
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Gleichstrommotoren (DC)	1
1.2	Das Wechselstromsystem (AC)	5
1.2.1	Einphasiger Wechselstrom	6
1.2.2	Mehrphasiger Wechselstrom	6
1.2.3	Wechselstrommotoren	7
1.3	Elektrische Energieübertragung	9
1.4	Batterien	11
1.5	Drehzahlvariable Antriebe	12
1.6	Entwicklung der Elektromobilität	12
1.7	Normung	17
	Literatur	18
2	Elektrische Fahrzeugantriebe	19
2.1	Drehzahl-/Drehmomentkennlinie verbrennungsmotorischer Antriebe	20
2.2	Drehzahl-/Drehmomentkennlinie elektrischer Antriebe	23
2.3	Betriebsgrenzen	25
2.3.1	Maximale Motorspannung $U_{\max}$	25
2.3.2	Maximaler Motorstrom $I_{\max}$	25
2.3.3	Thermische Grenze im Dauerbetrieb	26
2.3.4	Thermische Grenze bei Beschleunigung	27
2.4	Betriebseigenschaften von Elektromotoren	27
2.4.1	Grunddrehzahlbereich	27
2.4.2	Feldschwäcbereich	28
2.4.3	Kippmoment	28
2.4.4	Praktisches Beispiel eines elektrischen Antriebsstranges	29

2.5	Elektromotoren für vollelektrische und hybride Antriebsstränge	30
2.5.1	Getriebeintegrierte Maschinen (GEM)	30
2.5.2	Traktionsmaschinen (TEM)	31
2.5.3	Riemen-Startergeneratoren (RSG)	33
2.6	Eigenschaften von Getrieben	34
2.6.1	Mehrgängige Getriebe	35
2.6.2	Wandlerautomatikgetriebe	36
2.6.3	Stufenlose Getriebe	37
2.7	Elektrische Antriebsstränge	37
2.7.1	Getriebe für elektrische Traktionsmotoren (TEM)	37
2.7.2	Antriebsstrangkonfiguration.	40
2.7.3	Radnabenantriebe.	41
2.7.4	Einzelradantriebe	43
2.7.5	Achsantriebe.	44
3	Hybride Fahrzeugantriebe	45
3.1	Grundlagen.	45
3.2	Spannungsklassen	46
3.3	Hybride Fahrzeugklassen.	49
3.3.1	Micro-Hybrid (MCHEV)	49
3.3.2	Mild-Hybrid (MHEV)	50
3.3.3	Full-Hybrid (FHEV)	51
3.3.4	Plug-in-Hybrid (PHEV)	52
3.4	Hybride Betriebsarten	53
3.4.1	Lastpunktverschiebung	53
3.4.2	Muscheldiagramm der VKM	53
3.4.3	Lastpunktverschiebung mittels Getriebe	55
3.4.4	Lastpunktanhebung durch einen Elektromotor	56
3.4.5	Lastpunktabsenkung durch einen Elektromotor	58
3.4.6	Boosten.	58
3.4.7	Segeln.	58
3.5	Hybride Antriebsstränge	59
3.5.1	Serieller Hybridantrieb.	61
3.5.2	Range Extender	62
3.5.3	Paralleler Hybridantrieb.	63
3.5.4	Einwellen-Parallel-Hybrid/Drehmomentaddition	64
3.5.5	Zweiwellenanordnung/Drehzahladdition.	66
3.5.6	Zugkraftaddition.	66
3.5.7	Leistungsverzweigter Hybridantrieb	68
3.5.8	Input-Split Hybrid	72
3.5.9	Output-Split Hybrid	78
3.5.10	Compound-Split Hybrid.	80
3.5.11	Zusammenfassung Hybridantriebe	81

