

Ulrich Seiffert | Gotthard Rainer (Hrsg.)

Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz

Ulrich Seiffert | Gotthard Rainer (Hrsg.)

Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz

Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis
Mit 359 Abbildungen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



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. Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Thomas Zipsner | Elisabeth Lange

Der Vieweg+Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Technische Redaktion: Klementz publishing services, Gundelfingen
Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0345-0

Vorwort

Die Fahrzeugentwicklung steht nach wie vor unter steigenden Anforderungen sowohl von Seiten des Marktes als auch bedingt durch Auflagen des Gesetzgebers. Hohe Fahrzeugsicherheit und Qualitätsansprüche, geringst mögliche Abgaswerte, niedriges Außengeräusch, geringer Verbrauch und damit verbunden geringe CO₂-Emissionen, akzeptable Fahrleistungen, erweiterte Variantenzahl pro Hersteller, Integration in Verkehrssysteme und internationaler Wettbewerb sind nur einige Stichwörter. Neben den Produkten sind es die Prozesse, die die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit ganz entscheidend beeinflussen. In den hier zusammengestellten Beiträgen zur virtuellen Produktentstehung, die im Wesentlichen auf Präsentationen der ATZ/MTZ-Konferenzen zur VVC (Virtual Vehicle Creation) und VPC (Virtual Powertrain Creation) aufbauen, wird für das Gesamtfahrzeug aber auch für sämtliche Hauptgruppen wie Antrieb, Aufbau Fahrwerk und Elektronik durch die entsprechenden fachlichen Stellungnahmen diese veränderte Welt beschrieben. Obwohl es immer noch der physikalischen Tests auf der Basis von Hardwarekomponenten und Prototypen bedarf, trägt der veränderte Prozess nicht nur zur Erhöhung der Entwicklungsqualität sondern auch zur Verringerung der Entwicklungszeit bei. Das vorliegende Fachbuch zeigt ganzheitlich die Lösungen anhand von Praxisbeispielen auf.

Dieses Fachbuch richtet sich vor allem an in Praxis und Wissenschaft tätige Fachleute der Kfz-, Zulieferer- und Elektronikindustrie sowie an Hard- und Softwarehersteller. Auch Professoren und Studenten der Kfz-Technik bietet es einen hilfreichen Begleiter und zuverlässigen Ratgeber.

Unser besonderer Dank gilt allen unseren Autoren für ihren großen Einsatz bei der Realisierung dieses Fachbuches. Dabei sind vor allem die ausgeprägte Fachkompetenz und die verständliche Darstellung der Lösungen hervorzuheben.

Dem Vieweg Verlag, insbesondere dem Lektor Herrn Thomas Zipsner, danken wir für die jederzeit kollegiale und vorausschauende Mitarbeit.

Braunschweig, Graz im März 2008

*Ulrich Seiffert
Gotthard Rainer*

Autorenverzeichnis

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers [5.1]	Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe www.ipek.uni-karlsruhe.de
Dr. Klaus U. Baron [2.3]	Delphi Deutschland GmbH, Wuppertal www.delphi.com
Dr. rer. nat. Jost Bernasch [6.2]	Kompetenzzentrum – Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH, A-Graz www.virtuellesfahrzeug.at
Dr.-Ing. Ernst Beutner [1.2]	IAV GmbH, Chemnitz www.iav.de
Dr.-Ing. Thomas Binder [1.1]	Audi AG, Ingolstadt www.audi.de
Dipl.-Ing. Thomas Bock [1.1]	Audi AG, Ingolstadt www.audi.de
Dr. Bernd Bohr [2.1]	Robert Bosch GmbH, Stuttgart www.bosch.de
Dr.-Ing. Stefan Bunzel [2.2]	Continental, Frankfurt a.M., www.continental-corporation.com
Dr. Dipl.-Ing. Klaus Denkmayr [3.4]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Dipl.-Ing. Arnulf Deschler [4]	ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen www.zf.com
Dipl.-Ing. Michael Dick [1.1]	Audi AG, Ingolstadt www.audi.de
Dr. Raimund Ellinger [3.1]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Dipl.-Ing. Andreas Ennemoser [5.3]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Dipl.-Ing. Helmut Fennel [2.2]	Continental, Frankfurt a. M., www.continental-corporation.com
Dr. Robert Fischer [3.1]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Ronald Gneiting [6.1]	Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart www.behrgroup.com

Dipl.-Ing. Michael Günther [3.6]	IAV GmbH, Chemnitz www.iav.de
Dr.-Ing. Thomas Heckenberger [6.1]	Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart www.behrgroup.com
M. Sc. Borislav Klarin [5.4]	AVL-AST d.o.o., Zagreb, Croatia www.avl.com
Dr.-Ing. Peter A. Klumpp [3.2]	Audi AG, Ingolstadt www.audi.com
Dipl.-Ing. Thomas Kriegel, MBA [1.1]	Audi AG, Ingolstadt www.audi.de
Dipl.-Ing. Markus Kühl [5.1]	aquintos GmbH, Karlsruhe www.aquintos.com
Dr.-Ing. Gerhard Maas [1.2]	IAV GmbH, Chemnitz www.iav.de
Dr.-Ing. Franz Maaßen [3.3]	FEV Motorentechnik GmbH, Aachen www.fev.com
Hinrich Meinheit [5.2]	Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen www.ika.rwth-aachen.de
Dipl.-Ing. Thomas Müller [1.1]	Audi AG, Ingolstadt www.audi.de
Prof. Dr.-Ing. Klaus Müller-Glaser [5.1]	Institut für Technik der Informations- verarbeitung, Universität Karlsruhe www.itiv.uni-karlsruhe.de
Dr. Peter Nefischer [5.3]	BMW Motoren GmbH, A-Steyr www.bmw-werk-steyr.at
Prof. Dr.-Ing. Horst Oehlschlaeger [1.3]	Volkswagen Nutzfahrzeuge, Wolfsburg www.vwn.de
Dipl.-Ing. Sascha Ott [5.1]	Institut für Produktentwicklung, Universität Karlsruhe www.ipek.uni-karlsruhe.de
Dr. Heinz Petutschnig [5.3]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger [3.3]	FEV Motorentechnik GmbH, Aachen www.fev.com
Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Puntigam [6.2]	Kompetenzzentrum – Das Virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH, A-Graz www.virtuellesfahrzeug.at
Dr. Gotthard Rainer [Hrsg.]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com

Dr.-Ing. Martin Rebbert [3.5]	FEV Motorentechnik GmbH, Aachen www.fev.com
Dipl.-Ing. Thomas Resch [5.4]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Dr. Johannes-Jörg Rüger [2.1]	Robert Bosch GmbH, Stuttgart www.bosch.de
Dr. Christof Samhaber [5.3]	BMW Motoren GmbH, A-Steyr www.bmw-werk-steyr.at
Dipl.-Ing. Thomas Schaffner [5.4]	CD Labor für Motor- und Fahrzeugakustik, A-Graz
Dr.-Ing. Christian Schyr [5.1]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert [Hrsg.]	WiTech Engineering GmbH, Braunschweig www.witech-engineering.de
Dipl.-Ing. Martin Sopouch [5.4]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Dr.-Ing. Karin Spors [1.4]	Volkswagen AG, Wolfsburg www.volkswagen.de
Dr.-Ing. Ulrich Uphoff [1.5]	BMW Group München www.bmwgroup.com
Dipl.-Ing. Christian Vock [5.4]	AVL List GmbH, A-Graz www.avl.com
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Henning Wallentowitz [5.2]	Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen www.ika.rwth-aachen.de
Dr.-Ing. Thomas Wetzel [6.1]	Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart www.behrgroup.com
Dr.-Ing. Steffen Zwahr [3.6]	Westfälische Hochschule, Zwickau www.fh-zwickau.de

