

# Inhaltsverzeichnis

<b>Mitarbeiterverzeichnis</b> .....	XIII
<b>1 Einleitung</b> .....	1
Konrad Reif, Karl E. Noreikat und Kai Borgeest	
1.1 Definition, Einsatz, Anforderungen .....	1
1.1.1 Vorteile des Hybridantriebs .....	2
1.1.1.1 Weniger CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch Hybridfahrzeuge .....	2
1.1.1.2 Mehr Fahrdynamik und Fahrkomfort durch Hybridfahrzeuge .....	3
1.1.1.3 Hybridfahrzeuge als Zwischenschritt zu Elektrofahrzeugen .....	3
1.1.2 Technische Neuentwicklungen .....	3
1.2 Geschichte .....	4
1.2.1 Frühe Motivation .....	4
1.2.2 Umweltbewusstsein und Ölpreis .....	4
1.2.3 Fahrzeuge .....	6
Literatur .....	6
<b>2 Hybride Antriebsstrukturen</b> .....	7
Siegfried Saenger-Zetina und Markus Wagner	
2.1 Übersicht über die Komponenten .....	7
2.1.1 Einführung .....	7
2.1.2 Kombination von Wandlern und Speichern .....	8
2.1.2.1 Energiewandler .....	8
2.1.2.2 Energiespeicher .....	9
2.1.2.3 Drehzahl- und Drehmomentwandler .....	13
2.2 Vorteile eines Hybridantriebs .....	14
2.2.1 Technische Vorteile .....	15
2.2.1.1 Elektrisches Fahren .....	17
2.2.1.2 Rekuperatives Bremsen .....	17
2.2.1.3 Lastpunktverschiebung .....	21

2.2.1.4	Boosten	23
2.2.1.5	Start-Stopp-Funktion	24
2.2.1.6	Kraftstoffverbrauch und Wirkungsgrad im Testzyklus	25
2.2.2	Subjektive Vorteile	26
2.2.2.1	Fahr- und Schaltkomfort	26
2.2.2.2	Geräusch- und Schwingungsverhalten	27
2.3	Konzepte und Betriebsweisen	27
2.3.1	Serielle Hybride	28
2.3.1.1	Konstruktive Merkmale	28
2.3.1.2	Varianten des seriellen Hybridantriebs	29
2.3.1.3	Beispiele von seriellen Hybriden	30
2.3.2	Parallele Hybride	31
2.3.2.1	Konstruktive Merkmale	31
2.3.2.2	Ausprägungen von Parallelhybriden	33
2.3.2.3	Beispiele von Parallelhybriden	39
2.3.3	Leistungsverzweigte Hybride	39
2.3.3.1	Konstruktive Merkmale	39
2.3.3.2	Beispiel von Leistungsverzweigungen	52
2.3.3.3	Beispiele von leistungverzweigten Hybridantrieben	56
2.4	Klassifizierung nach Funktionalität	62
2.4.1	Anforderungen	62
2.4.2	Start-Stopp-Systeme	62
2.4.2.1	Die Start-Stopp-Funktion	63
2.4.2.2	Starteinrichtungen für Start-Stopp-Systeme	65
2.4.3	Hybrid-Funktionen	67
2.4.3.1	Mikro-Hybrid	67
2.4.3.2	Mild-Hybrid	67
2.4.3.3	Voll-Hybrid	67
2.4.4	Extern aufladbare Hybride	68
2.4.4.1	Hintergrund	68
2.4.4.2	Varianten	68
2.4.4.3	Lademöglichkeiten von Batterien	69
Literatur		72
3	<b>Komponenten des Hybridantriebs</b>	75
	Notker Amann, Matthias Beck, Otmar Bitsche, Pedro Casals, Bernd Cebulski, Christine Ehret, Jochen Faßnacht, Andreas Greff, Franz Gretzmeier, Günter Gutmann, Frank Hentschel, Markus van Heyden, Markus G. Kliffken, Dieter Kraft, Axel Müller, Roland Norden, Robert Stawiarski, Markus Wagner, Toni Viscido und Harald Weiler	
3.1	Auslegung des Verbrennungsmotors	75
3.1.1	Ottomotor	78