4	Fahrwiderstände und Energieverbrauch	85
4.1	Fahrwiderstandskraft	85
4.1.1	Luftwiderstand	86
4.1.2	Rollwiderstand	88
4.1.3	Kraftstoffverbrauch bei höheren Geschwindigkeiten	88
4.1.4	Steigungswiderstand	90
4.1.5	Beschleunigungskraft	91
4.1.6	Zusammenfassende Bewertung	92
4.2	Energie- und Leistungsflüsse	92
4.3	Nebenverbraucher	94
4.3.1	Heizung	94
4.3.2	Wärmepumpen	95
4.3.3	Weitere Nebenaggregate	95
4.4	Rekuperation	97
4.4.1	One-Pedal Driving	99
4.5	Fahrzyklen	100
4.5.1	NEFZ für Fahrzeuge nur mit Verbrennungsmotor	102
4.5.2	NEFZ für hybride Fahrzeuge	103
4.5.3	WLTP für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor	104
4.5.4	Real Driving Emissions	106
4.5.5	WLTP für hybride Fahrzeuge	107
4.5.6	FTP-72 (UDDS) und FTP-75 (Federal Test Procedure)	110
4.5.7	CADC (Common Artemis Driving Cycle)	110
4.5.8	10–15 Mode/JC08	110
4.6	Abweichung Testverfahren und Realverbrauch	111
4.7	CO ₂ -Effizienzklassen	112
4.8	Typischer Energieverbrauch von Fahrzeugen	114
4.8.1	e-Scooter	114
4.8.2	Fahrräder	114
4.8.3	Pkw mit Verbrennungsmotor	114
4.8.4	Pkw mit Batterie	115
4.8.5	Pkw mit Brennstoffzelle	116
4.8.6	Lkw und Busse	117
4.8.7	Schiffe	118
	Literatur	118
5	Betriebsstrategie	119
5.1	Optimierung der Betriebsstrategie	121
5.1.1	Regelbasierte Optimierung	121
5.1.2	Online-Optimierung	122
5.2	Prädiktive Betriebsstrategie	122

5.3	Interaktion mit dem Fahrer	123
5.3.1	Visualisierung des Fahrzeugzustands.	123
5.3.2	Berücksichtigung von Fahrerwünschen	124
5.3.3	Fahrpedal	126
6	Energiespeicher	127
6.1	Begriffe	129
6.2	Elektrochemische Speicher im Vergleich.	132
6.3	Batteriezellen	134
6.3.1	Aufbau und Funktionsprinzip	134
6.3.2	Batterieverluste	136
6.3.3	Batteriespannung	137
6.3.4	Einfache verhaltensbasierte Batteriemodelle.	139
6.3.5	Lebensdauer von Batterien.	140
6.3.6	Verfügbare Leistung und Energie	145
6.3.7	Bauformen von Batterien.	147
6.3.8	Sicherheit von Batterien.	152
6.4	Bleibatterien.	155
6.5	Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH).	155
6.6	Vanadium-Redox-Flow-Batterien	156
6.7	Lithium-Ionen-Batterie	157
6.7.1	Einführung	157
6.7.2	Komponenten und Funktionsweise	158
6.7.3	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten	160
6.7.4	Kathodenmaterialien (positive Elektrode)	164
6.7.5	Anodenmaterialien (negative Elektrode)	168
6.7.6	Lithiumplating und Dendritenbildung	169
6.7.7	Elektrolyt und Leitsalz.	169
6.7.8	Solid Electrolyte Interphase (SEI)	170
6.7.9	Separator	171
6.7.10	Lithium-Polymer-Batterien (LiPo)	171
6.7.11	Solid-State-Batterien	172
6.8	Lithium-Schwefel-Batterien	173
6.9	Natrium-Ionen-Batterien	174
6.10	Metall-Luft-Batterien.	175
6.11	Ladeverfahren	175
6.11.1	Constant-Current-Constant-Voltage-Laden (CCCV).	176
6.11.2	Verbessertes CCCV mit angepasstem Ladestrom	176
6.11.3	Puls- und Stufenladung	180
6.12	Balancing	180
6.13	Batteriemanagementsystem	183
6.14	Batteriepaket	183