Inhaltsverzeichnis

1 Gesamtfahrzeug	1
1.1 Einsatz virtueller Techniken in der Produktentwicklung	1
1.1.1 Einflüsse auf die Automobilindustrie	1
1.1.1.1 Globale Trends	1
1.1.1.2 Anforderungen aus geänderten Kundenerwartungen	4
1.1.1.3 Neue Wege gehen	6
1.1.2 Der Produktprozess und die Rolle der virtuellen Entwicklung	7
1.1.2.1 Paradigmenwechsel im Produktprozess	7
1.1.2.2 Synchronisation des Entwicklungsprozesses	8
1.1.2.3 Datenlogistik	9
1.1.2.4 Simulation als Prozessintegrator	12
1.1.3 Die Verwendung der virtuellen Techniken zur Komponenten- und Eigenschaftsentwicklung	15
1.1.3.1 Eigenschaftsableitung	15
1.1.3.2 Eigenschaftsverfolgung (-Monitoring)	17
1.1.3.3 Interdisziplinäre Prozessketten im Entwicklungsprozess	18
1.1.3.4 Neue Herausforderungen in der Simulation durch Regelsysteme	20
1.1.3.4.1 Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen	21
1.1.3.4.2 Vehicle in the Loop (VIL)	22
1.1.4 Zusammenfassung und Ausblick	27
1.1.4.1 Geänderter Produktprozess	27
1.1.4.2 Grenzen der virtuellen Entwicklung	28
1.1.4.3 Ausblick	29
1.2 Auslegungstools und Expertenwissen	29
1.2.1 Einleitung	29
1.2.2 Der „Integrierte Entwicklungsablauf“	31
1.2.3 Mit Auslegungstools zur simulationsgestützten Entwicklung in frühen Entwicklungsphasen	35
1.2.4 Verstärkte Nutzung von Wissen im Engineeringprozess	42
1.2.4.1 Wissen – auf dem Weg zur Ressource	42
1.2.4.2 Lösungsansätze für wissensbasiertes Engineering	44
1.2.4.3 Wissensdatenbanken	46
1.2.5 Anwendung von Wissensdatenbanken	50
1.2.5.1 Information	50
1.2.5.2 Technisches Benchmarking	50
1.2.5.3 Bereitstellung Expertenwissen	53
1.2.5.4 BauteilAuslegung	54
1.2.6 Zusammenfassung und Ausblick	56
1.3 Virtuelle Produktentwicklung in der Konzeptphase von Nutzfahrzeugen	58
1.3.1 Konzeptentwicklung, Frontloading	59

1.3.2	Beispiele für Simulationswerkzeuge in der Konzeptphase	60
1.3.2.1	Concept Car (Parametrisches Konzeptmodell)	60
1.3.2.2	Digital Mock-Up (DMU)	62
1.3.2.3	Virtuelle Sitzkiste	63
1.3.2.4	Augmented Reality	64
1.3.2.5	Parametrische Berechnungsverfahren	65
1.3.2.6	Modularer Berechnungsmodell-Aufbau	67
1.3.2.7	Strömungsberechnung (CFD)	68
1.3.2.8	Mehrkörpersimulation (MKS)	71
1.3.2.9	Blattfedergeführte Starrachse	72
1.3.3	Virtuelle Produktentwicklung in der Zukunft	73
1.4	Beschleunigung des Produktprozesses	75
1.4.1	Einleitung	75
1.4.2	Die drei Beschleunigungskomponenten	77
1.4.3	Ausgewählte Beispiele	83
1.4.4	Zusammenfassung und Ausblick	87
1.5	Virtueller verteilter Entwicklungsprozess bei Abgasanlagen und -konzepten	88
1.5.1	Einleitung	88
1.5.2	CAE-Methoden im Entwicklungsprozess Abgasanlage	88
1.5.3	Numerischer Werkzeugkasten für Abgasanlagenberechnungen	91
1.5.3.1	Vernetzungsrichtlinie für Abgasanlagenmodelle	93
1.5.3.2	Nummerierungskonvention für Abgasanlagenmodelle	94
1.5.3.3	Eine hierarchisch angelegte Struktur für Abgasanlagenberechnungen	94
1.5.3.4	Automatisierungsalgorithmus	95
1.5.3.5	Verschiedene kleinere Programme zur Erledigung von Teilaufgaben	95
1.5.4	Beispiele	95
1.5.5	Einführung einer gemeinsamen Methodik bei den Partnern	97
1.5.6	Zusammenfassung	98
2	Elektronik	99
2.1	Elektronik als Schlüsseltechnologie zur unfallfreien und umweltfreundlichen Mobilität der Zukunft	99
2.1.1	Globale Herausforderungen	99
2.1.2	Elektronik und Systemvernetzung	101
2.1.3	Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei Elektronik-Systemen	111
2.1.4	Zusammenfassung	113
2.2	AUTOSAR – Der Standard, seine Anwendung und die weitere Entwicklung	114
2.2.1	Einleitung	114
2.2.2	AUTOSAR-Projektorganisation	115
2.2.3	Technisches Konzept von AUTOSAR	116
2.2.3.1	Schichtenmodell der Softwarearchitektur	116
2.2.3.2	Virtueller Funktionaler Bus	118
2.2.3.3	Metamodell und Methodik	120

2.2.3.4	Konfigurationskonzept	122
2.2.3.5	Fehlerbehandlung	124
2.2.3.6	Anwendungssoftware	125
2.2.4	Status der AUTOSAR-Spezifikationen	125
2.2.4.1	AUTOSAR Release 1.0	125
2.2.4.2	AUTOSAR Release 2.0	126
2.2.4.3	AUTOSAR Release 2.1	127
2.2.5	AUTOSAR Konformitätsprüfung	127
2.2.5.1	Zielsetzung	127
2.2.5.2	Prozess der Konformitätsprüfung	128
2.2.6	AUTOSAR Phase II: 2007 – 2009	129
2.2.6.1	Inhalte der AUTOSAR Phase II	129
2.2.6.2	Start von AUTOSAR Phase II	131
2.2.7	Schlussfolgerung und Ausblick	131
2.3	Virtuelle Systementwicklung – Von der Anforderung zum Steuergerät	133
2.3.1	Einleitung	133
2.3.2	Anforderungsverursachte Komplexitätszunahme im E/E-Entwurfsprozess	135
2.3.3	Konventionelle Architektur- und Steuergeräteentwicklung	138
2.3.4	Integraler Toolverbund zur virtuellen E/E-Entwicklung	140
2.3.4.1	eSCOUT	142
2.3.4.2	CAPEmaster/CAPEopticon	145
2.3.4.3	Virtuelle Hardware	148
2.3.4.4	HW/SW Co-Simulation	149
2.3.5	Schlussbetrachtung	151
3	Motor	154
3.1	Virtuelle Antriebsstrangentwicklung	154
3.1.1	Einleitung	154
3.1.2	Entwicklungsprozess der Antriebsstrangentwicklung	155
3.1.3	Kalibrierung im Fahrzeug, auf der Straße	156
3.1.4	Kalibrierung im Fahrzeug, auf dem Rollenprüfstand	160
3.1.5	Kalibrierung auf Motor-, Getriebe- und Antriebsstrangprüfständen	164
3.1.6	Kalibrierung in der Hardware-in-the-Loop (HiL) und Model-in-the-Loop (MiL) Umgebung	166
3.1.7	Zusammenfassung und Ausblick	170
3.2	Steuertriebsentwicklung mit Simulation und Versuch	172
3.2.1	Einleitung	172
3.2.2	Entwicklungstools: Simulations- und Messtechniken	172
3.2.3	Zähnezahlen	175
3.2.4	Kettenart	177
3.2.5	Dynamikergebnisse	180
3.2.6	Unrunde Kettenräder	181
3.2.7	Aufbau und Ausbau der Simulationstechnik	184
3.2.8	Zusammenfassung	188

3.3	Virtuelle Motorenentwicklung	189
3.3.1	Einleitung	189
3.3.2	Entwicklungsplan	189
3.3.3	CAE-Unterstützung und virtuelle Produktfreigabe	191
3.3.4	Festigkeit und Kühlung	193
3.3.5	Ladungswechsel und Thermodynamik	194
3.3.6	Kosten und Gewicht	195
3.3.7	NVH und Gewicht	196
3.3.8	Dokumentation und Projektmanagement	299
3.3.9	Motormanagement, Software und Applikation	299
3.3.10	Zusammenfassung	200
3.3.11	Fazit	201
3.4	Zuverlässigkeitsmethoden in der Motorenentwicklung	202
3.4.1	Einleitung	202
3.4.2	Der Zuverlässigkeitsprozess	202
3.4.2.1	Statistische Analysen	204
3.4.2.2	Projekt-Risikomanagement	204
3.4.2.3	FMEA – Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse	205
3.4.2.4	Concern-System	205
3.4.2.5	Design of Experiments (DoE) und Robustheit	206
3.4.2.6	Zuverlässigkeitsblockdiagramme (Reliability Allocation)	206
3.4.2.7	Intelligente Validierung – Die Load Matrix Methodik	206
3.4.2.7.1	Prozess der Load Matrix Erstellung	207
3.4.2.7.2	Maßnahmen zur Verbesserung der Validierung	208
3.4.2.7.3	Nutzen der Load Matrix	208
3.4.2.8	Reliability Charts	209
3.4.2.9	Garantiekostenprognose	211
3.4.3	Zusammenfassung	212
3.5	3D-Simulation der Kolbengruppe	213
3.5.1	Einleitung	213
3.5.2	Simulation der Kolbengruppe in Bausteinen	214
3.5.2.1	Thermische Strukturanalyse des Kolbens	214
3.5.2.2	Simulation der Kolbensekundärbewegung	216
3.5.2.3	Simulation der Kolbenringdynamik	220
3.5.3	Anwendungsbeispiel: Reibungsanalyse	223
3.5.4	Zusammenfassung	225
3.6	Einsatz der Prozess- und Ladungswechselsimulation zur Bedatung von Motorsteuergeräten	227
3.6.1	Einleitung	227
3.6.2	Motivation	227
3.6.3	Grundlagen zur Einbeziehung der Vorausberechnung in den Applikationsprozess	228
3.6.4	Werkzeuge zur effektiven Grundbedatung mit Vorausberechnung	230
3.6.5	Anwendung für Füllungserfassung, Momentenstruktur und Zündwinkelvorgabe	232

