Tab. 5.4 zeigt die erforderlichen Werte für das Minimalmodell eines Starrkörpers.

Parameter	Beschreibung	Wert	Genauigkeitsanforderung
n	Anzahl der Lasteinleitungsstellen	2/4	
m_{dyn}	dynamische Massen	2/4 x 120 kg	± 30%
\hat{s}	maximale Wegamplitude	0,1m	± 30%
m_{stat}	statische Masse des Prüfstandaufbaus	4000 kg	± 30%
f_E	Erregerfrequenz im Versuchsbetrieb	0-30 Hz	± 20%
i_{erf}	erforderlicher Isolierungsgrad	80%	± 30%

Tab. 5.4 Erforderliche Parameter zur Fundament-Konzeptauslegung

Für die Aufstellung des Ersatzmodells ist der Hauptlastfall zu identifizieren. Liegen dazu keine Angaben oder Erfahrungen von ähnlichen Systemen vor, kann auch hier eine Abschätzung mit Hilfe einer energetischen Betrachtung erfolgen. Im Fall des Achspulsprüfstandes wurde die gleichphasige Erregung in z-Richtung (vgl. Abb. 5.10) aufgrund der im Vergleich zu den anderen Bewegungsrichtungen großen Schwingungsamplituden als der Hauptlastfall identifiziert. Als energetisch gleichwertiger Fall ist die nicht gleichphasige Erregung in z-Richtung ebenfalls von Bedeutung. Es hängt von der konstruktiven Umsetzung der Fundamentierung ab, ob der erste Hubmode in z-Richtung oder der erste Rotationsmode um die x-Achse stärker durch die jeweilige Erregung erreicht wird.

Für die Fundamentierungsaufgabe ergeben sich aus den bereits beschriebenen funktionalen Zusammenhängen im gesamten Versuchsfeld folgende Randbedingungen:

- Starke räumliche Nähe zu anderen Schwingungsprüfständen
- Schwingungsübertragung auf Gebäude und andere Systeme ist auszuschließen



- Hohe Empfindlichkeit der Messverfahren gegenüber nicht bekannten Schwingungseinträgen oder Eigenformen
- Lastfälle sind gut abschätzbar
- Schwach veränderliches Systemverhalten durch eine definierte Nutzung des Aufstellungsortes für Schwingungsprüfstände
- Systemaufbau setzt Lastübertragung zwischen Prüfstandbauteilen über den Aufstellort voraus.

Es können außerdem folgende verallgemeinerte Anforderungen an die Fundamentierung aufgestellt werden:

- Aufnahme aller Prüfstandkomponenten
- Übertragung von durch den Prüfstand hervorgerufenen Lasten
- Isolation von durch den Prüfstand hervorgerufenen Schwingungen und Erschütterungen vom Gebäude und benachbarten Prüfständen
- Beschränkung der Eigenbewegungen in Frequenz und Schwingungsamplitude auf die für die Benutzung des Prüfstandes unkritischen Bereiche.

Vorbetrachtung und Konzeptphase

Das hier vorliegende Versuchsfeld enthält Prüfstände als mechanische Vorrichtungen zur Untersuchung systemdynamischer Eigenschaften und Funktionen von gesamten Kraftfahrzeugen sowie deren Subsystemen und Komponenten. Resultierend aus dem kinematischen Aufbau und der Wirkungsweise der Prüfstände entstehen freie Massenkräfte und –momente, die in den Aufstellungsort übertragen werden. Mit der Aufstellung der Prüfstände entsteht jeweils ein schwingungsfähiges System, unabhängig davon, ob eine Aufstellung direkt auf dem Baugrund oder einer Unterkonstruktion realisiert wird. Beim Betrieb dieser Prüfstände werden Vibrationen in Form von Körper- und Luftschall auftreten. Diese Vibrationen können, wenn nicht in der Auslegung berücksichtigt oder unbeabsichtigt eingeleitet, das Systemverhalten des jeweiligen Prüfstandes beeinflussen und damit zu Verfälschungen in Messergebnissen führen. Zudem können Schwingungen auch über den Baugrund oder die Gebäudestruktur auf benachbarte Prüfstände übertragen werden und dort den Mess- und Prüfbetrieb stören. Grundsätzlich sollte schon bei der Auslegung der Prüfstände darauf geachtet werden, dass möglichst alle Lasten innerhalb der Prüfstandkonstruktion ausgeglichen werden. Dazu stehen zum Beispiel Verfahren zum Auswuchten



rotierender Teile oder zum dynamischen Massenausgleich zur Verfügung. Ausführliche Erklärungen dazu sind in den Literaturstellen [141] S. 151 – 174 und [161] zu finden.

Verallgemeinerung:

Fall 1: Soll ein einzelner Prüfstand aufgestellt werden, sind in der Fundamentierungsaufgabe folgende Fragen zu beantworten:

1. *Ist der Aufstellungsort geeignet, um die freien dynamische Massenkräfte und –momente aufzunehmen?*
 - *Amplituden resultierender Kräfte und Momente*
2. *Ist das Schwingungsverhalten des Prüfstandes am Aufstellungsort hinreichend gut berechenbar?*
 - *Systemidentifikation*
 - *Lastfälle*
3. *Wird das Systemverhalten des Prüfstandes am Aufstellungsort dem Nutzungskonzept noch entsprechen?*
 - *Eigenfrequenzen*
 - *Betriebsamplituden*
4. *Ist das Systemverhalten zeitinvariant?*
 - *Veränderlichkeit von Systemparametern*
 - *Setzungsverhalten*
5. *Können Einflüsse durch die Fernwirkung anderer schwingungsemitterender Anlagen ausgeschlossen werden?*
6. *Ist für den Betrieb des Prüfstandes eine Umgebungsisolierung zu angrenzenden Anlagen und Prozessen erforderlich?*

Fall 2: Für die Aufstellung mehrerer Prüfstände in räumlicher Nähe sind neben den Fragen 1. – 6. noch weitere Fragen zu ergänzen:

7. *Können alle im Betrieb auftretenden Übertragungspfade zwischen den einzelnen Prüfständen ermittelt und quantifiziert werden?*
8. *Sind Bereiche besonderer Störeffektivität der einzelnen Prüfstände auf äußere Einwirkungen bekannt und können diese umgangen werden?*

Für die Aufstellung schwingender Systeme und Anlagen stehen in der Baudynamik mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. In Abb. 5.11 ist links eine steife Konstruktion unter Einbe-



ziehung der elastischen Eigenschaften des Baugrundes und rechts eine Konstruktion mit Schwingisolierung dargestellt. Fundamentkonstruktionen mit Schwingisolierung können als Tischfundamente oder Blockfundamente ausgeführt werden.

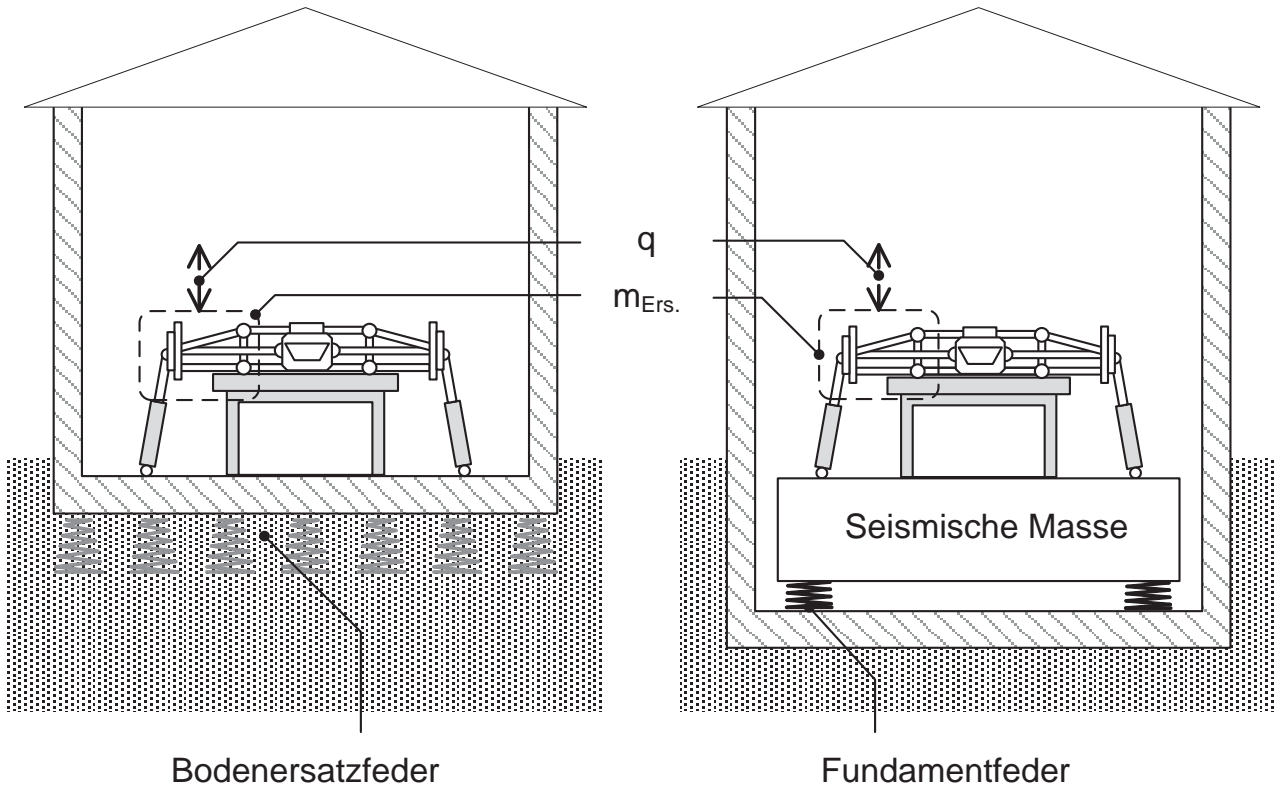


Abb. 5.11 Arten der Fundamentierung bei dynamischer Belastung

Beide in Abb. 5.11 dargestellten Varianten bieten Vor- und Nachteile. Diese werden in der folgenden Tab. 5.5 gegenübergestellt.

	Fundamentierung unter Nutzung der Bodenersatzfeder	Schwingisolierung / Seismische Masse
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Große angekoppelte Masse • Hohe Systemdämpfung • Geringe Schwingwege im Resonanzfall • Geringe Herstellungskosten, wenn der Bodenaufbau bekannt und geeignet ist 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gute Berechenbarkeit • Systemparameter im Rahmen der konstruktiven Möglichkeit frei bestimmbar • Resonanzlage z. T. einstellbar • Hoher Isolierungsgrad • Guter Gebäudeschutz • Unempfindlichkeit gegenüber externer Schwingungseinträge und Erschütterungen



	Fundamentierung unter Nutzung der Bodenfeder	Schwingisolierung / Seismische Masse
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • starkes Übersprechen auf benachbarte Prüfstände • Hohe Empfindlichkeit auf externe Schwingungseinträge und Erschütterungen • Keine Einstellbarkeit der Steifigkeits- und Dämpfungsparameter • Geringer Isolierungsgrad • Schlechte Berechenbarkeit durch zeitvariante Systemparameter (z.B. Steifigkeit der Bodenfeder) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Herstellungskosten • Höhere Schwingwege im Resonanzfall

Tab. 5.5 Vor- und Nachteile der Fundamentarten

Für die Fundamentierung unter Nutzung der Bodenfeder stellt SAVIDIS in [160] mit den *Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 „Baugrunddynamik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), vom Mai 1998* eine Berechnungsvorschrift vor. Darin werden Vorschläge für die überschlägige Auslegung von Fundamentsystemen gegeben. Für die Parametrierung werden die Bodenkennwerte dynamischer Schubmodul $G_{dyn.}$, Querdehnzahl ν und Materialdichte ρ verwendet. Diese Berechnungsvorschrift setzt voraus, dass der Baugrund linear-elastisch, homogen, isotrop und mit unendlicher Ausdehnung vorliegt. Sie sieht dabei einen frequenzunabhängigen und einen frequenzabhängigen Anteil der dynamischen Bodenkennwerte vor. Für die Beschreibung der frequenzunabhängigen Anteile der dynamischen Bodenkennwerte können die Gleichungen Gl. 5.1 bis Gl. 5.4 für die translatorischen Federsteifigkeiten c_i und die Dämpferkonstanten k_i in vertikaler und horizontaler Richtung verwendet werden. Die Gültigkeit bezieht sich auf ein *kreisförmiges Fundament* mit dem Radius r .

vertikal:

$$c_{vert.} = \frac{4 G_{dyn.} r}{1 - \nu} \quad \text{Gl. 5.1}$$

$$k_{vert.} = \frac{3,4 r^2}{1 - \nu} \sqrt{\rho G_{dyn.}} \quad \text{Gl. 5.2}$$



horizontal:

$$c_{hor.} = \frac{8 G_{dyn} \cdot r}{2 - \nu} \quad \text{Gl. 5.3}$$

$$k_{hor.} = \frac{4,6 r^2}{2 - \nu} \sqrt{\rho G_{dyn}} \quad \text{Gl. 5.4}$$

Für *rechteckförmige Fundamente*, wie in Abb. 5.12 dargestellt, kann der Ersatzradius r_{0i} nach Gleichung Gl. 5.5 berechnet werden.

$$r_{0x} = r_{0y} = r_{0z} = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}} \quad \text{Gl. 5.5}$$

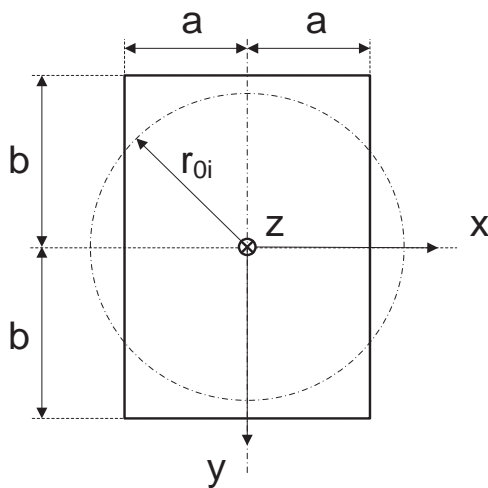


Abb. 5.12 Rechteckfundament mit Ersatzradius r_{0i} nach [160]

Eine Einführung und weiterführende Grundlagen zur Bodendynamik wurden von HAUPT in [146] dargelegt.

Die Auswahl der geeigneten Fundamentierung erfolgt nach den Kriterien Gebäudeschutz und Gebrauchstauglichkeit in Verbindung mit der Anlage bzw. dem Prüfstand.

Das Kriterium Gebäudeschutz ist dann erfüllt, wenn die Konstruktion so ausgeführt ist, dass bei dauerhaftem Betrieb unter dynamischen Lasten keine Schäden am Gebäude entstehen. Die Kosten für den Ausfall der Anlagen und die Reparatur des Gebäudes stehen in keinem Verhältnis zu den Baukosten für die Schwingisolierung.

Das Kriterium Gebrauchstauglichkeit ist erfüllt, wenn zum einen die Gebrauchstauglichkeit des jeweiligen Prüfstandes und zum anderen die Gebrauchstauglichkeit des Prüffeldes, also aller im Verbund betriebener Prüfstände gewährleistet sind. Der Begriff Gebrauchstauglichkeit wird dabei im Sinne des Ingenieurbaus als Maß für die uneingeschränkte Nutzbarkeit der Anlage verwendet. Als weiterführende Literatur sei auf die Quellen [183], [147], [184], [160], [179] und [158] verwiesen.

Je nach Zielstellung der Fundamentierungsaufgabe müssen die in Tab. 5.5 dargestellten Eigenschaften gewichtet werden. Dies führt in der Anwendung oft zu einem Zielkonflikt. Als Beispiel dafür sei die Gegenläufigkeit zwischen zulässiger Fundamentbewegung und Isolierungsgrad angeführt. Wird die Forderung nach einer geringen Bewegung des Fundamentes gestellt, so ist dies entweder mit einer sehr hohen seismischen Masse als tief abgestimmtes System oder mit einer steifen Anbindung an den Baugrund als hoch abgestimmtes System zu realisieren. Der Bauraum für die Fundamentierung eines Prüfstandes ist stets begrenzt. Somit kann konstruktiv auch nur eine begrenzt große seismische Masse eingesetzt werden. Wird auf eine seismische Masse verzichtet und das System an den Baugrund gefesselt, nimmt der Isolierungsgrad (vgl. Kap. 3.3.1) ab. Um diesem Zielkonflikt zu begegnen, ist eine möglichst exakte Bestimmung der Lastfälle, der relevanten Mess- und Prüfbereiche und des Isolierungsgrades erforderlich.

Die Wichtung der in Tab. 5.5 vorgestellten Kriterien ergibt im speziellen Fall des servohydraulischen Achsprüfstandes die Lösung der Fundamentierungsaufgaben mittels einer Schwingisolierung. Die Gründe dafür sind:

- Eine Schwingungsübertragung auf den Boden und zu anderen Systemen ist zu minimieren.
- Es besteht eine hohe Empfindlichkeit gegenüber eingeleiteten Störungen durch Schwingungen und Erschütterungen am Prüfstand.
- Es muss von einer zeitlich veränderlichen Baugrundsteifigkeit ausgegangen werden. Dies kann zu unzulässigen Änderungen des Schwingungsverhaltens des Bodens führen. Die in der Berechnungsvorschrift [160] angenommenen Voraussetzungen zum Baugrund konnten nicht sichergestellt werden.

Für die Ausführung der seismischen Masse muss nun die Art der Abstimmung festgelegt werden. Diese richtet sich im Fall des Versuchsfeldes nach dem Einsatzbereich der Anlagen und nach der Störungsempfindlichkeit der jeweiligen Messprinzipien in der Anlage.



Werden Prüfstände mit transienten oder höherfrequenten Lasten betrieben, kann die hochabgestimmte Schwingisolierung gewählt werden. Das heißt, die Erregerfrequenzen des Prüfstandes liegen über den Eigenfrequenzen der seismischen Masse. Das System wird also vorrangig oberhalb des Resonanzbereiches im Isolierungsbereich betrieben. Diese Ausführung ist zwar mit der Erstellung einer seismischen Masse und einer hochelastischen Lagerung (Isolierelemente) bautechnisch deutlich aufwendiger, jedoch bietet sie entsprechend Abb. 3.8 eine hohe Wirksamkeit bei der Reduzierung der Emission von Schwingungen des Prüfstandes. Durch den Einsatz exakt berechenbarer Isolierungselemente kann eine zeitinvariante Auslegung zu Gebäudeschutz und Gebrauchstauglichkeit gewährleistet werden.

Als nächster Schritt erfolgt die Modellbildung. Dies geschieht für die Konzeptauslegung zunächst mit einfachen Ansätzen. Hier eignet sich der bereits in Kap. 3.3.2 verwendete Starrkörper. Das Ziel dieser Berechnungen ist die Abschätzung von Bauräumen für eventuell erforderliche Zusatzmassen oder Schwingungsisolierungselemente. In [33] und [163] werden analytische Vorgehensweisen zur Konzeptauslegung von Blockfundamenten gezeigt, die noch deutlich mehr Parameter identifizieren können. Diese Verfahren können bei einfachen Konstruktionen und Lastfällen in einer späteren Entwicklungsphase anstatt einer numerischen Simulation zum Vorteil in Entwicklungszeit und -aufwand eingesetzt werden.

Das grundlegende Vorgehen der Fundamentierung soll anhand eines Starrkörpers mit dem Freiheitsgrad eins erläutert werden. Für den oben beschriebenen Hauptlastfall des Achspulprüfstandes wird zunächst die Erregerkraft bestimmt.

$$F(t) = \hat{F} \sin(\Omega_E t) \quad \text{Gl. 5.6}$$

Mit der dynamischen Masse m_{dyn} , der maximalen Wegamplitude \hat{s} und der höchsten Erregerkreisfrequenz $\omega_{E,\hat{s}}$, bei der die maximale Wegamplitude erreicht werden kann, folgt dann mit

$$s(t) = \hat{s} \sin(\omega_{E,\hat{s}} t), \quad \text{Gl. 5.7}$$

$$\ddot{s}(t) = -\omega_{E,\hat{s}}^2 \cdot \hat{s} \sin(\omega_{E,\hat{s}} t), \quad \text{Gl. 5.8}$$

$$F(t) = m_{dyn} \cdot \ddot{s}(t) \quad \text{Gl. 5.9}$$



als Erregerkraft. Mit der ungedämpften Eigenfrequenz $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m_{ges}}}$ des Ersatzsystems, dem Frequenzverhältnis $\eta = \frac{\Omega_E}{\omega_0}$, $\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$, $\Omega_E = 2\pi \cdot f_E$ und dem vorgegebenen Isolierungsgrad i aus Tab. 5.4 lassen sich Startwerte für die weiteren Berechnungen ermitteln. Aus dem Isolierungsgrad $i = 85\%$ kann iterativ ein erforderliches Frequenzverhältnis $\eta \cong 2,77$ bestimmt werden. Daraus folgt dann bei einer Erregerfrequenz $f_E = 10 \text{ Hz}$ eine Eigenfrequenz des Systems $f_0 \leq 3,6 \text{ Hz}$. Da bei realen Systemen eine Dämpfung nicht ausgeschlossen werden kann, sollte die Abstimmung noch etwas tiefer erfolgen. Anhand des Steifigkeitskennwertes für Schwingungsisolierelemente nach der VDI 2062-2 [187] kann eine erste Abschätzung der Zusatzmasse erfolgen. Mit der Vorauswahl der Schwingungsisolierelemente muss auch die Anzahl der Auflagerpunkte bestimmt werden. Daran lassen sich auch die zu erwartenden statischen Lagerkräfte bestimmen. Mit Hilfe des Isolierungsgrades aus Gl. 3.11 und der Erregerkraft können auch die dynamischen Anteile der Auflagerkräfte abgeschätzt werden. Damit kann ein erster konstruktiver Entwurf abgeleitet werden. Für die Herstellung einer seismischen Masse als Prüfstandfundament haben sich in der Praxis neben zahlreichen Sonderbauformen zwei Standardlösungen durchgesetzt. In Abb. 5.13 sind diese dargestellt. Die Plattenbauweise (a) besteht aus einer Spannplatte (1) und Schwingungsisolierelementen (2). Für die Platte wird meist ein Stahlguss- oder Graugusswerkstoff mit höherer Festigkeit verwendet. Die Platte wird konstruktiv für Aufnahmen aller Lasten im Versuchsbetrieb ausgelegt. Schwingfundamente in Blockbauweise bestehen aus einer Spannplatte (1), Schwingungsisolierelementen (2) und einem stahlbewehrten Betonkörper (3). Die Spannplatte wird anders als bei der Plattenbauweise nur für die Aufnahme der Prüfstandteile benötigt. Sie trägt mit ihrem Gewicht nur unwesentlich zur seismischen Masse bei und muss auch nicht auf Durchbiegung ausgelegt sein. Die Platte wird durch Spannanker mit dem Betonkörper verbunden und mit einem schwindungsarmen Fließmörtel (Pagel) vergossen. Dadurch sind auch die Bauhöhe und der Materialeinsatz für Stahlguss in diesem Fall geringer. In beiden Fällen ist bei der Konstruktion jedoch der in Abb. 5.13 mit der Strichpunktlinie dargestellte Grundsatz zur Kippsicherheit zu beachten. Der Abstand und die Höhenlage der Schwingungsisolierelemente in Bezug zum Gesamtschwerpunkt (SP) aus seismischer und Aufbaumasse sollten entsprechend gewählt werden.

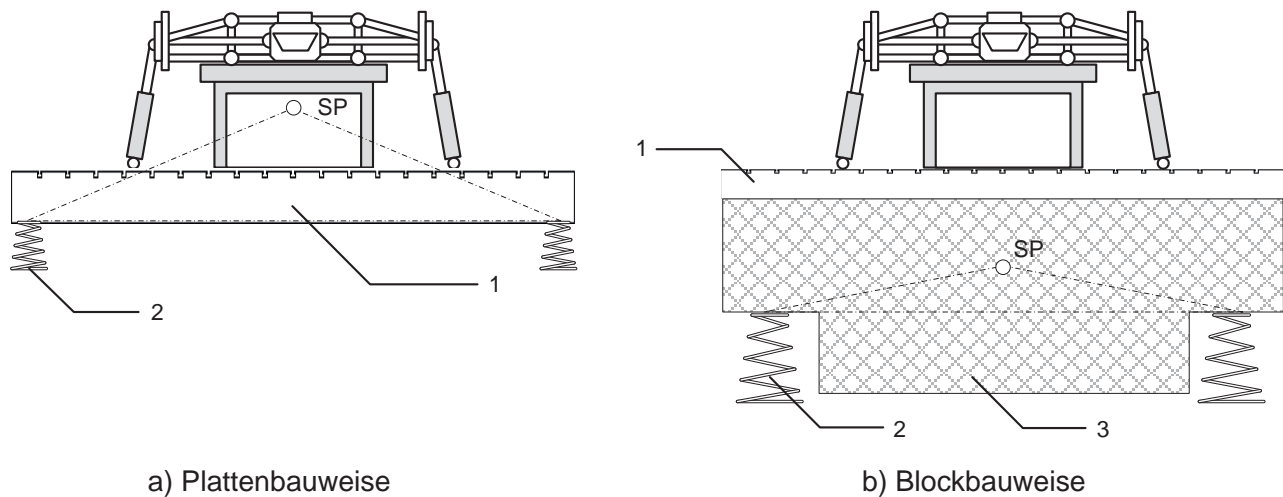


Abb. 5.13 Standardbauweise für Prüfstandschwingfundamente

Die Konzeptphase der Fundamentberechnung bedient wieder eine Schnittstelle im Gesamtentwicklungsprozess und sollte folgende Parameter hervorbringen, welche in der Entwurfsplanung des Gebäudes benötigt werden.

Parameter	Beschreibung	Genauigkeit
L, B, H	Abmessung des Raumbedarfes der seismischen Masse einschließlich Schwingungsisolierungselementen und Montage-/Wartungsbereichen	$\pm 10\%$
$F_{i,stat}$	Statische Auflagerkraft am Lagerpunkt i	$\pm 30\%$
$F_{i,dyn}$	Dynamischer Anteil der Auflagerkraft am Lagerpunkt i	$\pm 30\%$

Tab. 5.6 Übergabeparameter an Gebäudeplanung

5.4.2 Auslegung der Schwingisolierung

Eine allgemeine Vorgehensweise für die Berücksichtigung von Schwingungen in Bauwerken ist in den Literaturstellen [183] und [147] ausführlich beschrieben. Darin werden Kriterien definiert, nach denen entschieden werden kann, ob eine bauldynamische Betrachtung erforderlich ist. Gemäß der dort zu findenden Definitionen ist die bauldynamische Betrachtung aufgrund besonderer dynamischer Einwirkungen aus der Nutzung und nutzungsbedingt erhöhter Anforderungen an die Gebrauchsfähigkeit erforderlich.



Die Fundamentierung übernimmt dabei unterschiedliche Aufgaben. Bisher wurde die Aufgabe der Schwingungsisolierung betrachtet. Darüber hinaus werden über das Fundament auch Belastungen zwischen einzelnen Prüfstandkomponenten übertragen. Einige Aktuatoren stützen sich dabei entweder direkt an Spannelementen, die mit dem Fundamentkörper verbunden sind oder direkt am Fundamentkörper ab. Daraus resultieren zusätzliche Belastungen im Fundamentkörper, die in der Gestaltung berücksichtigt werden müssen (vgl. Abb. 5.14).

