

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Überblick Elektrofahrzeuge</b> .....	<b>19</b>
2.1	Geschichte und grundsätzliche Bedeutung .....	19
2.2	Konstruktive Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und herkömmlichem Kraftfahrzeug .....	20
2.3	Die Vorteile des Elektroantriebs .....	23
2.4	Die Nachteile des Elektroantriebs .....	26
2.5	Vorgaben zur CO <sub>2</sub> -Reduktion als Treiber für die Elektromobilität .....	27
<b>3</b>	<b>Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen in der Praxis</b> .....	<b>28</b>
3.1	Elektro-Pkw .....	28
3.1.1	Reine Elektrofahrzeuge, Batterieelektrische Fahrzeuge .....	28
3.1.2	Elektrofahrzeuge mit Range Extender, Range Extended Electric Vehicle (REEV) .....	30
3.1.3	Hybridfahrzeuge, Hybrid Electric Vehicle (HEV) .....	31
3.1.3.1	Mikrohybrid .....	33
3.1.3.2	Mildhybrid .....	33
3.1.3.3	Vollhybrid .....	33
3.1.3.4	Plug-in-Hybride .....	34
3.1.3.5	Antriebsstruktur der Hybride .....	35
3.1.3.6	Hybridsysteme in der Formel 1 .....	37
3.1.3.7	Brennstoffzellenfahrzeug .....	38
3.1.3.8	Funktion der Brennstoffzelle .....	39
3.1.3.9	Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug .....	39
3.1.3.10	Wasserstoffversorgung .....	40
3.1.3.11	Wie wird der Wasserstoff produziert? .....	40
3.1.3.12	Beispiele Brennstoffzellenfahrzeuge .....	41
3.2	Elektrobusse .....	42
3.3	Elektro-Nutzfahrzeuge .....	42
3.4	Elektrofahrräder .....	43
3.4.1	Bauformen von Elektrofahrrädern .....	44
3.4.2	Reichweite von Elektrofahrrädern .....	46

3.5	Weitere Elektrofahrzeuge .....	47
3.5.1	Segway .....	47
3.5.2	Elektromotorräder .....	49
3.5.3	Elektroflugzeuge .....	50
<b>4</b>	<b>Grundlagen Kfz-Antriebe .....</b>	<b>51</b>
4.1	Übersicht Antriebe .....	51
4.2	Verbrennungsmotor .....	51
4.2.1	Funktion Viertaktmotor .....	52
4.2.2	Leistung, Drehmoment und Verbrauch des Verbrennungs- motors .....	54
4.2.2.1	Energiebilanz und Berechnung des Wirkungsgrads aus dem spezifischen Verbrauch .....	56
4.2.2.2	Lastanhebung bei Hybridfahrzeugen .....	57
4.2.2.3	Berechnung der Motorleistung im Verbrauchs- kennfeld .....	59
<b>5</b>	<b>Elektrifizierter Antriebsstrang .....</b>	<b>60</b>
5.1	Elektromotor .....	60
5.1.1	Anforderungen .....	61
5.1.2	Kurzbeschreibung Elektromotoren .....	61
5.1.3	Gleichstrommotor .....	61
5.1.4	Drehstrommotor .....	63
5.1.5	Betrieb von Drehstrommotoren in Elektro kraftfahrzeugen .....	67
5.1.6	Leistung und Drehzahl-Drehmomentverhalten der Elektroantriebe .....	68
5.1.7	Berechnungsgrundlagen für den Pkw-Elektroantrieb .....	70
5.1.7.1	Leistung des Antriebs und Leistung des Gesamtfahrzeugs .....	71
5.1.7.2	Zusammenhang Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl .....	72
5.1.7.3	Ermittlung der notwendigen Getriebeübersetzung ..	73
5.1.7.4	Berechnung der Antriebskraft des Fahrzeugs aus dem Drehmoment des Motors .....	74
5.1.7.5	Berechnung der Beschleunigung aus der Antriebskraft .....	77
5.2	Energiespeicher Akku .....	78
5.2.1	Grundlagen und Begriffe .....	78
5.2.2	Basiszelle Lithium-Ionen-Akku .....	79
5.2.3	Li-Ionen-Akku als Fahrzeugakku .....	81
5.2.3.1	Akkukapazität und Reichweite von Elektro- fahrzeugen .....	83
5.2.3.2	Die Lebensdauer von Fahrzeugakkus .....	85
5.2.3.3	Das Batterie-Management-System (BMS) .....	85
5.2.3.4	Sicherheit der Fahrzeugakkus .....	87

5.2.4	Hersteller .....	87
5.2.5	Ausblick Weiterentwicklung Akkus .....	88
5.3	Leistungselektronik, Inverter .....	89

## **6** Laden und Ladeinfrastruktur ..... 91

6.1	Grundlagen Akkuladen .....	91
6.1.1	Die Laderate .....	92
6.1.2	Kapazität des Akkus .....	92
6.1.2.1	Kapazität in Amperestunden (Ah) .....	92
6.1.2.2	Kapazität in Wattstunden (Wh) und Wirkungsgrad ..	92
6.1.3	Anforderungen beim Laden von Lithium-Ionen-Basiszellen ...	93
6.1.4	Laden von Li-Ionen-Fahrzeugakkus .....	94
6.2	Das Laden von Elektrofahrzeugen .....	95
6.2.1	Ladearten und Lademodi .....	96
6.2.2	Zusammenhang Ladeleistung/Ladedauer .....	99
6.2.3	Anschlüsse zum Laden: Steckverbindungen .....	100
6.2.4	Sicherheit beim Laden .....	102
6.3	Entwicklung der Ladeinfrastruktur .....	102
6.4	Weiterentwicklung von Ladekonzepten .....	105
6.4.1	Induktives Laden .....	105
6.4.2	Wechselakku .....	106
6.4.3	Intelligentes Laden, Vehicle to Grid .....	107
6.4.4	Dichte von Ladestationen .....	108