3.6.6	Weitere Einsatzmöglichkeiten der Simulation im Applikationsprozess	245
3.6.7	Fazit	247
4	Getriebe	249
4.1	Optimierungsverfahren in der Antriebstechnik	249
4.1.1	Einleitung.....	249
4.1.2	Gliederung der Optimierungsverfahren	250
4.1.3	Topologieoptimierung: Begriffsklärung und Analogie	252
4.1.4	Prinzipielle Vorgehensweise bei einer Topologieoptimierung	253
4.1.5	Grundlegende Erfahrungen bei der Topologieoptimierung eines Differenzialdeckels	254
4.1.6	Topografieoptimierung einer Ölwanne.....	267
4.1.7	Topologieoptimierung eines Getriebegehäuses	272
4.1.8	Optimierung eines Halblechs	279
4.1.9	Einbindung in den Produktentwicklungsprozess	284
5	Antriebsstrang/Hybrid	286
5.1	Modellbasierte Antriebsstrangentwicklung	286
5.1.1	Einleitung	286
5.1.2	Werkzeuge im modellbasierten Entwicklungsprozess	288
5.1.2.1	Systemmodell	288
5.1.2.2	Regelbasierte Modelltransformation	290
5.1.2.3	Physikalische und signalfflussorientierte Modelle	291
5.1.2.4	Optimierungswerkzeuge	294
5.1.2.5	Modellbasierte Validierung	294
5.1.3	Zusammenfassung	296
5.2	Hybridfahrzeug in seiner Verkehrsumgebung	298
5.2.1	Einleitung	298
5.2.2	Simulationsumgebung	298
5.2.2.1	Längsdynamiksimulation	299
5.2.3.2	Verkehrsszenarien	303
5.2.3	Simulationsergebnisse	305
5.2.3.1	Hybridantrieb	305
5.2.4	Zusammenfassung	309
5.3	Einfluss des Strömungssiedens auf den kühlmittelseitigen Wärmeübergang in Verbrennungsmotoren	310
5.3.1	Einleitung	310
5.3.2	Sieden	311
5.3.2.1	Beschreibung des Siede-Phänomens	311
5.3.2.2	Einflüsse	312
5.3.2.2.1	Kühlmittelzusammensetzung	313
5.3.2.2.2	Rauigkeit	314
5.3.2.2.3	Orientierung	314
5.3.2.2.4	Druckgradient	315
5.3.2.2.5	Vibration	315

5.3.3	Modellbildung und Berechnungsmethodik	316
5.3.3.1	Boiling-Departure-Liftoff (BDL)-Modell	316
5.3.3.2	Gekoppelte Berechnungsmethodik	318
5.3.4	Anwendungsbeispiel	320
5.3.5	Zusammenfassung	322
5.4	Simulation des NVH-Verhaltens im Antriebsstrang	323
5.4.1	Einleitung	323
5.4.2	Modellkomplexität	324
5.4.3	Softwareprogramme und Modellierungsansätze	327
5.4.4	Untersuchung an einem Front-Querantriebsstrang	332
5.4.4.1	1D-Torsionsansatz	333
5.4.4.2	3D-MKS (Starrkörper)	334
5.4.4.3	3D-MKS (flexible Körper)	338
5.4.5	Zusammenfassung	343
6	Nebenaggregate	345
6.1	Simulation in der Produktentwicklung	345
6.1.1	Einführung	345
6.1.2	Dynamikanalyse von Kühlmodulen	345
6.1.3	Temperaturwechselbeanspruchung von Ladeluftkühlern	347
6.1.4	Motorraumdurchströmung	348
6.1.5	Auslegung von Hybridquerträgern für Thermostrukturmodule [©]	350
6.1.6	Komfortbewertung mit dem virtuellen thermischen Dummy	352
6.1.7	Dynamische Berechnung der Ladeluftkühlung mit BISS	354
6.1.8	Füllungsoptimierung eines R744 Kältekreislaufs	355
6.2	Integrierte Virtuelle Gesamtfahrzeugsimulation ausgeführt am Beispiel des Thermischen Managements	358
6.2.1	Einleitung	358
6.2.2	Motivation und Problemstellung	359
6.2.3	Technologien, Methoden und Werkzeuge für Integriertes Engineering	360
6.2.4	Rolle der Co-Simulation für das Thermische Management	364
6.2.5	Design einer unabhängigen Co-Simulationsplattform-Erstellung eines Gesamtfahrzeugmodells am Beispiel des Thermischen Managements	366
6.2.5.1	Aufteilung des Gesamtsystems in Teilmodelle	367
6.2.5.2	Kopplung der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell	367
6.2.5.3	Synchronisierung der Teilmodelle innerhalb des Gesamtmodells	369
6.2.6	Betrachtung der Energieströme innerhalb eines gekoppelten thermischen Gesamtfahrzeugmodells	372
6.2.7	Zusammenfassung und Ausblick	376
	Ausblick	380
	Sachwortverzeichnis	381

Abkürzungen und Akronyme

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
ADC	Analogue Digital Converter
AGR	Abgasrückführung
AR	Augmented Reality
AUTOSAR	AUTomotive Open System ARchitecture
BDL	Boiling Departure Liftoff
BISS	Behr integrierte Systemsimulation
BSA	Betriebsschwingungsanalyse
BSW	Basic Software
CAD	Computergestützte Konstruktion (Computer Aided Design)
CAE	Computergestütztes Engineering (Computer Aided Engineering)
CAX	Sammelbegriff für computergestützte Arbeitstechniken
CD	Compact Disc
CFD	Numerische 3D-Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics)
CPU	Central Processing Unit
CTA	Conformance Test Agency
CTS	Conformance Test Suite
CVT	Continuously Variable Transmission
DEM	Diagnostics Event Manager
DET	Development Error Tracer
DMU	Digitales Zusammenbau-Modell (Digital Mock-Up)
DoE	Design of Experiments (statistische Versuchsplanung)
DV-Technik	Datenverarbeitungstechniken
E/E	Electric/Electronics
ECU	Electronic Control Unit
ERP	Computergestützte Planung der Unternehmensressourcen (Enterprise Resource Planning)
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
GIF	Graphic interchange Format – Komprimierendes Bilddateiformat
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
GJV	Gusseisen mit Vermikulargraphit
HMD	Head-Mounted-Display
HMI	Human Machine Interface
HW	Hardware
I/O	Input/Output
IT	Informations-Technologie
KW	Kurbelwelle

MARCO	Thermischer Dummy
MKS	Mehrkörpersimulation
MTBF	Mean Time Between Failures
NVH	Noise, Vibration and Harshness
PDM	Produkt-Daten-Management
PVS	Produktionsvorserie
RA	Risk Assessment
RFID	Radio Frequency Identification
RTE	Runtime Environment
SFE	Gesellschaft für Strukturanalyse in Forschung und Entwicklung mbH
SIMBAUK	Simulations-Baukasten
SOP	Start der Serienfertigung (Start of Production)
SW-C	Software Component
TSM	Thermostrukturmodul©
UML	Unified Modeling Language
VB-Prozess	Versuchsbauprozess, dient der Erstellung von Prototypen
VFB	Virtual Functional Bus
ViP	Virtuelle Produktentwicklung
VR	Virtual Reality
VREP	virtueller Ergonomieprüfstand
XML	eXtensible Mark up Language
ZKG	Zylinder-Kurbel-Gehäuse

1 Gesamtfahrzeug

1.1 Einsatz virtueller Techniken in der Produktentwicklung

1.1.1 Einflüsse auf die Automobilindustrie

Mobilität stellt eines der Grundbedürfnisse der Menschen dar. Das Fahrzeug ist als individuelles Verkehrsmittel in der heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Die Mobilität in Zukunft sicher zu stellen ist neben der gesellschaftspolitischen Verantwortung auch eine technische Herausforderung.

Die Automobilindustrie steht heute im starken Wandel. Durch sich stark verändernde Rahmenbedingungen und Einflüsse müssen Entscheidungen getroffen werden, die in der zukünftigen Gesellschaft tragfähig sind.

Die Basis dafür stellt die genaue Analyse der verschiedenen Einflussgrößen auf die Gesellschaft, Verhaltensweisen und Produkterwartungen. Dazu zählen die globalen Trends genauso wie die sich ständig verändernden Kundenanforderungen an das Fahrzeug. Im Folgenden werden die vielseitigen Einflüsse auf die Automobilindustrie und die Auswirkungen für den Produktentstehungsprozess dargestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei nicht auf den direkten Auswirkungen der sich konstant ändernden Rahmenbedingungen auf das Produkt, sondern es geht um die notwendigen Anpassungen des Entwicklungsprozesses und die Verwendung neuer Methoden, um mit optimalen Ressourcen im Wettbewerbsumfeld zu bestehen.