6.15	Wasserstoff.....	186
6.15.1	Chemische Eigenschaften von Wasserstoff.....	186
6.15.2	Brennstoffzellen.....	189
6.15.3	Brennstoffzellensystem.....	191
6.15.4	Betriebseigenschaften.....	194
6.15.5	Wasserstoffspeicher.....	195
6.16	Weitere Kurzzeitspeicher.....	199
6.17	Brandgefahr von Autos.....	200
6.18	Zusammenfassung Energiespeicher für Pkw.....	202
	Literatur.....	204
7	Grundlagen elektrischer Maschinen.....	205
7.1	Einleitung.....	205
7.2	Funktionsprinzip.....	206
7.3	Drehstrom.....	207
7.4	Drehstrommaschinen.....	211
7.4.1	Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM)....	212
7.4.2	Fremderregte Synchronmaschinen (FESM).....	215
7.4.3	Asynchronmaschinen (ASM).....	217
7.5	Grundarten elektrischer Maschinen.....	220
7.5.1	Drehfeldmaschinen.....	220
7.5.2	Gleichfeldmaschinen.....	220
7.5.3	Wechselfeldmaschinen.....	221
7.5.4	Axialflussmaschinen.....	222
7.5.5	Transversalflussmaschinen.....	224
7.6	Design von elektrischen Maschinen.....	226
7.6.1	Konstruktiver Aufbau.....	226
7.6.2	Wicklungen.....	228
7.6.3	Rotoren.....	232
7.7	Induzierte Spannung.....	236
7.8	Magnetische Kräfte.....	238
7.8.1	Lorentz-Kraft.....	239
7.8.2	Leistungsdichte.....	240
7.8.3	Reluktanzkraft.....	243
7.9	Grunddrehzahlbereich (Konstantmomentbereich).....	244
7.10	Feldschwäcbereich (Konstantleistungsbereich).....	245
7.11	Werkstoffe.....	247
7.11.1	Leiterwerkstoffe.....	247
7.11.2	Weichmagnetische Materialien.....	249
7.11.3	Eisenverluste (Ummagnetisierungsverluste).....	252
7.11.4	Hartmagnetische Materialien.....	255

7.12	Gesamtverluste und Wirkungsgrad	260
7.13	Kühlverfahren	263
8	Synchronmaschinen	267
8.1	Das d-q-Koordinatensystem	267
8.2	Mathematisches Modell	271
8.3	Drehmomentbildung	273
8.3.1	Rotorvarianten	275
8.4	Vorsteuerwinkel	277
8.5	Parameterebene	278
8.6	Besondere Betriebszustände	280
8.6.1	Leistungsunterbrechung	280
8.6.2	Aktiver Kurzschluss	280
9	Asynchronmaschinen	281
9.1	Einphasiges Ersatzschaltbild	282
9.2	Betriebsverhalten	284
10	Leistungselektronische Bauteile	287
10.1	Halbleiter	287
10.1.1	Dioden	288
10.1.2	Leistungselektronische Schalter	290
10.2	Wide-Bandgap Halbleiter	302
10.2.1	Galliumnitrid (GaN)	304
10.2.2	Siliziumkarbid (SiC)	304
10.2.3	Gallium Arsenide (GaAs)	305
11	Elektrische Antriebsstränge	307
11.1	Antriebsstrangkomponenten	307
11.2	DC/AC-Wandler (Wechselrichter)	310
11.2.1	Grundlagen der PWM	310
11.2.2	Einphasige Schaltung	312
11.2.3	Dreiphasige Schaltung	313
11.2.4	Sinus-Delta Modulation (Dreiphasen-PWM)	314
11.2.5	Gleichtaktspannung	316
11.3	Motorregelung	318
11.3.1	Rotorflussorientierte Regelung der Synchronmaschine	318
11.3.2	Offline-Stromsollwertvorgabe	319
11.3.3	Id/Iq-Stromebene	322
11.3.4	Rotorflussorientierte Regelung einer Asynchronmaschine	328

11.4	DC/DC-Wandler (Gleichstromsteller)	328
11.4.1	Schaltungskonzept	329
11.4.2	Hochsetzsteller	330
11.4.3	Tiefsetzsteller	330
11.5	Parasitäre Effekte im Motor durch geschaltete Spannungen	330
12	Ladesysteme.	333
12.1	Einleitung	333
12.2	Aufbau des fahrzeugseitigen Ladesystems	334
12.2.1	AC-Laden mit Ladegerät	334
12.2.2	DC-Laden	335
12.2.3	AC-Inverter-Laden	335
12.2.4	Elektrische Sicherheit	336
12.3	Ladeleistung und Ladezeiten	338
12.4	Ladeverluste	341
12.5	Ladestandards für Autos und leichte Nutzfahrzeuge	342
12.5.1	Europa	342
12.5.2	USA	344
12.5.3	Japan	344
12.5.4	Korea	345
12.5.5	China	345
12.5.6	Andere Länder	346
12.6	Batteriewechsel	347
12.7	IEC Typ 1 & 2 und CCS Ladestandards	347
12.7.1	Betriebsarten beim AC-Laden	349
12.7.2	Ladekommunikation AC-Laden	350
12.7.3	Combined Charging System (CCS)	354
12.7.4	High-Level Ladekommunikation	354
12.7.5	Autorisierung des Ladevorgangs	355
12.8	CHAdMo	356
12.9	ChaoJi (CHAdMo 3.0)	357
12.10	Tesla Ladestandard	358
12.11	Ladesysteme für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge	359
12.11.1	OppCharge	359
12.11.2	Oberleitungssysteme	359
12.11.3	Megawatt Charging System (MCS)	360
12.12	Berührungsloses induktives Laden	361
12.12.1	Technologie	363
12.13	Wasserstofftankstellen	364
12.13.1	Technologie	364
	Literatur	366