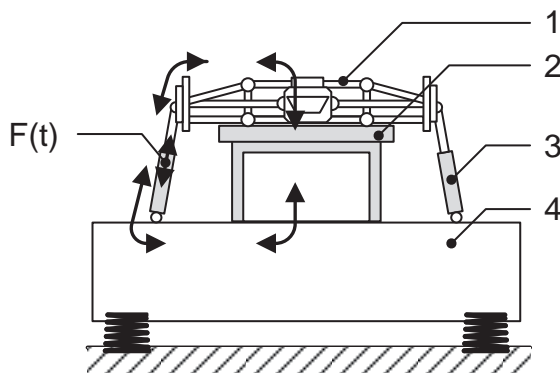


Abb. 5.14 Innere Lasten durch Aktuatoren des Prüfstandes

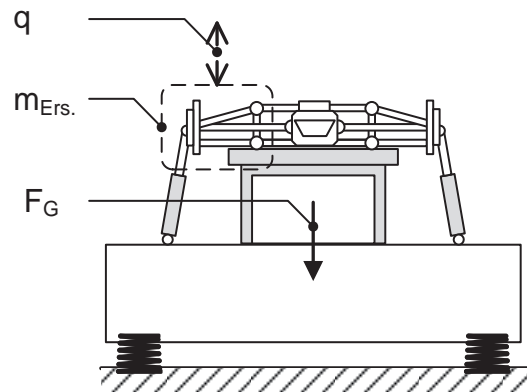


Abb. 5.15 Äußere Lasten durch Gravitation und beschleunigte Massen

Die Auslegung des Fundamentkörpers erfolgt für die Integration in den Gesamtablauf der Gebäudeplanung in zwei Schritten. Nachdem die Erkenntnisse zu Raumbedarf und Bodenlasten der Konzeptphase in die Entwurfsplanung eingeflossen sind, wird nun im ersten Schritt der Auslegung die Schwingungsisolierung detaillierter berechnet. Dazu wird der Fundamentkörper entsprechend der in Kap. 3.2.1 niedergeschriebenen Definition als starrer Körper behandelt. Im zweiten Schritt erfolgt dann die statische Berechnung und Detailkonstruktion des Fundamentkörpers. Weiterhin kann in diesem der Ausführungsplanung zuzuordnenden Schritt auch eine Betrachtung des dynamischen Schwingungsverhaltens als Finite Elemente Struktur durchgeführt werden. Darauf wird später noch eingegangen.

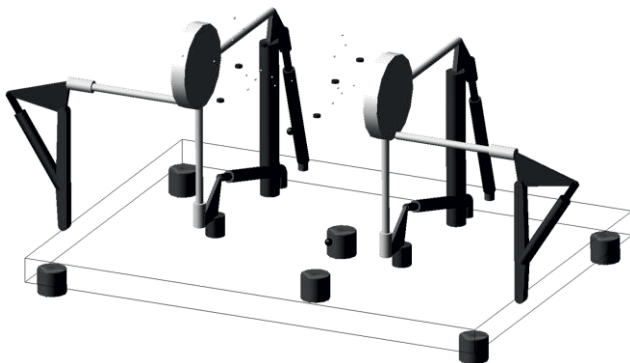
Zur Durchführung des ersten Schrittes stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann das oben erwähnte analytische Berechnungsverfahren nach DRESIG aus [33] zur Anwendung kommen.

Im Fall des Achspulsprüfstandes wurde bereits in der Konzeptphase ein detailliertes Ersatzmodell verwendet. Dazu wurde das aus der Prüfstandentwicklung auch für diesen

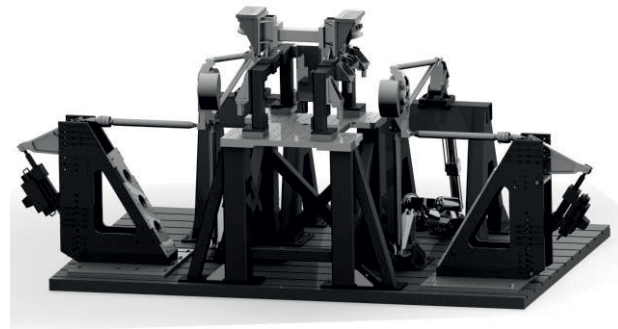


Prüfstand vorhandene Mehrkörpermodell verwendet. Es lag in ähnlicher Detaillierung wie das in Kap. 4.5 vorgestellte Modell des Rad-Achs-Prüfstands vor und wurde um die Fundamentierung erweitert.

Die Erforderlichkeit dazu bestand aus der hohen Systemkomplexität in einem Versuchsfeld mit mehreren hochdynamischen Prüfständen. Die weitere Auslegung der Schwingisolierung erfolgte iterativ mit Hilfe der virtuellen Entwicklungswerkzeuge ADAMS/View[®] und PTC Pro/ENGINEER[®]. In Abb. 5.16 ist der Ausgangszustand dargestellt.



a) MKS-Modell



b) CAD-Modell

Abb. 5.16 Visualisierungen zum a) MKS-Modell und zum b) CAD-Modell des Achspulsprüfstandes im Ausgangszustand

Betrachtung als Starrkörper

Die Auslegung der Schwingungsisolierung erfolgte mit den in Abb. 5.16 dargestellten Modellen des Prüfstandes. Zunächst wurden die in der Konzeptphase bestimmten Vorgaben konstruktiv im CAD-Modell umgesetzt. Dazu wurden der Betonkörper und die Spannplatte geometrisch modelliert. Für die virtuelle Ermittlung von Schwerpunkt- und Trägheitsparametern wurden Richtwerte aus Tab. 5.7 verwendet.



Parameter	Bemerkung	Wert
ρ_{Stahl}	Dichte Stahlguss / Grauguss (GG25) für Spannplatten	7800-7850 kg/m ³
$\rho_{Stahlbeton}$	Dichte Stahlbeton mit Bewehrungsgrad 50-70 (Die Dichte kann durch den Zusatz von Feldspat erhöht werden.)	2200-2500 kg/m ³ (2800 kg/m ³)
h_{PB}	Bauhöhe für Spannplatten in Plattenbauweise	0,4-0,6 m
h_{BB}	Bauhöhe für Spannplatten in Blockbauweise	0,2-0,3 m
$S_{M,PB}$	Flächenbezogener Massenfaktor für Spannplatten in Plattenbauweise	850-1000 kg/m ²
$S_{M,BB}$	Flächenbezogener Massenfaktor für Spannplatten in Blockbauweise	750-900 kg/m ²

Tab. 5.7 Richtwerte für Konstruktionsparameter der seismischen Masse

Es erfolgt eine Auswahl der Schwingungsisolierelemente aus Produktkatalogen verschiedener Hersteller. Die Auswahl erfolgte zunächst für die ertragbare Last. Danach richten sich Anzahl und Kennung der Schwingungsisolierelemente. Bei der Auswahl muss eine Lastreserve für Prüfstandaufbauten und zusätzliche Vorrichtungen eingeplant werden. Im vorliegenden Fall werden Luftfederelemente eingesetzt. Durch Luftfederelemente kann neben der Schwingungsisolierung auch ein Niveauegleich der seismischen Masse umgesetzt werden. Zudem kann bei Luftfedern der Innendruck dem Belastungszustand angepasst werden und so die Systemeigenfrequenz über einen konstruktiv bestimmten Auflastbereich nahezu konstant gehalten werden. Die Dämpfungseigenschaften der Luftfederelemente werden in Produktkatalogen oft nur für bestimmte Betriebszustände angegeben. Für die Verwendung im Simulationsmodell müssen diese über die Zusammenhänge des Einmassenschwingers und das Lehr'sche Dämpfungsmaß D umgerechnet werden.

Für die numerische Simulation ist meist eine Dämpfungskonstante auf Basis einer Relativgeschwindigkeit erforderlich. Dazu muss zunächst die ungedämpfte Systemeigenfrequenz der seismischen Masse berechnet werden. Dazu wird das System im jeweiligen Arbeitspunkt linearisiert und eine Eigenwertermittlung durchgeführt. Anhand der zum jeweiligen Eigenmode gehörenden Eigenfrequenz f_0 und der Federsteifigkeit $c_{h,v}$ in horizontaler oder vertikaler Richtung kann dann über die Beziehung

$$D = \frac{b \cdot \omega_0}{2 \cdot c_{h,v}} \rightarrow b_{h,v} = \frac{D \cdot c_{h,v}}{\pi \cdot f_0} \quad \text{Gl. 5.10}$$



die Dämpfungskonstante $b_{h,v}$ in horizontaler oder vertikaler Richtung bestimmt werden. Die Parameter wurden im MKS-Modell angepasst.

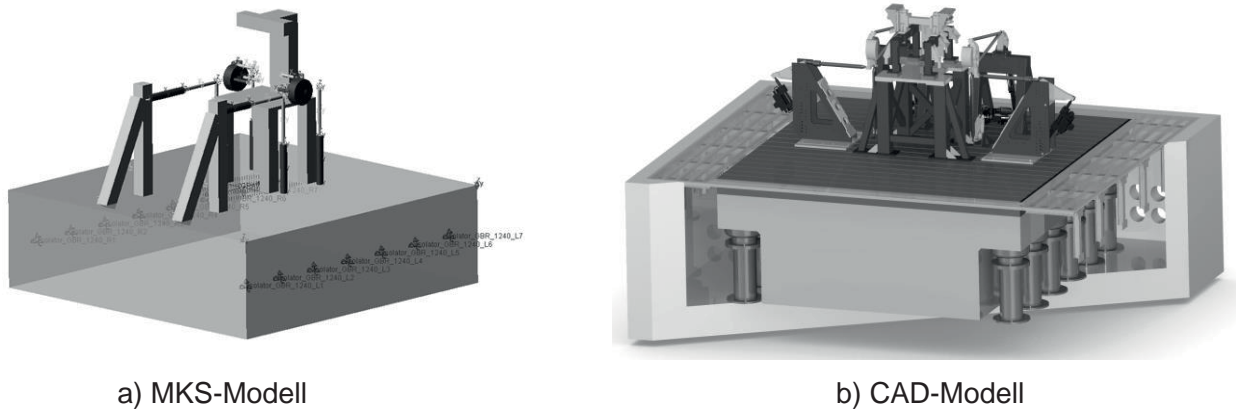


Abb. 5.17 Fundamentierung a) MKS-Modell und b) CAD-Modell

Mit der angepassten Parametrierung im MKS-Modell erfolgt eine Zeitschrittsimulation des Lastverlaufes. Dazu wurden zwei repräsentative, synthetische Prüfstandmanöver verwendet.

Manöver	Bemerkung	Wert
1. Sweep	Hub in z-Richtung hyperbolisch mit Frequenz abnehmend maximal: (konstante hydraulische Leistung)	0,1 m
	Hub in x-Richtung konstant:	0,01 m
	Bewegung von zwei Radersatzsystemen mit Phasenverschiebung:	0°
	Frequenzbereich der Erregung:	0-30 Hz
	Frequenzänderung:	1 Hz/s
2. Sweep	wie 1. Sweep	
	Bewegung von zwei Radersatzsystemen mit Phasenverschiebung:	180°

Tab. 5.8 Prüfstandmanöver zur Fundamentauslegung

Dabei werden die Zeit-Kraft-Verläufe an den Lagerpunkten zum Gebäude und die Bewegung der seismischen Masse berechnet und mit den in der Anforderung gesetzten Zielen verglichen. In der folgenden Tab. 5.9 sind die Ergebnisse von Eigenfrequenzanalyse und Zeitschrittsimulation zusammengefasst. Gültigkeit hat das Koordinatensystem aus Abb. 5.10.



Parameter	Bemerkung	Wert
$f_{0,x,t}$	Eigenfrequenz des ersten translatorischen Eigenmode in x-Richtung	1,2 Hz
$f_{0,y,t}$	Eigenfrequenz des ersten translatorischen Eigenmode in y-Richtung	1,3 Hz
$f_{0,z,t}$	Eigenfrequenz des ersten translatorischen Eigenmode in z-Richtung	1,6 Hz
$f_{0,x,r}$	Eigenfrequenz des ersten rotatorischen Eigenmode um die x-Achse	2,5 Hz
$f_{0,y,r}$	Eigenfrequenz des ersten rotatorischen Eigenmode um die y-Achse	1,5 Hz
$f_{0,z,r}$	Eigenfrequenz des ersten rotatorischen Eigenmode um die z-Achse	1,8 Hz
\hat{s}_{max}	Maximale Verschiebung der seismischen Masse	$0,75 \cdot 10^{-3}$ m
$F_{z,dyn}$	Dynamischer Anteil der Auflagerkräfte je Lagerpunkt in z-Richtung	1,5 kN
i_z	Isolierungsgrad in z-Richtung	88,6%

Tab. 5.9 Ergebnisse der Mehrkörpersimulation der Schwingungsisolierung

Das Ergebnis des Auslegungsprozesses für die Fundamentierung des Achspulsprüfstandes ist in Abb. 5.18 dargestellt.

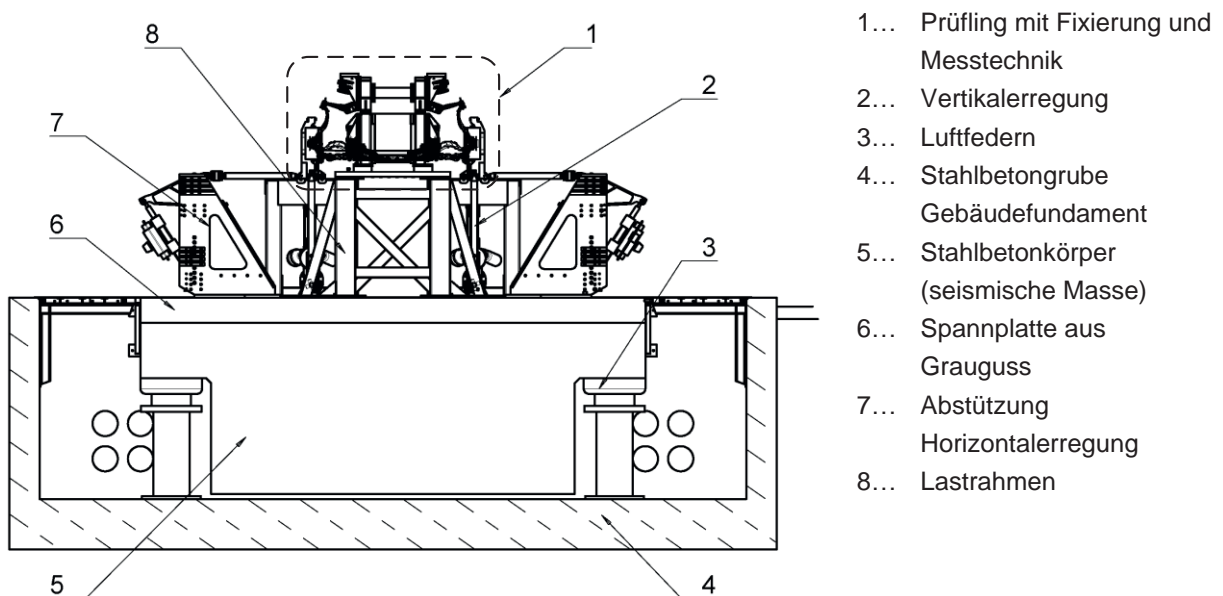


Abb. 5.18 Konstruktiver Entwurf des Schwingfundamentes eines Achspulsprüfstandes



Experimentelle Modalanalyse zur funktionalen Absicherung

Eine vollständige Modellvalidierung an Prototypen ist bei einer Schwingungsisolierung dieses Ausmaßes nicht möglich und auch nicht erforderlich. Die Modellgültigkeit ist anhand analytischer Lösungen für den Starrkörper mit sechs Freiheitsgraden gut nachvollziehbar. Dennoch ist vor dem Aufbau und der Inbetriebnahme der Versuchsanlage eine Absicherung anhand einer experimentellen Modalanalyse sinnvoll. In diesem Zustand ist das Schwingfundament dem Ersatzmodell noch sehr ähnlich und bleibt auch analytisch gut nachvollziehbar.

Das Ziel der experimentellen Modalanalyse ist die Ermittlung der modalen Parameter Eigenfrequenzen, modale Dämpfungen und Eigenvektoren des Systems aus einem Satz von Übertragungsfunktionen. Als ein Satz von Übertragungsfunktionen wird dabei eine Spalte oder eine Zeile der Übertragungsfunktionsmatrix verstanden. Die theoretischen Grundlagen dazu sind dem Kap. 3.3.3 zu entnehmen. Zur Ermittlung dieses Satzes werden im Allgemeinen die folgenden Schritte durchgeführt.

- Auswahl der Mess- und Erregungsstellen hinsichtlich Ort und Richtung. Die Anzahl der Mess- und Erregungsstellen bestimmt den auflösbaren Systemfreiheitsgrad und damit die Anzahl der Abtaststellen für den Modenausschlag. (vgl. Abb. 5.19)
- Auswahl der Erregungsform. Neben der Wahl der Erregungsstelle ist auch die Art der Erregung wesentlich für die Ergebnisqualität. Es stehen fest verbundene und nicht fest verbundene Erreger zur Verfügung. Fest verbundene Erreger werden oft bei stark gedämpften Systemen eingesetzt. Mechanische Ausführungen arbeiten nach dem Unwuchtprinzip und können ausschließlich periodische Erregungen bereitstellen. Die Kraftamplitude ist hier frequenzabhängig. Ihr Einsatzbereich ist daher konstruktiv begrenzt. Universeller einsetzbar sind dagegen Erreger nach dem elektrodynamischen oder servohydraulischen Prinzip. Sie können periodische und transiente Erregungen erzeugen.
- Messung der Übertragungsfunktionen für eine Spalte oder Zeile der Übertragungsfunktionsmatrix $H(\Omega)$ (vgl. Kap. 3.3.3).
- Anpassungsrechnung für die Bestimmung der modalen Parameter. Für die Anpassungsrechnung stehen nach EWINS ([143]) das SDOF-Verfahren (Single Degree of Freedom) und MDOF-Verfahren (Multiple Degree of Freedom) zur Verfügung. Die Wahl des Verfahrens wird vom Grad der Kopplung mehrerer Eigenmoden be-



stimmt. Beim SDOF-Verfahren wird unterstellt, dass es keine Kopplung gibt und dass der Mode ausschließlich durch den dazugehörigen Eigenvektor bestimmt wird. Eine einfache Darstellung dieser Verfahren ist in [165] enthalten.

- Energetische Betrachtung der Übertragungsfunktionsmatrix und Berechnung der Länge der Eigenvektoren aus den Residuen (vgl. Kap. 3.3.3). Das Residuum drückt als imaginäre Zahl die Stärke des Modes aus. (vgl. [165])
- Darstellung der Eigenformen

Für die Analyse des Schwingungsverhaltens der seismischen Masse des Achspulsprüfstandes wurde ein Messaufbau gemäß Abb. 5.19 verwendet. Es stand die Ermittlung der Starrkörpermoden im Fokus der Untersuchung. Dabei wurde stets an ein und derselben Stelle mit einem Handhammer erregt und an vier Stellen mit Beschleunigungsaufnehmern nacheinander gemessen. Diese Messung ergibt eine Spalte der Übertragungsfunktionsmatrix $\mathbf{H}(\Omega)$.

Die Verwendung eines Unwuchterregers ist im vorliegenden Fall nicht möglich. Die Erregerfrequenz ist direkt an die Umlaufdrehzahl n_u der Umwuchtmasse m_u gebunden. Auch der Betrag der Erregerkraft wird gemäß Gl. 5.11 von n_u beeinflusst. Für den erwarteten Frequenzbereich ist die resultierende Unwuchtkraft F_u nicht ausreichend für die Erregung der Eigenschwingungen.

$$F_u = m_u \cdot s_e \cdot \omega_u^2 \text{ mit } \omega_u = 2 \cdot \pi \cdot n_u \quad \text{Gl. 5.11}$$

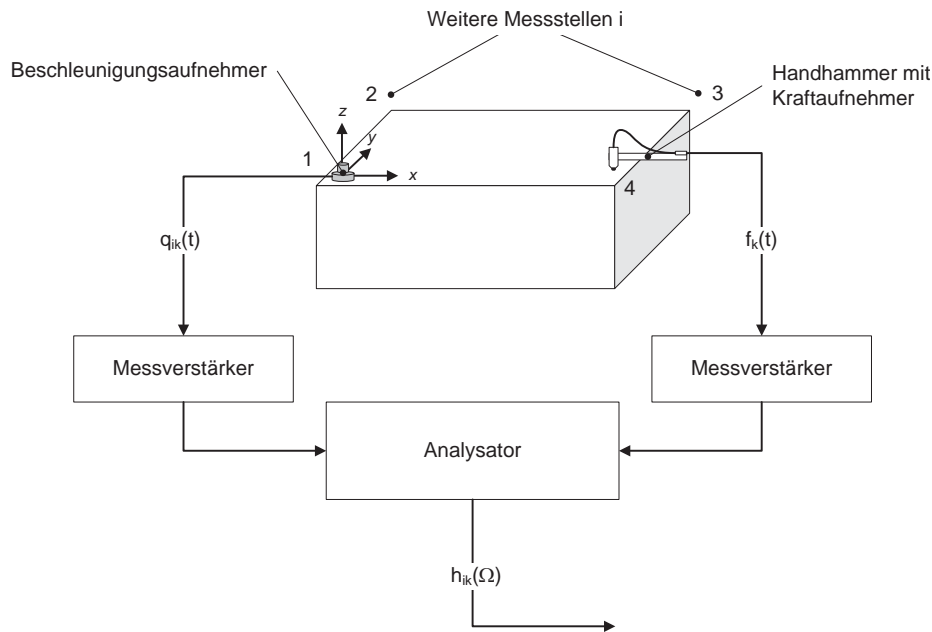


Abb. 5.19 Messaufbau experimentelle Modalanalyse

Die Animation der experimentell ermittelten Eigenmoden der seismischen Masse des Achspulsprüfstandes wird in Abb. 5.20 für eine Auswahl dargestellt.

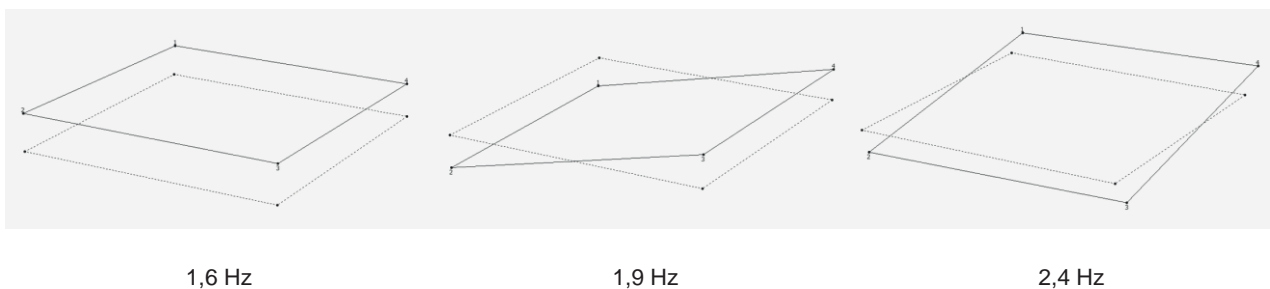


Abb. 5.20 Visualisierung Eigenmoden der seismischen Masse am Achspulsprüfstand

Die Messung ergab, dass für einige Moden eine relativ starke Kopplung der Bewegung vorliegt. Wird während der Auslegung und Konstruktion des Fundamentes darauf geachtet, dass Koppelterme in der Steifigkeitsmatrix klein sind, kann dies begrenzt werden. Vor allem bei Schwingungsisolierungen für Produktionsmaschinen oder Anlagen, deren Erregungsrichtung sich an den Hauptachsen des Systems ausrichten lässt, können diese Maßnahmen eine effiziente Fundamentlösung hervorbringen. Dazu wird auf DRESIG [33] S. 191 -194 verwiesen.



Grenzen des Verfahrens der experimentellen Modalanalyse:

Für die praktische Anwendung der experimentellen Modalanalyse sowohl für strukturdynamische Untersuchungen an Prüfständen als auch an Schwingfundamenten sind Kenntnisse zu Grenzen des Verfahrens hilfreich. Liegt ein n -facher Eigenwert vor, wird ein Eigenvektorunterraum (auch Eigenraum genannt) mit der Ordnung n aufgespannt. Jede beliebige Linearkombination der Vektoren dieses Eigenvektorunterraumes ist dann Eigenvektor zu dem n -fachen Eigenwert. Liegen in einer experimentell bestimmten Übertragungsfunktion zwei Eigenwerte sehr dicht beieinander, so sind die daran abzuleitenden Eigenvektoren nicht eindeutig bestimmbar. Die Berechnung ergibt dann zwei Eigenvektoren, wobei auch jede beliebige Linearkombination dieser Vektoren Eigenvektor des Systems ist. Der Nachweis dafür lässt sich an den von RUGE in [159] S. 55 – 56 dargelegten Betrachtungen zur Orthogonalisierung bei mehrfachen Eigenwerten ableiten.

Bei Schwingungsisolierungen in Plattenbauweise kann das dynamische Systemverhalten oft nicht unter der Modellvorstellung des starren Körpers betrachtet werden. Die flächenartige Gestalt der Platte führt zu geringen Torsions- und Biegesteifigkeiten um die x- und y-Achse nach dem bisher verwendeten Koordinatensystem und kann damit auch zu Strukturschwingungen der Platte innerhalb des Nutzungsbereiches führen. Die Konstruktion der Platte kann entsprechend an die Anforderungen angepasst werden. Dies zieht jedoch eine Reduzierung des Verhältnisses Plattenhöhe zu Nutzfläche nach sich und führt zu einem höheren Platz- und Materialbedarf. Können die Eigenmoden der Platte präzise genug vorausberechnet werden und erfolgt eine Platzierung der Prüfstandelemente in globalen Schwingungsknoten, kann die Anlage so betrieben werden, dass das strukturdynamische Schwingungsverhalten der Spannplatte wenig oder keine Auswirkung auf die Gebrauchstauglichkeit des Prüfstandes hat. Für die Berechnung des strukturdynamischen Schwingungsverhaltens können z.B. Werkzeuge der Finite-Elemente-Methode verwendet werden.

Betrachtung der Strukturmechanik

Im vorliegenden Fall des Achspulsprüfstandes wurde bei der Gestaltung der Seismischen Masse die Blockbauweise in einer kompakten Ausprägung gewählt. Der Vergleich mit ähnlichen Fundamenten in ähnlicher Verwendung führte zu der Erkenntnis, dass eine strukturdynamische Analyse nicht erforderlich ist. Die Konstruktion sieht ein hochgezogenes Auflager für die Luftfedern vor. Dies ist aufgrund der Forderung nach einer tiefen Ge-



samtschwerpunktlage für die Standsicherheit der Versuchseinrichtung erforderlich. Die strukturmechanische Untersuchung beschränkt sich bei diesem Fundamentkörper auf eine innerhalb der baurechtlich vorgeschriebenen statischen Berechnung durchgeführte Spannungsanalyse. Diese wurde jedoch nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt und wird daher hier nicht näher behandelt.