1.1.1.1 Globale Trends

Die Entwicklung der globalen Trends kann in Form vieler Einzelmeldungen täglich verfolgt werden (**Bild 1-1**).

Die Verknappung von natürlichen Ressourcen wie Wasser und Rohöl wird in Zukunft massive Auswirkungen auf die Menschheit haben. Die Urbanisierung, die in Europa ihren Höhepunkt bereits überschritten hat, läuft in Metropolen des südamerikanischen und asiatischen Raums weiter.

Aus der anhaltenden Besiedelung von Naturflächen durch den Menschen ergibt sich eine sichtbare Zunahme von Naturereignissen, bei denen Menschen zu schade kommen. Sowohl die Gesellschaft als auch die Politik beschäftigen sich infolgedessen immer stärker mit dem Thema Umwelt, wie zum Beispiel mit der Ursache und Bekämpfung des Treibhauseffektes.

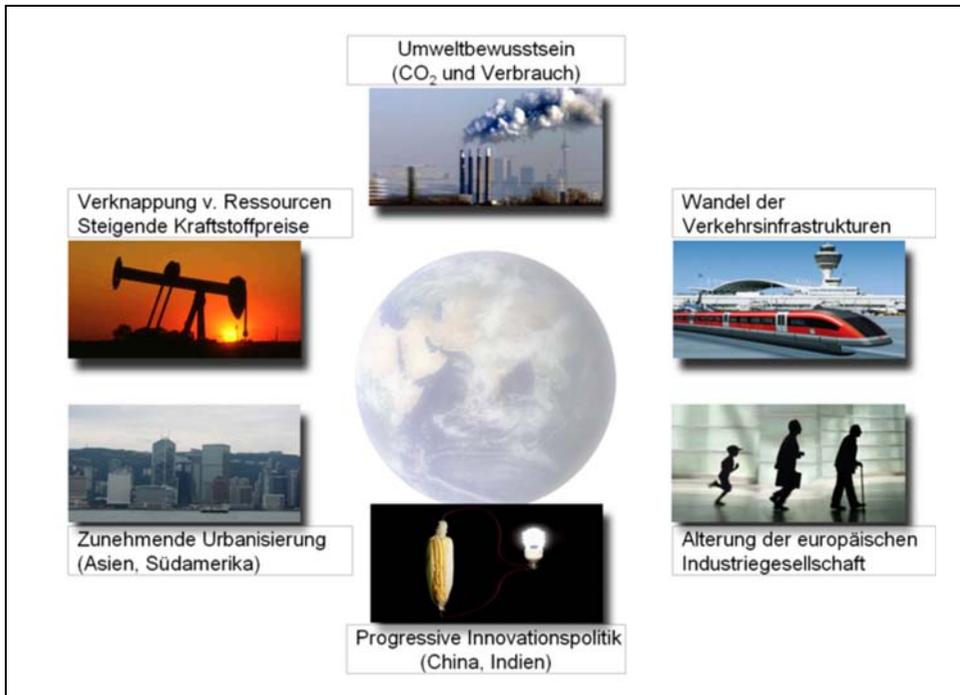


Bild 1-1: Globale Trends.

Die Alterung der Gesellschaft ist etwas, was nicht nur jeder als Person selbst erlebt, sondern auch in vielfältiger Weise Auswirkungen auf das Wirtschaftsumfeld haben wird. **Bild 1-2** stellt die Entwicklung der Verteilung der Altersgruppen bis Ende des Jahrhunderts in Deutschland dar.

Heute sind über 30 Mio. (37 %) Bürger in Deutschland über 50 Jahre alt. Künftig (2030) wird knapp die Hälfte der Bevölkerung über 50 Jahre alt sein. Die Zahl der 60 Jährigen und älter steigt besonders stark an und diese Menschen werden ein wesentlicher Bestandteil des Fahrzeugklientels sein. Wir sprechen von der so genannten Generation Plus. Die Generation Plus ist durch große Wachstumsdynamik und hohe Konsumbereitschaft gekennzeichnet.

Diese Zielgruppe möchte in ihrem Alter das Leben genießen, weiter an verschiedenen sozialen Aktivitäten teilnehmen, und ebenso weiter selbstständig sein. Dazu gehört auch die Mobilität, die sie keineswegs aufgeben möchten. Ferner spielt der Begriff „Sportlichkeit“ in dieser Zielgruppe eine immer wichtiger werdende Rolle.

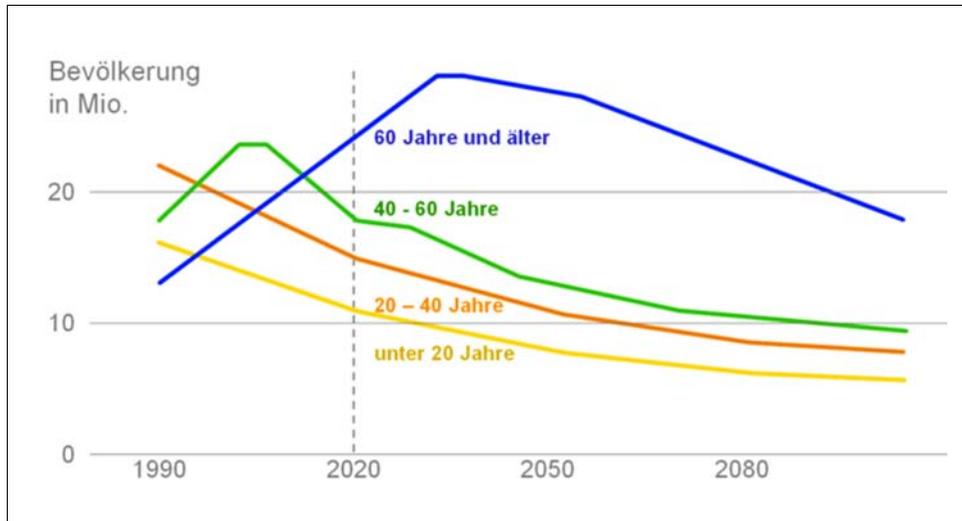


Bild 1-2: Alterung der Gesellschaft am Beispiel Deutschland.

Die Entwicklung der Weltbevölkerung und die Globalisierung, die immer stärkere internationale Vernetzung sowohl im privaten, als auch im beruflichen Umfeld führen unwiderruflich nach einem immer stärker anwachsenden Bedarf an Logistik. Hier geht es nicht nur um Güter, die transportiert werden müssen, sondern auch um Informationen und Menschen.

Aufbauend auf verschiedene Szenarien haben die Verkehrsforscher ein vertiefendes Szenario zur regionalen Verkehrsentwicklung in Deutschland erarbeitet. Man erkennt eine deutliche Zunahme des Verkehrsaufkommens im Bereich Berlin, Hamburg, Rhein/Ruhr, Rhein/Main, Stuttgart und München (**Bild 1-3**).

In Korrelation dazu steht, wie auf **Bild 1-4** zu erkennen, die prognostizierte Bevölkerungszunahme in genau diesen Regionen. Der Entvölkerung im Osten steht ein starker Zuwachs der Bevölkerung im Raum Berlin gegenüber. Das größte Wachstum soll aber vor allem im Süden, in der so genannten „greater Munich area“ erfolgen.

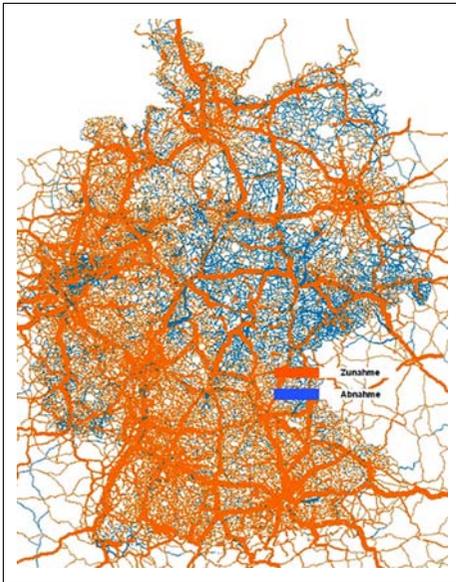


Bild 1-3: Verkehrszuwachs am Beispiel Deutschland.

