

# Fortschritt-Berichte VDI

**Reihe 12**

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Peter Wältermann,  
Borchen

**Nr. 447**

**Der serielle Hybridantrieb**  
**Vom rechnergestützten Entwurf**  
**zur Hardware-in-the-Loop-**  
**Realisierung**

**VDI Verlag**

*HLuHB Darmstadt*



14956204

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Das Hybridfahrzeug als mechatronisches System	2
1.2	Motivation und Zielsetzung	3
1.3	Gliederung und Aufbau der Arbeit	4
<b>2</b>	<b>Rechnerunterstützter Entwurf mechatronischer Systeme</b>	<b>6</b>
2.1	Mechatronik und mechatronische Systeme	6
2.2	Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme	7
2.3	Beschreibungsformen mechatronischer Systeme	10
2.4	Stand der Technik bei Programmsystemen zur Modellierung, Analyse und Synthese	12
2.5	Objektmodell der Mechatronik und darauf aufbauende Werkzeugumgebung	14
2.6	Ansatz zur Strukturierung mechatronischer Systeme	16
<b>3</b>	<b>Kfz-Hybridantriebe</b>	<b>19</b>
3.1	Historischer Abriss	19
3.2	Alternative Antriebe: Einflussfaktoren, gesetzliche Rahmenbedingungen und Antriebsstrukturen	20
3.2.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen für alternative Antriebsstrukturen	21
3.2.2	Fahrzeug-Antriebsstrukturen und ihre Klassifikation	23
3.3	Vorstellung einiger ausgewählter Konzepte und Fahrzeuge	25
3.3.1	Reiner Elektroantrieb (Batteriefahrzeug)	25
3.3.2	Integrierter Starter-Generator	27
3.3.3	Parallel-Hybridantrieb	28
3.3.4	Serieller Hybridantrieb	30
3.3.5	Leistungsverzweigter Hybridantrieb / Mischformen	33
3.3.6	Brennstoffzellenfahrzeuge	35
3.4	Komponenten für den seriellen Hybridantrieb	38
3.4.1	Verbrennungskraftmaschinen	38
3.4.2	Elektrische Energiespeicher	41
3.4.2.1	Batterien	42
3.4.2.2	Elektromechanische Schwungradspeicher	44
3.4.2.3	Doppelschichtkondensatoren	44
3.4.3	Elektrische Maschinen	45
3.5	Realisierte Antriebsstruktur eines seriellen Hybridantriebs	48
<b>4</b>	<b>Hardware-in-the-Loop-Prüfstand eines seriellen Hybridantriebs</b>	<b>51</b>
4.1	Hardware-in-the-Loop-Simulation	51
4.1.1	Definition	51
4.1.2	Vorteile durch die Anwendung von HiL-Simulation	51
4.1.3	Bestandteile und Voraussetzungen für HiL-Systeme	52

<b>4.2 Hardware- und Software-Umgebungen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation</b>	<b>54</b>
4.2.1 dSPACE GmbH	54
4.2.2 ETAS GmbH	55
4.2.3 Integrated Systems, Inc.	56
4.2.4 RealTech AG / The Mathworks, Inc.	56
4.2.5 Weitere Anbieter von HIL-Systemen für die Fahrzeugtechnik	57
4.2.6 Eigenentwicklung des MLAP: IPANEMA	57
<b>4.3 Hardware-in-the-Loop-Prüfstand des seriellen Hybridantriebs</b>	<b>59</b>
<b>4.4 Prüfstandskomponenten</b>	<b>61</b>
4.4.1 Verbrennungsmotor	61
4.4.2 Generator	62
4.4.3 Batterie	63
4.4.4 Antriebsmotoren	65
4.4.5 Bremsmaschinen	66
<b>4.5 Verknüpfung der Komponenten zum Gesamtsystem</b>	<b>67</b>
4.5.1 Komponentenorientierte Sicht auf das Gesamtsystem	67
4.5.2 Funktionsstruktur der Echtzeitumgebung	69
4.5.3 Hardware der Echtzeitumgebung	72
4.5.4 Graphische Benutzeroberfläche	72
<b>5 Modellierung des seriellen Hybridantriebs</b>	<b>74</b>
<b>5.1 Modellierungsansätze: Effect-Cause- und Cause-Effect-Methode</b>	<b>74</b>
5.1.1 Effect-Cause-Methode: Modelle von konventionellem und hybridem Antriebsstrang	75
<b>5.2 Modelle der Hybridfahrzeug-Komponenten</b>	<b>78</b>
5.2.1 Modell der APU	78
5.2.1.1 Verbrennungsmotor	79
5.2.1.2 Generator	82
5.2.1.3 APU-Management	83
5.2.1.4 APU als geregeltes Gesamtsystem	85
5.2.2 Modell der Ni/Cd-Batterie	86
5.2.2.1 Grundlagen	86
5.2.2.2 Effekte und Einflußfaktoren	88
5.2.2.3 Struktur des implementierten Batteriemodells	92
5.2.2.4 Zusammenfassung und Fazit	93
5.2.3 Modell des Antriebsteils des Hybridantriebs	94
5.2.3.1 Tandemmotor	94
5.2.3.2 Modelle der Fahrzeugdynamik	97
5.2.3.3 Antriebsmanagement	102
5.2.3.4 Antriebssystem als geregeltes Gesamtsystem	103
5.2.4 Fahrermodelle	104
5.2.5 Anregungsmodelle	105
5.2.5.1 Fahrzyklen	105
5.2.5.2 Weitere Anregungsmodelle und Testprozeduren	108
5.2.5.3 Komplexe Umgebungsmodelle	108
<b>5.3 Struktur des Gesamtsystems Hybridantrieb</b>	<b>109</b>
<b>6 Prüfstandsmodell und HIL-Konfiguration</b>	<b>111</b>
<b>6.1 Prüfstandsmodell</b>	<b>111</b>
<b>6.2 Übergang vom Modell zum realen Prüfstand</b>	<b>113</b>
<b>6.3 Mögliche weiterführende Prüfstandsuntersuchungen</b>	<b>114</b>