Eine strukturdynamische Untersuchung wurde durch KALISKE ET AL. in [149] für einen weiteren Prüfstand des Versuchsfeldes durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen kombinierten Antriebsstrang-Fahrwerk-Prüfstand. Das Spannungsfeld des Prüfstandes hat eine Nutzfläche von 6,0 m x 8,0 m. Der Bauraum lässt in diesem Fall die Ausbildung in Blockbauweise nicht zu, sodass ein rechteckiges Maschinenfundament in den Abmessungen 6,0 m x 8,0 m x 0,45 m auf 24 Luftfeder-Schwingungsisoliererelementen konzipiert wurde. Die Berechnung als starrer Körper ergab, dass die translatorischen Eigenmoden zwischen 2,1 Hz und 2,6 Hz und die rotatorischen Eigenmoden zwischen 2,4 Hz und 3,2 Hz liegen. Da dieser Prüfstand zur Untersuchung von Antriebsstrangschwingungen in einem deutlich höheren Frequenzbereich eingesetzt werden soll, wurde hier eine strukturdynamische Untersuchung erforderlich. Für diese Untersuchung kam das am Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke der TU Dresden entwickelte Programm FALT-FEM[®] (vgl. [152]) zum Einsatz.

Das Maschinenfundament ist als mehrteilige T-Nuten-Spannplatte mit hochfesten scherfreien Verschraubungen aufgebaut und besitzt auf der dem Prüfstand abgewandten Seite eine Wabenstruktur. Für die Modellbildung wurden die 24 Luftfedererelemente als linear-elastische wegabhängige Kräftelemente mit einer vertikalen und zwei identischen horizontalen Steifigkeitskonstanten modelliert. Für die Diskretisierung der Spannplatte wurde das in dem o.g. Programmpaket enthaltene Verfahren finiten Falwerkelementen (vgl. Kap. 3.2.1) verwendet. Die theoretischen Grundlagen dafür legen MÜLLER und MÖLLER in [152]. Dieses Verfahren bietet einen guten Kompromiss aus qualitativ hochwertiger Diskretisierung für eine realitätsnahe Modellbildung und vertretbarem Berechnungsaufwand. Das Modell der deformierbaren Spannplatte wurde zur Abbildung realistischer Steifigkeitsverhältnisse um den erheblich zur räumlichen Gesamtsteifigkeit beitragenden Lastrahmen des Prüfstandaufbaus erweitert. Dazu wurden zusätzliche Stabelemente mit verhältnismäßig höherer Steifigkeit eingesetzt und durch Zusatzmassen ergänzt. Das Modell besitzt 45600 Knotenfreiheitsgrade. Die durchgeführte Eigenwertanalyse ergab für die mit der



MKS-Umgebung ermittelten Starrkörpermoden eine gute Übereinstimmung. Außerdem wurden 14 weitere strukturdynamische Eigenmoden berechnet und visualisiert. Einen Auszug daraus zeigt Abb. 5.21.



Abb. 5.21 Darstellung Eigenmoden der Spannplatte Fahrwerk-Antriebsstrang-Prüfstand aus [149]

Die strukturdynamische Analyse bestätigt somit zunächst die Berechnungen der Mehrkörpersimulation. Sie zeigt weiterhin, dass eine möglichst homogene Verteilung der Luftfederelemente unter der Spannplatte die Ausprägung der Eigenschwingungen zugunsten der Prüfstandanforderungen beeinflusst.

Im Rahmen der Ausführungsplanung wurden durch den bauausführenden Unternehmer weitere strukturdynamische Nachweise für Blockfundamente mit besonderen dynamischen Anforderungen und außergewöhnlicher Belastung geführt. Dazu wurde die FEM-Simulationsumgebung ANSYS® ([64]) eingesetzt. Einige ausgewählte Berechnungsergebnisse sind dem Anhang F zu entnehmen.

5.5 Energiemanagement

Das Versuchsfeld mit den bisher beschriebenen Funktionsumfängen besteht aus einer Vielzahl großer und leistungsstarker Prüfstände. Während des Betriebes der Anlagen ist daher mit einem erheblichen Energieaufwand zu rechnen. Für eine optimale Dimensionierung aller für den Betrieb der Prüfstände erforderlichen Versorgungsaggregate und des Anschlusses an den lokalen Energieversorger im Versuchszentrum muss bereits in einem frühen Entwicklungsstadium damit begonnen werden, eine gesamtheitliche Energieinfrastruktur zu konzipieren. Nur so gelingt es, die Optimierungspotenziale frühzeitig zu erkennen und deren technische Nutzbarkeit zu bewerten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die durch ein modellbasiertes Vorgehen die Erstellung eines Energiemanagements mit variablem Detaillierungsgrad in Abhängigkeit der dem Reifegrad der Gebäudeentwicklung entsprechenden Anforderungen zulässt. Die Gültigkeit



des Vorgehens wurde bereits anhand des hier dokumentierten Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums durch HASENKOPF in [145] nachgewiesen. Die Motivation für die je nach Komplexität und erforderlichem Detailierungsgrad aufwändige Modellbildung und Parameteridentifikation können aus zwei Bereichen hervorgehen, die später Zielgrößen für eine Optimierungsstrategie liefern. Das Energiemanagement kann zum Zweck der ökologischen Ressourcenschonung und zur Kostenreduzierung eingesetzt werden. Die Vorteile eines energieeffizienten Betriebes technischer Anlagen für die Umwelt sind hinreichend bekannt und sollen an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden.

Die Beweggründe aus ökonomischer Sicht hingegen sind vielseitig und werden in der Zielformulierung für das Energiemanagement in Kap. 5.5.1 erläutert.

Für die hier durchgeführten Analysen wird die Systemgrenze an der Energieübergabestelle zum lokalen Energieversorger gezogen. Wie bereits eingangs beschrieben, wird als Primärenergie elektrische Energie verwendet.

5.5.1 Zielformulierung und Lösungsansatz

Die Optimierung der Betriebsstrategie erfolgt wie oben genannt vordergründig zur Minimierung der Betriebskosten. Dazu ist eine Betrachtung der Kostenzusammensetzung erforderlich. POSCH erläutert in [154] die Zusammensetzung der Bezugskosten leitungsgebundener und nicht leitungsgebundener Energieformen. Bei der vorliegenden elektrischen Energieform handelt es sich um eine leitungsgebundene Energieform. Bei der Preisbildung wird hier neben der Abnahmemenge auch die Maximalkapazität einbezogen, weil letztere erheblichen Einfluss auf die Dimensionierung des Anschlusses hat. Die Energieversorgungskosten setzen sich daher aus den in Abb. 5.22 auf der linken Seite genannten Bestandteilen zusammen. Für die Optimierung kommen somit zwei Ansätze in Frage, die entweder getrennt voneinander oder in Kombination durchgeführt werden können. Auf der rechten Seite der Abb. 5.22 sind diese Ansätze und ihre Auswirkungen für den Verlauf der Leistungsaufnahme schematisch dargestellt.

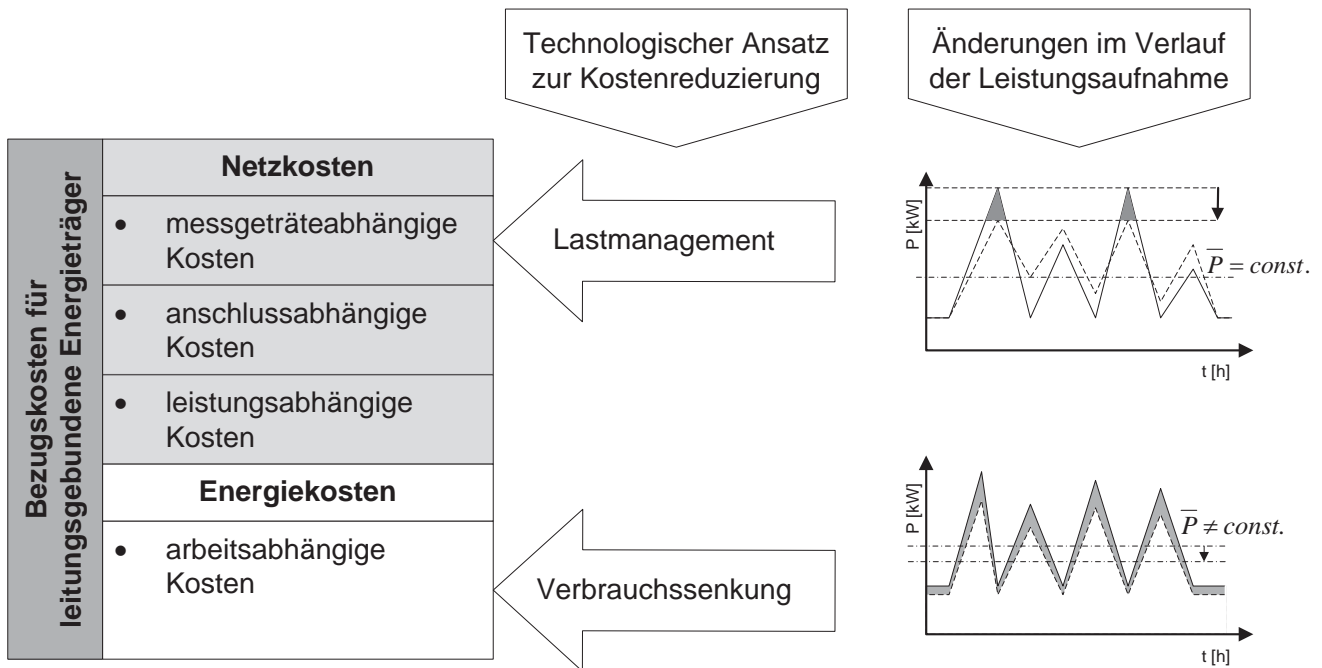


Abb. 5.22 Ansätze zur Reduzierung der Bezugskosten

Der Ansatz *Lastmanagement* verfolgt das Ziel der Senkung der Leistungsaufnahmespitzen. Dem liegt die optimale Dimensionierung des Versorgungsnetzes zugrunde. Der Energieversorger ist bestrebt, das gesamte Versorgungsnetz mit weitgehend konstanten Lasten zu betreiben. Für die Abdeckung eines volatilen Leistungsbedarfes seitens der Verbraucher muss der Energieversorger zusätzliche Kapazitäten schaffen, die im ökonomischen Sinne nicht optimal genutzt werden können. Die Ermittlung der Bezugskosten erfolgt diesbezüglich durch eine registrierende Leistungsmessung in 15-Minuten-Takten. Dabei wird jeweils der Mittelwert des 15-minütigen Zeitfensters ermittelt. Aus der höchsten gemessenen Lastspitze ergibt sich – je nachdem, welche vertraglichen Bedingungen vereinbart wurden, eine Kostenpauschale für den Berechnungszeitraum. Diese Kostenpauschale wird in der Regel für ein Jahr festgeschrieben. Die Gestaltung der Prozessabläufe im Versuchsfeld enthält demnach ein hohes Einsparpotenzial. Die Leistungsaufnahme eines Versuchsfeldes ist anders als bei einer produzierenden Einrichtung sehr stark schwankend. Bereits aus ersten Betrachtungen einer trivialen Aufgabe mit zwei Verbrauchern und konstanter Leistungsaufnahme über der Einschaltzeit ist ersichtlich, dass sich durch eine Optimierung Kosten sparen lassen. Durch Variation der Einschaltzeit der beiden Verbraucher kann eine Senkung der Leistungsaufnahmespitze um den jeweils kleine-



ren Betrag der Maximalleistungsaufnahme der beiden Verbraucher erreicht werden. Für die Optimierung des gesamten Lastganges der elektrischen Leistungsaufnahme des Versuchsfeldes einschließlich der Versorgungsaggregate werden die nutzungsspezifischen Lastverläufe der einzelnen Verbraucher benötigt. Für die Modellbildung in Kap. 5.5.2 ist dabei die Unterscheidung in abhängige und unabhängige Verbraucher erforderlich. Abhängige Verbraucher sind Versorgungs- und Periphergeräte, die für den Betrieb der Prüfstände eingeschaltet werden. Der Einschaltzeitpunkt und die Leistungsaufnahme können direkt vom jeweiligen Prüfstand oder vom übergreifenden Energiemanagement bestimmt werden. Als unabhängige Verbraucher werden alle Prüfstände und sonstigen Messeinrichtungen bezeichnet. Ihr Einschaltzeitpunkt und die spezifische Leistungsaufnahme ergeben sich direkt aus der Versuchsaufgabe und werden nicht durch andere Randbedingungen beeinflusst.

Der Ansatz Verbrauchssenkung verfolgt das Ziel, den Anteil der arbeitsabhängigen Kosten an den Bezugskosten zu senken. Dies kann zunächst ohne übergreifendes Energiemanagement an den einzelnen Verbrauchern durch Wirkungsgradoptimierung geschehen. Das Einsparpotenzial wird hier durch die jeweilige Kennung des Verbrauchers bestimmt. Kann der Verbraucher nicht in einem optimalen Betriebspunkt betrieben werden, lässt sich das Einsparpotenzial auch nicht heben. Dies ist bei volatilen Lastverläufen häufig der Fall. Durch den Aufbau einer Energieinfrastruktur lässt sich dies jedoch besser realisieren. Hier können vor allem bei den Versorgungsgeräten durch die übergreifende Verwendung für mehrere Prüfstände mit Verschachtelung der individuellen Lastverläufe und durch den Einsatz von Speichern große Einsparungen erzielt werden.

Die Entscheidung darüber, ob die Erstellung eines Energiemanagements sinnvoll ist, wird anhand einer Lastganganalyse getroffen. Dabei wird das Grenzpotenzial ermittelt. Dies geschieht durch die Messung der Leistungsaufnahmeverläufe auf reale Verbraucher. Da dies während des Entwicklungsprozesses aufgrund fehlender realer Verbraucher nicht möglich ist, wurden für die Prüfstände Lastverlaufabschätzungen anhand der Prüfstandmanöver erstellt.



5.5.2 Modellbildung und Simulation

Die Anforderungen des Gebäudeentwicklungsprozesses an die hier vorgestellte Entwicklungsmethode für ein Energiemanagement lassen sich zu den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Abbildung aller für die Energieinfrastruktur erforderlichen Energiewandlungsprozesse
- Mehrschichtige Modelltopologie auf Basis Energieträger
- Erweiterbarkeit auf weitere Energieträger
- Variable Detaillierungstiefe der Teilmodelle
- Austauschbarkeit der Teilmodelle
- Erweiterung der Teilmodelle über die rein energetische Betrachtung hinaus
- Reifegradäquivalente Parametrierung

Die Modellbildung erfolgte in der Multi-Physical-Domain-Simulationsumgebung SimulationX[®] ([166]). Die physikalische Modellbildung erfolgte in der objektorientierten Modellbeschreibungssprache Modellica ([108], [50]). Die Programmumgebung erlaubt einen stark modularisierten Modellaufbau durch die Verwendung des Type Designers. Darin lassen sich Elemente zu in sich abgeschlossenen Teilmodellen zusammenfassen. Die genormten physikalischen Anschlüsse der Modellkomponenten erlauben zudem eine hohe Wiederverwendung. Dies und die gute Kompatibilität zu anderen Simulationswerkzeugen kommen dem Anforderungsprofil der Aufgabe entgegen. Darüber hinaus verfügt SimulationX[®] über Modell-Bibliotheken, die bereits vorgefertigte Modellelemente enthalten und damit den Aufwand zur Modellbildung reduzieren. Zunächst wurde die grundlegende Struktur festgelegt. Der Entwurf der Medienstruktur wurde dabei gemeinsam mit den am Planungsprozess des Gebäudes beteiligten Fachplanern entwickelt und genügt daher den fachspezifischen Ansprüchen der jeweiligen Gewerke. Dazu wird in moderierten Workshops das Grundgerüst entworfen und später in die Simulationsumgebung übertragen. Die Gestaltung der Struktur hängt von den zur Verfügung stehenden Primärenergieträgern, den bereitstehenden finanziellen Mitteln für die Auswahl der Arbeitsprinzipien der Versorgungsaggregate und von der geplanten baulichen Struktur ab. Die Abb. 5.23 zeigt schematisch die Modelltopologie. Die Prüfstände werden darin als austauschbare Teilmodelle mit festen Schnittstellen ausgeführt. Weiterhin sind darin mehrere voneinander unabhängige Energieübertragungsnetze aufgebaut. Jedes Netz entspricht dabei einer physikali-



schen Domäne, die auch bei Bedarf unabhängig von den anderen betrachtet werden kann. Die Topologie sieht die Erweiterung durch Speicher oder weitere Energieträger vor. Die signaltechnische Struktur ist funktionswertbasiert und in dieser Abbildung nicht dargestellt.

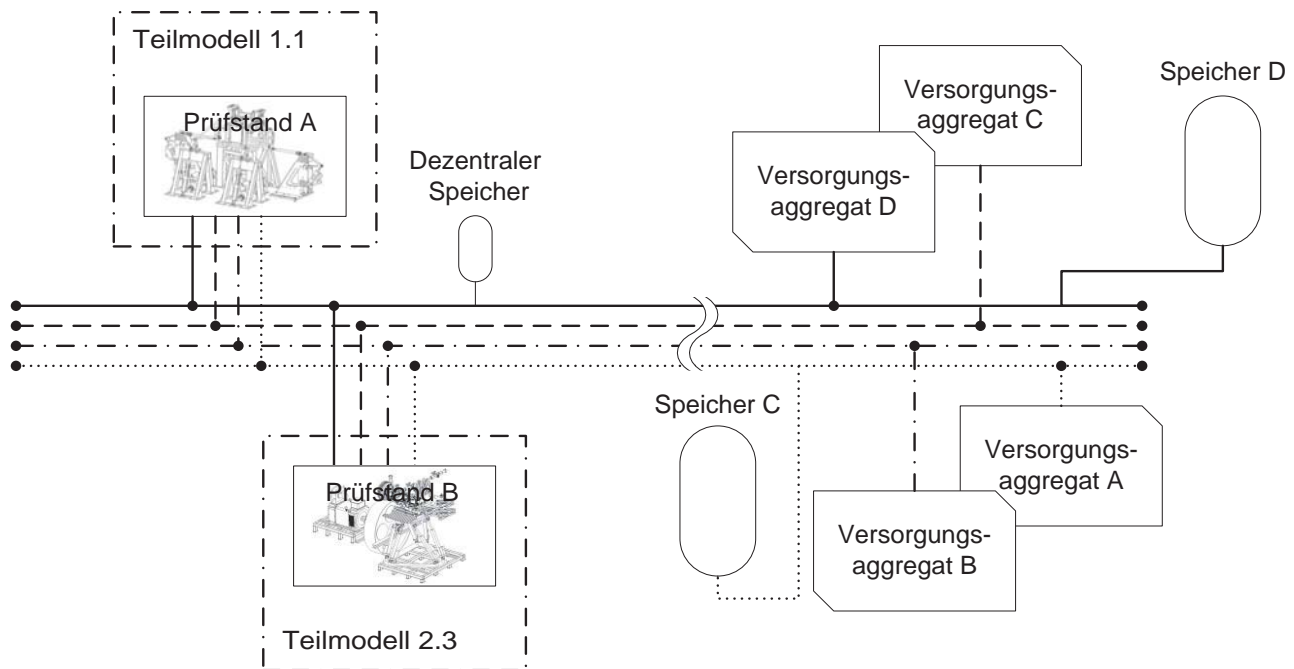


Abb. 5.23 Modelltopologie Energieinfrastruktur schematisch

Für die Handhabung während der Entwicklungsphase und für die Nutzung des Simulationsmodells beim Betrieb des Energiemanagements wurde eine grafische Benutzeroberfläche erstellt, welche sich an der baulichen Struktur des Versuchszentrums orientiert. Eine Ansicht dazu ist dem Anhang D dieser Arbeit zu entnehmen.

Die Erstellung der Teilmodelle soll nun anhand des in Abb. 5.24 dargestellten Rad-Achs-Prüfstandes erläutert werden. Der Aufbau und die Funktion des Prüfstandes wurden bereits in Kap. 4.4 ausführlich erläutert. In der Abbildung sind über die Bestandteile des Prüfstandes hinaus noch weitere für den Betrieb des Prüfstandes im Prüfraum erforderliche Peripheraggregate dargestellt. Es handelt sich dabei sowohl um gebäudetechnische Anlagen zur Konditionierung des Prüfraumes samt Prüfstand und des Prüflings als auch um Geräte, die zum Einrichten und für Montagearbeiten am Prüfstand benötigt werden. In Tab. 5.10 ist die in Abb. 5.24 verwendete Nummerierung erläutert.

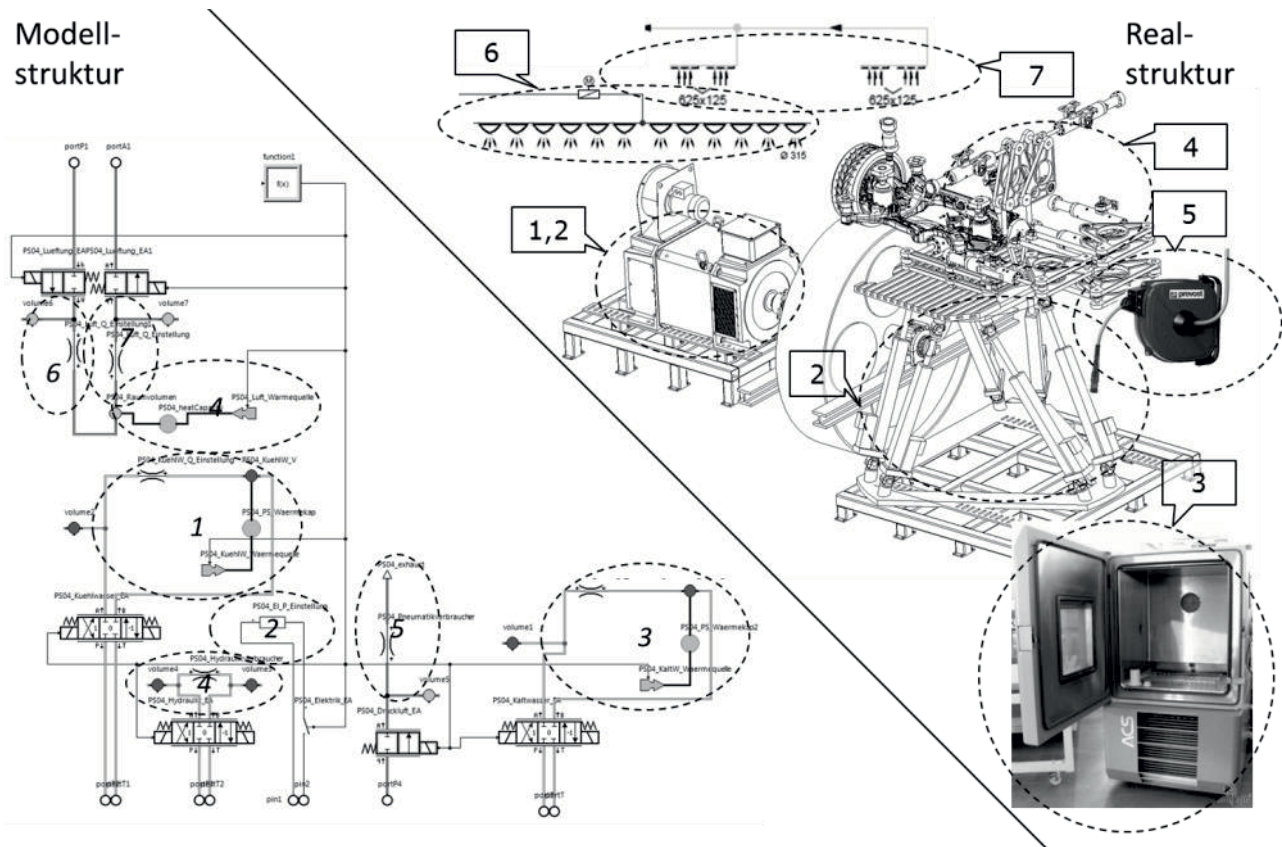


Abb. 5.24 Modellstruktur eines Prüfstandes im Prüfraum nach [145]

Nr.	Bezeichnung	Gerät	Anschlusswerte
1	Flüssigkeitsbasierte Kühlung	Wärmeübertrager in den elektrischen Verbrauchern	70 kW
2	Elektrische Verbraucher	Elektromechanisches Bewegungssystem, elektrischer Rollen- / Flachbahnantrieb	750 kW
3	Technische Kälte	Bauteiltemperaturkammer	unspezifisch
4	Hydraulische Verbraucher in zwei Druckstufen	Servozyylinder der Radaktuatorik	225 l/min bei 280 bar, 300 l/min bei 210 bar
5	Druckluftversorgung	div. Montagegeräte	500 l/min bei 10bar
6	Luftbasierte Kühlung	div. Luftauslassdüsen	60 kW und 400 m³/h
7	Raumabluft	Luftansaugkanal	400 m³/h

Tab. 5.10 Übersicht Energieträger Prüfraum Rad-Achs-Prüfstand



Für den Aufbau der Modellstruktur wurden zunächst Basismodelle für jeden Energiewandlungsprozess erstellt. Durch die Kombination der einzelnen Basismodelle und die spezifische Parametrierung entstehen daraus dann die Teilmodelle der jeweiligen Prüfstände entsprechend dem Beispiel des Rad-Achs-Prüfstands in Abb. 5.24. Die physikalische Beschreibung in den Basismodellen aus [145] wird am Beispiel der Hydraulik gezeigt.

Die hydraulischen Verbraucher werden im Basismodell durch eine parametrierbare Konstantdrossel beschrieben. Die aufgenommene Leistung lässt sich damit in einem ersten Ansatz mit Gl. 5.12 berechnen.

$$P = \Delta p \cdot Q \quad \text{Gl. 5.12}$$

Wird angenommen, der Druckabfall sei zeitinvariant, so lässt sich die Leistungsaufnahme als Funktion der Zeit in Abhängigkeit vom Volumenstrom mit

$$P(t) = \Delta p \cdot Q(t) \quad \text{Gl. 5.13}$$

beschreiben, wobei sich der Volumenstrom aus

$$Q(t) = \alpha \cdot A(t) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \quad \text{Gl. 5.14}$$

ergibt. Mit dem zeitveränderlichen Querschnitt kann der Verlauf des Lastganges beschrieben werden.

Die Modellbildung in SimulationX[®] bietet eine detaillierte Parametrierbarkeit, die hier jedoch für eine erste energetische Betrachtung in der Tiefe nicht erforderlich ist. Diese kann für spätere Untersuchungen zu Schwingungen im gesamten Hydrauliksystem herangezogen werden. In Abb. 5.25 ist die Drosselstelle zwischen zwei für die numerische Lösbarkeit erforderlichen Volumina dargestellt. Die zeitabhängige Last wird als Gleichung in das Parametereingabefeld der Drossel geschrieben. Im Basismodell ist außerdem noch ein hydraulisches 4-3-Wegeventil mit einer Signalleitung enthalten. Über das Ventil, welches ebenfalls einfach parametrierbar wurde, kann die Durchflussrichtung geändert und das Zu- oder Abschalten des hydraulischen Verbrauchers im Gesamtmodell umgesetzt werden. Über die Signalleitung werden diese logischen Zustände z.B. während einer Gesamtsystemsimulation gesetzt.