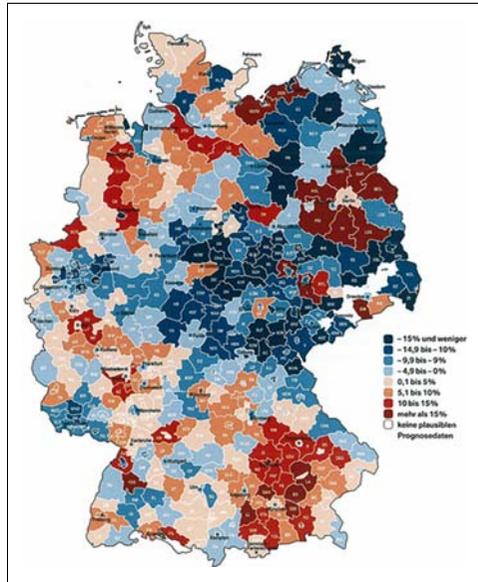


Bild 1-4: Zu- und Abwanderungsübersicht am Beispiel Deutschland.

1.1.1.2 Anforderungen aus geänderten Kundenerwartungen

Neben den globalen Veränderungen und deren Auswirkungen spielt auch die frühzeitige Erkennung und Erfüllung des Kundenwunsches eine wesentliche Rolle beim Unternehmenserfolg.

Der persönliche Wunsch, etwas Exklusives und Einzigartiges zu sein, spiegelt sich beim Kaufverhalten des Kunden eins zu eins wider. Eine immer stärkere Derivatisierung ist notwendig, um ein Volumenwachstum verzeichnen zu können (**Bild 1-5**).

Ferner ist der Kunde ständig bestrebt, das Fahrzeug individuell zu gestalten. Markenprägende Innovationen gehören genauso dazu wie eine exakt nach Kundenwunsch spezifisch ausgewählte Ausstattung. Daraus ergibt sich eine Kombinations- und Variantenvielfalt, deren Komplexität (**Bild 1-6**) sowohl in der Produktentwicklung, als auch in der Herstellung beherrscht werden muss.

Die Zeiten des Fahrzeuges als Massenprodukt in einheitlicher Farbe, Form und Ausstattung, sind in der Form, wie sie diese Henry Ford mit dem T-Modell einmal propagiert und erfolgreich vermarktet hat, vorüber.

Trotz der gestiegenen Derivatisierung und Produktkomplexität akzeptiert der Kunde keine längeren „Wartezeiten“. Vielmehr erfordert das starke Wettbewerbsumfeld, dass man als Automobilhersteller immer der erste ist, der mit attraktiven Produkten und Innovationen den Markt besetzt. Die Zeit, die für die Produktentwicklung bis zur Vermarktung zur Verfügung steht („Time to Market“), wird demnach immer geringer. Damit ergeben sich auch für die Entwicklung immer kürzer werdende Entwicklungszeiten (**Bild 1-7**) trotz zunehmender Komplexität und Varianz. Und dieses natürlich unter Einhaltung der höchsten Qualitätsstandards.

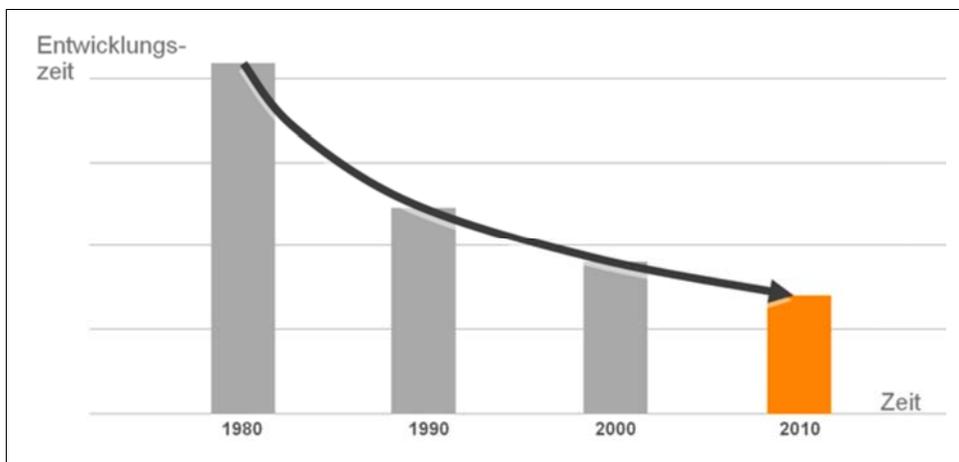


Bild 1-7: Reduktion der Entwicklungszeit.

1.1.1.3 Neue Wege gehen

Die Entwicklungsprozesse müssen den dargestellten Einflüssen (**Bild 1-8**) angepasst werden. Unter Beibehaltung der klassischen Entwicklungsmethoden ergäbe sich ein Ressourcenbedarf an Mitarbeitern und Material, welcher unternehmerisch unwirtschaftlich wäre.

Der Schlüssel zum Erfolg liegt im konsequenten Einsatz virtueller Entwicklungsmethoden im Produkt-Entstehungsprozess. Sowohl in der frühen Entwicklungsphase, als auch als Absicherungsmethode für Softwareversionen und Hardwarevarianten müssen diese Methoden intensiv umgesetzt werden.



Bild 1-8: Zusammenfassung der aktuellen Herausforderungen an die Automobilindustrie.

1.1.2 Der Produktprozess und die Rolle der virtuellen Entwicklung

1.1.2.1 Paradigmenwechsel im Produktprozess

Im Produktprozess spielt die Simulation eine immer größere Rolle. Die Erwartungshaltung an die Simulation ist hoch. Sie soll maßgeblich helfen bei:

- ◆ der Verkürzung der Entwicklungszeiten
- ◆ der Beherrschung der steigenden Variantenvielfalt
- ◆ der Einsparung von Hardwareschleifen
- ◆ der Erhöhung der Erprobungsqualität von Prototypen
- ◆ der Erweiterung von Erprobungsmöglichkeiten.

Die folgende Graphik (**Bild 1-9**) verdeutlicht das Ziel der virtuellen Entwicklung: durch die frühzeitige Auslegung der Funktionen soll der Reifegrad der Fahrzeuge schon in der Konzeptphase ein höheres Niveau erreichen. Nur die frühzeitig verfügbare, höhere Produktreife ermöglicht kürzere Entwicklungszeiten und somit eine Reduktion der Zeit bis zur Produkteinführung („Time to Market“).

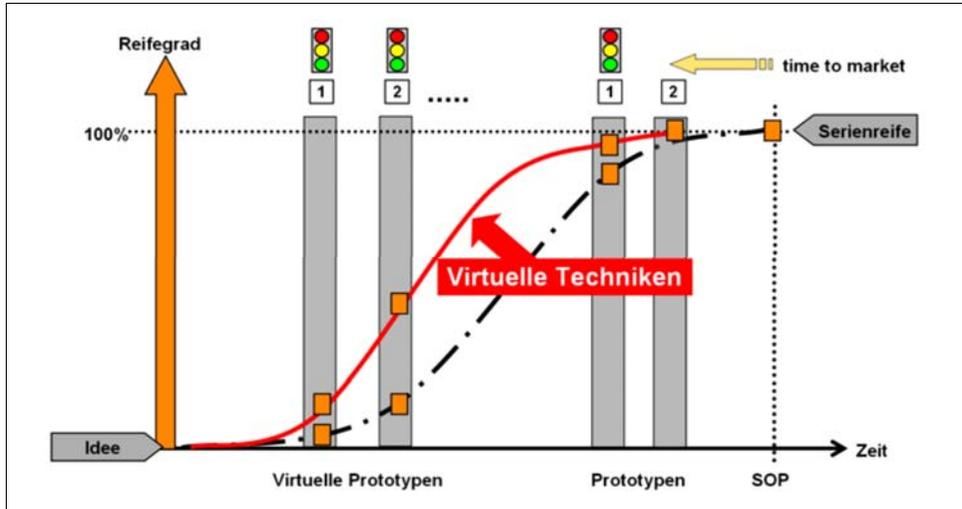


Bild 1-9: Reifegrad der Entwicklung.

1.1.2.2 Synchronisation des Entwicklungsprozesses

Im klassischen Entwicklungsprozess werden die Fahrzeugkomponenten (Antriebsstrang, Karosserie, Fahrwerk, Elektrik, Ausstattung, usw.) erst im ersten gebauten Fahrzeug, zum Beispiel Prototypen aufeinander abgestimmt. Eine Synchronisation der Entwicklungsleistung findet demnach erst spät im Entwicklungsprozess statt.

