

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	14
2.5	Vorgaben zur CO ₂ -Reduktion als Treiber für die Elektromobilität	15
3	Ausführungsformen von Elektrofahrzeugen in der Praxis	17
3.1	Elektro-Pkw	17
3.1.1	Reine Elektrofahrzeuge, Batterieelektrische Fahrzeuge	17
3.1.2	Elektrofahrzeuge mit Range Extender, Range Extended Electric Vehicle (REEV)	20
3.1.3	Hybridfahrzeuge, Hybrid Electric Vehicle (HEV)	21
3.1.3.1	Mikrohybrid	23
3.1.3.2	Mildhybrid	23
3.1.3.3	Vollhybrid	24
3.1.3.4	Plug-in-Hybride	24
3.1.3.5	Antriebsstruktur der Hybride	25
3.1.3.6	Hybridsysteme in der Formel 1	27
3.1.3.7	Brennstoffzellenfahrzeug	29
3.1.3.8	Beispiele Brennstoffzellenfahrzeuge	30
3.2	Elektrobusse	32

3.3	Elektro-Nutzfahrzeuge	33
3.4	Elektrofahrräder	33
3.4.1	Bauformen von Elektrofahrrädern	34
3.4.2	Reichweite von Elektrofahrrädern	37
3.5	Weitere Elektrofahrzeuge	38
3.5.1	Segway	38
3.5.2	Elektromotorräder	40
3.5.3	Elektroflugzeuge	40
4	Grundlagen Kfz-Antriebe	42
4.1	Übersicht Antriebe	42
4.2	Verbrennungsmotor	43
4.2.1	Funktion Viertaktmotor	43
4.2.2	Leistung, Drehmoment und Verbrauch des Verbrennungsmotors	45
4.2.2.1	Energiebilanz und Berechnung des Wirkungsgrads aus dem spezifischen Verbrauch	47
4.2.2.2	Lastanhebung bei Hybridfahrzeugen	49
4.2.2.3	Berechnung der Motorleistung im Verbrauchskennfeld	51
5	Elektrifizierter Antriebsstrang	53
5.1	Elektromotor	53
5.1.1	Anforderungen	54
5.1.2	Kurzbeschreibung Elektromotoren	54
5.1.3	Gleichstrommotor	54
5.1.4	Drehstrommotor	56
5.1.5	Betrieb von Drehstrommotoren in Elektro kraftfahrzeugen	60
5.1.6	Leistung und Drehzahl-Drehmomentverhalten der Elektroantriebe	61
5.1.7	Berechnungsgrundlagen für den Pkw-Elektroantrieb	63
5.1.7.1	Leistung des Antriebs und Leistung des Gesamtfahrzeugs	65
5.1.7.2	Zusammenhang Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl	66

5.1.7.3	Ermittlung der notwendigen Getriebeübersetzung ...	66
5.1.7.4	Berechnung der Antriebskraft des Fahrzeugs aus dem Drehmoment des Motors	67
5.1.7.5	Berechnung der Beschleunigung aus der Antriebskraft	69
5.2	Energiespeicher Akku	71
5.2.1	Grundlagen und Begriffe	71
5.2.2	Basiszelle Lithium-Ionen-Akku	72
5.2.3	Li-Ionen-Akku als Fahrzeugakku	75
5.2.3.1	Akkukapazität und Reichweite von Elektrofahrzeugen	78
5.2.3.2	Die Lebensdauer von Fahrzeugakkus	79
5.2.3.3	Das Batterie-Management-System (BMS)	80
5.2.3.4	Sicherheit der Fahrzeugakkus	82
5.2.4	Hersteller	82
5.2.5	Ausblick Weiterentwicklung Li-Ionen-Akkus	83
5.2.6	Neuentwicklung Na-Ionen-Akkus	85
5.2.7	Welche Akkuzellen eignen sich für welche Fahrzeuge?	86
5.3	Energiespeicher Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge	88
5.4	Leistungselektronik, Inverter	96
6	Laden und Ladeinfrastruktur	98
6.1	Grundlagen Akkuladen	98
6.1.1	Die Laderate	99
6.1.2	Kapazität des Akkus	99
6.1.2.1	Kapazität in Amperestunden (Ah)	99
6.1.2.2	Kapazität in Wattstunden (Wh) und Wirkungsgrad ...	99
6.1.3	Anforderungen beim Laden von Lithium-Ionen-Basiszellen	100
6.1.4	Laden von Li-Ionen-Fahrzeugakkus	102
6.2	Das Laden von Elektrofahrzeugen	102
6.2.1	Ladearten und Lademodi	103
6.2.2	Zusammenhang Ladeleistung/Ladedauer	107
6.2.3	Anschlüsse zum Laden: Steckverbindungen	108
6.2.4	Sicherheit beim Laden	110