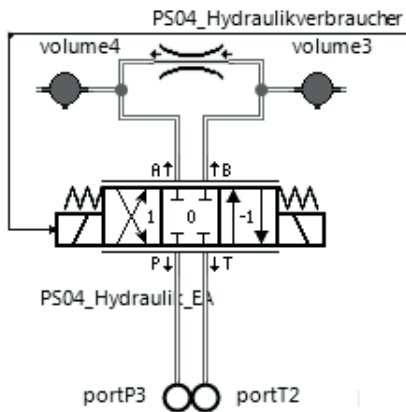


Abb. 5.25 Basismodell Hydraulik [145]

Alle Basismodelle sind durch eine entsprechende Parametrierung für die Untersuchung dynamischer Effekte geeignet. In ähnlicher Weise wurden auch die Versorgungsaggregate modelliert. Für weiterführende Systembeschreibungen wird auf [145] und [166] verwiesen. Für die Berechnung der Einsparpotenziale sollten Informationen zum Betriebsverhalten und zum Wirkungsgrad der Aggregate vorliegen. Ist dies zum Beispiel aufgrund des noch niedrigen Gesamtreifegrades des Planungsvorhabens nicht der Fall, so kann ebenso wie im hier vorliegenden Fall mit Abschätzungen begonnen werden.

Die Berechnung der Energieflüsse innerhalb des Versuchszentrums erfolgt anhand charakteristischer Lastverläufe der einzelnen Verbraucher. Diese können an bestehenden Systemen gemessen bzw. für in der Entwicklung befindliche Prüfstände simulativ ermittelt werden. Die Lastverläufe können für jeden unabhängigen Verbraucher separat eingegeben werden. Besteht eine technologische Abhängigkeit, so kann diese durch Formulierung einer entsprechenden Beziehung als Gleichung hergestellt werden. Für den im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigten simultanen Entwicklungsprozess von Gebäudestruktur und Prüfständen erfolgte die Implementierung in mehreren Schritten. Dazu wurden zunächst nur konstante Lasten für jeden Verbraucher angenommen. In einem zweiten Schritt wurden dann mehrere Einschaltzustände (Prüfbetrieb und Einrichtungsbetrieb) eingeführt. Mit fortschreitender Reife der Prüfstände wurden weitere Verfeinerungen in der Leistungsaufnahme und mehrere Standardmanöver für den Lastverlauf eingeführt. Liegen später gemessene Lastverläufe vor, kann die Aussagegüte weiter erhöht werden.

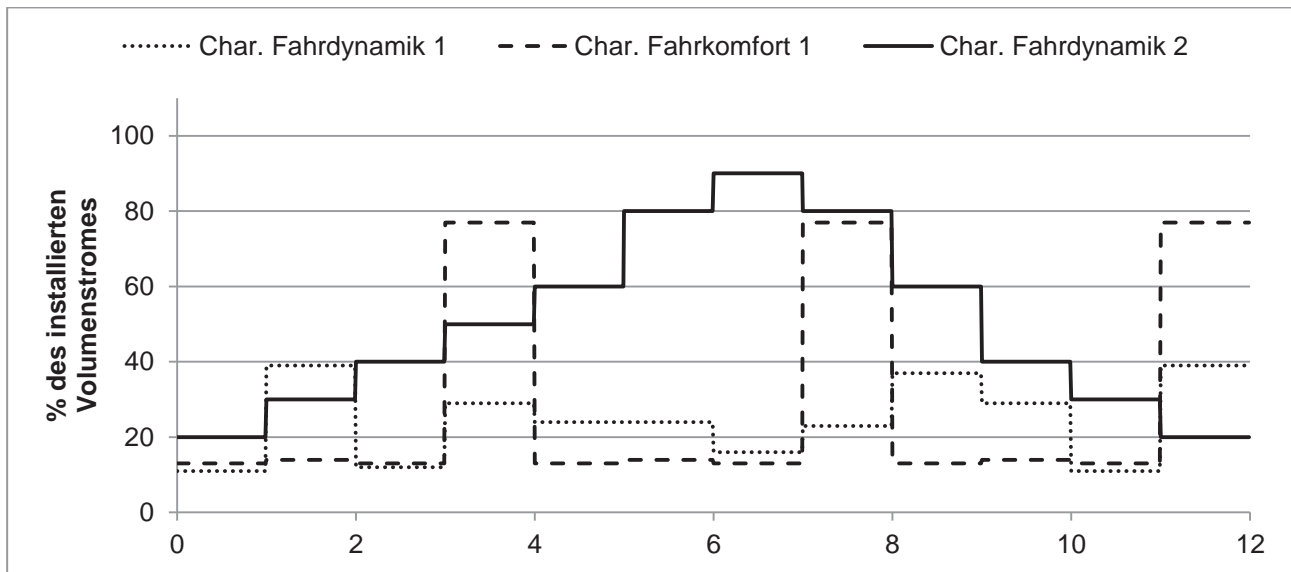


Abb. 5.26 Schematischer Lastverlauf der Rad-Achs-Prüfstandes für die Hydraulik [145]

Die Initialisierung des Energiemanagements erfolgt in zwei voneinander unabhängigen Prozessschritten. Zunächst wird durch die Wahl des Startzeitpunktes für jeden der in einem Zeitraum ablaufenden Lastverläufe eine Verschachtelung erzeugt. Dadurch wird vermieden, dass sich zwei oder mehr Lastspitzen überlagern und zu einer Erhöhung der leistungsabhängigen Kosten führen. Für dieses Optimierungsproblem werden Randbedingungen in Form von zulässigen Zeitfenstern für den Beginn einer Mess- oder Prüfaufgabe gesetzt. Im zweiten Prozessschritt werden die Versorgungsaggregate so angesteuert, dass sie möglichst unabhängig vom Lastzustand der Verbraucher in einem dem optimalen Wirkungsgrad entsprechenden Betriebspunkt betrieben werden können. Dafür wird der Einsatz von Speichern in verschiedenen Energieträgern einbezogen. Für die Umsetzung wurde ein heuristischer Ansatz verwendet.

5.5.3 Potenziale und Möglichkeiten

Für die Bestimmung der möglichen Einsparpotenziale kann in einem ersten Schritt die überschlägige Berechnung des theoretischen Grenzpotenzials durchgeführt werden. Diese setzt jedoch voraus, dass entweder bereits konkrete Leistungsmessungen an Verbrauchern und Versorgungsaggregaten oder Betriebskennwerte vorliegen. Wie in Kap. 5.5.1 bereits beschrieben wurde, setzt sich das Einsparpotenzial hauptsächlich aus den Teilen „Leistungsabhängige Kosten“ und „Arbeitsabhängige Kosten“ zusammen. Das weist darauf hin, dass sich diese Methode besonders für Betriebe mit einer homogenen Verbrau-



cherstruktur eignet. Die Vielzahl unterschiedlicher Prüfstände führt jedoch zu einer stark heterogenen Verbraucherstruktur und lässt den Aufwand auf den der physikalischen Modellbildung anwachsen. Im vorliegenden Fall wurde daher der Weg über die Berechnung von Betriebsszenarien gewählt. Die Berechnung unter der in Kap. 5.5.2 beschriebenen niedrigen Informationsdichte zu Wirkungsgraden und Lastverläufen ergab dennoch vielversprechende Ergebnisse. Für zwei unterschiedliche fiktive Betriebsszenarien wurden die in Tab. 5.11 dargestellten Einsparungen an Leistungskosten ermittelt.

Fiktives Betriebsszenario	Szenario 1	Szenario 2
Ohne Energiemanagement	100 %	100 %
Mit Verschachtelung der Lastverläufe	76 %	93,5 %
Mit Verschachtelung der Lastverläufe und Regelung der Versorgungsaggregate	75,8 %	92,9 %

Tab. 5.11 Potenzial Energiemanagement

Neben der in Kap. 5.5.2 erwähnten heuristischen Regelung kann das Energiemanagement auch durch eine dynamische Optimierung durchgeführt werden. Dies setzt jedoch eine konsequente Reduzierung der unabhängigen Verbraucher und eine Senkung des Systemfreiheitsgrades für die Optimierungsaufgabe voraus. Das Vorgehen der dynamischen Optimierung findet heute verbreitet Anwendung für die Erstellung von Betriebsstrategien bei hybriden Antriebsträngen. Eine umfassende Einführung in dieses Thema bietet KUTTER ([50]).

Anhand der durchgeführten Simulationsrechnungen können außerdem die Anforderungen an Versorgungsstrukturen präzisiert und die Dimensionierung erleichtert werden. Weiterhin konnten konkrete Vorgaben für die Einbindung verschiedener Speicher entwickelt werden.

Als weiteres Ergebnis der Modellierung entstand ein Werkzeug, welches zur Erstellung der Betriebsabläufe genutzt wird. Außerdem dient es zur Planung von Mess- und Prüfabläufen. Später sollen Systemoptimierungen und die Verbesserung der Regelstrategie für die gesamte Energieversorgung damit ermöglicht werden.



Für die Weiterführung des Energiemanagementsystems ist eine Einbeziehung von Versuchsplanungsprozessen sinnvoll. Dadurch lassen sich die Verschiebungen der Startzeiten für Versuche noch genauer an den realen Arbeitsablauf anpassen.

6 Ergebnisdiskussion

Den Anstoß für dieses Vorhaben gab die Aufgabe zur Planung eines Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums, welches auch als Anwendungsbeispiel im Verlauf dieser Arbeit herangezogen wurde. Die Besonderheit in der vorliegenden Arbeit besteht in:

- der Planung eines hoch komplexen Versuchsfeldes mit Lösungsansätzen und Werkzeugen aus dem Systems Engineering und
- der Anwendung des V-Modells auf die Planung und die Realisierung des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums in den Bereichen
 - Prüfstandentwicklung,
 - Versuchsfeldgestaltung und
 - Integration in einen Gebäudekomplex.

Aufgrund eines vorgegebenen Zeitfenster und der Komplexität des Vorhabens konnte eine sequentielle Planung nicht durchgeführt werden. Die Hauptaufgabe der vorliegenden Arbeit bestand darin, eine Systematik zu entwickeln, die es erlaubt, die Entwicklungsprozesse für ein Versuchsfeld, die darin befindlichen Prüfstände und die das Versuchsfeld umgebende Gebäudehülle zu parallelisieren und so Planungs- und Entwicklungszeit zu sparen. Daneben sollten methodische Werkzeuge entstehen, welche die Planungsarbeit erleichtern und Risiken eher erkennbar machen. Die Beurteilung der erzielten Ergebnisse erfolgt daher in mehreren Schritten. Zunächst werden in Kap. 6.1 die Plausibilität der Systematik und die darin enthaltenen Werkzeuge dargestellt. In Kap. 6.2 folgt eine SWOT-Analyse dazu. Danach wird in Kap. 6.3 die praktische Tauglichkeit anhand der Planungsergebnisse für das Versuchsfeld, die Prüfstände und das Gebäude des verwendeten Beispiels „Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum“ nachgewiesen. Die Schlussfolgerungen aus diesen Ergebnissen und den erlangten Erfahrungen während der Bearbeitung werden in einer Handlungsempfehlung in Kap. 6.4 zusammengefasst. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf zukünftige Schritte in Kap. 6.5.

6.1 Plausibilität der Systematik

Die entstandene Systematik erlaubt einen durchgängigen Planungsverlauf der einzelnen Teilprozesse *Versuchsfeldentwicklung* und *Prüfstandentwicklung*. Es konnte gezeigt werden, dass die Entkopplung dieser beiden Prozesse mit definierten Schnittstellen möglich



ist. Dadurch wird die erste Voraussetzung für eine Parallelisierung der Teilprozesse erfüllt. Die zweite Voraussetzung wird erfüllt, wenn auch der *Gebäudeplanungsprozess* in einzelnen Abschnitten entkoppelt werden kann. Dies gelingt durch die Anwendung der modellbasierten Produktentwicklung (vgl. Kap. 3.2.2), die damit verbundene Verwendung simulationsbasierter Methoden und Werkzeuge sowie die Schaffung von Datenübergabeformalismen (vgl. Kap. 4.5 und 5.3).

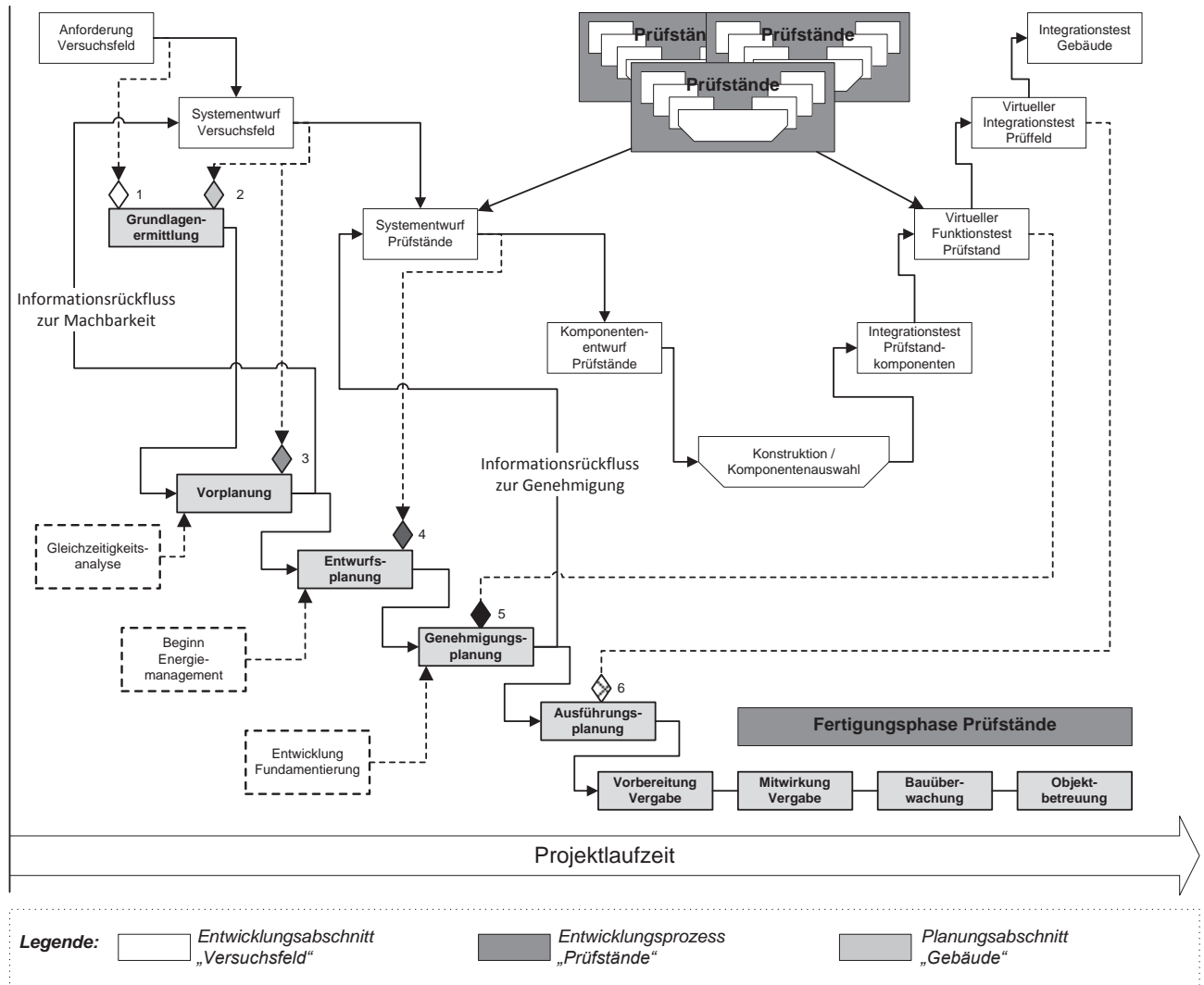


Abb. 6.1 Informationsverknüpfung der Teilentwicklungsprozesse

In Abb. 6.1 sind alle hier behandelten Entwicklungsprozesse zur Versuchsfeld, Prüfstand und Gebäude mit den jeweils wesentlichen Abschnitten dargestellt. Die Grafik zeigt dazu die Verflechtungen im Informationsfluss zu Anforderungen und Randbedingungen. Außerdem sind die Übergabemeilensteine (1-6) darin verzeichnet.



Die Systematik kombiniert verschiedene bekannte Techniken des Systems Engineering und enthält zusätzlich folgende Werkzeuge:

- Bewertungsverfahren für komplexe Systemlösungen nach vielschichtigen Kriterien (vgl. Kap. 3.1.3)
- Verfahren zur Anforderungsanalyse für methodische Werkzeuge in der Kraftfahrzeugentwicklung (vgl. Kap. 4.2)
- Verfahren zur Konzepterstellung von Versuchsfeldern (vgl. Kap. 4.3)
- Verfahren zur virtuellen Entwicklung von Prüfständen in der Kraftfahrzeugentwicklung (vgl. Kap. 4.4)
- Vorgehensweise zum Datenmanagement für die Gebäudeintegration von Prüfständen (vgl. Kap. 4.5)
- Verschiedene Techniken zur Kommunikation und Visualisierung im Planungsteam (vgl. Kap. 5.3)
- Verfahren zu Konzeption und Absicherung von Schwingisolierungen für Schwingungsprüfstände (vgl. Kap. 5.4)
- Verfahren zur Erstellung eines Energiemanagementsystems für Versuchsfelder (vgl. Kap. 5.5)

Damit liefert diese Arbeit eine Vorgehensweise zur Parallelisierung der Entwicklungsprozesse und den Nachweis zur Durchführbarkeit.

6.2 Chancen und Risiken

Die vorgestellte Systematik zeigt Möglichkeiten zur Durchführung einer komplexen Gesamtplanung in simultan ablaufenden Teilprozessen für den Gebäude- und Anlagenentwicklungsprozess. Durch die Veränderung des Planungsablaufes ergeben sich Chancen und Risiken, die hier benannt werden müssen. Die Erprobung der Methode erfolgte in dieser konsequenten Form bisher nur an dem gezeigten Beispiel. Eine fundierte Bewertung der Chancen und Risiken ist nach einer längeren Erprobungsphase der Systematik erneut durchzuführen. In Abb. 6.2 ist das Ergebnis einer SWOT-Analyse zur vorgestellten Systematik dargestellt.



Stärken	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> • Verkürzung der Gesamtplanungszeit • Starke Informationsvernetzung im gesamten Planungsprozess • Optimale Abstimmung von technischer Anlage (Versuchsfeld, Prüfstand) und Gebäude • Hohe Flexibilität im gesamten Entwicklungsprozess 	<ul style="list-style-type: none"> • Risiko einer inhaltlichen Fehlplanung durch veraltete Anforderungen wird gesenkt • Senkung der Planungskosten durch gute Möglichkeiten zum Einsatz von Simulation an verschiedenen Stellen der Systematik • Optimale Auslegung der Betriebsprozesse durch den Einsatz der Simulation in frühen Entwicklungsphasen
Schwächen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Aufwändige administrative Prozesse • Hoher Abstimmungsbedarf • Entscheidungsprozesse für Lösungsvarianten aufgrund der erhöhten Anzahl an gestalterischen Freiheitsgraden und Planungsbeteiligten schwierig • Erhöhter Dokumentationsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Planungsfehler hinsichtlich der Umsetzbarkeit können u.U. nicht erkannt werden • Funktionale Einschränkung der technischen Anlage durch verfrühte Entscheidungen mit Relevanz in der Gebäudeplanung

Abb. 6.2 Ergebnisse nach SWOT-Analyse

6.3 Planungsergebnisse Versuchsfeld, Prüfstand und Gebäude

Die Systematik zur Konzeption eines Versuchsfeldes wurde anhand eines Beispiels aus der Praxis entwickelt. Das Gesamtvorhaben „Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum“ wurde für die Planung und Realisierung von den ausführenden Behörden in drei Abschnitte geteilt. Nachfolgend werden einige ausgewählte Ergebnisse dieses konkreten Beispiels vorgestellt. Da lediglich der erste Abschnitt während der Bearbeitungsphase dieser Dissertation abgeschlossen werden konnte, werden sich die Ergebnisse der Realisierung auf diesen Abschnitt beschränken. In Tab. 6.1 sind die Elemente der Prüffeldstruktur mit dem dazugehörigen Einsatzzweck und ausgewählten daran bestimmbaren Fahrzeugparametern aufgeführt. Für die Realisierung des Versuchsfeldes mussten Prüfstandsysteme erweitert und zum Teil auch vollkommen neu konzipiert werden. In Abb. 6.3 ist eine Auswahl neuentstandener und verbesserter Prüfstandkonzepte dargestellt. In Abb. 6.4 ist der Entwurf der Versuchsfeldstruktur zur Gebäudeintegration des späteren Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums dargestellt.



Nr.	Bezeichnung	Einsatzzweck / Fahrzeugparameter (Auszug)
<i>1. Abschnitt</i>		
1	Dynamischer Kinematics and Compliance-Prüfstand	Fahrwerk – Kinematik, Elastokinematik (stat./dyn.), Nickpole, Wankpolhöhe, Steifigkeit über Radhub u.v.m
2	Messeinrichtung für Schwerpunkt und Trägheitsmomente	Parameteridentifikation – Trägheitstensor, Schwerpunktlage, Masse Gesamtfahrzeug
3	Messeinrichtung für Radstellungsgrößen	Parameteridentifikation – Gesamtspur, Einzelspur, Sturz, Radversatz, Fahrachswinkel, Nachlauf u.v.m.
4	Dynamischer Achsprüfstand (Straßensimulator)	Fahrwerk – Kinematik, Elastokinematik, Übertragungsverhalten, Lastpfade, Kräfte/Momente/Beschleunigungen
5	Dreidimensionaler Elastomerlagerprüfstand	Elastomerlager Fahrwerk und Aggregate – statische und dynamische Kennwerte wie Steifigkeit, Dämpfung unter mehrachsiger Belastung
6	Einachsiger Hydropulsprüfstand	Div. Komponenten Fahrwerk und Antriebsstrang – statische und dynamische Kennwerte wie Steifigkeit, Dämpfung unter einachsiger Belastung
7	Präzisions-Zug-Druck-Messmaschine	Div. Komponenten Fahrwerk und Antriebsstrang – statische Steifigkeit, Dehnungsverhalten unter einachsiger Belastung; statisches Kalibrieren
<i>2. Abschnitt</i>		
8	Dynamischer Reifenprüfstand mit Trommel und Flachbahn	Reifen – statische und dynamische Kennwerte wie Reifensteifigkeit, Seitenkraft-Rückstellmoment-Kennlinien, Einlaufverhalten, modale Eigenschaften, Temperaturverhalten u.v.m.
9	Dynamischer Rad-Achs-Prüfstand mit Bewegungssystem	Fahrwerk und Achse mit Reifen – Anlenkverhalten, manöverspezifisches Übertragungsverhalten, fahrdynamische Kenngrößen
10	Servohydraulisch-elektrisches Multifunktionsprüffeld	div. Versuchsaufbauten für Karosserie, Lenkung, Bremssystem, Fahrwerk und Komponentenuntersuchung
11	Gekoppelter Fahrwerk-Antriebsstrang-Prüfstand	Antriebsstrang und Fahrwerk – manöverspezifisches Übertragungsverhalten, Schnittgrößen zur Karosserie, Betriebsstrategie, Lastpfadmessung
12	Dynamischer Rollenprüfstand für Innengeräuschemessung	Antriebsstrang, Fahrwerk und Karosserie – betriebspunktabhängiges Übertragungsverhalten, Transferpfadanalyse, Innenraumluftschallsynthese
<i>3. Abschnitt</i>		
13	Hochdynamischer selbstfahrender Fahrsimulator	Fahrerverhalten – Untersuchung Mensch-Maschine-Schnittstellen, Fahrerassistenzsysteme, Akzeptanz
14	Linearreifenprüfstand	Untersuchung des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes für beliebige Witterungsbedingungen und Fahrbahnoberflächen

Tab. 6.1 Zusammensetzung Versuchsfeld

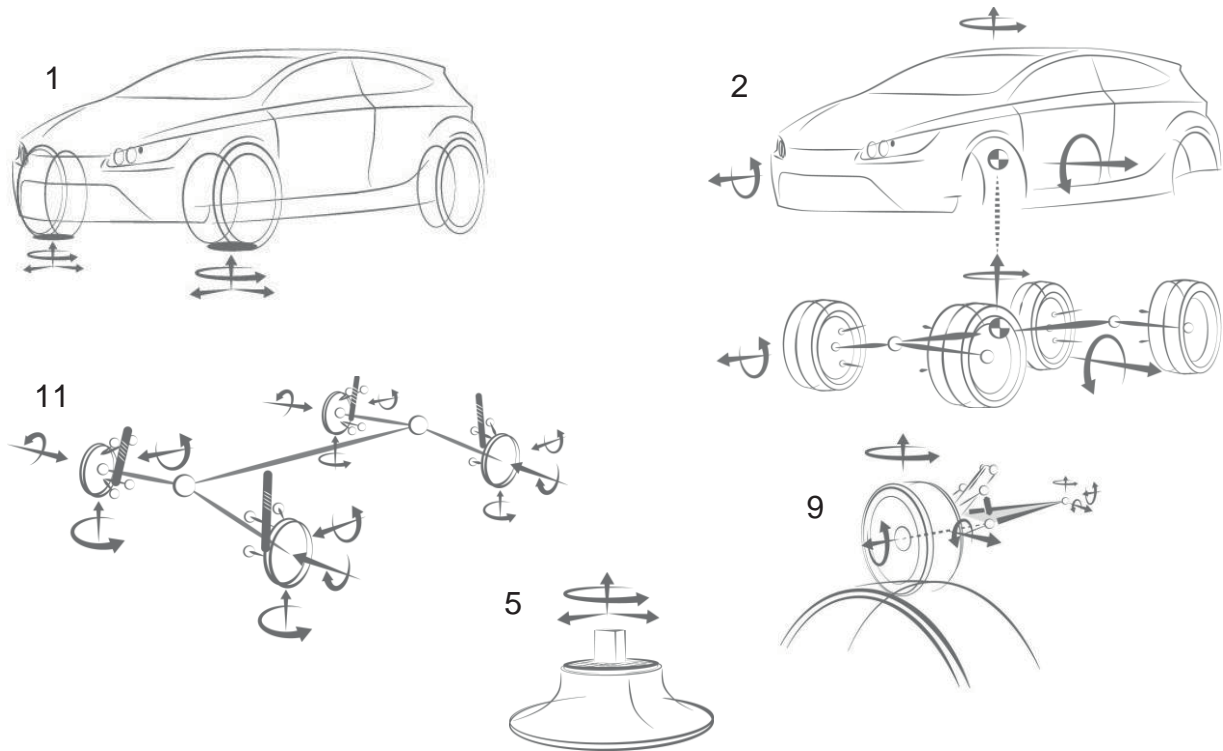


Abb. 6.3 Neuentstandene und verbesserte Prüfstandkonzepte (vgl. Tab. 6.1)

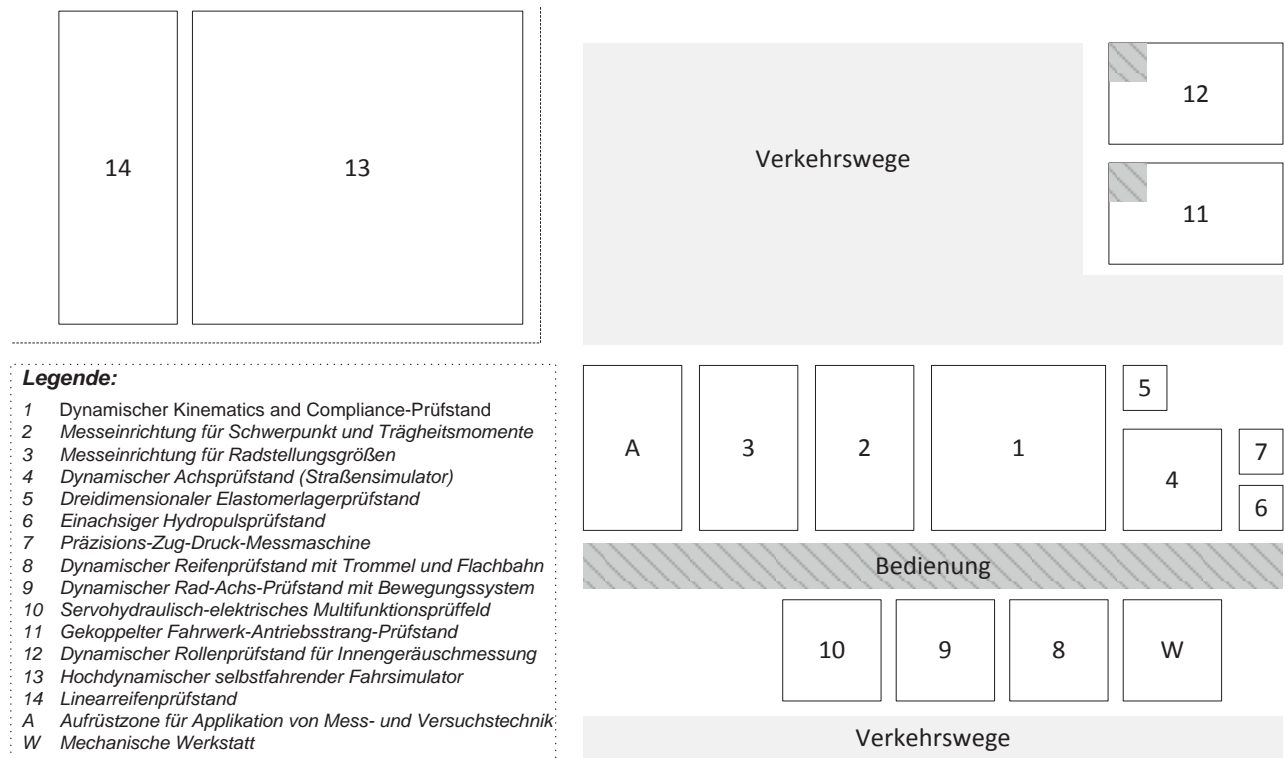


Abb. 6.4 Entwurf Gebäudestruktur



Einige Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden bereits einen Ausführungsplanungsprozess aufgegriffen und fortgeführt. In einem ersten Bauabschnitt wurden dann die sieben im oberen Teil von Tab. 6.1 aufgeführten Prüfstände umgesetzt. Nach der Fertigstellung der Baumaßnahmen und dem Einbau der Prüfstände konnte der erste Bereich des Versuchsfeldes in Betrieb genommen werden. In Abb. 6.5 sind drei Innenansichten mit Blick auf das Versuchsfeld und die Prüfstände dargestellt. Weitere Darstellungen sind dem Anhang G zu entnehmen.