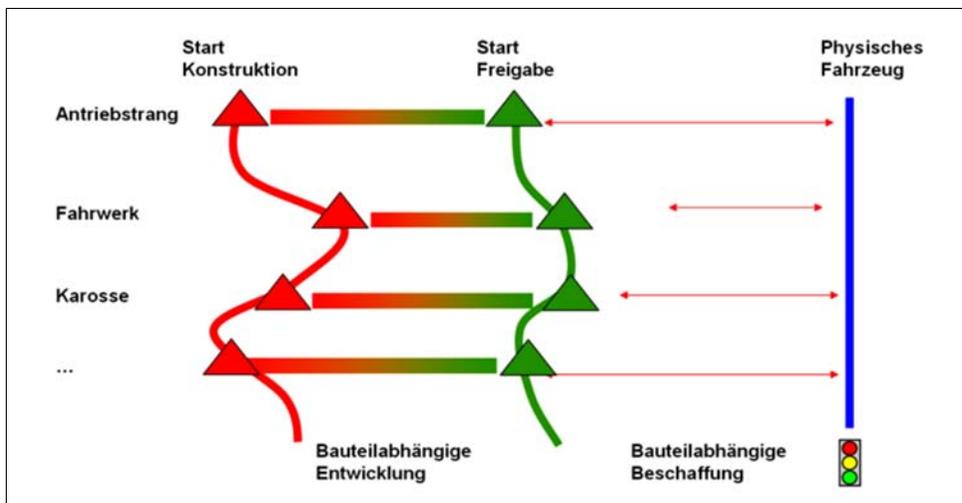


Bild 1-10: Klassischer Entwicklungsprozess mit Synchronisation in der Hardware von rechts.

Im virtuellen Entwicklungsprozess hingegen werden virtuelle Projektmeilensteine integriert. Zu diesen Meilensteinen müssen die Bauteile nicht nur geometrisch, sondern auch funktional aufeinander abgestimmt sein. Diese schrittweise Iteration von Funktionen im „Virtuellen Prototypen“ lässt den Reifegrad des Fahrzeuges steigen und das bei transparenter Messbarkeit. Durch die Unabhängigkeit der Hardware können verschiedene Funktionen parallel erprobt werden, man spricht in diesem Zusammenhang von synchronisierten Prozessen.

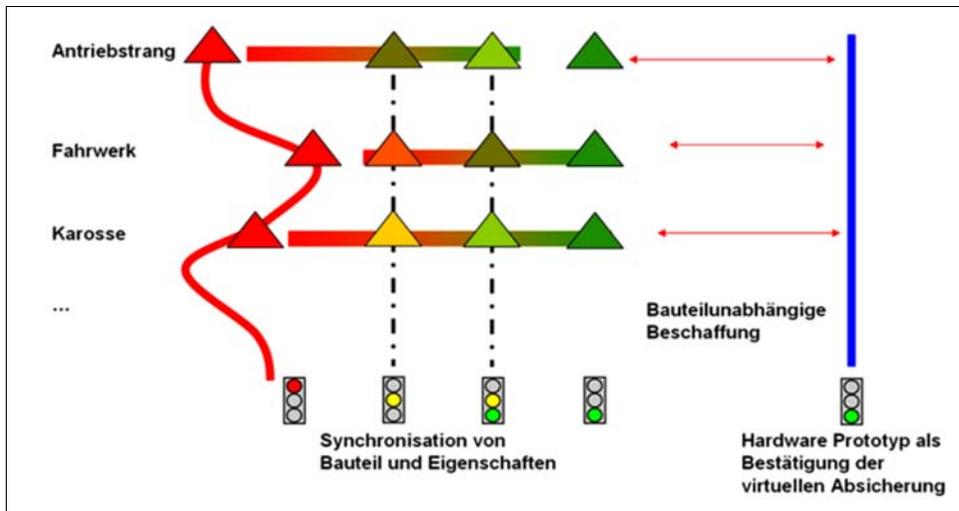


Bild 1-11: Virtuelle Entwicklung mit Synchronisationspunkten vor der Hardware.

1.1.2.3 Datenlogistik

Um den Reifegradprozess zu unterstützen, müssen alle dazu benötigten Daten und Informationen entsprechend strukturiert und organisiert werden. Sinnvoll ist das in Form der Neuschaffung einer übergreifenden Datenlogistik, die in einer Rolle als Dienstleister den Datenbereitstellungsprozess in enger Abstimmung mit der Projektsteuerung koordiniert. Zu den zu leistenden Aufgaben gehörten (**Bild 1-12**):

Daten:

- ◆ Dateninhalte
- ◆ Detaillierungsgrade
- ◆ Zeitpunkte und Konfigurationen für die entsprechenden Nutzer
- ◆ fachspezifische Datenaufbereitung
- ◆ Datenverfolgung.

Logistik:

- ◆ Strukturierung und Verwaltung der Input- und Output-Daten für verschiedene Anwendungsfälle
- ◆ Synergien durch Mehrfachverwendungen.

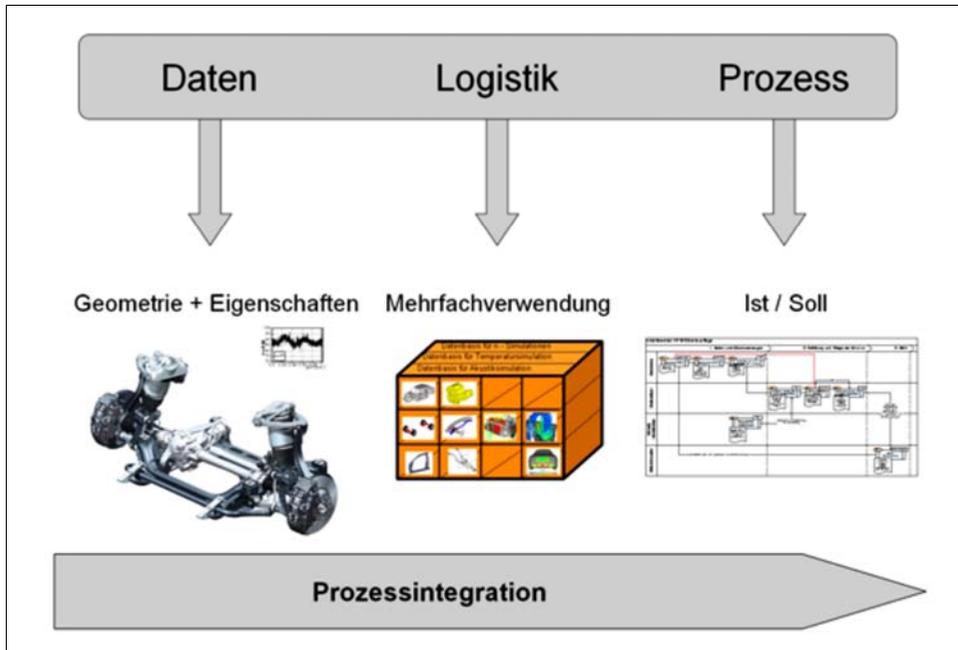


Bild 1-12: Aufgabenbereiche der Prozessdatenlogistik.

Prozesse:

- ◆ Permanente Optimierung des Datentransformationsprozesses von den Quell- in die Zielsysteme
- ◆ Prozessanalyse und -Optimierung für die angewendeten Methoden und Systeme
- ◆ Umsetzung / Integration in den Fachbereichen

Die Datenlogistiker haben in Analogie zu den Teilelogistikern in der Prototypenwerkstatt die Aufgabe, die Datenversorgung für die Nutzer zu organisieren. Der prinzipielle Arbeitsablauf ist unter **Bild 1-13** dargestellt.

Um die Vielzahl der verschiedenen Berechnungsmethoden bedienen zu können, muss für jede Berechnungsart eine Datenzusammenstellung mit nutzergerechtem Detaillierungsgrad aufbereitet werden.

Um den individuellen Aufbereitungsaufwand zu minimieren, wird ein Mastermodell geschaffen, aus dem sich die verschiedenen Detaillierungsgrade ableiten lassen. Somit wird außerdem sichergestellt, dass die verschiedenen Berechnungsdisziplinen auf einem gemeinsamen Datenstand ihre Simulationen durchführen können. Damit kann eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden. **Bild 1-14** zeigt beispielhaft die Mehrfachnutzung des Mastermodells für unterschiedliche Simulationsarten.

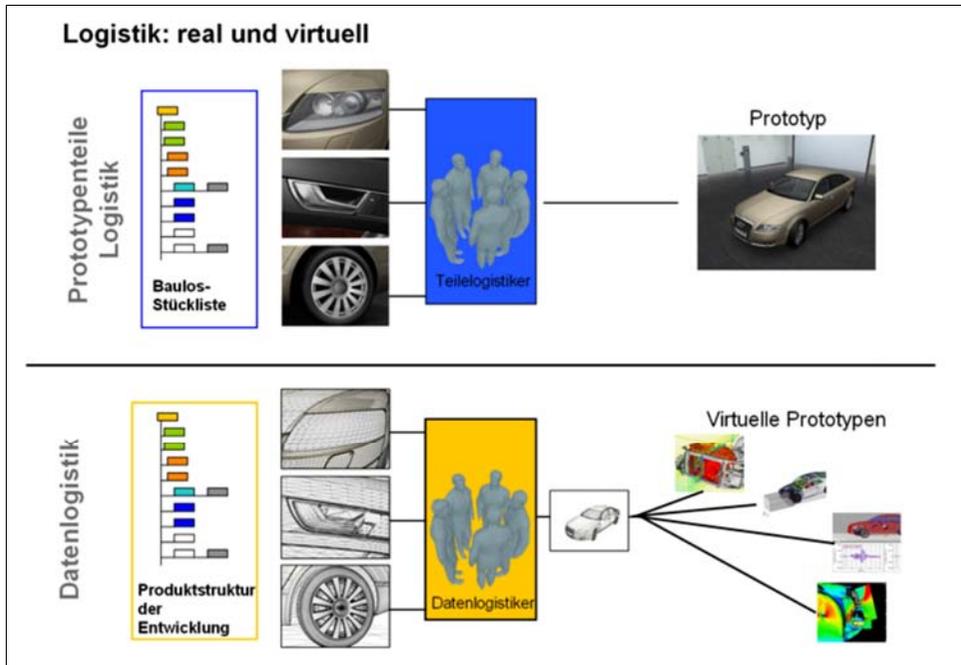


Bild 1-13: Teile- und Datenlogistikprozess.

