

Inhalt

1	Einführung	1
2	Überblick Elektrofahrzeuge	6
2.1	Geschichte und grundsätzliche Bedeutung	6
2.2	Konstruktive Unterschiede zwischen Elektrofahrzeug und herkömmlichem Kraftfahrzeug	8
2.3	Die Vorteile des Elektroantriebs	11
2.4	Die Nachteile des Elektroantriebs	13
2.5	Vorgaben zur CO ₂ -Reduktion als Treiber für die Elektromobilität	15
3	Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen in der Praxis	16
3.1	Elektro-Pkw	16
3.1.1	Reine Elektrofahrzeuge, Batterieelektrische Fahrzeuge	16
3.1.2	Elektrofahrzeuge mit Range Extender, Range Extended Electric Vehicle (REEV)	19
3.1.3	Hybridfahrzeuge, Hybrid Electric Vehicle (HEV)	20
3.1.3.1	Mikrohybrid	21
3.1.3.2	Mildhybrid	22
3.1.3.3	Vollhybrid	22
3.1.3.4	Plug-in-Hybride	23
3.1.3.5	Antriebsstruktur der Hybride	24
3.1.3.6	Hybridsysteme in der Formel 1	26
3.1.3.7	Brennstoffzellenfahrzeug	27
3.1.3.8	Beispiele Brennstoffzellenfahrzeuge	29
3.2	Elektrobusse	31

3.3	Elektro-Nutzfahrzeuge	31
3.4	Elektrofahrräder	32
3.4.1	Bauformen von Elektrofahrrädern	33
3.4.2	Reichweite von Elektrofahrrädern	36
3.5	Weitere Elektrofahrzeuge	37
3.5.1	Segway	37
3.5.2	Elektromotorräder	38
3.5.3	Elektroflugzeuge	39
4	Grundlagen Kfz-Antriebe	41
4.1	Übersicht Antriebe	41
4.2	Verbrennungsmotor	42
4.2.1	Funktion Viertaktmotor	42
4.2.2	Leistung, Drehmoment und Verbrauch des Verbrennungsmotors ...	44
4.2.2.1	Energiebilanz und Berechnung des Wirkungsgrads aus dem spezifischen Verbrauch	46
4.2.2.2	Lastanhebung bei Hybridfahrzeugen	48
4.2.2.3	Berechnung der Motorleistung im Verbrauchskennfeld ...	50
5	Elektrifizierter Antriebsstrang	52
5.1	Elektromotor	52
5.1.1	Anforderungen	53
5.1.2	Kurzbeschreibung Elektromotoren	53
5.1.3	Gleichstrommotor	53
5.1.4	Drehstrommotor	55
5.1.5	Betrieb von Drehstrommotoren in Elektro kraftfahrzeugen	59
5.1.6	Leistung und Drehzahl-Drehmomentverhalten der Elektroantriebe	60
5.1.7	Berechnungsgrundlagen für den Pkw-Elektroantrieb	62
5.1.7.1	Leistung des Antriebs und Leistung des Gesamtfahrzeugs	64
5.1.7.2	Zusammenhang Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl	65
5.1.7.3	Ermittlung der notwendigen Getriebeübersetzung	65

5.1.7.4	Berechnung der Antriebskraft des Fahrzeugs aus dem Drehmoment des Motors	66
5.1.7.5	Berechnung der Beschleunigung aus der Antriebskraft	68
5.2	Energiespeicher Akku	70
5.2.1	Grundlagen und Begriffe	70
5.2.2	Basiszelle Lithium-Ionen-Akku	71
5.2.3	Li-Ionen-Akku als Fahrzeugakkus	74
5.2.3.1	Akkukapazität und Reichweite von Elektrofahrzeugen	77
5.2.3.2	Die Lebensdauer von Fahrzeugakkus	78
5.2.3.3	Das Batterie-Management-System (BMS)	79
5.2.3.4	Sicherheit der Fahrzeugakkus	81
5.2.4	Hersteller	81
5.2.5	Ausblick Weiterentwicklung Akkus	82
5.3	Energiespeicher Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge	84
5.4	Leistungselektronik, Inverter	90
6	Laden und Ladeinfrastruktur	93
6.1	Grundlagen Akkuladen	93
6.1.1	Die Laderate	94
6.1.2	Kapazität des Akkus	94
6.1.2.1	Kapazität in Amperestunden (Ah)	94
6.1.2.2	Kapazität in Wattstunden (Wh) und Wirkungsgrad	94
6.1.3	Anforderungen beim Laden von Lithium-Ionen-Basiszellen	95
6.1.4	Laden von Li-Ionen-Fahrzeugakkus	97
6.2	Das Laden von Elektrofahrzeugen	97
6.2.1	Ladearten und Lademodi	98
6.2.2	Zusammenhang Ladeleistung/Ladedauer	102
6.2.3	Anschlüsse zum Laden: Steckverbindungen	103
6.2.4	Sicherheit beim Laden	105
6.3	Entwicklung der Ladeinfrastruktur	105
6.4	Weiterentwicklung von Ladekonzepten	108
6.4.1	Induktives Laden	109
6.4.2	Wechselakku	110

