

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Mobilität im 21. Jahrhundert</b> .....	<b>13</b>
1.1 <i>Ökologie als treibende Kraft</i> .....	14
1.1.1 Begrenzte Ressourcen und steigender Energieverbrauch	14
1.1.2 Klima- und Smogproblematik .....	17
1.2 <i>Politische Rahmenbedingungen</i> .....	20
1.2.1 Kyoto-Protokoll .....	20
1.2.2 Förderung verbrauchsgünstiger Autos in Deutschland	21
1.2.3 ZEV-Abgasgesetzgebung in Kalifornien .....	23
1.3 <i>Gesellschaftliche Herausforderungen</i> .....	24
1.3.1 Mobilität .....	24
1.3.2 Ökonomische Aspekte der Mobilität .....	26
<i>Zusammenfassung</i> .....	28
<b>2 Fahrzeuge mit modifiziertem Verbrennungsmotor</b> .....	<b>29</b>
2.1 <i>Biodieselfahrzeuge</i> .....	29
2.1.1 Modifikationen am Fahrzeug .....	29
2.1.2 Kraftstoffherstellung .....	30
2.1.3 Für und wider Biodiesel .....	31
2.2 <i>Erdgasfahrzeuge</i> .....	33
2.2.1 Modifikationen am Fahrzeug .....	33
2.2.2 Fahrzeugbeispiel .....	34
2.2.3 Marktchancen von Erdgasfahrzeugen .....	35
2.3 <i>Wasserstofffahrzeuge</i> .....	36
2.3.1 Modifikationen am Fahrzeug .....	36
2.3.2 Fahrzeugbeispiele .....	37
2.3.3 Marktchancen von Fahrzeugen mit Wasserstoff- Verbrennungsmotor .....	38
<i>Zusammenfassung</i> .....	39
<b>3 Batterieelektrische Fahrzeuge</b> .....	<b>41</b>
3.1 <i>Fahrzeugaufbau</i> .....	41
3.1.1 Elektromotoren .....	42
3.1.1.1 Grundlagen .....	44
3.1.1.2 Gleichstrommotor .....	46

## Inhaltsverzeichnis

3.1.1.3 Drehstrommotoren	47
3.1.1.4 Geschalteter Reluktanzmotor	49
3.1.1.5 Bürstenloser Gleichstrommotor	50
3.1.2 Batteriesysteme und Energiespeicher	51
3.1.2.1 Grundlagen	52
3.1.2.2 Bleiakkumulator	53
3.1.2.3 Nickel-Cadmium-Batterie	54
3.1.2.4 Nickel-Metallhydrid-Batterie	55
3.1.2.5 Lithiumionen-Batterie	56
3.1.2.6 Hochtemperaturbatterien	56
3.1.3 Ladegeräte	58
3.1.4 Stromrichter	59
3.1.5 Kraftübertragung	61
3.1.6 Nebenaggregate	62
3.2 Fahrzeugbeispiele	62
3.2.1 Nutzfahrzeuge	62
3.2.2 Personenwagen	64
3.3 Marktchancen batterieelektrischer Fahrzeuge	65
3.3.1 Fahrleistung	66
3.3.2 Wirtschaftlichkeit	67
3.3.3 Emissionen und Primärenergieverbrauch	68
Zusammenfassung	69
<b>4 Fahrzeuge mit Hybridantrieb</b>	<b>73</b>
4.1 Strukturvarianten	73
4.1.1 Serieller Hybridantrieb	73
4.1.2 Paralleler Hybridantrieb	76
4.1.3 Mischformen	77
4.2 Komponenten	78
4.2.1 Energiewandler	78
4.2.2 Energiespeicher	79
4.2.2.1 Batterien	80
4.2.2.2 Hochenergiekondensatoren	80
4.2.2.3 Schwungräder	80
4.2.3 Getriebe	81
4.3 Betriebsstrategien	82
4.4 Fahrzeugbeispiele	83
4.5 Marktchancen von Hybridfahrzeugen	85
Zusammenfassung	86