3.1.2	Dieselmotor	82
3.1.3	Alternative Antriebe	85
3.1.3.1	Stirlingmotor	85
3.1.3.2	Dampfmotor	88
3.1.3.3	Gasturbine	90
3.1.4	Zusammenfassung	92
3.2	Elektrische Maschinen	93
3.2.1	Überblick	93
3.2.1.1	Allgemeines zu elektrischen Maschinen	93
3.2.1.2	Prinzipien der physikalischen Wirkungsweise	94
3.2.1.3	Grundzüge der Drehfeldtheorie	97
3.2.1.4	Werkstoffe	105
3.2.2	Synchronmaschinen	107
3.2.2.1	Prinzipieller Ständeraufbau	107
3.2.2.2	Prinzipielle Läuferbauformen	108
3.2.2.3	Sonderform Transversalflussmaschine	113
3.2.2.4	Wirkungsweise	115
3.2.2.5	Ausführungsbeispiele	119
3.2.2.6	Vor- und Nachteile bei Hybridfahrzeugen	121
3.2.3	Asynchronmaschinen	122
3.2.3.1	Einleitung	122
3.2.3.2	Prinzipieller Aufbau der Drehstrom-Asynchronmaschine mit Käfigläufer	123
3.2.3.3	Wirkungsweise	125
3.2.3.4	Betriebsverhalten	127
3.2.3.5	Vor- und Nachteile bei Hybridfahrzeugen	130
3.2.3.6	Anwendungsbeispiele	130
3.2.3.7	Ausführungsbeispiele	132
3.2.4	Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine	134
3.2.4.1	Einführung	134
3.2.4.2	Mathematisches Modell der permanenterregten Synchronmaschine	135
3.2.4.3	Aufbau der feldorientierten Regelung	138
3.2.4.4	Sensorik	141
3.2.4.5	Sonstige Regelungselemente für Hybridfahrzeuge	142
3.3	Elektrik und Elektronik	143
3.3.1	Energiebordnetz	144
3.3.1.1	Bordnetztopologien	144
3.3.1.2	Bordnetzsicherheit	160
3.3.2	Steuergeräte und Kommunikation	163
3.3.2.1	Funktionsorientierte Vernetzungsstrategie	164

3.3.2.2	Zonenorientierte Vernetzungsstrategie . . . . .	166
3.3.2.3	Architekturen . . . . .	168
3.3.2.4	Bussysteme . . . . .	169
3.3.2.5	Anbindung des Fahrzeugs an Infrastrukturen . . . . .	173
3.3.3	Leistungselektronik . . . . .	174
3.3.3.1	Grundlagen und Systemeinordnung . . . . .	174
3.3.3.2	Technik und Bauelemente . . . . .	174
3.3.3.3	Topologien und Schaltungstechnik . . . . .	176
3.3.3.4	Zusätzliche Anforderungen . . . . .	179
3.3.3.5	Aktuelle Entwicklungen . . . . .	180
3.4	Energiespeicher . . . . .	184
3.4.1	Überblick: Rolle der Energiespeicher . . . . .	184
3.4.2	Bleibatterie . . . . .	185
3.4.2.1	Elektrochemie des Bleiakkumulators . . . . .	185
3.4.2.2	Aufbau des Bleiakkumulators . . . . .	188
3.4.2.3	Bauarten . . . . .	194
3.4.2.4	Eigenschaften von Bleibatterien . . . . .	196
3.4.2.5	Stand der Technik . . . . .	201
3.4.2.6	Entwicklungstendenzen bei Bleiakkumulatoren für Fahrzeuge . . . . .	205
3.4.3	Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren . . . . .	207
3.4.4	Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren . . . . .	212
3.4.4.1	Elektrochemie . . . . .	213
3.4.4.2	Stand der Technik . . . . .	215
3.4.4.3	Zellendesign . . . . .	215
3.4.4.4	Betriebs- und Alterungsverhalten . . . . .	220
3.4.5	Lithium-Ionen-Batterien . . . . .	222
3.4.5.1	Elektrochemie . . . . .	225
3.4.5.2	Stand der Technik . . . . .	226
3.4.5.3	Zellenkomponenten . . . . .	228
3.4.5.4	Zellendesign . . . . .	232
3.4.6	Anwendung elektrochemischer Speicher in Kraftfahrzeugen . . . . .	235
3.4.6.1	Bordnetz . . . . .	235
3.4.6.2	Elektrochemische Speichersysteme für Hybridfahrzeuge . . . . .	238
3.4.6.3	Ausblick . . . . .	242
3.4.7	Hydraulische Hybridantriebe und Energiespeicher . . . . .	242
3.4.7.1	Abgrenzung zum elektrischen Hybrid . . . . .	242
3.4.7.2	Aufbau und Systemkomponenten des hydrostatisch-regenerativen Bremssystems . . . . .	245
3.4.7.3	Ergebnisse an einem Abfallsammelfahrzeug mit hydrostatisch-regenerativem Bremssystem . . . . .	247