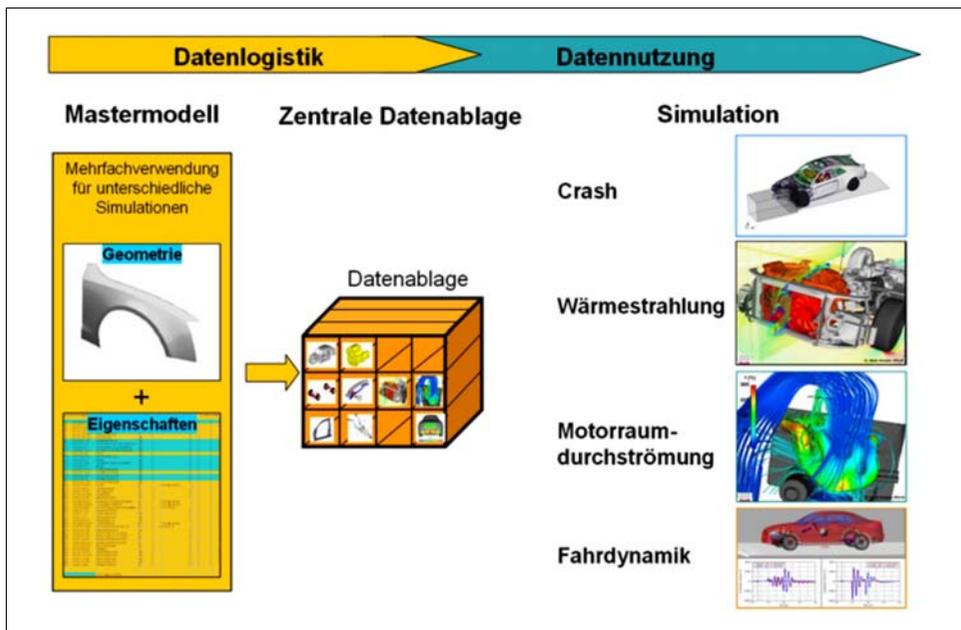


Bild 1-14: Mastermodell mit Mehrfachverwendung.

Um die Komplexität der Anforderungen bedienen zu können, ist ein zielgerichteter Anflugprozess erforderlich. Dieser gliedert sich in vier Meilensteine (**Bild 1-15**). Nach der Definition der für die Funktionsauslegung erforderlichen Daten und Konfigurationen wird in einem weiteren Meilenstein eine Bestandsaufnahme des Füllungsgrades festgehalten. Vor dem Datenfreeze findet eine Kontrolle der Geometrie-Daten im DMU-Freeze statt.

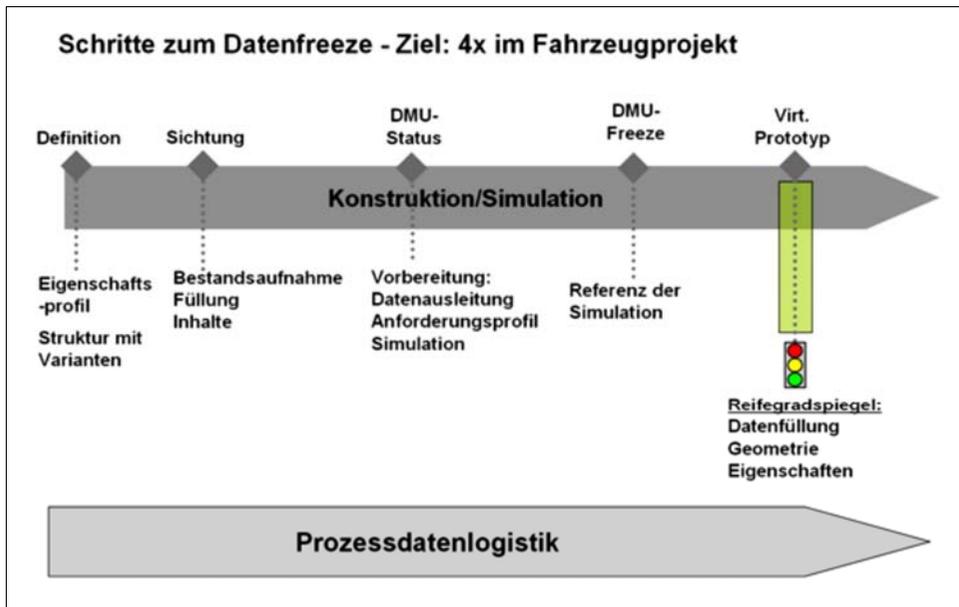


Bild 1-15: Datenanflugprozess.

Die sich ergebende Produktreife trägt dazu bei, den Einsatz physischer Prototypen zu minimieren. Darüber hinaus ist es möglich, Geometrien und Eigenschaften des Fahrzeugs frühzeitig erlebbar zu machen und größere Produktrisiken zu vermeiden.

1.1.2.4 Simulation als Prozessintegrator

Den in Kap. 1.1.2.1 aufgeführten Anforderungen konnte die Simulation in der Vergangenheit oft nicht standhalten. Dazu sei im Folgenden ein wesentlicher Prozessgrund angeführt.

Die Rolle der Simulation im Entwicklungsprozess war in der Vergangenheit maßgeblich getrieben durch die Begleitung des geometrischen Auslegungsprozesses auf Bauteil-, System- und Gesamtfahrzeugebene (Digital Mock Up). Die funktionalen und eigenschaftsbasierten Aspekte wurden primär durch Komponentensimulationen unterstützt. Fehlende bzw. unzureichende Simulationsmethoden auf Fahrzeugebene führten zur Pro-

zesslücke zwischen der Zielfahrzeugpositionierung am Anfang des Produktentstehungsprozesses und den daraus abgeleiteten Anforderungen an die Systeme und Bauteile. Diese mehrmonatige Konstruktionsphase mündete in Fahrzeugprototypen zur Überprüfung der einst aufgestellten Zielfahrzeuganforderungen (**Bild 1-16**).

Die Ergebnisse dieses Entwicklungsprozesses waren:

- ◆ hohe Entwicklungsrisiken im Produktentstehungsprozess bis zur erprobungstauglichen Darstellung der ersten Prototypen
- ◆ späte Darstellung der Gesamtfahrzeugeigenschaften im Produktentstehungsprozess
- ◆ hoher versuchstechnischer Aufwand inkl. hoher Prototypenanzahl
- ◆ mehrere und späte Entwicklungsschleifen.

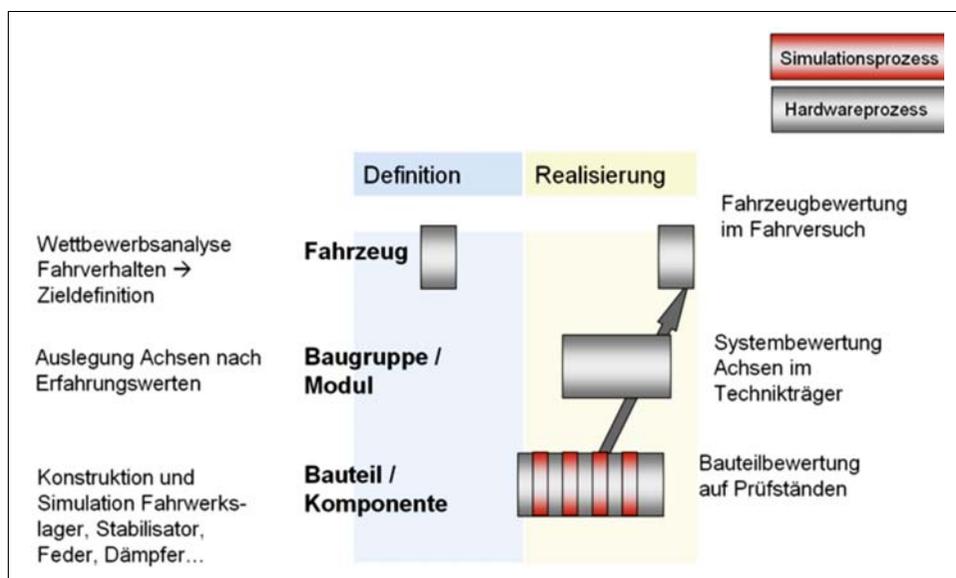


Bild 1-16: Unterbrochene Prozessketten in der Vergangenheit am Beispiel Fahrverhalten.