Abb. 6.5 Innenansicht der Versuchshalle Gebäude 127 (Lassig)



6.4 Handlungsempfehlung

Die Handlungsempfehlung wird in die Bereiche projektspezifische und methodenspezifische Weiterentwicklung unterteilt.

6.4.1 Projektspezifische Weiterentwicklung

Für das Entwicklungsprojekt Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum ist die Anbindung des Versuchsfeldes an leistungsfähige Simulationsnetzwerke umzusetzen. Erst dadurch gelingt es, die Virtualisierung des Gesamtfahrzeuges in Kombination mit realen prototypischen Komponenten zu betreiben. Dazu ist der Aufbau einer leistungsfähigen, simulationsbasierten Reglerstruktur zum vernetzten Betrieb der Einzelprüfstände (vgl. Kap. 6.5) erforderlich. Weiterhin sind nun Nutzungsprozesse für die Prüfstände sowohl im individuellen als auch im vernetzten Betrieb zu entwickeln und zu optimieren. Es müssen Prozeduren und Abläufe für die jeweiligen Mess- und Versuchsaufgaben entstehen, die eine reproduzierbare Ergebnisgenauigkeit und eine Automatisierbarkeit zulassen. Für den Betrieb des gesamten Versuchszentrums müssen dann Lastganganalysen durchgeführt und somit die Grundlage für ein verbessertes Energiemanagement geschaffen werden.

Um den funktionalen Anforderungen an den virtualisierten Entwicklungsprozess im Fahrzeugtechnischen Versuchszentrum weiter Rechnung zu tragen, muss der Aufbau eines hochdynamischen Fahrsimulators mit den Untersuchungsschwerpunkten Mensch-Maschine-Schnittstelle für Fahrerassistenzsysteme, Fahrermodellierung und virtuelle Absicherung von Gesamtfahrzeugfunktionen priorisiert werden. Zur weiteren methodischen Unterstützung im Bereich Parametrierung und Validierung sind Prozesse zur Einbindung des Fahrversuches erforderlich. Auch hier müssen die vorhandenen Möglichkeiten optimiert und weiter ausgebaut werden.

6.4.2 Methodenspezifische Weiterentwicklung

Die Weiterentwicklung der Systematik sollte sich auf die Weiterentwicklung der Verfahren zur virtuellen Entwicklung von Prüfständen und der Konzeption von Versuchsfeldern unter Einbeziehung weiterer Eigenschaftsfelder (Energieeffizienz, Fahrzeug- und Verkehrssicherheit, u.a.) fokussieren. Daneben wird die Verbesserung der Formalismen im Planungsablauf an Bedeutung zulegen, wenn die Komplexität des Vorhabens steigt. Dazu gehört vor allem die Standardisierung der benannten Schnittstellen zwischen Gebäude-



und Anlagenentwicklung. Ebenso wird dann die automatisierte Erstellung von Dokumentationen und Datenbanken erforderlich sein, um den reibungsarmen Informationsfluss zu gewährleisten.

6.5 Ausblick

Das Vorhaben „Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum“ endet nicht mit dem Abschluss der vorliegenden Arbeit. Vielmehr sollte diese lediglich einen Beitrag zur Koordination und zum Anlauf des Vorhabens leisten. Nachdem anhand des erfolgreichen Abschlusses des ersten Bauabschnittes gezeigt werden konnte, dass die Vorgehensweise tauglich ist, um Vorhaben dieser Komplexität durchzuführen, werden auch die noch ausstehenden zwei Bauabschnitte in der gezeigten Systematik vorbereitet. Dabei werden bereits einige der in Kap. 6.4 „Handlungsempfehlung“ postulierten Schritte umgesetzt.

Simulationsgesteuerter Versuch (X-in the Loop)

Der Aufbau einer Simulationsumgebung und die Umsetzung von Prüfständen in X-In-The-Loop-Strukturen haben ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Anforderungen an das zu erstellende Gebäude und die Ausprägung der Prüfstände bzw. deren Steuerung im Besonderen. Die Austauschbarkeit von realen und virtuellen Komponenten, die jeder X-In-The-Loop Anwendung zu Grunde liegt, ermöglicht einerseits die Ableitung von Gesamtfahrzeugeigenschaften auf Subsystem- und Komponentenprüfständen, setzt jedoch andererseits leistungsfähige Fahrzeugmodelle voraus. Weiterhin ist der Zusammenschluss mehrerer Prüfstände durch informationstechnische Vernetzung zu einer Anwendung dazu erforderlich. Die geplante Simulationsumgebung umfasst zusätzlich auch Modelle der Prüfstände. Diese sind notwendig, um im Prüfstandbetrieb eine modellbasierte Steuerung bzw. Regelung zu ermöglichen, welche für eine Reihe von Anwendungen von Vorteil ist.

Hieraus kann abgeleitet werden, dass die gekoppelte Nutzung von Prüfständen ein performantes Datennetz erfordert. Die Einbindung einer Simulationsumgebung ist bereits bei der Auslegung der Regelungskonzepte der Prüfstände zu berücksichtigen. Aus beiden Aspekten erwachsen demnach Anforderungen für Gebäude und Prüfstandauslegung, welche bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Planungsarbeiten berücksichtigt werden müssen. Da dies in der zurückliegenden Planung bereits geschehen ist, sind die wesentlichen Voraussetzungen für die Einführung einer auf mehrere Prüfstände ausgedehnten simulati-



onsbasierten Versuchsdurchführung möglich. Ein Lösungskonzept für diese Aufgabe sollte dabei folgende Inhalte berücksichtigen:

- Initiation eines neuen Forschungsfeldes unter dem Titel „*Methoden zur virtuellen Entwicklung und Absicherung / vernetzte Prüfsysteme*“. Darin sollen Methoden und Werkzeuge geschaffen werden, die es erlauben, den Entwicklungszyklus eines Fahrzeuges bereits in einer frühen Phase stärker zu virtualisieren, als dies bisher möglich ist. Es muss das Ziel sein, das Fahrzeug bereits in einer frühen Phase gesamtheitlich erfassen zu können und gleichzeitig Wechselwirkungen bis auf Subsystem- oder Komponentenebene abzubilden.
- Das Konzept des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums sieht vor, eine Auswahl an Prüf- und Messsystemen so zu vernetzen, dass durch die Interaktion mit Fahrzeug- und Prüfstands Simulationsmodellen schrittweise die Beschreibung physikalischer Wirkketten im Fahrzeug für unterschiedliche Anwendungsfälle ermöglicht wird.
- Für die Realisierung des Konzeptes wurde für das Fahrzeugtechnische Versuchszentrum eine Auswahl an bestehenden und zu entwickelnden Prüfständen vorgesehen, die eine virtuelle Aufspaltung des Fahrzeuges in Teilsysteme und -funktionen zulässt.

Diese Forschungs- und Entwicklungsaufgabe kann dazu in folgende Teilschritte gegliedert werden:

1. Vorbereitung für grundsätzliche messtechnische Aufgaben
 - a. Erstellung von Zielstellungen und Aufgaben in der virtuellen Entwicklung und Absicherung mit vernetzten Prüfsystemen
 - b. Analyse bestehender Prüfstände hinsichtlich mess- und regelungstechnischer Möglichkeiten und Ableitung von Anforderungen für neue Messtechnik
 - c. Ableitung einer Anforderungsliste für Messtechnik
 - d. Beschaffung messtechnischer Grundausstattung
2. Machbarkeitsstudie zur technischen Umsetzbarkeit einer modellbasierten Prüfstandsregelung für Fahrdynamikaufgaben
3. Konzeption der prüfstandübergreifenden Kommunikations- und Regelstruktur
 - a. Definition der für die unter 1. festgelegten Anwendungen erforderlichen Bestandteile (Prüfstände und Simulationsmodelle)



- b. Entwicklung anwendungsspezifischer Netzstrukturen und Erstellung von Kommunikationsmatrizen auf Basis der unter 1. definierten Zielstellungen und Aufgaben
- c. Definition von Teilaufgaben in der Messdatenerfassung und der Regelung für die jeweiligen Teilnehmer (Prüfstände, Modelle, u.a.)
- d. Untersuchung bestehender Regelkonzepte hinsichtlich Verwendbarkeit
- e. Entwicklung der Regelungs- und Automatisierungsstruktur für die virtuelle Entwicklung und Absicherung mit vernetzten Prüfsystemen

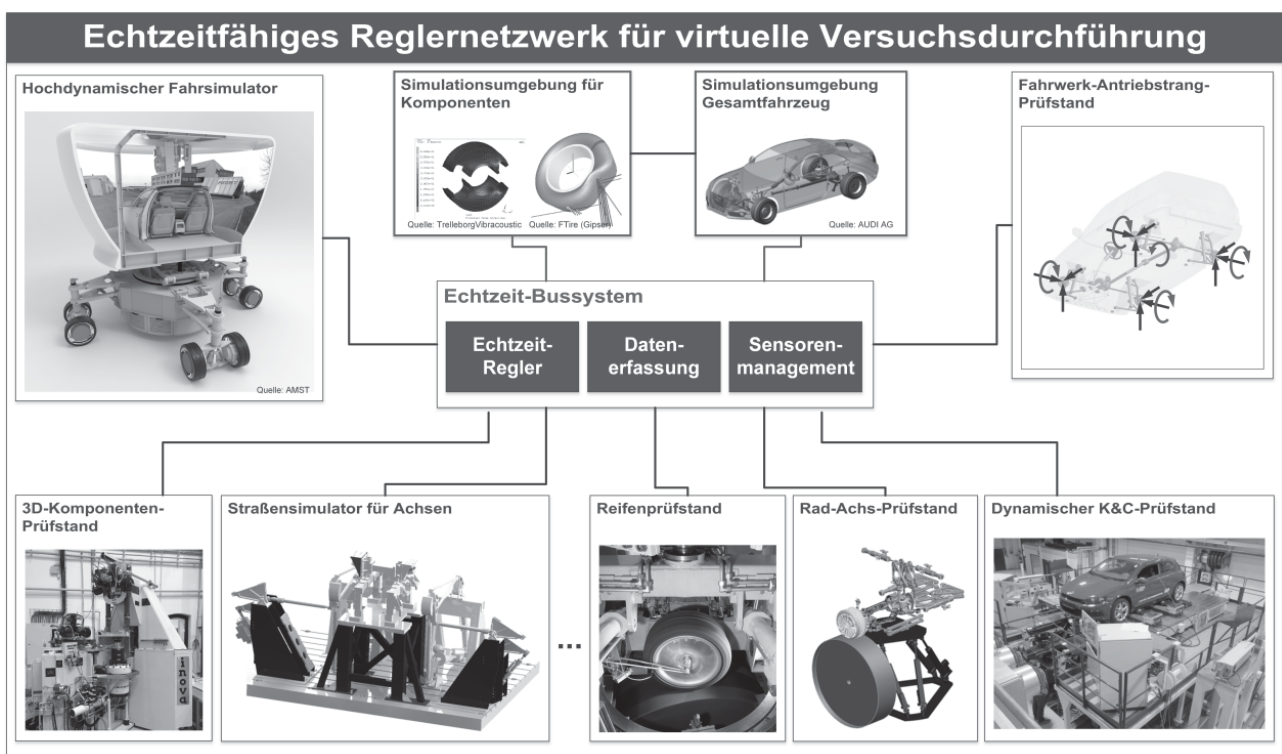


Abb. 6.6 Schema vernetzte, simulationsbasierte Prüfstandregelung

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Entwicklung einer Systematik zum Entwurf eines Versuchsfeldes bestehend aus Mess- und Prüfanlagen beschrieben. Anhand eines konkreten Beispiels für ein Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum wurde der Fokus für diese Arbeit auf die Anforderungen des Kraftfahrzeugentwicklungsprozesses gelegt. Das dabei entstandene Versuchsfeld sollte moderne Simulationsmethoden und experimentelle Verfahren, welche heute im Fahrzeugentwicklungsprozess standardisiert sind, leistungsfähiger machen und selbst die Entwicklung neuer simulationsbasierter Methoden für die Fahrzeugentwicklung ermöglichen. Der Bedarf für eine solche Systematik ergibt sich aus der Komplexität und Vielfalt der zu lösenden Aufgaben bei der Konzeption und Planung von Versuchseinrichtungen, wie sie zur virtualisierten Entwicklung im Bereich Schwingungstechnik in der Kraftfahrzeugtechnik erforderlich sind. Hinzu kommt die gezwungenermaßen verkürzte Entwicklungszeit für Versuchseinrichtungen resultierend aus der verkürzten Entwicklungszeit für das eigentliche Produkt. Die bisher praktizierte serielle Vorgehensweise, erst das Konzept des Versuchsfeldes, dann die komplette Entwicklung der Versuchsanlagen (Prüfstände u.ä.) und dann, wenn alle Informationen daraus vorliegen, die Planung und Realisierung des Gebäudes, sind unter diesen Voraussetzungen nicht mehr umsetzbar. Eine ausführliche Darstellung der Beweggründe, welche die Motivation zu dieser Arbeit bilden, ist in Kap. 1 beschrieben.

Die starke funktionale Verknüpfung der Anlagen mit dem Gebäude macht eine ganzheitliche Betrachtung unter Einbeziehung vieler Wechselwirkungen erforderlich. Der dokumentierte Stand der Technik hält keine Vorgehensweise für eine parallelisierte Entwicklung eines Versuchsfeldes nach den Anforderungen der virtualisierten Kraftfahrzeugentwicklung bereit. Die Grundlagen für eine zeitsynchron ablaufende Entwicklung einzelner Anlagen, welche Bestandteil des Versuchsfeldes sind, und der Gebäudestruktur für die Unterbringung des gesamten Versuchsfeldes werden mit der vorliegenden Arbeit gelegt. Dagegen sind Methoden für die voneinander getrennt ablaufende Entwicklung der genannten Bereiche in ausreichendem Umfang veröffentlicht, sodass diese Arbeit auf eine breite Basis aufbauen konnte. Weiterhin konnte der Ausgangspunkt für die Konzeption neuer Methoden und Werkzeuge in der Kraftfahrzeugentwicklung aus der Literatur gut bestimmt



werden. Der Stand der Technik zu Methoden in der Kraftfahrzeug- und Prüfstandentwicklung wurde in Kap. 2 dargelegt.

Die Entwicklung der Systematik erfolgte unter Zuhilfenahme von methodischen Ansätzen aus verschiedenen Ingenieurdisziplinen, die als theoretische Grundlagen für diese Arbeit in Kap. 3 vorgestellt wurden. Die Ansätze für die umfassenden Aufgaben zur Integration der verschiedenartigen Entwicklungsaufgaben aus Maschinen- und Anlagenbau sowie des Gebäudeentstehungsprozesses zu einem ganzheitlichen Ablauf entstammen dem Wissenschaftsfeld „Systems Engineering“. Die Schwingungstechnik spielt im hier verwendeten Beispiel des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums eine hervorzuhebende Rolle. Aus diesem Grund wurden in Kap. 3 zusätzlich noch einige grundlegende Zusammenhänge wiedergegeben.

Die Systematik wurde in den Bereichen „Versuchsfeld“, „Prüfstand“ und „Gebäude“ entwickelt. Für die Bereiche „Versuchsfeld“ und „Prüfstand“ wird in Kap. 4 ein simulationsbasiertes Verfahren erarbeitet, welches eine schlüssige Abfolge an Arbeitsschritten hervorbringt, die auch auf Entwicklungsaufgaben für Versuchsfelder mit anderen Forschungszielen übertragbar sind. Dazu wurde ein Anforderungsprozess unter der Nutzung aus der Literatur bekannter Vorgehensweisen mit hier entwickelten Erweiterungen kombiniert. Der Anforderungsprozess erstreckt sich hier über die Fahrzeugeigenschaftsbereiche *Fahrdynamik*, *Schwingungskomfort* und *Haltbarkeit und Lastdaten*. Als Resultat der Konzeptentwicklung für die Bereiche „Versuchsfeld“ und „Prüfstand“ wurde ein virtuelles Modell in den Gebäudeentwicklungsprozess integriert.

In Kap. 5 wurde der formale Ablauf des Gebäudeentwicklungsprozesses dargestellt. Danach wurden die hier eingeführten Erweiterungen erläutert, die sich aus der Anwendung der Systematik zur Konzeption des Versuchsfeldes ergeben. Dazu zählen das Energiemanagement und die Fundamentierung der Prüfstände in diesem speziellen Fall der Schwingungstechnik. Die Validierung der Simulationsergebnisse für die Fundamentierung erfolgte anhand zweier Schwingfundamente mittels experimenteller Modalanalyse. Des Weiteren wurden Schnittstellen für die Synchronisation der einzelnen Entwicklungsprozesse definiert.

Den Abschluss der Arbeit bildet die Ergebnisdiskussion in Kap. 6. Darin wurde eine Plausibilisierung sowie eine Chancen- und Risikenanalyse der gesamten Systematik durchgeführt. Danach wurden wesentliche Ergebnisse des Planungsprozesses sowie einige Ein-



drücke vom bereits realisierten ersten Bauabschnitt des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums vorgestellt. Anhand dieser Ergebnisse konnte die Durchführbarkeit der Systematik erneut bestätigt werden. In der Handlungsempfehlung wurden die Erkenntnisse aufgeführt, die auf einen konkreten Handlungsbedarf sowohl zur Weiterentwicklung des Versuchszentrums als auch zur Verbesserung der Systematik hinweisen. Einer der genannten Vorschläge zum Aufbau einer erweiterten Hardware-in-the-Loop-Prüfstandumgebung wurde im Ausblick konkretisiert.



Glossar

Begriff	Bedeutung
Bottom-Up	von unten nach oben, vom Detail zum Übergreifenden
Car-2-X	Kommunikation zwischen Fahrzeug und X (X steht dabei als Variable für andere Verkehrsteilnehmer oder die Verkehrsinfrastruktur)
closed loop	geschlossene Schleife
Downforce	Abtriebskraftzylinder
Elastokinematik	Erweiterung einer Kinematik starrer Körper um elastische Koppellemente
Forschungsfeld	Kompetenzbereich in einem wissenschaftlichen Teilgebiet.
Kubatur	Volumen eines Bauwerkes im Sinne von Form und Gestalt des Baukörpers
open loop	offene Schleife
Planer	Die Planung durchführende Person, i.d.R. fachspezifisch
Planung	Entwicklungsprozess i.d.R. für Bauwerke bis hin zum Betrieb und Unterhalt
Prüfling	physikalischer Gegenstand, an welchem experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden
Prüfstand	Technische Anlage zur experimentellen Untersuchung physikalischer Eigenschaften von Proben und Prüflingen
SWOT-Analyse	Analyse von Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Bedrohungen/Risiken)
Topmount	Lagerung des Federbeins im Federbeindom der Karosserie
Versuchsfeld	Kombination verschiedener Prüfstände zur Untersuchung komplexer Eigenschaften von Prüflingen
Vibroakustik	Teilbereich der technischen Dynamik
Wirkkette	physikalisch beschreibbare Wechselwirkung mehrerer Elemente eines Systems, die zu einem bestimmten auch phänomenologisch beschreibbaren Systemverhalten führen



Quellenverzeichnis

Stand der Technik

- [1] ALBERS, A. et al.: Prüfen von Antriebssträngen am Beispiel des Kupplungsrupfens – Ganzheitliche Antriebsstrangentwicklung. in ATZ 2001, Vol. 103, Nr.01, Springer, 2001, S. 44 – 49.
- [2] BAUMANN, G.: *Antriebsstrang- und Hybrid-Prüfstand*. Info-Broschüre Research in motion 06/2010, FKFS und Universität Stuttgart, Stuttgart, 2010.
- [3] BRAUN, H. et al.: *Vorstellung eines Antriebsstrangprüfstands mit elektrischem Antrieb für die Simulation des Verbrennungsmotors*. VDI-Berichte Nr. 1990, Düsseldorf, 2007.
- [4] BRODBECK, P. et al.: *Verbesserung der Simulationsgüte von Antriebsstrangprüfständen mittels Reifenschlupfsimulation*. VDI Berichte Nr. 1610, Getriebe in Fahrzeugen, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [5] BRUNNER, H.: *100 Jahre Kraftfahrzeugtechnik an der Technischen Universität Dresden*. Abschrift des Festvortrages, Dresden, 2003.
- [6] FÖRSCHL, L.: *Anlagenbeschreibung Fahrdynamischer Achsprüfstand*. IABG, 2015.
- [7] HÜSEMANN, T. ET AL.: *Mobile Prüfstandstechnik zur Messung von Reifen-Fahrbahn-Reibwerten*. in ATZ 2011 Vol. 113, Nr. 6, Springer, 2011, S.504-508.
- [8] KATSUTOSHI, H. et al.: *Handling Analysis with Vehicle Dynamics Simulator*. Society of Automotive Engineerings, Inc., (SAE-paper: 971058), 1997.
- [9] KÜÇÜKAY, F.: *Forschung, Entwicklung und Lehre am Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig*. in ATZ 2003, Vol.105, 2003, S. 988 – 995.
- [10] LUX, R. et al.: *Neuartiger, universell einsetzbarer Antriebsbaugruppen-Prüfstand*. VDI-Berichte Nr. 1470, Düsseldorf, 1999.
- [11] MAST, P. et al: *Simulator für dynamische Fahrwerk-Tests*. in ATZ extra 2009, Springer, 2009, S. 20 – 25.
- [12] NESTLER, H.: *Analyse von Versuchen am Antriebsstrangprüfstand mit Verbrennungsmotor*. Diplomarbeit TU Dresden, Dresden, 2006.



- [13] RESCH, S. et al: *Dynamic Kinematics and Compliance Analysis for Transient Vehicle Dynamic Behavior on Intelligent Test Bench Concept*. Tagungsbeitrag FISITA 2008 World Automotive Congress, München, 2008.
- [14] ROBERT, L.: *Automobilbau und Hochschule*. in: *Der Motorwagen*, Heft 28, 1905, S. 660–665
- [15] SCHINDLER, V.; SIEVERS, I.: *Forschung für das Auto von morgen – Aus Tradition entsteht Zukunft*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.
- [16] SCHYR, C.; CHRIST, C.: *Anforderungen an Prüfstände für Hybridfahrzeuge*. in ATZ/MTZ-Konferenz Motorentwicklung auf dynamischen Prüfständen, vieweg technology forum, Wiesbaden, 2006.
- [17] STRETZ, A.: *Komfortrelevante Wechselwirkung von Fahrzeugschwingungsdämpfern und den elastischen Dämpferlagern*. Dissertation TU Darmstadt, Darmstadt, 2012.
- [18] WILLUMEIT, H.-P.; APPEL, H.: *Lehre und Forschung der Kraftfahrzeugtechnik an der TU Berlin – Teil1*. in ATZ 1998, Vol. 100, Nr. 2, Springer, 1998, S. 154 – 159.
- [19] WILLUMEIT, H.-P.; APPEL, H.: *Lehre und Forschung der Kraftfahrzeugtechnik an der TU Berlin – Teil2*. in ATZ 1998, Vol. 100, Nr. 3, Springer, 1998, S. 224 – 228.
- [20] N.N.: *Model 329 Multiaxial Spindle-Coupled Road Simulators 100-109-160c Multiaxial329*. MTS Systems Corporation, Eden Prairie, USA, 2014.
- [21] N.N.: *Flat-Trac miniproposal*. MTS Systems Corporation, Eden Prairie, USA, 2011.
- [22] N.N.: *Transmission Test System – TTS-Mini Brochure 04*. Toyota Motorsport GmbH, Köln, 2015.
- [23] N.N.: *Model 852 Damper Test System 100-129-588*. MTS Systems Corporation, Eden Prairie, USA, 2004.
- [24] N.N.: *Modell 833 Triaxial Test System for Dynamic Characterization and Fatigue Testing of Elastomers 100-015-996*. MTS Systems Corporation, Eden Prairie, USA, 1999.
- [25] N.N.: *Prüfstandskatalog – IKA Institut für Kraftfahrzeuge*. 2. Auflage, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University, Aachen, 2015.



- [26] N.N.: *Technische Spezifikation Rollenprüfstand CDM-75L- 4mot.* Version 3, MAHA - AIP GmbH & Co. KG, Haldenwang, 2015.