6.4.3	Intelligentes Laden, Vehicle to Grid	111
6.4.4	Dichte von Ladestationen	112
7	Verbrauch und Reichweite von E-Fahrzeugen	114
7.1	Physikalische Grundlagen	114
7.1.1	Berechnungsgrößen	114
7.1.2	Berechnungsgleichungen für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung	115
7.1.3	Energie und Verbrauch	117
7.1.4	Antriebskraft und Fahrwiderstände	119
7.2	Verbrauchssimulationen	121
7.2.1	Einflussgrößen	121
7.2.2	Leistung und Antriebskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	122
7.2.3	Fahrwiderstände und Verbrauch	123
7.2.4	Einfluss der Rekuperation auf den Verbrauch	126
7.3	Verbrauch Elektrofahrzeuge im NEFZ	130
7.3.1	Der NEFZ-Fahrzyklus	131
7.3.2	Verbrauchssimulationen	134
7.3.3	Einfluss von Änderungen ausgewählter Konstruktionsparameter	138
7.3.4	NEFZ-Verbrauch bei Plug-in-Hybriden	140
7.3.5	Elektrische Reichweite (NEFZ)	143
7.3.6	Einfluss von Zusatzverbrauchern auf die Reichweite	144
	7.3.6.1 Reichweitenverluste durch Heizen und Kühlen	144
	7.3.6.2 Verbesserungsansätze für Heizung und Klimatisierung ..	146
7.4	Verbrauch und Reichweite gemäß WLTP	147
7.5	Schlussfolgerungen aus den Verbrauchsermittlungen	153
8	Strom für die Elektrofahrzeuge	154
8.1	Energieerzeugung	154
8.1.1	Primärenergiequellen	155
8.1.2	Der Strommix Deutschland	155

8.1.3	Erneuerbare Energien	159
8.1.3.1	Strom aus Photovoltaik-Anlagen	161
8.1.3.2	Windenergie	163
8.1.3.3	Strom aus Biomasse	164
8.1.3.4	Wasserkraft	166
8.2	Speicherung von Strom	168
8.2.1	Speichertechnologien	169
8.2.2	Beschreibung wichtiger Stromspeicher	170
8.2.2.1	Akkumulatoren	170
8.2.2.2	Pumpspeicherwerke	171
8.2.2.3	Erdgasspeicher	172
8.2.2.4	Power-to-Gas	173
9	Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen	177
9.1	Beurteilungsmöglichkeiten für eine Umweltbilanz	177
9.2	Herstellungs- und Verwertungsphase der E-Fahrzeuge	179
9.3	Nutzungsphase	180
9.3.1	Lärm	180
9.3.2	Luftschadstoffe	181
9.3.3	CO ₂ -Ausstoß als Maß für die Klimaschädlichkeit des Autoverkehrs	182
9.4	Ökobilanz Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrenner-Fahrzeugen ...	184
10	Markt	189
10.1	Kostenvergleich Elektroautos – konventionelle Fahrzeuge	189
10.1.1	Anzusetzende Kosten	189
10.1.2	Vergleichsrechnung Elektrofahrzeug/ Verbrennungsmotor-Fahrzeug	191
10.2	Angebot an Elektrofahrzeugen und Verbreitung	194
10.2.1	Verbreitung von Elektrofahrzeugen	195
10.2.2	Angebote Elektrofahrzeuge, Anfangsmodelle und Entwicklung	197
10.2.2.1	Reine Elektro-Pkw	198
10.2.2.2	Plug-in-Hybride	207

10.2.2.3	Nutzfahrzeuge	209
10.2.2.4	Brennstoffzellenfahrzeuge	211
10.3	Wirkung staatlicher Förderung	212
10.4	Förderung der Elektromobilität in Deutschland	214
10.5	Schlussfolgerungen Markt	216
11	Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen	217
11.1	Carsharing	217
11.1.1	Carsharing im städtischen Umfeld	218
11.1.2	Carsharing im ländlichen Raum	220
11.2	E-Taxis	221
11.3	Elektrobusse	221
11.4	Güterverkehr	222
11.4.1	Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen	223
11.4.2	Elektro-Lkw	224
12	Automatisiertes/Autonomes Fahren	225
13	Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung	230
14	Berechnungen	233
14.1	Aufgaben	233
14.2	Workshop Simulation	239
Glossar		244
Ergänzende Informationsquellen		248
Index		250