Die konsequente Weiterentwicklung der Simulationsmethoden führte in den letzten Jahren mehr und mehr zur Erschließung neuer, in der Vergangenheit teilweise unbesetzter Felder und zur Schließung von Prozesslücken im Produktprozess. So wurden immer komplexere Modelle schrittweise zu einer Methodenqualität entwickelt, die es heute erlaubt, auch auf der Eigenschaftsebene des Gesamtfahrzeugs gute bis sehr gute Ergebnisse zu erzielen (**Bild 1-17**). Künftig geht es, neben der festen Etablierung dieser Methoden im Produktentstehungsprozess, um die interdisziplinäre Verknüpfung der Simulationsmethoden, um daraus weitere Potenziale zu erschließen.

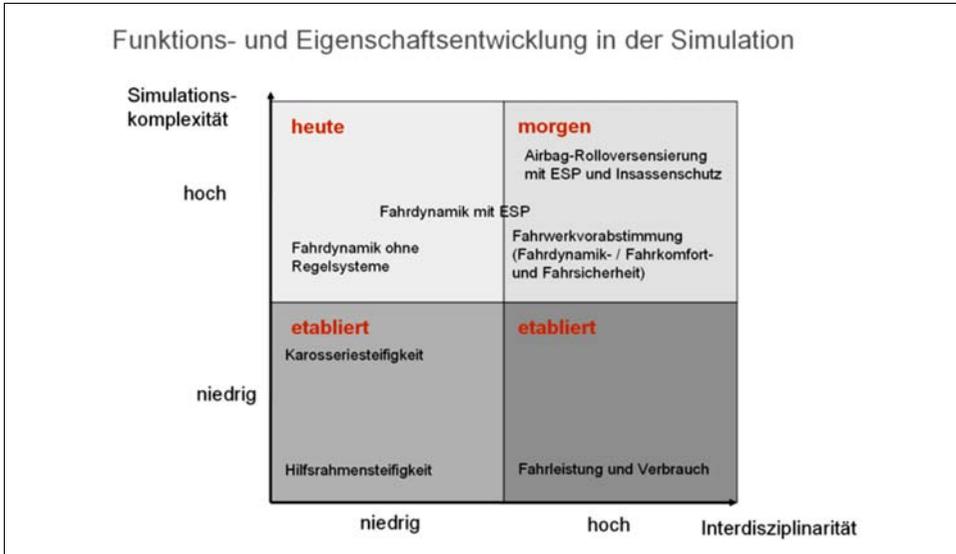


Bild 1-17: Funktionale / Eigenschaftsbasierte Simulation.

Erst mit der Erschließung der Gesamtfahrzeugeigenschaften für die Simulation können jetzt schrittweise die Prozesslücken im Produktentstehungsprozess effizient geschlossen werden (**Bild 1-18**). Dadurch erhöht sich die Prozessqualität deutlich und die Arbeitsweise aller im Produktprozess Beteiligten verändert sich nachhaltig. Eigenschaftsableitung und Eigenschaftsverfolgung sind zwei zentrale Aspekte der neuen Arbeitsweise.

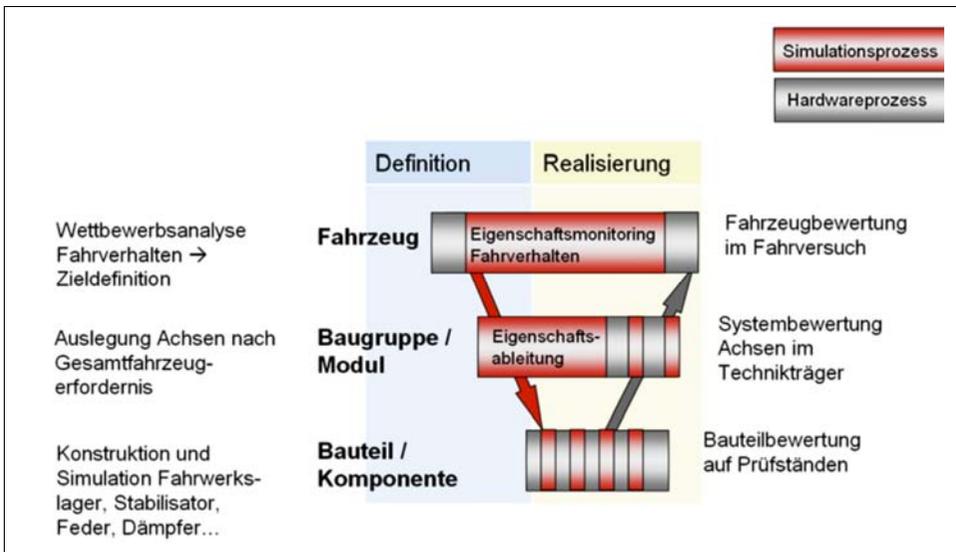


Bild 1-18: Geschlossene Prozessketten durch die Simulation am Beispiel Fahrverhalten.

1.1.3 Die Verwendung der virtuellen Techniken zur Komponenten- und Eigenschaftsentwicklung

1.1.3.1 Eigenschaftsableitung

Ausgangsbasis und Leitfaden im Produktprozess ist ein klares Eigenschaftsprofil, ausgerichtet am Kundenbedürfnis. Mit dem definierten Ziel-Eigenschaftsprofil wird der Entwicklungsprozess gestartet und an diesem Profil werden die Entwicklungsstände immer wieder gespiegelt.

Die Herausforderung dabei ist:

- ◆ die Anforderungen aus den Zieleigenschaften in Einklang mit den Bauteil- und Komponentenanforderungen (Gewicht, Kosten, Modularität, Herstellbarkeit, Qualität) zu bringen
- ◆ die Komponentenfunktionen zueinander zu einem stimmigen Gesamtfahrzeug zusammenzuführen und unerwünschte Interaktionen bspw. zwischen geregelten und mechanischen Systemen zu vermeiden
- ◆ die Fahrzeugeigenschaften bestmöglich zueinander in Abstimmung zu bringen, dass heißt Zielkonflikte frühzeitig aufzuzeigen und zur Abwägung zu führen.

Im gewählten Beispiel der Eigenschaft Fahrverhalten wird zunächst eine konsequente Stärken-Schwächen-Analyse des Vorgängerfahrzeugs und der zu erwartenden Wettbewerbsprodukte für den Zeitpunkt der Markteinführung des neuen Fahrzeugs vorgenommen. Stark gefragt sind hierbei die Einschätzungen aus dem Feld, dem Fahrversuch und aus dem Marketing. Unter Berücksichtigung konzeptioneller Randbedingungen wird daraus eine Zielpositionierung formuliert. Mittels eines MKS-Gesamtfahrzeugmodells lassen sich erste konzeptionelle Änderungen am Fahrzeug bewerten. Dazu werden zunächst die wichtigsten Einflussgrößen wie Fahrzeugmasse, Achslastverteilung, Schwerpunktöhe, Achskinematiken variiert. Die **Bilder 1-19a und 1-19b** zeigen dabei die Ergebnisse einer Sensitivitätsstudie durch Kopplung des Mehrkörpersystem-Modells der Vorderachse mit einem DoE-Tool (Design of Experiments, das heißt statistischer Versuchsplanung). Dabei repräsentiert jeder Linienzug eine Kombination aus Lagersteifigkeiten. Ausgewertet sind typische Achskenngößen wie Längs- und Quersteifigkeit, Sturznachgiebigkeit und Spur für definierte Lastfälle wie Kurvenbremsen und stationäre Kreisfahrt – dargestellt auf den vertikalen Achsen. Durch Eingrenzung des Wertebereichs der Achskenngößen auf die aus der Gesamtfahrzeugsimulation ermittelten Zielgrößen wurden interaktiv die besten Varianten ausgewählt (**Bild 1-19b**).

Auf diese Weise konnten automatisiert hunderte von kinematischen als auch elastokinematischen Variationen durchgeführt werden. Ausgewählte Designs der Kinematik und Elastokinematik wurden danach in der Gesamtfahrzeugsimulation hinsichtlich ihrer fahrdynamischen Performance überprüft.

Um sowohl qualitative als auch quantitative Einschätzungen zum Zielwettbewerb zu ermöglichen, werden in der Simulation auch Wettbewerbsfahrzeuge aufgebaut und dem Fahrzeugkonzept gegenübergestellt.