Methoden

- [27] BEITELSCHMIDT, D; PROKOP, G.: *Concept, integration, and validation of total vehicle properties upon the V-Model of development.* in Automotive Systems Engineering II, Springer Verlag, Heidelberg, (under review).
- [28] BRAUNSPERGER, M: *Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf.* Dissertation, Technische Universität München, München, 1992.
- [29] BULLINGER, H.-J.; WARSCHAT, J.: *Forschungs- und Entwicklungsmanagement : simultaneous engineering, Projektmanagement, Produktplanung, rapid product development.* Stuttgart : Teubner, 1997.
- [30] BÜTTNER, K.; STOLLER, A.; PROKOP, G.: *Methodological approaches for the development of a test facility to represent system dynamic aspects in automotive engineering.* in Tagungsband zum 15. Internationalen Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 187 – 201.
- [31] BÜTTNER, K.; QUARZ, V.; VOLK, F.-M.: *Development of a method for analysis and effectiveness evaluation of driving safety functions in powered two-wheelers.* 10th International Motorcycle Conference, Köln, 2014.
- [32] CONRAD, K.-J.: *Grundlagen der Konstruktionslehre.* 6. Aufl., Hanser Verlag, München, 2013.
- [33] DRESIG, H.; HOLZWEISIG, F.: *Maschinendynamik.* Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [34] EHRENSPIEL, K. et al.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren - Kostenmanagement in der integrierten Produktentwicklung.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [35] EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik. Bd. 1: Grundlagen.* 3. Aufl. (VDI-Buch) , Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1996.
- [36] EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik. Bd. 2: Konstruktion,* 3. Aufl. (VDI-Buch) , Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- [37] EVERSHEIM, W.: *Organisation in der Produktionstechnik. Bd. 3: Arbeitsvorbereitung,* 3. Aufl. (VDI-Buch), Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.



- [38] EVERSHEIM, W.: *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. (VDI-Buch), Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005.
- [39] FRIEDRICH, J. et al.: *Das V-Modell-XT*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [40] GRUBER, H.; KITTELMANN, M.; MIERDEL, B.: *Leitfaden für die Gefährdungsbeurteilung*. 14. Auflage, DCVerlag e.K., Bochum, 2015.
- [41] HAB, G.: *Projektmanagement in der Automobilindustrie*, Fachbuch, 4. Auflage, 2013
- [42] HABERFELLNER R. et. al.: *Systems Engineering – Grundlagen und Anwendung*, Orell Füssli Verlag, 12. Auflage, 2012.
- [43] HALL, A.: *A Methodology for Systems Engineering*. Princeton University Press, Princeton, 1962.
- [44] HOUDEK, F.; HEUMESSER, N.: *Requirements Engineering Erfahrungen in Projekten der Automobilindustrie*. Proceedings of the 12th IEEE International Requirements Engineering Conference 2004, Kyoto, 2004.
- [45] HOUDEK, F.: *Requirements Engineering Erfahrungen in Projekten der Automobilindustrie*. Softwaretechnik-Trends 2003, Vol. 23, 2003.
- [46] KIM, H. M. et al.: *Analytical Target Cascading in Automotive Vehicle Design*. in Journal of Mechanical Design, Vol. 125, September 2003, S. 481 – 489.
- [47] KLEIN, T.; CONRAD, M.; FEY, I.; GROCHTMANN, M.: *Modellbasierte Entwicklung eingebetteter Fahrzeugsoftware bei DaimlerChrysler*. In: Modellierung 2004, Köllen Verlag, Bonn, 2004.
- [48] KLEEDÖRFER, R.: *Prozeß- und Änderungsmanagement der integrierten Produktentwicklung*. Dissertation, Technische Universität München, Shaker-Verlag, Aachen, 1999.
- [49] KREMPF, M.; GRUBER, F.: *Vernetzte Wertschöpfung-Chancen und Herausforderungen für die Automobilzulieferer*. Marktstudie, Supplier Day 2014, Stuttgart, 2014.
- [50] KUTTER, S.: *Eine prädiktive und optimierungsbasierte Betriebsstrategie für autarke und extern nachladbare Hybridfahrzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2013.
- [51] LINCKE, W.: *Simultaneous Engineering - Neue Wege zu überlegenen Produkten*, Hanser Verlag, München, 1995.



- [52] MADAUSS, B. J.: *Handbuch Projektmanagement*, 5., überarb. u. erw. Aufl., Schaeffer-Poeschel, Stuttgart, 1994.
- [53] MAYER-BACHMANN, R.: *Integratives Anforderungsmanagement – Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2007.
- [54] MÜHLBAUER, R.: *Virtuelle Auslegung und Absicherung strukturmechanischer Fahrwerksfunktionen*. VDI Berichte Nr. 1701, Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, VDI Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [55] MÜLLER-HERBERS, S. et al.: *Methoden zur Beurteilung von Varianten*. Arbeitspapier der Universität Stuttgart, Fakultät Architektur und Stadtplanung, Institut für Grundlagen der Planung, Stuttgart, 2007.
- [56] NIßL, A. M.: *Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess*. Dissertation, Technische Universität München, München, 2006.
- [57] OTTMANN, M.; LIFKA, S. F.; HAAS, H.-D.: *Methoden der Standortanalyse*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2010.
- [58] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [59] PFEIFFER, T; SCHMIDT, R: *Masing Handbuch Qualitätssicherung*. 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2014.
- [60] PROKOP, G.: *How to find the optimal method mix for total vehicle validation*. Tagungsbeitrag, 15th ASAM International Conference for Vehicle Validation and Quality Management, Dresden, 2013.
- [61] ROBERTSON, S.; ROBERTSON, J.: *Mastering the Requirements Process*. Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ ; Munich, 2010.
- [62] RUPP, C.: *Requirements-Engineering und –Management*. 6. Auflage, Hanser-Fachbuchverlag, München, 2014.
- [63] SEIFFERT, U.; RAINER, G.: *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz*, Fachbuch, 1. Auflage, 2008.
- [64] WESTERMANN, TH.: *Modellbildung und Simulation : mit einer Einführung in ANSYS*, Springer, Berlin, 2010.



- [65] WOELFEL, H. P.: *Umdruck zur Vorlesung Maschinendynamik*, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2005.
- [66] N.N.: *Reifegradabsicherung von Neuteilen*. 2. Aufl. Verband der Automobilindustrie, 2014
- [67] N.N.: *Bedarfsanmeldung des Fahrzeugtechnischen Versuchszentrums des Instituts für Automobiltechnik Dresden*. unveröffentlichtes Dokument der Technischen Universität Dresden, Dresden, 2011.
- [68] N.N.: *White Paper Vernetzte Wertschöpfung. Die Automobilbranche im Wandel – von der produzierenden zur Dienstleistungsindustrie*. T-Systems Enterprise Service, 2007.
- [69] N.N.: *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie*. Schriftenreihe Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Frankfurt a.M., 2010.

Anforderungen Fahrzeug-Entwicklungsprozess

- [70] BACKHAUS, R.: *22. Aachener Kolloquium*. in ATZ 2013, Vol. 115, Nr.12, Springer, 2013, S. 940 – 941.
- [71] BRAESS, H.-H.: *Konstruktion, Berechnung und Versuch – Zunehmende Partnerschaft auch in der Automobiltechnik*. Automobiltechnische Zeitschrift 7/8/1985.
- [72] BRAESS, H.-H.: *Das Automobil von der Produkt- zur Systemoptimierung*. in ATZ 1999, Vol. 101, Nr.12, Springer, 1999, S. 984 – 990.
- [73] BRAESS H.-H., SEIFFERT U.: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg Verlag, 6. Auflage, 2011.
- [74] EVENDEN, H.: *Moving Forward – New Directions in Transport Design*. V&A Puplication, London, 2007.
- [75] DIPPOLD, J.: *In der ganzen Welt zu Hause*. Sonderausgabe ATZ/MTZ 6er BMW, 2004, S168 – 173.
- [76] HEIßING, B.; ERSOY, M.; GIES, S.: *Fahrwerkhandbuch*. Fachbuch, 4. Auflage, 2013.
- [77] HÜLSMANN, A.: *Methodenentwicklung zur virtuellen Auslegung von Lastwechselphänomenen*. Dissertation TU München, 2007



- [78] LOOMAN, C., et. al.: *Schwingungsursachen, Einflussmöglichkeiten und zukünftige Regelansätze im hybriden Antriebsstrang*. Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug IV, Expertverlag, 2009
- [79] MAURER M., WINNER H. (Hrsg.): *Automotive Systems Engineering*. Springer Verlag, Heidelberg, 2013, S. 17-38.
- [80] MAI, M.: *Fahrerverhaltensmodellierung für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen der Aktiven Fahrzeugsicherheit*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden 2016.
- [81] MATSCHINSKY, W.: *Radführung der Straßenfahrzeuge*. 3. Auflage, Springer, Berlin, 2007.
- [82] MITSCHKE, M.; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik von Kraftfahrzeugen*. 4. Auflage, Springer, Berlin, 2004.
- [83] PACEJKA, H.B.; BAKKER, E.: *The Magic Formula Tyre Model*, Taylor&Francis, 1993.
- [84] PROKOP, G.: *Kraftfahrzeugtechnik 3 Entwicklung, Auslegung und Absicherung von Kraftfahrzeugen*. Vorlesungsskriptum, TU Dresden, 2014.
- [85] PROKOP G.: *Anforderungen und Konzepte für die Fahrwerkstechnik der Zukunft*, 4. Sächsisches Autoforum, Dresden, 2011.
- [86] PFEFFER, P. et. al.: *4. ATZ-Konferenz CHASSIS.TECH PLUS*. in ATZ 2013, Vol. 115, Nr.9, Springer, 2013, S. 634 – 635.
- [87] RAUH, J.: *Virtual Development of Ride and Handling Characteristics for Advanced Passenger Cars*, 2003, Vol. 40, Nos. 1–3, S. 135–155.
- [88] REIMPELL, J.: *Fahrwerktechnik: Radaufhängungen*. 2. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1988.
- [89] SCHARFENBAUM, I.: *Funktionale Grundauslegung von Fahrwerkregelsystemen in der frühen Entwicklungsphase*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2016.
- [90] SCHRAMM, D.; HILLER, M.; BARDINI, R.: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Springer, 2010.
- [91] WALLENTOWITZ, H.; FREIALDENHOVEN, A.; OLSCHESKI, I.: *Strategien in der Automobilindustrie*. Vieweg+Teubner GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2009.
- [92] WAGNER, R.: *Projektmanagement in der Automobilindustrie*. Essential, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015.



- [93] ZELLER, P.: *Handbuch Fahrzeugakustik*. Fachbuch, Vieweg und Teubner / GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2009.
- [94] N.N.: *VDA-Jahresbericht 2015*. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2015.

Versuchsfeld

- [95] DEUSCHL, M.: *Gestaltung eines Prüffelds für die Fahrwerksentwicklung unter Berücksichtigung der virtuellen Produktentwicklung*, Dissertation, TU München, 2006.
- [96] HAGEMANN, G. et al.: *Universelle Prüfumgebung für die Untersuchungen des Antriebsstrangs*. in ATZ 2003, Vol. 105, Nr.2, Springer, 2003, S. 128 – 136.
- [97] KÖHN, P.; HOLDMANN, P.: *Moderne Prüfstandstechnik für das Fahrwerk*. in ATZ 1998, Vol. 100, Nr.9, Springer, 1998, S. 626 – 632.
- [98] OSBORNE: *Sieben Wege zur Prüffeld-Effektivität*. in ATZ extra 2014, Springer, 2014, S. 47 – 52.
- [99] SAMMER, G.; GUNTSCHING, T.; GERSPACH, U.: *Das Prüffeld der Zukunft*. in ATZ extra 2013, Springer, 2013, S. 70 – 75.
- [100] SCHLOTT, S.: *Von der Straße ins Labor – Neues Versuchszentrum bei BMW*. in ATZ 2010, Vol. 112, Nr.10, Springer, 2010, S. 756 – 757.
- [101] SEEBACH, D.; HUTH, T.; PISCHINGER, S.: *Center of Mobile Propulsion - Forschungszentrum für mobile Antriebskonzepte*. in ATZ extra Juni 2013, Springer, 2013.

Prüfstände

- [102] ABEL, H.: *Adaption und Weiterentwicklung eines Radaufhängungsprüfstandes zur Abbildung der realen Fahrzeugbewegung*, Studienarbeit, TU Dresden, IAD, 2013.
- [103] ALBERS, A.; SCHYR, C.: *Simulationsunterstützte Auslegung von Antriebsstrang-Prüfständen*. in ATZ 2003, Vol. 105, Nr. 6, Springer, 2003, S. 604 – 611.
- [104] ALBERS, A. et al.: *Modellbasierte Antriebsstrangentwicklung – Durchgängige Werkzeugkette vom Entwurf bis zur Validierung*. in ATZ 2007, Vol. 109, Nr.2, Springer, 2007, S. 134 – 139.



- [105] ALBERS, A.; SCHYR, C.: *Modellgestützte Erprobungsmethodik in der Antriebsstrangentwicklung*. Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, VDI-Berichte 1900, Würzburg, 2005.
- [106] ANGRICK, C. et al.: *Development Of A New Highly Dynamic Wheel-suspension Test Rig For Realistic Representation Of Maneuvers Concerning Driving Dynamics And Ride Comfort*, 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015, 2015.
- [107] AUGSBURG, K. et. al.: *Neues Prüffeld Reifen- und Fahrwerkstechnik am IVK der TU Dresden*. in ATZ 1999, Vol. 101, Nr.10, Springer, 1999, S. 774 – 779.
- [108] BECKMAN, M.; ANDREASSON, J.: *Wheel model library for use in vehicle dynamics studies*. The Modelica Association, Modelica 2003, 2003.
- [109] BINDAUF, A. et. al.: *Fahrwerkscharakterisierung an einem hochdynamischen Achsprüfstand*. in ATZ 2014, Vol. 116, Nr.12, Springer, 2014, S. 76 – 81.
- [110] BOCHTLER, W.: *Modellbasierte Methodik für eine Integrierte Konstruktion und Arbeitsplanung*, Ein Beitrag zum Simultaneous Engineering, RWTH Aachen, 1996.
- [111] BODEN, S.: *Ein Beitrag zur Entwicklung einer geeigneten Reibpaarung für selbstverstärkende PKW-Teilbelag-Scheibenbremsen mit elektrischer Betätigung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2011.
- [112] BÖHL, J. et al.: *Effiziente Entwicklungswerkzeuge zur Motor- und Getriebeapplikation*. Getriebe in Fahrzeugen, VDI-Berichte 1943, Friedrichshafen, 2006.
- [113] BORN, C.: *Erstellung eines CAD Modells des neuen Radaufhängungsprüfstandes des IAD in ProE und Ableitung technischer Zeichnungen*. Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Dresden, 2014.
- [114] BRÄUNIG, M. et. al.: *Erfassung von 3-D-Schwinungen am PKW-Reifen*. in ATZ 2014, Vol. 116, Nr.1, Springer, 2014, S. 62 – 67.
- [115] BÜTTNER, K.: *Entwicklung eines MKS-Modells für die Fahrdynamiksimulation von Motorrädern*, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2007.
- [116] DRESSLER, K. et al.: *Virtual durability test rigs for automotive engineering*. in Vehicle System Dynamics, Vol. 47, No. 4, 2009, S. 387 - 401.
- [117] EINSLE, S.: *Analyse und Modellierung des Reifenübertragungsverhaltens bei transienten und extremen Fahrmanövern*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2010.



- [118] GEHLEN, P.: *Funktionale Sicherheit von Maschinen und Anlagen*. Puplicis Puplishing, Erlangen, 2010.
- [119] GEUER, A.: *Einsatzpotenzial des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung*, Dissertation TU München, München, 2002.
- [120] GÜHMANN, C.; Riese, J.: *Testautomatisierung in der Hardware-in-the-Loop-Simulation*, VDI-Bericht 1672, 2002, S. 511-527.
- [121] HEMPEL, J. et. al.: *Schwingungstechnik für Automobile*. Vibracoustic, Weinheim, 2002.
- [122] JACOBY, J.: *Betriebslastensimulation an Fahrzeugbauteilen mittels servohydraulischer Prüfeinrichtungen*. VDI Berichte 632, Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau, Tagungsbeitrag, Darmstadt, 1987.
- [123] JESCHOR, M.: *Ein neues Verfahren zur Bewertung von Runflat-Reifen – ein Beitrag auf dem Weg zum reserveradlosen Pkw*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2005.
- [124] KLEPPMANN, W.: Taschenbuch Versuchsplanung, Hanser Verlag 2002
- [125] LAERMANN, F.-J.; LOTH, St.: *Fahrzeugverifizierung im modernen Entwicklungsprozess - Stand und Ausblick*, VDI-Ber. 1755, 2003, S. 3 – 21.
- [126] NEUDÖRFER, A.: *Konstruieren sichergerechter Produkte*. 6. Aufl., Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 2014.
- [127] REITZ, A.; et al.: *Spezielle Prüfstände zur Untersuchung von NVH-Phänomenen des Antriebstrags*. 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik 1999, 1999.
- [128] SARKISOV, P. et. al.: *Steifer Reifenprüfstand für höhere Messgenauigkeit*. in ATZ 2015, Vol. 117, Nr.4, Springer, 2015, S. 46 – 51.
- [129] SCHILLER, C.: *Auslegung einer Aktuatorik des stehenden Rades für Anregungen aus Fahrdynamik und Fahrkomfort am neuen Radaufhängungsprüfstand des IAD*. Diplomarbeit, TU Dresden, Dresden, 2014.
- [130] SELL, H.: *Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von elastischen Bauteilen im Einbauzustand*. Dissertation TU Hamburg-Harburg, Hamburg, 2004.
- [131] STEINBEISS, M.: *Auslegung eines Hexapod zur Darstellung der Aufbaubewegungen von Kraftfahrzeugen am neuen Radaufhängungsprüfstand des IAD*. Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Dresden, 2014.



- [132] VDI 632.: *Meß- und Versuchstechnik im Automobilbau*. VDI-Berichte 632, Tagung Darmstadt, 27. und 29. April 1987.
- [133] VDI 1470.: *Meß- und Versuchstechnik im Fahrzeugbau*. VDI-Berichte 1470, Kongreß Mainz, 29. und 30. April 1999.
- [134] VDI.1616: *Mess- und Versuchstechnik im Fahrzeugbau*. VDI-Berichte 1616, Tagung Nürnberg, 10.und 11.Mai 2001.
- [135] VDI.1755: *Mess- und Versuchstechnik in der Fahrzeugentwicklung / Erprobung und Simulation*. VDI-Berichte 1755 Tagung Würzburg, 3. und 4. April 2003.
- [136] VDI.1990: *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung / Mess- und Versuchstechnik*. VDI-Berichte 1990 Tagung Würzburg, 21. und 22.. Juni 2007.

Simulation und XIL

- [137] BRAUNER, H.; HEPPNER, B.: *Anforderungen an eine funktionale Gesamtfahrzeugsimulation für die Fahrzeugauslegung bezüglich Fahrverhalten und Fahrsicherheit*. Tagungsbeitrag 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2008, Aachen, 2008
- [138] IBENDORF, I.: *Hardware-in-the-Loop-Prüfstand für Schwingungsuntersuchungen an Fahrzeugantriebskomponenten*. Dissertation, TU Rostock, Rostock, 2008.
- [139] ÖHMAN, C.: *Optimal energy Conservation Programmes*. in Energy Modelling Studies and Conservation, United Nations, Pergamon Press, Oxford, 1982.

Gebäudeplanung

- [140] BEER, H.-J.: *Modalanalyse*, Vorlesungsunterlagen Technische Universität Dresden, Dresden, 1999.
- [141] DRESIG, H.; HOLZWEIßIG, F.: *Maschinendynamik*. 8. Aufl., Springer-Verlag Berlin; Heidelberg; New York, 2007, S. 175 – 225.
- [142] DRESIG, H.: *Schwingungen mechanischer Antriebssysteme*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 2001.
- [143] EWINS, D. J.: *Modal testing / theory, practice and application*. Research Studies Press, Baldock, 2000.



- [144] HARDTKE, H.-J.: *Messwertverarbeitung und Identifikation maschinendynamischer Systeme*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dresden, Dresden, 1987.
- [145] HASENKOPF, M.: *Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abbildung und Auslegung eines Energiemanagementsystems des energetischen Gesamtverhaltens des Fahrzeug-technischen Versuchszentrums der TU Dresden*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Dresden, 2014.
- [146] HAUPT, W.: *Bodendynamik / Grundlagen und Anwendungen*. Wiesbaden, Vieweg-Teubner Verlag, 1986.
- [147] HÜFFMANN, G.; NAWROTZKI, P.; UZUNOGLU, T.: *Statische und dynamische Berechnung von Turbinenfundamenten aus Stahlbeton*, Beton- und Stahlbetonbau 100 Heft 10, 2005, S. 886 – 896.
- [148] JUNKER, C.; BÜTTNER, K.; SCHAUFEL, C.; KLESS, R.: *Machbarkeitsstudie – Einbau Prüfstand 9*. Interne Auftragsstudie für die TU Dresden, Sächsisches Immobilien und Baumanagement, Dresden, 2012.
- [149] KALISKE, M.; GRAF, W.; HOFFMANN, A.: *Numerische Untersuchungen deformierbarer Maschinenfundamente der Prüfstände des Instituts für Automobiltechnik Dresden (IAD)*. Interner Entwicklungsbericht, Technische Universität Dresden, Dresden, 2014.
- [150] KOLBE, C.: *Wissensbasiertes System zur Anforderungsanalyse bei der Anlagenplanung am Beispiel intralogistischer Anlagen*. Dissertation, Universität Dortmund, 2013.
- [151] MEIDLINGER, R.: *Einfluss der Aufstellung auf das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2008
- [152] MÜLLER, H.; MÖLLER, B.: *Ein finites hybrides mehrschichtiges Faltwerkelement*. in Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, Nr. 28, Heft 5, 1979, S.1241 – 1248.
- [153] PARTHIER, R.: *Messtechnik – Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*. 4. Aufl. Vieweg, Wiesbaden, 2008
- [154] POSCH, W.: *Ganzheitliches Energiemanagement für Industriebetriebe*. 1.Auflage, Gabler, Wiesbaden, 2011.



- [155] PREUß, N.; SCHÖNE, L.B.: Real Estate und Facility Management, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [156] PROKOP, G.: *Lehr-, Forschungs- und Ausstattungskonzept*. unveröffentlichtes Dokument, Dresden, 2010.
- [157] PROKOP, G.: *Auto-Mobilität von morgen – Die Automobiltechnik an der TU Dresden*. Antrittsvorlesung, Dresden, 2011.
- [158] RAUSCH, E.: *Maschinenfundamente und andere dynamisch beanspruchte Baukonstruktionen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1959.
- [159] RUGE, P.: *Umdruck Baudynamik*. Technische Universität Dresden, Dresden, 2006.
- [160] SAVIDIS, S.: *Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 „Baugrunddynamik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.* in Bautechnik 75 (1998), Heft 10, Ernst & Sohn, 1998. S. 792 – 805.
- [161] SCHNEIDER, H.: *Auswuchttechnik*. – 5. Aufl., Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg, 2000.
- [162] SEM Modal space - in our own little world, SEM Experimental Techniques - April 2001, Society of Experimental Mechanics, 2001.
- [163] UHLIG, A.; SCHREIBER, U.; BLOCHWITZ, T.: *ISOMAG 1.1 – Projektierung und Berechnung der Schwingungsisolierung von Maschinen und Geräten*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, Berlin, Dresden, 2002.
- [164] WALLENTOWITZ, H.; REIF, K.: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*. Springer-Verlag Berlin; Heidelberg; New York, 2006, S. 510 – 511.
- [165] N.N.: *Strukturen prüfen Teil 2: Modalanalyse und Simulation*. Brüel & Kjaer, Naerum, 1985.
- [166] N.N.: *Dokumentation Simulationsumgebung SimulationX*. ITI GmbH, 2014.
- [167] N.N.: *Werkplanung Schwingfundament 350t für dynamischen K+C Prüfstand*, Technische Universität Dresden, Projekt-Nr.: 12681, erstellt durch Fa. CFM Schiller, Dresden, 2014.

Normen und Richtlinien:

- [168] EMV-ILA V01-03: *Integrationsleitfaden zur Erzielung Elektromagnetischer Verträglichkeit und elektrischen Anlagen der Automobilindustrie*, 2010.



- [169] N.N.: *Honorarordnung für Architekten- und Ingenieurleistungen*. Bundesrechtsverordnung, 2013, §34.
- [170] DIN 4150-1: *Erschütterungen im Bauwesen Teil1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen*, Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [171] DIN 4150-2: *Erschütterungen im Bauwesen Teil2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden*, Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [172] DIN 4150-3: *Erschütterungen im Bauwesen Teil3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen*, ENTWURF im Oktober 2015.
- [173] DIN 18205: *Bedarfsplanung im Bauwesen*. Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- [174] DIN 32835-1: *Technische Produktdokumentation – Dokumentation für das Facility Management Teil 1: Begriffe und Methodik*. Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [175] DIN 32835-2: *Technische Produktdokumentation – Dokumentation für das Facility Management Teil 2: Nutzungsdokumentation*. Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [176] DIN 45669-1: *Messung von Schwingungsimmissionen — Teil 1: Schwingungsmesser, Anforderungen, Prüfung*
- [177] DIN 45669-2 *Messung von Schwingungsimmissionen — Teil 2: Meßverfahren* Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [178] DIN 70000: *Straßenfahrzeuge Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1994.
- [179] DIN ISO 1940-1: „Mechanische Schwingungen – Anforderungen an die Auswuchtgüte von Rotoren in konstantem (starr) Zustand“. Teil 1: Festlegung und Nachprüfung der Unwuchttoleranz. Ausgabe April 2004.
- [180] DIN ISO 10844: *Akustik – Anforderungen an Prüfstrecken zur Messung der Geräuschemission von Straßenfahrzeugen und deren Reifen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [181] DIN EN ISO 12100: *Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsgrundsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010); Deutsche Fassung EN ISO 12100:2010*, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [182] Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung), 2006.



- [183] VDI 2038 Blatt 2: *Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen - Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung*, 2013.
- [184] VDI 2038 Blatt 1: *Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen - Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik - Grundlagen ; Methoden, Vorgehensweisen und Einwirkungen*, 2012.
- [185] VDI 2225 Blatt 3: *Technisch-Wirtschaftliche Bewertung*, VDI Richtlinie 2225 2013.
- [186] VDI-Richtlinie 2062-1: *Schwingungsisolierung – Begriffe und Methoden*, 2011.
- [187] VDI-Richtlinie 2062-2: *Schwingungsisolierung – Schwingungsisolierelemente*, 2007.
- [188] VDI-Richtlinien 2057: *Einwirkungen mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Blatt 1 und 2*, Beuth Verlag, Berlin, 2002.

Online Quellen:

- [189] GERHARD, A.: 1-Achs-Hydropulser – Detaillierte Prüfstands-Dokumentation. Online-Dokument, abgerufen am 27.09.2015,
http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/iad/professuren/kft/lehrstuhl/ausstattung/1-achs-hydropulser/doku.pdf
- [190] <http://www.sensoren.info/#Beschleunigungsaufnehmer>, am 20.09.2015.
- [191] https://navigator.tu-dresden.de/karten/dresden/geb/fvz_1, am 22.09.2015.
- [192] www.geosn.sachsen.de; Geoportal Sachsenatlas, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN), 2013.