<b>7 Beeinflussung von Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs</b>	<b>116</b>
<b>7.1 Beeinflussung der Längsdynamik</b>	<b>116</b>
7.1.1 Fahrerklassifikation	117
7.1.2 Zielgrößen und Bewertungskriterien	120
7.1.3 Regelkonzepte	121
7.1.4 Bestimmung der Antriebsmanagement-Parameter	122
7.1.5 Beispielsimulation	125
<b>7.2 Beeinflussung der Querdynamik durch geregelten Elektro-Einzelradantrieb</b>	<b>127</b>
7.2.1 Stand der Technik	127
7.2.1.1 Fahrdynamik-Regelsysteme	128
7.2.1.2 Allradlenkung	129
7.2.1.3 Giermomentenregelung mittels regelbarer Kupplungen	129
7.2.1.4 Giermomentenregelung mittels elektrischen Einzelradantriebs	129
7.2.2 Regelungskonzepte	130
7.2.2.1 Überblick	130
7.2.2.2 Ansatz von Ackermann zur robusten entkoppelten Regelung von Gier- und Querbewegung	132
7.2.2.3 Übertragung des Ansatzes auf den elektrischen Einzelradantrieb	135
7.2.2.4 Simulationsergebnisse	138
7.2.3 Fazit	140
<b>8 Energiemanagement für den seriellen Hybridantrieb</b>	<b>141</b>
<b>8.1 Anforderungen und Randbedingungen</b>	<b>142</b>
<b>8.2 Betriebsstrategien für den seriellen Hybridantrieb</b>	<b>143</b>
8.2.1 Begriffe und Definitionen	144
8.2.2 Einflußgrößen und ihre Bestimmung	146
8.2.3 Standard-Betriebsstrategien	148
8.2.3.1 Thermostat-Modus	149
8.2.3.2 Power-Tracking-Modus	150
8.2.4 Ergebnisse der einfachen Strategien	151
8.2.5 Modifizierter Power-Tracking-Modus mit unterer Leistungsbegrenzung	153
<b>8.3 Analytischer Ansatz unter Berücksichtigung des Batteriewirkungsgrads (Kombinierter Modus)</b>	<b>154</b>
8.3.1 Abschätzung des Batteriewirkungsgrads	155
8.3.2 Abschätzung des Gesamtwirkungsgrads zur Bereitstellung der elektrischen Energie	156
8.3.3 Betriebsstrategie des Kombinierten Modus	160
8.3.4 Intelligente An- und Abschaltstrategie	161
8.3.5 Fazit und Ergebnisse	163
<b>8.4 Ausblick: Adaptive Online-Anpassung der Betriebsstrategie</b>	<b>165</b>
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>167</b>
<b>10 Anhang</b>	<b>170</b>
<b>10.1 Komponentenspezifikation</b>	<b>170</b>
10.1.1 Mercedes-Benz-Ottomotor	170
10.1.2 Mannesmann-Sachs-Generator	171
10.1.3 Mannesmann-Sachs-Tandemmotor	172
10.1.4 Batteriesystem	173
10.1.5 Bremsmaschinen	174
<b>10.2 CAN-Kommunikationsstruktur am Hybridantrieb-Prüfstand</b>	<b>175</b>
<b>10.3 Anpassungshardware</b>	<b>178</b>
<b>11 Literaturverzeichnis</b>	<b>180</b>