3.4.7.4	Ergebnisse an einem Abfallsammelfahrzeug mit hydrostatisch-regenerativem Bremssystem . . . . .	249
3.4.8	Schwungräder . . . . .	249
3.5	Fahrzeuggetriebe . . . . .	253
3.5.1	Grundlagen . . . . .	253
3.5.2	Getriebearten . . . . .	259
3.5.2.1	Getriebe mit Zugkraftunterbrechung . . . . .	260
3.5.2.2	Getriebe ohne Zugkraftunterbrechung . . . . .	265
3.5.3	Einfluss der Hybridisierung auf das Getriebe . . . . .	274
3.6	Nebenaggregate . . . . .	279
3.6.1	Einleitung . . . . .	279
3.6.2	Mechanischer und elektrischer Antrieb . . . . .	279
3.6.3	Einsatz von Nebenaggregaten in unterschiedlichen Antriebssträngen . . . . .	280
3.6.3.1	Konventioneller Antriebsstrang . . . . .	281
3.6.3.2	Teilweise elektrifizierter Antriebsstrang . . . . .	281
3.6.3.3	Vollständig elektrifizierter Antriebsstrang . . . . .	284
3.6.4	Aggregate im Hybridfahrzeug . . . . .	286
3.6.4.1	Elektrische Maschine . . . . .	286
3.6.4.2	Lenkkraftunterstützung . . . . .	287
3.6.4.3	DC/DC-Wandler zur Bordnetzversorgung . . . . .	290
3.6.4.4	Potentialtrennender DC/DC-Wandler zur Bordnetzstabilisierung . . . . .	291
3.6.5	Betrieb von Nebenaggregaten im Traktionsnetz . . . . .	291
3.6.6	Energiemanagement . . . . .	292
	Literatur . . . . .	293
<b>4</b>	<b>Betriebsstrategien . . . . .</b>	<b>301</b>
	Jan-Welm Biermann und Christian Renner	
4.1	Einleitung . . . . .	301
4.2	Antriebskomponenten . . . . .	302
4.2.1	Verbrennungsmotor . . . . .	302
4.2.2	Elektrische Maschine . . . . .	303
4.2.3	Energiespeicher . . . . .	304
4.2.4	Nebenaggregate . . . . .	305
4.3	Entwurf von Betriebsstrategien . . . . .	306
4.3.1	Basisanforderungen . . . . .	306
4.3.1.1	Start-Stopp-Betrieb . . . . .	307
4.3.1.2	Boosten . . . . .	307
4.3.1.3	Rekuperation . . . . .	308
4.3.1.4	Elektrisches Fahren . . . . .	309
4.3.1.5	Lastpunktanhebung und Lastpunktverlagerung . . . . .	311

4.3.2	Entwicklungsprozess	315
4.4	Anwendungsbeispiel	317
4.4.1	Fahrzeug	317
4.4.2	Betriebsstrategie	318
4.4.3	Prädiktive Betriebsstrategie	321
	Literatur	323
5	<b>Simulation und Auslegung</b>	325
	Dieter Kraft, Thomas Huber und Sandra Sterzing-Oppel	
5.1	Modellierung und Simulation	325
5.2	Validierung der Simulationsmodelle	328
5.3	Optimale Auslegung von Hybridfahrzeugen	330
5.3.1	Bestimmung von Zielgrößen	330
5.3.2	Optimierung einer einzelnen Zielgröße	331
5.3.3	Optimierung mehrerer Zielgrößen	332
5.3.4	Datenbasierte Modellierung	333
5.4	Ergebnisse der optimalen Auslegung	335
5.4.1	Ausgangspunkt und Ziele	335
5.4.2	Modellierung	336
5.4.3	Optimierung	338
5.4.4	Vergleich von Hybridkonzepten	338
5.4.5	Validierung der Ergebnisse	338
	Literatur	339
	<b>Sachverzeichnis</b>	341