Anhang

A. Überblick zu Versuchseinrichtungen

Kategorie	Benennung	Spezifikationen / Messungen	Betreiber	Standort
Prüfstand	Dynamische Batterieprüfstände	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme und Bewertung von Zellparametern (Kapazität, Ruhespannung, Innenwiderstand, Leistung, etc.) • Impedanzspektroskopie zur Bestimmung von Modellparameter • Untersuchungen zur Alterung • Thermische Untersuchungen 	IAD - Technische Universität Dresden; LS Fahrzeugmechatronik	Jante-Bau, George-Bähr-Straße 1c, 01069 Dresden
Prüfstand	Mehrkanal-Zelltester	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme und Bewertung von Zellparametern (Kapazität, Ruhespannung, Innenwiderstand, Leistung, etc.) • Untersuchungen zur Alterung • Zyklentests (Fahrzyklen, Normzyklen) • Dynamische Lastsprünge zur Bestimmung von Modellparametern 	IAD - Technische Universität Dresden; LS Fahrzeugmechatronik	Jante-Bau, George-Bähr-Straße 1c, 01069 Dresden
Prüfstand	HPS-Testsystem	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme und Bewertung von Zellparametern (Kapazität, Ruhespannung, Innenwiderstand, Leistung, etc.) • Untersuchungen zur Alterung • Zyklentests (Fahrzyklen, Normzyklen) • Ermittlung von Parameterstreuungen 	IAD - Technische Universität Dresden; LS Fahrzeugmechatronik	Jante-Bau, George-Bähr-Straße 1c, 01069 Dresden
Prüfstand	Zweispansungsbatterie	<ul style="list-style-type: none"> • Komponentenauslegungen (beispielsweise DC/DC-Wandler) • Entwicklung/Validierung von Batteriemangementstrategien • Untersuchungen zur Zellsymmetrierung • Untersuchungen einer Zweispansungsbatterie mit Mittelabgriff 	IAD - Technische Universität Dresden; LS Fahrzeugmechatronik	Jante-Bau, George-Bähr-Straße 1c, 01069 Dresden
Prüfstand	Mehrspannungsbordnetzprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchungen anhand von Fahrzyklen (NEFZ, WLTP, etc.) • Untersuchung von Bordnetzkomponenten • Energetische Bordnetzuntersuchungen (Ein- und Mehrspannungsbordnetze) • Validierungsmessungen für Simulationsmodelle 	IAD - Technische Universität Dresden; LS Fahrzeugmechatronik	Jante-Bau, George-Bähr-Straße 1c, 01069 Dresden
Prüfstand	Hochdynamischer Motorenprüfstand	Messung von verschiedenen dynamischen Fahrzuständen (HiL)	IAD - Technische Universität Dresden; LS Verbrennungsmotoren	Jante-Bau, George-Bähr-Straße 1c, 01069 Dresden
Prüfstand	Heißgasprüfstand	Test bzw. Vermessung von Motorkomponenten unter betriebsnahen, reproduzierbaren Bedingungen (ATL, Abgaskrümmer, Abgasanlage, Zylinderkopf,...)	IAD - Technische Universität Dresden; LS Verbrennungsmotoren	Jante-Bau, George-Bähr-Straße 1c, 01069 Dresden
Prüfstand	Rollenprüfstand	Emissionsmessungen	IAD - Technische Universität Dresden; LS Verbrennungsmotoren	Jante-Bau, George-Bähr-Straße 1c, 01069 Dresden
Prüfstand	Experimenteller Lebensdauernachweis	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitätssicherung beim Betriebslastennachfahrversuch • Reproduktion realer Lasten bei nichtlinearen Prüfteilcharakteristika • Mehrkomponentige Bauteilprüfung bei erheblichem Achsübersprechen • Experimentelle Bauteilprüfung von Elastomerbauteilen • Prüfung aktiver Komponenten und Bauelemente 	TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden



Kategorie	Benennung	Spezifikationen / Messungen	Betreiber	Standort
Prüfstand	Resonanzprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung von Lebensdauerlinien in Block- und Betriebslastennachfahrversuchen • experimentelle Dauerfestigkeitsbestimmung • klassische Wöhler-Versuche in Kraft- oder Dehnungsregelung 	TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden
Prüfstand	3K-Aggregatelauger-Prüfstand	<ul style="list-style-type: none"> • dynamische Charakterisierung von Werkstoffen und Bauteilen zur Bestimmung von Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften • Kriech- und Relaxationsversuche • Kombinierte Zug-Druck-Torsionsversuche • Shaker-Versuche 	TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden
Prüfstand	Servohydraulische Prüfanlage	<ul style="list-style-type: none"> • Hydraulikversorgung in zwei Laboren von 160 l/min und 350 l/min bei 280 bar • 32 Regelkreise "Labtronic 8800" • Alle Regelkreise können für mehrkomponentige Prüfungen miteinander verknüpft betrieben werden • Nennkräfte/Nennmomente: 7 kN bis 160 kN, 2 kNm bis 16 kNm • Spannrost für statische Kräfte bis 1,2 MN • Prüfgerüst für statische Kräfte bis 500 kN • Zug-Druck-Prüfmaschinen bis 1 MN • 4,5 x 5,0 m; Masse 55 t für mehrkomponentige Bauteilversuche 	TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden
Prüfstand	Radsatz-Prüfstand		TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Professur für Dynamik und Mechanismentechnik	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden
Prüfstand	Rotorversuchsstand		TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Professur für Dynamik und Mechanismentechnik	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden
Prüfstand	Modalanalyse Prüfstand		TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Professur für Dynamik und Mechanismentechnik	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden
Prüfstand	Akustik-Messsystem: Mikrofon-Array		TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Professur für Dynamik und Mechanismentechnik	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden
Prüfstand	Berührungslose Schwingungsmesstechnik		TU Dresden - Institut für Festkörpermechanik; Professur für Dynamik und Mechanismentechnik	Marschnerstraße 30, 01307 Dresden
Prüfstand	Schnellzerreißmaschine	$F_{\max} \pm 160 \text{ kN}$, $v_{\max} 20 \text{ m/s}$	TU Dresden - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	Holbeinstr. 3, 01307 Dresden
Prüfstand	Impact- und Crashprüfstand	$v_{\max} 200 \text{ m/s}$	TU Dresden - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	Holbeinstr. 3, 01307 Dresden
Prüfstand	Fallturm	h 27 m, Prallfläche 2.500 mm x 2.500 mm	TU Dresden - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	Holbeinstr. 3, 01307 Dresden



Kategorie	Benennung	Spezifikationen / Messungen	Betreiber	Standort
Prüfstand	Servohydraulische Mehraxial-Prüfmaschine	$F_{\max} \pm 1.000 \text{ kN}$, $M_{t,\max} 4.000 \text{ Nm}$, $f_{\max} 1.000 \text{ Hz}$	TU Dresden - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	Holbeinstr. 3, 01307 Dresden
Prüfstand	Hochgeschwindigkeits-Rotorprüfstände	$n_{\max} 250.000 \text{ 1/min}$, $\varnothing_{\max} 1 \text{ m}$	TU Dresden - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	Holbeinstr. 3, 01307 Dresden
Prüfstand	Elektrodynamischer Shaker mit Schwingtisch und Schwerlastplattform		TU Dresden - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	Holbeinstr. 3, 01307 Dresden
Prüfstand	Vibro / PulsE-SPI System Vibrograph		TU Dresden - Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	Holbeinstr. 3, 01307 Dresden
Prüfstand	Elektrischer Antriebstand	<ul style="list-style-type: none"> • 400 V, 5 kW Asynchronmaschine • 420 V, 4,75 kW Gleichstrommaschine einschließlich Umkehrstromrichter • 400 V, 15 kVA Spannungszwischenkreisumrichter ($f_s = 2-16 \text{ kHz}$) mit Bremschopper • Netzanbindung: direkt an das 400V-Netz oder optional über einen 0-400 V Stelltrafo • Netzfilter: induktiv oder LCL-Filter • Regelungsumgebung: dSpace DS1103 (fast prototyping system) 	TU Dresden - Elektrotechnisches Institut - Professur für Leistungselektronik	Görges-Bau, Helmholtzstraße 9, 01069 Dresden
Prüfstand	Prüfstand für Hochstromkontakte	<ul style="list-style-type: none"> • Stromübertragung bis zu 3000 A • Abbildung realitätsnaher, dynamischer Lastgänge • Abtastrate der Steuer- und Messsignale 400 Hz - 220 kHz • Kontaktwiderstände auf bis zu $5 \mu\Omega$ genau messbar (nach der Methode der 4-Leiter-Messung) • automatische Messdatenerfassung über LabView und NI-Hardware 	Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	Zeunerstraße 38, 01069 Dresden
Prüfstand	Prüfstand für Batteriemodule	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Kanal • Spannungsbereich: 7 V - 15 V • Strombereich: -180 A - 200 A • Temperaturbereich: -40 °C - 100 °C • Feuchtebereiche: 10 % - 95 % rel. Feuchte • Prüfraumvolumen: 600 l • Abfahren von Temperaturprofilen mit Änderungen von bis zu 3 K/min • Realisierung von Standardfahrzyklen, Kundenspezifische Lastzyklen und Puls-tests • Einbindung von Steuer- und Regelstrategien in Abhängigkeit der Messgrößen sowie komplexer Algorithmen, wie z. B. Zustandsschätzer 	Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	Zeunerstraße 38, 01069 Dresden
Prüfstand	Teststände zur Batteriezellcharakterisierung	<ul style="list-style-type: none"> • BasyTec XCTS • Präzisionseinzelzellmessplatz • Impedanzspektrometer Gamry Interface 1000 • Impedanzmesssystem Gamry FC350 	Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	Zeunerstraße 38, 01069 Dresden



Kategorie	Benennung	Spezifikationen / Messungen	Betreiber	Standort
Prüfstand	Serieller Antriebsstrang- und Maschinenprüffeld	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung eines Gleichspannungszwischenkreises von 60 bis 800 VDC • Batteriesimulation mit bis zu 400 kW • Traktionsmotorsimulation mit bis zu 400 kW • Fahrwiderstandssimulation für Antriebsmotoren mit 400 kW • Spitzenleistung - 330 kW Dauerleistung • Prüfraum zur Nutzung realer Traktionsbatterien • Hardware in the Loop (HIL) Leistungsbedarfssimulation für alle Traktionskomponenten • Aufspannfeld für Traktionsantriebsstränge 	Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	Zeunerstraße 38, 01069 Dresden
Prüfstand	Motorenprüfstand für Verbrennungsmotoren und elektrische Maschinen	<ul style="list-style-type: none"> • Maximaldrehmoment 2400 Nm und 2000 Nm dauerhaft • Drehzahl bis zu 4000 1/min bzw. höher mit entsprechendem Vorschaltgetriebe • Bis zu 400 kW Spitzenleistung - 330 kW Dauerleistung • Ermittlung von Wirkungsgrad- und Verbrauchskennfeldern • Anpassung von Funktionsumfängen von Aggregaten (Start-Stopp-Verhalten, Regelungsverhalten) • statische Untersuchungen (Dauerlauf) • dynamische Belastungen (Lastsprünge, Regelungen) 	Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	Zeunerstraße 38, 01069 Dresden
Prüfstand	Parallelkinematische Versuchseinrichtung 3POD		Fraunhofer - Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU - Mechatronik/Adaptronik	Nöthnitzer Straße 44, 01187 Dresden
Prüfstand	Multiaxialer Schwingungsprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> • 4 beliebig positionierbare elektrodynamische Schwingungserreger mit einer Nennkraft von je 8 000 N 	Fraunhofer - Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU - Mechatronik/Adaptronik	Nöthnitzer Straße 44, 01187 Dresden
Prüfstand	Kolbenverdichterprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> • zweistufiger Verdichter für Luft mit einem Enddruck von 16 bar • Versuchspunkt ist hier das Indizieren der Maschine, das heißt die Ermittlung des Druckverlaufs in den Zylinderräumen der Niederdruck- und Hochdruckstufe 	HTW Dresden - Studiengang Fahrzeugtechnik	Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
Prüfstand	Prüfaufbau zur Schwerpunktbestimmung eines Fahrzeugs		HTW Dresden - Studiengang Fahrzeugtechnik	Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
Prüfstand	Rollenleistungsprüfstand		HTW Dresden - Studiengang Fahrzeugtechnik	Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
Prüfstand	Vierstempelprüfanlage (Straßensimulator)		HTW Dresden - Studiengang Fahrzeugtechnik	Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
Prüfstand	Geschwindigkeits-abhängige PKW-Servolenkung		HTW Dresden - Studiengang Fahrzeugtechnik	Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden



Kategorie	Benennung	Spezifikationen / Messungen	Betreiber	Standort
Prüfstand	Hydraulischer Pulsationsantrieb		HTW Dresden - Studiengang Fahrzeugtechnik	Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
Prüfstand	PKW-Prüfstraße	<ul style="list-style-type: none"> • 4-teilige Fahrzeug-/Radlastwaage 1.500 / 3.000 kg • Scheinwerfereinstellgerät • Bremsenprüfstand bis 3.500 kg Achslast • Stoßdämpferprüfstand bis 2.000 kg Achslast • Achsspieltester bis 2.000 kg Achslast • Radlaufester bis 2.000 kg Achslast 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Komplettfahrzeug	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	NFZ-Prüfstraße	<ul style="list-style-type: none"> • Verbund-Brückenwaage 60.000 kg (2 x 30.000 kg) • Grube mit Grubenheber • Bremsenprüfstand mit Wiegeeinrichtung und hydraulischem Gewichtssimulator • Achsspieltester 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Komplettfahrzeug	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Klimatisierter Abgasrollenprüfstand für einachs- und allradgetriebene Fahrzeuge		DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Abgas	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Abgaskombirolle für Fahrzeuge mit Einachsantrieb und für Krafträder		DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Abgas	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Freiluftdauerlaufrollenprüfstand		DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Abgas	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Dual-Motorenprüfstand	bis 140 kW Motorleistung	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Abgas	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Katapult	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigungsschlitzenanlage bis max. 80 km/h und 80g • max. 3,5t Masse • Zündtrigger für Airbags, Gurtstraffer etc. • Digitale-High-Speed Kameras und Auswertesoftware • Hybrid III Dummy Familie, P-Kinder Dummy Familie • Prüfmustertemperierung -35°C bis 90°C • separate Vorbereitungsboxen • 3D-Messarm mit Magnethalterung am Aufbau 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Karosserie, Interieur, Exterieur	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Schlitzenanlage/ Kindersicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • max. Geschwindigkeit 60 km/h • max. Masse 600kg • Datenaufzeichnung/Analysesoftware • Messring • High-Speed- Digitalkameras (Stationär) • Videoanalyse • Vorbereitungsboxen / Werkstattausrüstung • P-, Q- und HIII Dummy-Serie 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Karosserie, Interieur, Exterieur	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz



Kategorie	Benennung	Spezifikationen / Messungen	Betreiber	Standort
Prüfstand	Zuganlage	<ul style="list-style-type: none"> • max. Zugkraft 9 x 30 kN/ Zylinderhub 800 mm • Spannfundament: Versuchsfläche 3m x 8m • Aufzeichnung und Analyse von Messdaten • Digitale Videoaufzeichnung und HS-Video inkl. Analyse • 3D-Messarm 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Karosserie, Interieur, Exterieur	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Fallturm	<ul style="list-style-type: none"> • variable Fallhöhe bis zu maximal 3m • variable Masse bis maximal 300 kg • Aufzeichnung Verzögerungssignal mit zwei Sensoren • optionaler Einsatz von Messkraftdosen (4 Stück) • Messring Messdatenrecorder NA-34 • High-Speed-Videoanalyse • Dokumentation und Zertifikat 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Karosserie, Interieur, Exterieur	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Klimakammer	<ul style="list-style-type: none"> • Kammervolumen 15m³ • Spannplatte in der Kammer 2m x 2m • Temperaturarbeitsbereich -40 ... 160 °C • Klimaarbeitsbereich 10 ... 95% Luftfeuchte • Koppelbar mit servohydraulischer Prüfzylinderanlage für dynamische Untersuchungen unter Umweltbedingungen • flexible Krafteinleitung von 3 Außenseiten und oben möglich 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Betriebsfestigkeit	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Prüfstand für Kopfaufprall	<ul style="list-style-type: none"> • 3,5 kg Kinder-/kleiner Erwachsenenkopf • 4,5 kg Erwachsenenkopf • Geschwindigkeitsbereich 0 - 42,0 km/h • Genauigkeit +/- 0,1 km/h • Trefferabweichung < 5 mm • Maximale Prüfkörpermasse 4,8 kg • mobile Prüfanlage • Integrierter 3D-Messarm • Aufzeichnung und Analyse von Messdaten 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Fußgänger-schutz	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Prüfstand für Hüft- und Bein-anprall	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfkörper WG17 Lower Leg • Prüfkörper WG17 Upper Leg • Geschwindigkeitsbereich 0 - 55,0 km/h • Genauigkeit +/- 0,1 km/h • Trefferabweichung < 5 mm • Maximale Prüfkörpermasse 15 kg • Prüfanlage auf Luftkissen beweglich • Aufzeichnung und Analyse von Messdaten 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Fußgänger-schutz	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Prüfstand	Prüfstand für Fahrerassistenz-systeme zur Unfallvermeidung	<ul style="list-style-type: none"> • Dummy Adult/Child (gem. vFSS) • Durchfahrtsbreite 12 m • Durchfahrts Höhe 2,5 m • Geschwindigkeitsbereich 0 - 46,0 km/h • Genauigkeit +/- 0,2 km/h • Positioniergenauigkeit Dummy < 0,5 mm • max. bewegte Masse 35 kg • max. Beschleunigung des Dummies 17g • Beschleunigungszeit Dummy < 100 ms • Temperaturbereich -30 °C - +40 °C • Betriebsmodus Lichtschranke, Laser, DGPS • Optional: Einsatz von Lenk- und Bremsroboter, Tag- und Nachtbetrieb, Streckenbewässerung 	DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Fußgänger-schutz	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz



Kategorie	Benennung	Spezifikationen / Messungen	Betreiber	Standort
Prüfstand	Biaxialprüfmaschine für dynamische Untersuchung von Elastomeren		Leibniz-Institut für Polymerforschung - Institut für Polymerwerkstoffe - Mechanik und Struktur	Hohe Str. 6, 01069 Dresden
Prüfstand	Rechnergesteuerte Eigenbau Mikro-Zug- und Biegevorrichtung für den Einsatz unter dem Mikroskop wie auch im Synchrotron	<ul style="list-style-type: none"> • unterschiedliche Kraftbereiche bis 1 kN • Raumtemperatur bis 120 °C 	Leibniz-Institut für Polymerforschung - Institut für Polymerwerkstoffe - Mechanik und Struktur	Hohe Str. 6, 01069 Dresden
Prüfstand	Abriebprüfgerät	<ul style="list-style-type: none"> • Beurteilung des Widerstandes von Elastomeren gegen die reibende Abnutzung nach DIN 53516 sowie ISO 4649:2002 • Ermitteln des Volumenverlust eines zylindrischen Probenkörpers 	Leibniz-Institut für Polymerforschung - Institut für Polymerwerkstoffe - Elastomere	Hohe Str. 6, 01069 Dresden
Prüfstand	Rückprall-Elastizitäts-Prüfgerät	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung der elastischen Federung von Elastomeren nach DIN 53512, ASTM D 1054 und ISO 4662 sowie von ähnlichen Materialien 	Leibniz-Institut für Polymerforschung - Institut für Polymerwerkstoffe - Elastomere	Hohe Str. 6, 01069 Dresden
Prüfstand	4-Stempel-Prüfstand	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfstand erlaubt, auf einem Schlechtwegkurs erfasste Beschleunigungen zu reproduzieren und vollständig in die Struktur einzuleiten • Frequenzbereich: zwischen ca. 3 und 50 Hz 	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH	Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden
Prüfstand	8-kanaliger Achsprüfstand	<ul style="list-style-type: none"> • Einstufenlasten, Blockprogramme oder Echtzeitsignale • Prüfungen sind unter Medieneinfluss wie z.B. Salzbesprühung oder unter verschiedenen Klimabedingungen möglich 	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH	Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden
Prüfstand	Mehraxiale Schwingungsprüfung	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensdauernachweis von Motorkomponenten unter mechanischer Schwingbeanspruchung in 6 Freiheitsgraden und überlagerter thermischer Belastung • mechanische Prüfung findet auf einem Hexapoden 353.20 der Fa. MTS Systems GmbH statt • thermische Belastung notwendige Erdgasbrenner ist eine spezielle, mehrflutige Konstruktion, die den notwendigen, weiten Leistungs-Stellbereich ermöglicht • Einstellparameter des Brenngases, der Brennluft und der Mischluft werden als Funktion der gewünschten Ausgangsparameter „Heißgasmassestrom / Heißgastemperatur“ vorgegeben bzw. geregelt 	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH	Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden
Prüfstand	Komplexer Spezialprüfstand für Getriebekomponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Getriebebelastung mit Drehzahl und Drehmoment • Einleitung von Radkräften • Nachbildung der Lenkbewegung 	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH	Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden



Kategorie	Benennung	Spezifikationen / Messungen	Betreiber	Standort
Prüfstand	Fallgewichtsprüfstand (Metalle)	<ul style="list-style-type: none"> • Fallgewichtsmasse: ≤ 200 kg • Maximales Arbeitsvermögen: $\leq 19\,600$ J • Maximale Auftreffgeschwindigkeit: $\leq 18,3$ m/s (66 km/h) • Fallhammer mit 3-kanaliger Registrierung der Kraftsignale Abtastrate je Kanal 200 kHz • Ereigniszeiten bis 650 ms • 6 Kanal-Dehnungsmessung mit DMS • Standardbildrate 4000 f/s 	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH	Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden
Prüfstand	Impacttürme (Metalle)	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Impact Energie: 400 J • Impact Geschwindigkeit: 9 m/s • Variable Probengeometrien prüfbar 	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH	Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden
Prüfstand	Konventionelle Pendelschlagwerke (Metalle)	<ul style="list-style-type: none"> • Impactenergien von 15 J bis 300 J 	IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH	Wilhelmine-Reichard-Ring 4, 01109 Dresden
Prüfstand	Shore A Härteprüfer		Leibniz-Institut für Polymerforschung - Institut für Polymerwerkstoffe - Elastomere	Hohe Str. 6, 01069 Dresden
Versuch	Versuchsfahrzeug AutoTram	<ul style="list-style-type: none"> • Versuchsfahrzeug zur Erprobung alternativer Antriebe, Spurführungstechniken und automatischer Lenkregelung • elektrischer Allradantrieb • elektronisch ansteuerbare Allradlenkung • Traktionsenergiespeicher über Batterie und Supercaps sowie zwei Wasserstoff-Brennstoffzellen 	Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI	Zeunerstraße 38, 01069 Dresden
Versuch	Hochgeschwindigkeitsoval		DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Test Oval	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz
Versuch	ISO - Geräuschmessstrecke		DEKRA Automobil GmbH - Technology Center - Automobil Test Center - Test Oval	Senftenberger Straße 30, 01998 Klettwitz

Tab. 0.1 Auszug Redundanzanalyse



B. Matrizen für die Variantenanalyse

	Fahrdynamik	Schwingungs- komfort	Haltbarkeit und Lastdaten	Summe
Prüfstand				
Gesamtfahrzeug				
Dynamischer KnC-Prüfstand	3	3	3	9
Schwerpunkt- und Trägheitsmomentenmessvorrichtung	3	2	2	7
Messvorrichtung für Radstellungsgrößen	3	2	3	8
Abgas-/Leistungsrollen-Prüfstand	0	0	1	1
Vierstempel-Prüfstand	0	3	3	6
Servohydraulisches Multifunktionsprüffeld	1	3	3	7
Dynamischer Vierrollen-Prüfstand	2	3	3	8
Prüffeld Modalanalyse	1	3	2	6
Subsysteme				
<u>Achse</u>				
Rad-Achs-Prüfstand mit Fahrzeugbewegung	3	3	3	9
Achspulsprüfstand / Straßensimulator	3	3	3	9
Servohydraulisches Multifunktionsprüffeld	2	3	3	8
<u>Lenkung</u>				
Lenkungsprüfstand	3	3	3	9
Servohydraulisches Multifunktionsprüffeld	2	3	3	8
<u>Antriebsstrang</u>				
Zwei-Achs-Antriebsstrangprüfstand	1	3	3	7
Drei-Achs-Antriebsstrangprüfstand	1	3	3	7
Vier-Achs-Antriebsstrangprüfstand	1	3	3	7
Fünf-Achs-Antriebsstrangprüfstand	1	3	3	7
Fünf-Achs-Antriebsstrangprüfstand mit Straßensimulator	3	3	3	9
<u>Karosserie</u>				
Prüffeld Modalanalyse	1	3	3	7
Servohydraulisches Multifunktionsprüffeld	2	3	3	8
Komponenten				
<u>Reifen</u>				
Reifenprüfstand Flachbahn	3	3	2	8
Reifenprüfstand Scheitelrolle	3	3	3	9
Hydropulsprüfstand	3	3	3	9
<u>Schwingungsdämpfer</u>				
Hydropulsprüfstand	3	3	3	9
<u>Elastomerlager</u>				
Elastomerlagerprüfstand	3	3	3	9
Hydropulsprüfstand	3	3	2	8
<u>Feder</u>				
Hydropulsprüfstand	2	3	3	8
Zug-Druck-Messmaschine	2	3	3	8
<u>Streben und Lenker</u>				
Hydropulsprüfstand	1	3	3	7
Servohydraulisches Multifunktionsprüffeld	1	3	3	7
Zug-Druck-Messmaschine	1	3	3	7

Tab. 0.2 Bewertungsmatrix zur Eignungsfeststellung



C. Anforderungsliste Rad-Achs-Prüfstand

TU Dresden IAD		Anforderungsliste für Radaufhängungsprüfstand 12/13 zukünftiges Konzept	Blatt: 1	Seite 1
Änder.	F W	Anforderungen	Verantw.	
		<u>Geometrie</u>		
	W	Anschluss an vorhandenes Fundament des RAPS		
	W	Nutzung der vorhandenen Verstelleinrichtungen		
	F	vollständige Adaption einer Vorder- oder Hinterachse verschiedener Ausführung		
	F	Einzelradaufhängung		
		Mehrlenker-Achse		
		Doppelquerlenker-Achse		
		McPherson-Achse		
		Schräglenker-Achse		
	W	Starrachse		
	W	Verbundlenkerachse		
	F	variables Adaptionskonzept		
		Adaption von Rädern mit dem Durchmesser:		
	W	Kraftrad: min. 550 mm		
	F	Pkw: max. 800 mm (= 21" + Reifen + Spiel)		
	W	Nkw: max. 1300 mm (= 22.5" + Reifen + Spiel)		
		Fahrbahnbreite		
	F	Pkw: max. 500 – 550 mm		
	W	Nkw: max. 800 mm		
	W	Adaption von Motorradachsaufhängungen		
	W	Aufnahme des Lenkgetriebes		
	F	Adaptiv bzgl. verschiedener Achsanbindungspunkte + Messmittel		
	W	Aufnahme der Lenkansteuerung		
	F	Adaption von Achsen mit Spurweiten zwischen 1210 mm und 1706 mm (Pkw)		
	W	Adaption von Achsen mit Spurweiten bis zu 2154 mm (NKW)		
	W	Ermöglichen von Prüfverfahren unter Witterung (Aquaplaning, Schnee)		
		Wasserfilmhöhe: 0 – 10 mm		
	W	Adaption von realistischen Fahrbahnoberflächen / Hindemissen		
		Korund		
		Asphalt		
		Beton		
		Safety Walk		
		Versetzte Wellen		
		Querwellen		
		Feines Kopfsteinpflaster		
		Grobes Kopfsteinpflaster		
		Gleise		
		Spurrillen		
		Katzenaugen		
		Bahnübergang		
		Betonplatten		
		generelle Anregungen: 0.4 – 100 Hz und 8 – 300 mm		
		Schlagleisten		
		Rechteck (10 x 25, 20 x 28), optional angefast		
		Trapez		
		dreieckig		
		stufenförmig		
		halbrund		
		Rechteck mit Anfahrtschräge		
	W	Möglichkeit zur Fesselung des Aufbaus		
	W	Fahrtwindsimulation		
		4400 m³/h bis 80 km/h		
	W	dynamische Verstellung des Reifenfülldrucks		
		<u>Kinematik</u>		
	F	Heben (z-Richtung)		
		vollständige Aufbaubewegung in vertikaler Richtung (Heben) bis max. 300 – 400 mm		
		vertikale Bewegung Aufbau mit der Maximalgeschwindigkeit von max. 1 m/s		
		vertikale Bewegung mit der Maximalbeschleunigung von 60 m/s²		
		Frequenzbereich der Hebebewegung bis 35 Hz		
	F	Zucken (x-Richtung)		
		Weg: ±20 mm (Radstandsänderung durch Fahrwerkkinematik)		
		Beschleunigung: ±2 m/s² um Längsbeschleunigung (Ruckeln durch Motor)		
		Frequenzbereich: +4.5 Hz		
Ersetzt Ausgabe vom			30.04.2013	



