

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Gesamtfahrzeug</b> .....	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
<b>2</b>	<b>Elektronik</b> .....	<b>99</b>
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
<b>3</b>	<b>Motor</b> .....	<b>154</b>
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
<b>4</b>	<b>Getriebe</b> .....	<b>249</b>
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
<b>5</b>	<b>Antriebsstrang/Hybrid</b> .....	<b>286</b>
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 signalflussorientierte 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
<b>6</b>	<b>Nebenaggregate</b> .....	<b>345</b>
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 <sup>©</sup> .....	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
	<b>Ausblick</b> .....	<b>380</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	<b>381</b>