6.3	Entwicklung der Ladeinfrastruktur	110
6.4	Weiterentwicklung von Ladekonzepten	114
6.4.1	Induktives Laden	114
6.4.2	Wechselakku	115
6.4.3	Intelligentes Laden, Vehicle to Grid	116
6.4.4	Dichte von Ladestationen	117
7	Verbrauch und Reichweite von E-Fahrzeugen	119
7.1	Physikalische Grundlagen	119
7.1.1	Berechnungsgrößen	119
7.1.2	Berechnungsgleichungen für die Beschreibung der Fahrzeuggbewegung	120
7.1.3	Energie und Verbrauch	122
7.1.4	Antriebskraft und Fahrwiderstände	124
7.2	Verbrauchssimulationen	126
7.2.1	Einflussgrößen	126
7.2.2	Leistung und Antriebskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	127
7.2.3	Fahrwiderstände und Verbrauch	128
7.2.4	Einfluss der Rekuperation auf den Verbrauch	131
7.2.5	Verbrauchssimulation anhand eines Testzyklus	135
7.2.6	Einfluss von Änderungen ausgewählter Konstruktionsparameter	139
7.2.7	Einfluss von Zusatzverbrauchern auf die Reichweite	141
7.2.7.1	Reichweitenverluste durch Heizen und Kühlen	141
7.2.7.2	Verbesserungsansätze für Heizung und Klimatisierung	143
7.3	Verbrauchs- und Reichweitenangaben von Elektrofahrzeugen gemäß NEFZ	144
7.4	Verbrauch und Reichweite gemäß WLTP	146
7.5	Schlussfolgerungen aus den Verbrauchsermittlungen	151
8	Strom für die Elektrofahrzeuge	153
8.1	Energieerzeugung	153
8.1.1	Primärenergiequellen	154

8.1.2	Der Strommix Deutschland	154
8.1.3	Erneuerbare Energien	158
8.1.3.1	Strom aus Photovoltaik-Anlagen	160
8.1.3.2	Windenergie	162
8.1.3.3	Strom aus Biomasse	163
8.1.3.4	Wasserkraft	165
8.2	Speicherung von Strom	167
8.2.1	Speichertechnologien	168
8.2.2	Beschreibung wichtiger Stromspeicher	169
8.2.2.1	Akkumulatoren	169
8.2.2.2	Pumpspeicherwerke	170
8.2.2.3	Erdgasspeicher	171
8.2.2.4	Power-to-Gas	172
9	Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen	176
9.1	Beurteilungsmöglichkeiten für eine Umweltbilanz	176
9.2	Herstellungs- und Verwertungsphase der E-Fahrzeuge	178
9.3	Nutzungsphase	179
9.3.1	Lärm	179
9.3.2	Luftschadstoffe	180
9.3.3	CO ₂ -Ausstoß als Maß für die Klimaschädlichkeit des Autoverkehrs	181
9.4	Ökobilanz Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrenner-Fahrzeugen ..	183
10	Markt	188
10.1	Kostenvergleich Elektroautos – konventionelle Fahrzeuge	188
10.1.1	Anzusetzende Kosten	188
10.1.2	Vergleichsrechnung Elektrofahrzeug/Verbrennungsmotor- Fahrzeug	190
10.2	Angebot an Elektrofahrzeugen und Verbreitung	194
10.2.1	Verbreitung von Elektrofahrzeugen	194
10.2.2	Angebote Elektrofahrzeuge, Anfangsmodelle und Entwicklung	197
10.2.2.1	Reine Elektro-Pkw	197

10.2.2.2	Plug-in-Hybride	206
10.2.2.3	Nutzfahrzeuge	208
10.2.2.4	Brennstoffzellenfahrzeuge	210
10.3	Wirkung staatlicher Förderung	211
10.4	Förderung der Elektromobilität in Deutschland	213
10.5	Schlussfolgerungen Markt	215
11	Mobilitätskonzepte mit Elektrofahrzeugen	216
11.1	Carsharing	216
11.1.1	Carsharing im städtischen Umfeld	217
11.1.2	Carsharing im ländlichen Raum	219
11.2	E-Taxis	220
11.3	Elektrobusse	220
11.4	Güterverkehr	221
11.4.1	Paketzustellung mit Elektrofahrzeugen	222
11.4.2	Elektro-Lkw	223
12	Automatisiertes/Autonomes Fahren	224
13	Schlussfolgerungen und Gesamtbeurteilung	230
14	Berechnungen	233
14.1	Aufgaben	233
14.2	Workshop Simulation	239
Glossar		244
Ergänzende Informationsquellen		248
Index		250