TU Dresden IAD		Anforderungsliste für Radaufhängungsprüfstand 12/13 zukünftiges Konzept	Blatt: 2	Seite 2
Änder.	F W	Anforderungen	Verantw.	
	F	Wanken (y-z-Ebene) Wankwinkel: $\pm 5^\circ$ Pkw; $\pm 10^\circ$ SUV Wankwinkelgradient: $0.65^\circ/s^2/m$ Wankwinkelgeschwindigkeit: $22^\circ/s$ (Iso Spurwechsel) Wankwinkelbeschleunigung: $\pm 0.4 m/s^2$		
	W	Nicken (x-z-Ebene) Nickwinkel: max 1.8° (Pkw) max 5.5° (Nkw) Nickwinkelgeschwindigkeit: $0.3 rad/s$ Nickwinkelbeschleunigung: bis $100^\circ/s^2$		
	F	Lenkwinkel von $\pm 20^\circ$		
	F	Lenkgradient von $75^\circ/s$ (am Rad)		
	W	Aufbau freischwingend (Komfortuntersuchungen)		
	F	keine Kollision der Achse mit dem Prüfstand		
	F	Realisierung der Rollbewegung des Rades		
	W	Antrieb Fahrbahn		
	W	Antrieb der Räder		
	F	Bremsen der Räder		
	F	Geschwindigkeit des Rades bis max. $320 km/h$		
	W	Beschleunigung: $0 - 100 km/h$: $2.1 s$		
	W	Verzögerung: $0 - 100 km/h$: $1.9 s$		
	F	Radantrieb: max. $150 kW$ pro Rad		
		<u>Kinetik</u>		
	F	dynamische Verstellung der Radlast im Bereich bis $30 kN$ (Pkw)		
	W	dynamische Verstellung der Radlast im Bereich bis $40 kN$ (Nkw)		
	F	Verstellung der Radlast mit einer Geschwindigkeit von max. $30 kN/s$		
	F	hohe Eigenfrequenzen (geringe Resonanzerscheinungen) $>100 Hz$		
	W	geringe bewegte Prüfstandsmassen		
	F	hohe Steifigkeiten		
	F	vertikale und horizontale Anregung des Rades (Bsp.: Schlagleiste)		
	W	synthetische vertikale und horizontale Anregung des Rades (Bsp.: Hydropulser)		
	F	Variation der statischen Radlast im Komfortaufbau (freie Aufbaumasse)		
		<u>Energie</u>		
	F	Anschluss an Prüfstandsperipherie (Energie, Hydraulik)		
	F	hoher Wirkungsgrad		
	F	minimale Reibungseinflüsse		
	W	Klimatisierung Temperatur: -20 bis $50^\circ C$ Luftfeuchtigkeit 80% ab $10^\circ C$		
		<u>Werkstoff</u>		
	F	Witterungsbeständigkeit / Korrosionsbeständigkeit		
	F	keine gesundheitsgefährdenden Stoffe		
	W	schweißbare Werkstoffe		
		<u>Signal</u>		
	W	vollautomatisierte Ansteuerung		
	W	Einbettung in eine Hardware-in-the-Loop-Umgebung		
	F	Eingangssignale: Radlast Lenkwinkel Bremsdruck		
	W	Implementierung von fahrdynamischen Regelsystemen (ABS)		
		<u>Sicherheit und Ergonomie</u>		
	F	einfache Handhabung / Bedienbarkeit		
	F	Schutz vor Verletzungen		
	W	bewegte Teile abdecken		
	F	einfache Umstellung von Komfort- zu Dynamikversuchen		
	F	geringe Rüstzeit bei Umbau der Achsen		
		<u>Fertigung und Kontrolle</u>		
	W	kosten- und aufwandseffiziente Fertigung mit den an der TUD zur Verfügung stehenden Möglichkeiten		
	W	geringe Fertigungszeit		
	W	Schweißkonstruktion		
Ersetzt Ausgabe vom			30.04.2013	



TU Dresden IAD		Anforderungsliste für Radaufhängungsprüfstand 12/13 zukünftiges Konzept	Blatt: 3	Seite 3
Änder.	F W	Anforderungen	Verantw.	
	W	<u>Montage und Transport</u> einfache Adaption an bestehendes Prüfstandsystem		
	W	Rückrüstmöglichkeit		
	W	Montageösen		
	F	<u>Gebrauch und Instandsetzung</u> Staub- und Schmutzunempfindlichkeit		
	F	Temperaturunempfindlichkeit		
	F	keine Prüfstandsemissionen		
	F	<u>Kosten</u> geringe Herstellungskosten		
	W	<u>Gewicht</u> Gewicht < 20 t		
		<u>Standard- und Sonderfahrmanöver für PKW / NKW</u>		
		Handling		
	F	Stabilität bei Kurvenfahrt		
	F	Stationäre Kreisfahrt (ISO 4138)		
	F	Lastwechsel aus stationärer Kreisfahrt		
	W	Bremsen in der Kurve (ISO 7975)		
	W	Reifendefekt		
	F	Instationäre Kreisfahrt		
	F	Ausfahrt aus einem Kreis		
	W	Bremsen aus stationärer Kreisfahrt		
	F	Einfahrt in einen Kreis / Anprechverhalten		
	F	"Reinfallen" der Lenkung		
	W	Aquaplaning und Bremsen in der Kurve		
	F	Hindernisüberfahrt in stationärer Kreisfahrt		
	W	Beschleunigung aus stationärer Kreisfahrt		
		Stabilität bei Geradeausfahrt		
	F	Beschleunigen		
	F	Ebene Fahrbahn		
	W	Unebene Fahrbahn (Ablaufen)		
	W	Vorbeifahrt am Seitenwindgebläse (ISO 12021-1)		
	F	Geradeauslauf-Spurhaltung		
	W	Lastwechselreaktion (ISO 9816)		
		Spurrillenempfindlichkeit		
		Abziehen (geradeaus)		
	W	Reifendefekt		
		Stabilität bei Spurwechsel		
	F	ISO Spurwechsel (ISO 3888-1)		
	F	VDA Ausweichtest (ISO 3888-2)		
	F	Doppelter Spurwechsel, langsam		
	F	Doppelter Spurwechsel, schnell		
		Fahrkomfort		
	F	Schlagleistenüberfahrt		
	W	Statistische Anregung		
	W	Stochastische Anregung		
	W	Wellenfahrbahn		
	W	Periodische Anregung		
	F	Straßenanregung (Raue Straße, Flickasphalt)		
		Abrollen (Raue Straße)		
		Abtasten (Flickasphalt)		
		Lenkungsstößigkeit (Impulsstärke unter Querbeschleunigung)		
		Shimmy		
		Zittern		
		Stuckern (Motor, Achse)		
		Mikrostuckern		
	W	Nachfahrversuch Nürburgring		
		Bremsverhalten		
	W	Geradeausbremsen		
	W	Aquaplaning		
	W	Bremsen auf μ-Split (ISO 14512)		
Ersetzt Ausgabe vom			30.04.2013	



TU Dresden IAD		Anforderungsliste für Radaufhängungsprüfstand 12/13 zukünftiges Konzept	Blatt: 4	Seite 4
Änder.	F W	Anforderungen	Verantw.	
		Lenkverhalten		
	F	Lenkwinkelsprung (Gerade-Kreis) (ISO 7401)		
	F	Rechteck Lenkimpuls		
	W	Frequenzgang (ISO 7401)		
	F	Lenkungszuziehen		
	W	Gierverstärkung		
	F	Wedelfahrt: LW-frequenz wird erhöht		
	F	Wedelfahrt: LW-amplitude wird erhöht		
	F	"zufällige" Lenkwinkleingabe		
	F	Rückstellverhalten (Lenkungsrücklauf) bei Geradeausfahrt und Kurvenfahrt		
	F	Dreieck-Lenkimpuls		
	F	Slalom (18m, 36m)		
	F	Freies Wedeln		
	F	Parkieren		
	F	Lenkradfreigabe nach Wechsellenken		
	F	Anlenken		
	F	Lenkwinkelsprung (Kreis- Kreis)		
	F	Anreißen		
	F	Fishhook		
	W	Transition Test (ISO 13674)		
	F	Einfacher Lenkimpuls		
	F	Mehrfaches Lenken und Gegenlenken		
	F	Einfaches Lenken und Gegenlenken		
		Lenkungsreinfallen		
	F	Lenkungsansprechen bei Geradeausfahrt und Kurvenfahrt		
	F	Lenkungspendeln (ISO 17288)		
	W	Weave-Test (ISO 13674)		
	F	Sinusförmiger Lenkeinschlag eingeschwungen		
	F	Sinusförmiger Lenkeinschlag über eine Periode		
	W	<u>Standard- und Sonderfahrmanöver für Krafräder</u>		
		Handling		
		Stabilität bei Geradeausfahrt		
		Freihändiger Fahrversuch (Shimmy = Flattern)		
		Seitlicher Störimpuls (Pendeln)		
		Stabilität bei Kurvenfahrt		
		<u>Termine</u>		
	F	Abgabedatum Konzept 30.04.2013		Abel
Ersetzt Ausgabe vom			30.04.2013	

Tab. 0.3 Anforderungsliste Rad-Achs-Prüfstand [102]



D. Benutzeroberfläche Energiemanagement

Bedien- und Eingabekonzole



Abb. 0.1 Modelltopologie mit Bedien- und Eingabekonzole für das Energiemanagement aus [147]



E. CAD-Modellstruktur am Beispiel Gebäude 127

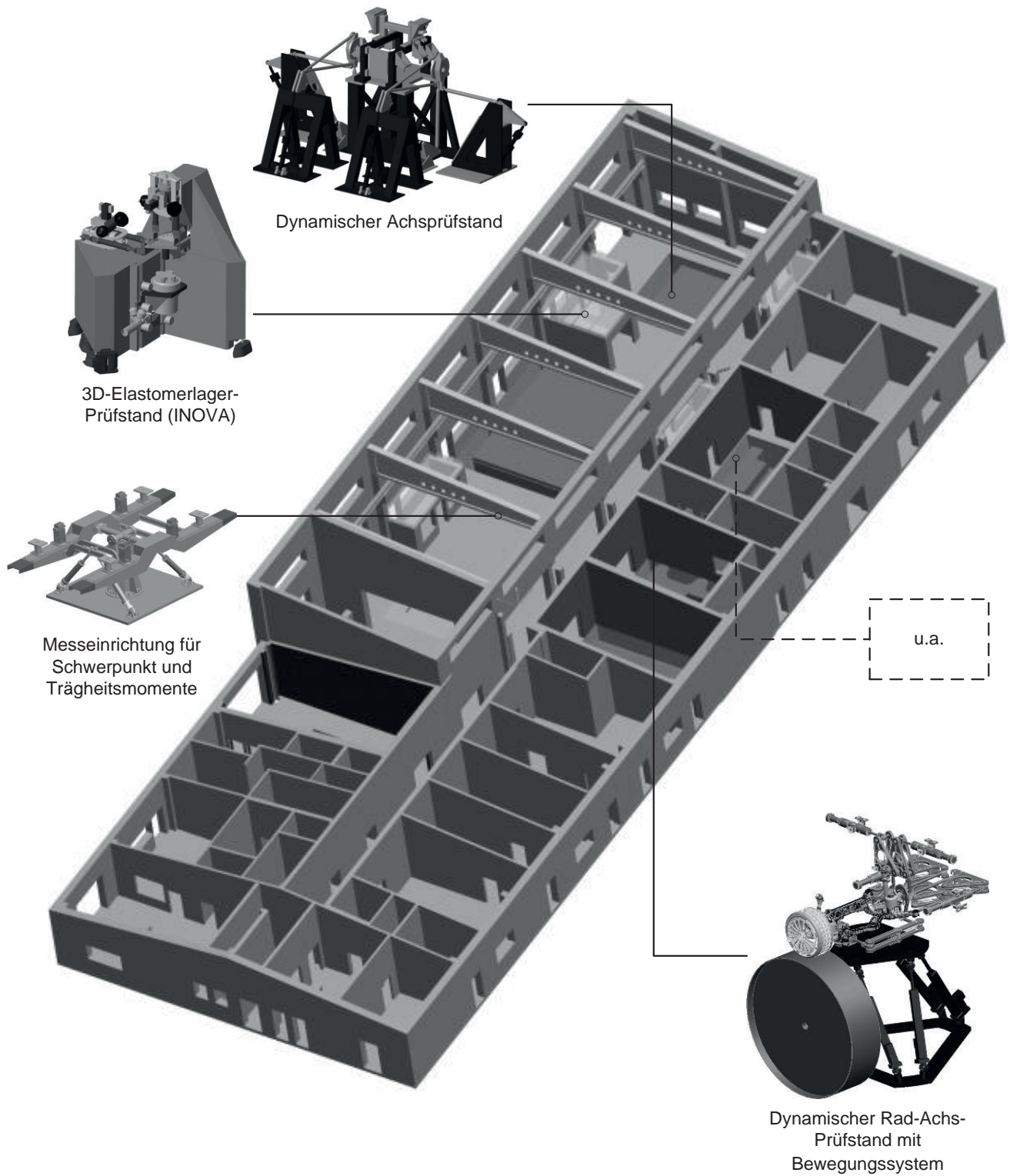


Abb. 0.2 CAD-Modell Funktionsgebäude mit Submodellen der Prüfstände



F. Berechnungsergebnisse Strukturanalyse Blockfundament

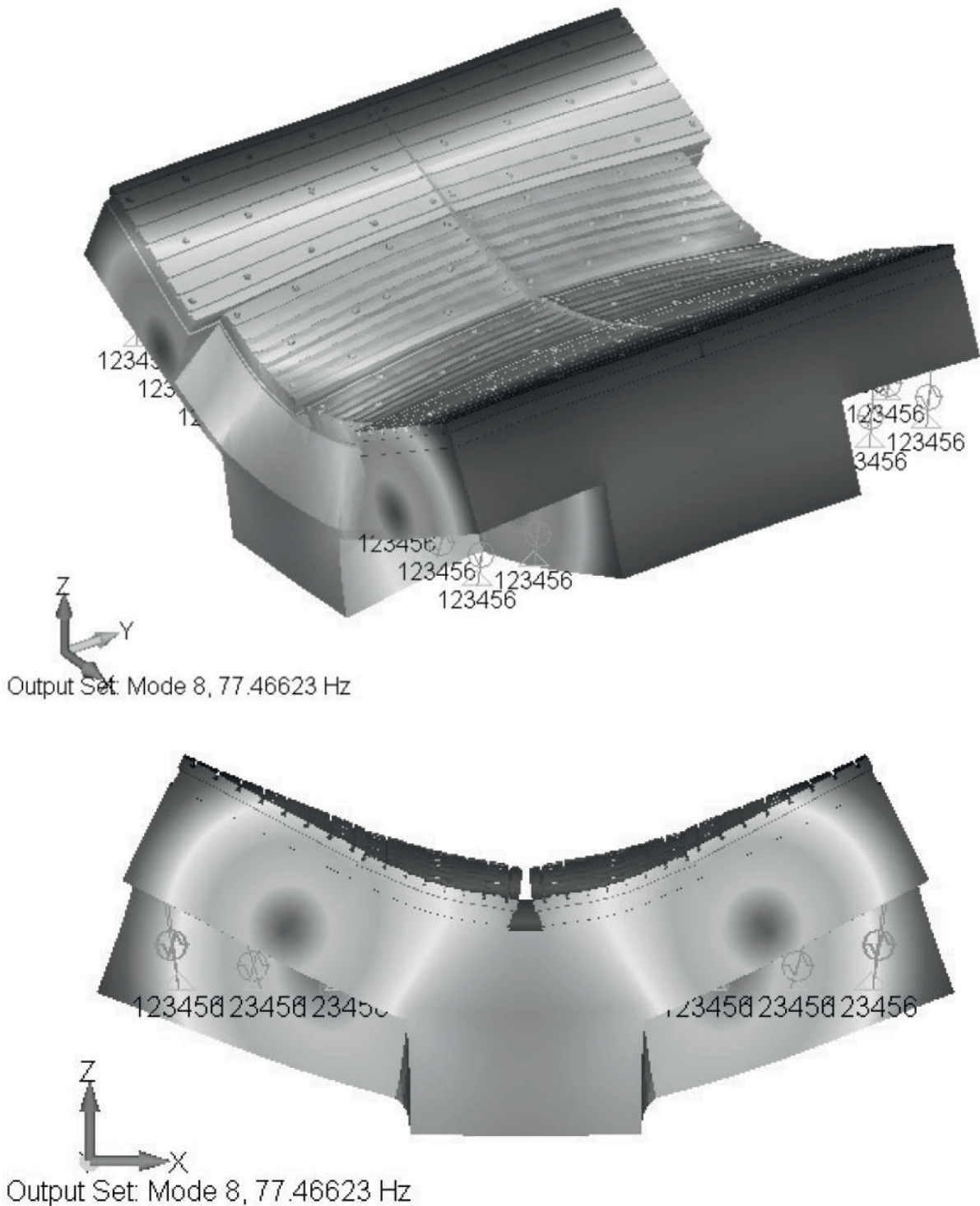


Abb. 0.3 Eigenform 1. Biegung Fundamentkörper für Dyn. Kinematics & Compliance Prüfstand [167]



G. Weiterer Darstellungen der Planungsergebnisse

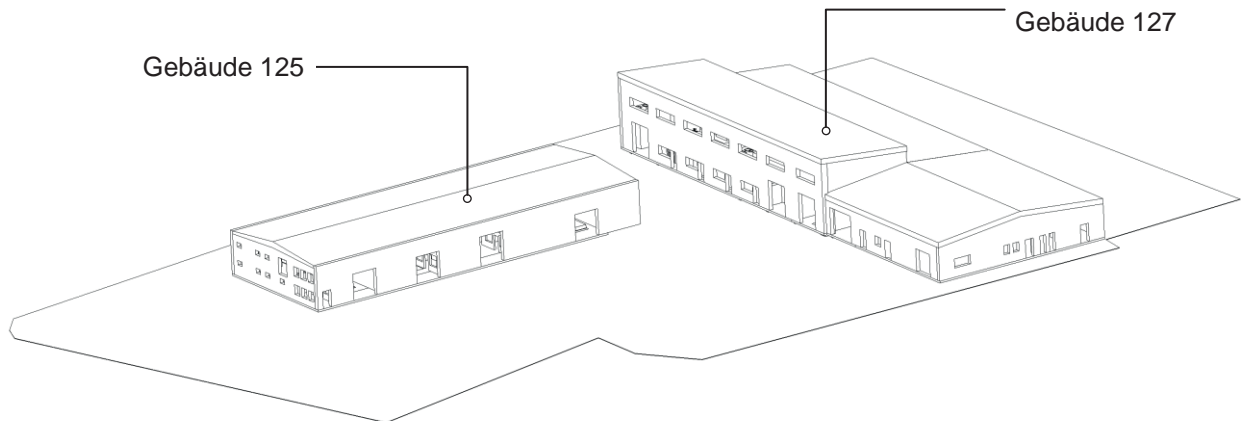


Abb. 0.4 Übersicht Komplex Fahrzeugtechnisches Versuchszentrum der TU Dresden

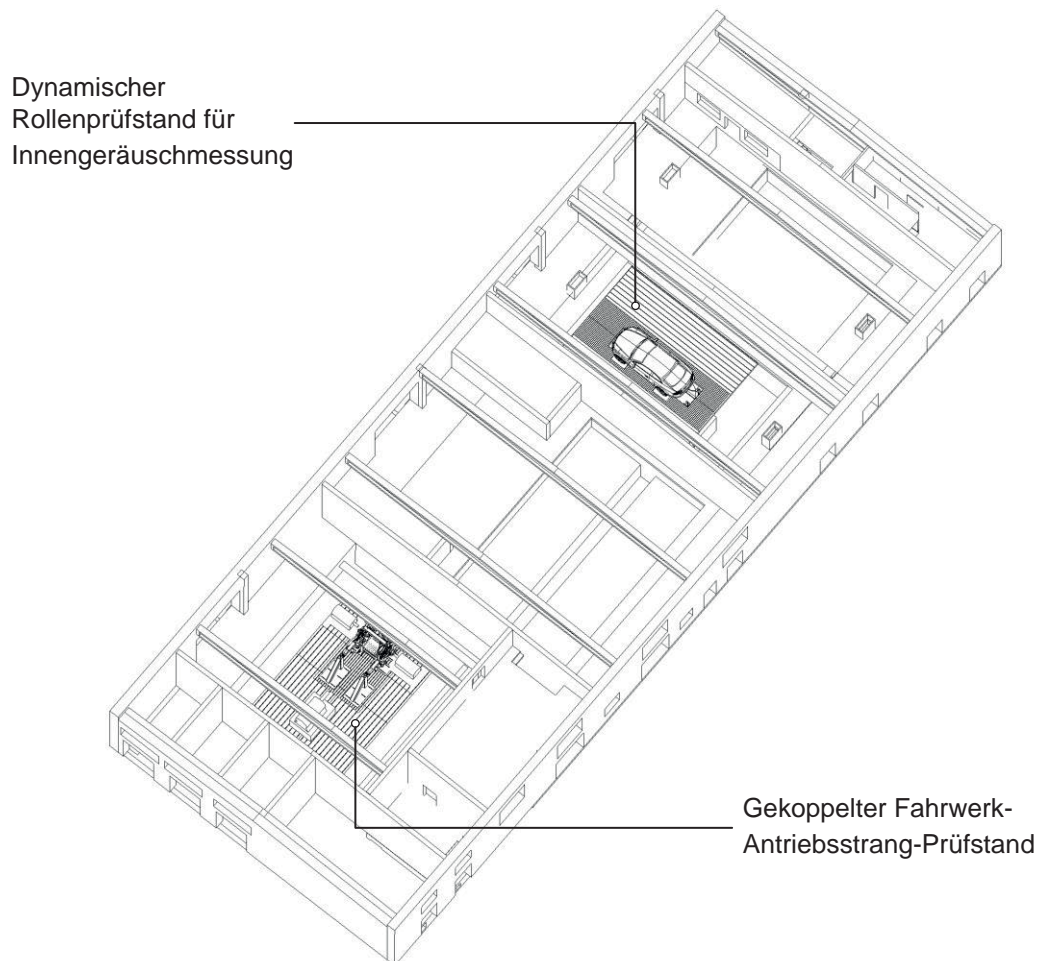


Abb. 0.5 CAD-Entwurf Gebäude 125 Planungsergebnis

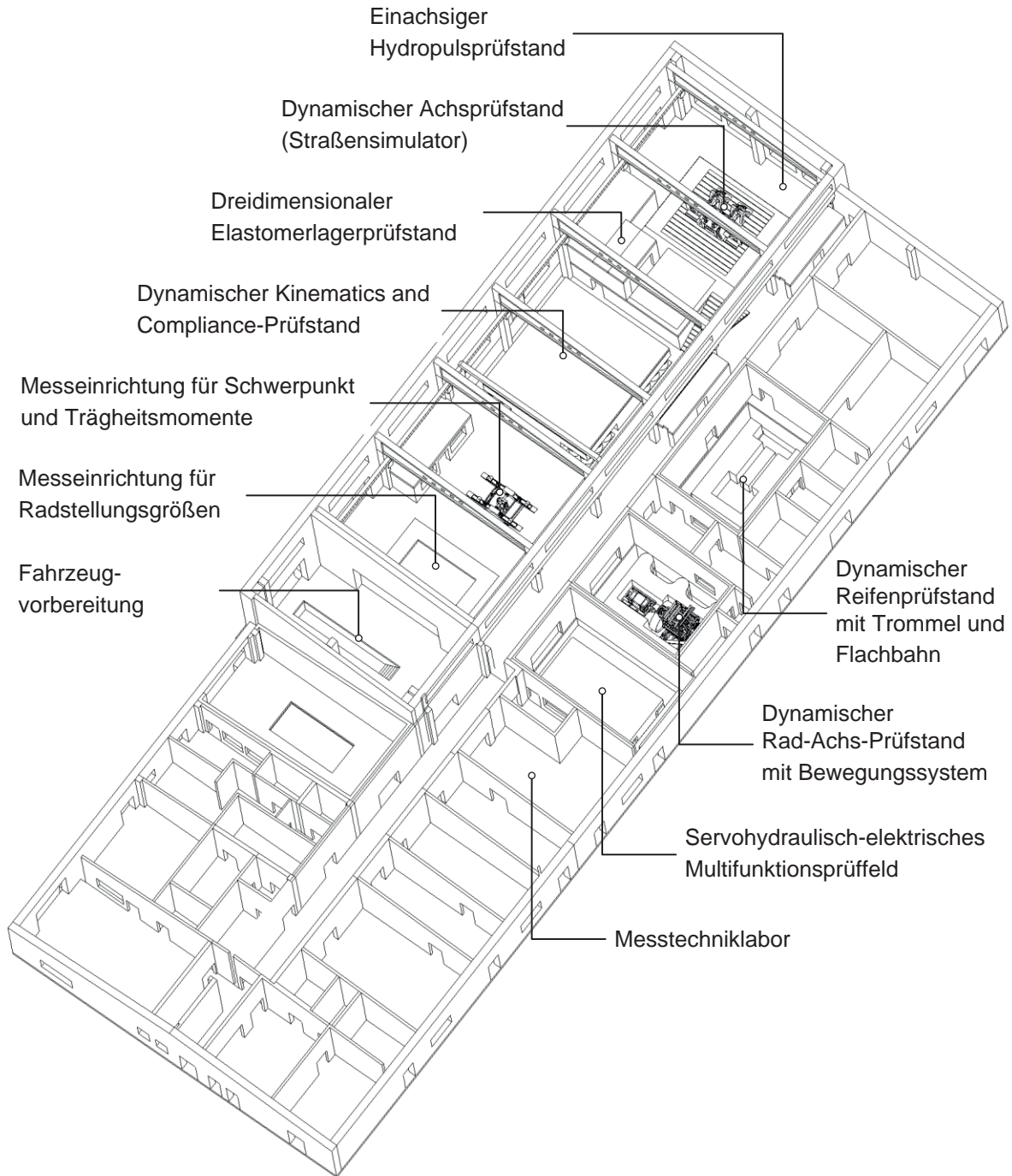


Abb. 0.6 CAD-Entwurf Gebäude 127 Planungsergebnis