<b>5 Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellensystem</b> .....	<b>89</b>
5.1 Brennstoffzellen.....	89
5.1.1 Geschichte der Brennstoffzelle .....	90
5.1.2 Aufbau und Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle ....	92
5.1.3 Brennstoffzellentypen .....	93
5.1.3.1 Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle .....	95
5.1.3.2 Direkt-Methanol-Brennstoffzelle .....	99
5.1.3.3 Alkalische Brennstoffzelle .....	103
5.1.3.4 Phosphorsäure-Brennstoffzelle .....	104
5.1.3.5 Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle .....	105
5.1.3.5 Oxidkeramische Brennstoffzelle .....	107
5.1.3.6 Regenerative Brennstoffzelle .....	108
5.1.4 Komponenten eines Polymer-Elektrolyt- Brennstoffzellenstacks .....	109
5.1.4.1 Polymermembran .....	109
5.1.4.2 Elektroden und Katalysatoren .....	111
5.1.4.3 Bipolarplatten .....	115
5.1.4.4 Wassermanagement .....	116
5.1.4.5 Brennstoffzellenstacks .....	117
5.1.5 Fertigungsverfahren .....	121
5.1.6 Thermodynamik einer Brennstoffzelle .....	122
5.1.6.1 Wirkungsgrad .....	122
5.1.6.2 Freie Enthalpie .....	124
5.1.6.3 Reaktionsenthalpie und reversibles Zellpotenzial .	125
5.1.6.4 Tatsächliche Zellspannung – Elektrodenkinetik ..	128
5.1.6.5 Stromstärke und Brennstoffverbrauch .....	131
5.1.6.6 Leistung einer Brennstoffzelle .....	133
5.2 Kraftstoffspeicher .....	134
5.2.1 Druckspeicher .....	135
5.2.2 Speicher für Flüssigwasserstoff .....	136
5.2.3 Metallhydridspeicher .....	137
5.2.4 Methanolspeicher .....	139
5.2.5 Vergleich der Speichersysteme .....	140
5.2.5.1 Speicherdichte .....	140
5.2.5.2 Energieverluste und Energiebilanz .....	142
5.2.5.3 Kosten .....	142
5.3 Systemtechnik .....	143
5.3.1 Versorgung mit reinem Wasserstoff und Luftsauerstoff	144
5.3.2 Wasserstofferzeugung aus Kohlenwasserstoffen .....	145

## Inhaltsverzeichnis

5.3.2.1 Reformierung .....	145
5.3.2.2 Gasvorreinigung .....	148
5.3.2.3 Gasfeinreinigung .....	150
5.3.3 Kraftstoffrückführung .....	152
5.3.4 Wärmemanagement .....	152
5.3.5 Wasserkreisläufe .....	155
5.3.6 Stromaufbereitung .....	155
5.3.7 Ansprechverhalten .....	156
5.3.8 Wirkungsgrad .....	158
Zusammenfassung .....	159
<b>6 Gewinnung und Nutzung von Kraftstoffen für Brennstoffzellenfahrzeuge .....</b>	<b>165</b>
6.1 Kraftstoffherzeugung .....	165
6.1.1 Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe .....	165
6.1.2 Gasförmiger und flüssiger Wasserstoff .....	167
6.1.3 Methanol .....	168
6.2 Kraftstoffverteilung .....	170
6.3 Thermodynamische Wirkungsgrade .....	171
6.3.1 Wirkungsgrad der Kraftstoffherzeugung .....	171
6.3.2 Wirkungsgrad der Kraftstoffverteilung .....	174
6.3.3 Wirkungsgrad der Kraftstoffnutzung .....	174
6.3.4 Wirkungsgrad der gesamten Energiekette .....	176
6.4 Schadstoffausstoß .....	177
6.4.1 Kohlenstoffoxide .....	177
6.4.2 Stickoxide .....	179
6.4.3 Giftige und krebserregende Stoffe .....	179
6.4.4 Geräusche .....	180
Zusammenfassung .....	181
<b>7 Brennstoffzellen-Konzeptfahrzeuge .....</b>	<b>183</b>
7.1 Personenkraftwagen .....	183
7.1.1 Konzeptfahrzeuge mit Wasserstoffspeicher .....	183
7.1.2 Konzeptfahrzeuge mit Reformer .....	188
7.2 Nutzfahrzeuge .....	191
Zusammenfassung .....	194

## Inhaltsverzeichnis

<b>8 Der Markt für Brennstoffzellenfahrzeuge</b> .....	<b>195</b>
8.1 <i>Forschungskooperationen und Interessengemeinschaften</i> ..	195
8.1.1 Strategien der Automobilhersteller .....	195
8.1.2 Aufbau einer Infrastruktur zur Kraftstoffversorgung ..	197
8.1.3 Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie .....	197
8.1.4 California Fuel Cell Partnership .....	198
8.2 <i>Vertriebsstrategien</i> .....	200
8.2.1 Wechselwirkungen mit anderen Anwendungen für die Brennstoffzelle .....	200
8.2.2 Vermarktung über Produktvorteile .....	202
8.2.3 Kostenentwicklung .....	203
8.3 <i>Szenarien zur Marktdurchdringung</i> .....	204
<i>Zusammenfassung</i> .....	206
<b>9 Quellenangaben</b> .....	<b>209</b>
9.1 <i>Literatur</i> .....	209
9.2 <i>Webseiten</i> .....	211
<b>10 Fachbegriffe und Abkürzungen</b> .....	<b>213</b>
<b>11 Index</b> .....	<b>219</b>