13	Rahmenbedingungen individueller Mobilität	367
13.1	Einleitung	367
13.2	Klima- und Umweltschutz	369
13.2.1	Nachhaltigkeit	369
13.2.2	Weltklima	369
13.2.3	Endenergieverbrauch	370
13.2.4	Anthropogene Schadstoffemissionen	371
13.2.5	Klimaschutzziele	372
13.3	Megacities	374
13.4	Automobile	375
13.4.1	Kraftstoffverbrauch von Pkw in Deutschland	375
13.4.2	Weltweiter Kraftstoffverbrauch von Pkw	375
13.4.3	Pkw-Bestand	377
13.4.4	Verkehrsaufkommen	379
13.4.5	Tägliche Fahrleistung von Pkw	380
13.5	Elektrische Energie	381
13.5.1	Die globale Situation	381
13.5.2	Aktuelle Trends regenerativer Stromproduktion	384
13.5.3	Stromproduktion in Deutschland	386
13.5.4	Kosten und Preise der elektrischen Energie	388
13.5.5	Strombedarf für die Elektromobilität	388
13.6	Rohstoffe	390
13.6.1	Lithium	391
13.6.2	Kupfer	393
13.6.3	Seltene Erden	395
13.6.4	Kobalt	396
13.6.5	Nickel	398
13.6.6	Mangan	398
13.6.7	Phosphat	399
13.6.8	Zusammenfassung Rohstoffe	399
13.7	Second Life (Weiterverwendung)	399
13.8	Recycling	401
	Literatur	403
14	Produktion und Verteilung von Energie	405
14.1	Einführung	405
14.2	Rohöl- und erdgasbasierte Kraftstoffe	406
14.2.1	Eigenschaften	406
14.2.2	Erdölproduktion	408
14.2.3	Gas	409
14.2.4	Erdgasförderung	409

14.3	Synthetische Kraftstoffe.	410
14.3.1	Nicht nachhaltige synthetische Kraftstoffe	411
14.3.2	Nachhaltige synthetische Biokraftstoffe	411
14.3.3	Kraftstoffe aus elektrischer Energie (E-Fuels).	414
14.4	Elektrische Energie	417
14.4.1	Hochspannungsnetze	417
14.4.2	Niederspannungsnetze	418
14.4.3	Netzstabilität und Versorgungssicherheit.	420
14.4.4	Saisonale elektrische Energiespeicher	429
14.4.5	Emissionsfaktoren von Anlagen zur Stromerzeugung	429
14.5	Wasserstoff.	432
14.5.1	Wasserstofferzeugung	432
14.5.2	Versorgung von Wasserstofftankstellen	440
14.5.3	Nutzungsszenarien für grünen Wasserstoff	442
14.6	Zusammenfassung	447
	Literatur.	447
15	Umweltbilanz.	449
15.1	Schadstoffe und Umweltwirkungen.	449
15.2	Well-to-Wheel Analyse	451
15.3	Beispiele von Well-to-Wheel Analysen	453
15.3.1	Fahrzeuge mit Kolbenmotoren.	454
15.3.2	Brennstoffzellenfahrzeuge	456
15.3.3	Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge	456
15.3.4	Zusammenfassung	457
15.4	Lebenszyklusanalyse	457
15.4.1	Emissionen während der Fahrzeugproduktion.	458
15.5	Lebenszyklusanalyse durchschnittlicher Autos	462
	Literatur.	463
16	Kosten der Elektromobilität	465
16.1	Kosten der Fahrzeug- und Batterieherstellung.	466
16.2	BEV-Ladepunkte für die gesamte Pkw-Flotte in Deutschland	467
16.2.1	Erforderliche Anzahl Ladepunkte	468
16.2.2	Investitionskosten Ladeinfrastruktur	472
16.2.3	Kosten des öffentlichen Ladens	474
16.3	Service und Wartung	476
16.4	Zusammenfassung	477
	Literatur.	477

Schlusswort	479
Elektrotechnische Grundlagen	483
Glossar	513
Stichwortverzeichnis	519