## **7** Verbrauch und Reichweite von E-Fahrzeugen ..... 109

7.1	Physikalische Grundlagen .....	109
7.1.1	Berechnungsgrößen .....	109
7.1.2	Berechnungsgleichungen für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung .....	110
7.1.3	Energie und Verbrauch .....	112
7.1.4	Antriebskraft und Fahrwiderstände .....	113
7.2	Verbrauchssimulationen .....	116
7.2.1	Einflussgrößen .....	116
7.2.2	Leistung und Antriebskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit .....	116
7.2.3	Fahrwiderstände und Verbrauch .....	117
7.2.4	Einfluss der Rekuperation auf den Verbrauch .....	120
7.3	Verbrauch Elektrofahrzeuge im NEFZ .....	124
7.3.1	Der NEFZ-Fahrzyklus .....	124
7.3.2	NEFZ-Verbrauchssimulationen .....	127
7.3.3	Einfluss von Änderungen ausgewählter Konstruktions- parameter .....	131
7.3.4	NEFZ-Verbrauch bei Plug-in-Hybriden .....	132
7.3.5	Elektrische Reichweite (NEFZ) .....	135
7.3.6	Einfluss von Zusatzverbrauchern auf die Reichweite .....	136

7.3.6.1	Reichweitenverluste durch Heizen und Kühlen	137
7.3.6.2	Verbesserungsansätze für Heizung und Klimatisierung	138
7.3.7	Alternative Messzyklen und Übertragbarkeit der NEFZ-Messwerte auf reale Fahrsituationen	139
7.4	Schlussfolgerungen aus den Verbrauchsermittlungen	141
<b>8</b>	<b>Strom für die Elektrofahrzeuge</b>	<b>142</b>
8.1	Energieerzeugung	142
8.1.1	Primärenergiequellen	142
8.1.2	Der Strommix Deutschland	143
8.1.3	Erneuerbare Energien	146
8.1.3.1	Strom aus Photovoltaik-Anlagen	148
8.1.3.2	Windenergie	150
8.1.3.3	Strom aus Biomasse	151
8.1.3.4	Wasserkraft	153
8.2	Speicherung von Strom	155
8.2.1	Speichertechnologien	156
8.2.2	Beschreibung wichtiger Stromspeicher	157
8.2.2.1	Akkumulatoren	157
8.2.2.2	Pumpspeicherwerke	158
8.2.2.3	Erdgasspeicher	159
8.2.2.4	Power-to-Gas	160
<b>9</b>	<b>Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen</b>	<b>164</b>
9.1	Beurteilungsmöglichkeiten für eine Umweltbilanz	164
9.2	Herstellungs- und Verwertungsphase der E-Fahrzeuge	166
9.3	Nutzungsphase	167
9.3.1	Lärm	167
9.3.2	Luftschadstoffe	167
9.3.3	CO <sub>2</sub> -Ausstoß als Maß für die Klimaschädlichkeit des Autoverkehrs	168
9.4	Ökobilanz Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrenner-Fahrzeugen	170
<b>10</b>	<b>Markt</b>	<b>174</b>
10.1	Kostenvergleich Elektroautos – konventionelle Fahrzeuge	174
10.1.1	Anzusetzende Kosten	174
10.1.2	Vergleichsrechnung Elektrofahrzeug/Verbrennungsmotor-Fahrzeug	175
10.2	Angebot an Elektrofahrzeugen und Verbreitung	179
10.2.1	Verbreitung von Elektrofahrzeugen	179
10.2.2	Angebote Elektrofahrzeuge	181
10.2.2.1	Reine Elektro-Pkw	182
10.2.2.2	Plug-in-Hybride	190

10.2.2.3	Nutzfahrzeuge .....	192
10.2.2.4	Brennstoffzellenfahrzeuge .....	194
10.3	Wirkung staatlicher Förderung .....	195
10.4	Schlussfolgerungen Markt .....	197
<b>11</b>	<b>Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen .....</b>	<b>198</b>
11.1	Carsharing .....	198
11.1.1	car2go .....	198
11.1.2	DriveNow .....	200
11.1.3	Carsharing im ländlichen Raum .....	201
11.2	E-Taxis .....	201
11.3	Elektrobusse .....	202
11.4	Güterverkehr .....	203
11.4.1	Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen .....	203
11.4.2	Elektro-Lkw .....	205
<b>12</b>	<b>Förderung der Elektromobilität in Deutschland .....</b>	<b>206</b>
12.1	Förderbereiche der Bundesministerien und Leuchtturmprojekte .....	206
12.2	Schaufenster für Elektromobilität .....	208
12.3	NPE-Fortschrittsberichte 2014 und 2018 .....	208
<b>13</b>	<b>Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung .....</b>	<b>211</b>
<b>14</b>	<b>Berechnungen .....</b>	<b>213</b>
14.1	Aufgaben .....	213
14.2	Workshop Simulation .....	219
<b>■</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>224</b>
<b>■</b>	<b>Verzeichnis Bildquellen .....</b>	<b>227</b>
<b>■</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>229</b>
<b>■</b>	<b>Index .....</b>	<b>233</b>