

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Historische Entwicklung elektrischer Antriebe	1
1.1.1	Gleichstrommotoren (DC)	1
1.1.2	Wechselstrommotoren (AC)	5
1.2	Entwicklung der Elektromobilität	9
1.3	Elektrotechnische Grundlagen	14
1.3.1	Elektrische Ersatzkreise	14
1.3.2	Magnetischer Kreis	30
2	Elektrische Fahrzeugantriebe	41
2.1	Drehzahl-/Drehmomentkennlinie verbrennungsmotorischer Antriebe	41
2.2	Drehzahl-/Drehmomentkennlinie elektrischer Antriebe	43
2.2.1	Leistungselektronische Ansteuerung	43
2.2.2	Thermische Drehmomentbegrenzung	45
2.2.3	Grunddrehzahlbereich	46
2.2.4	Feldschwäcbereich	47
2.2.5	Kippmoment	47
2.2.6	Praktisches Beispiel eines elektrischen Antriebsstranges	48
2.3	Elektromotoren für vollelektrische und hybride Antriebsstränge	49
2.3.1	Getriebeintegrierte E-Maschinen (GEM)	49
2.3.2	Traktionsmaschinen (TEM)	50
2.3.3	Riemen-Startergeneratoren (RSG)	51
2.4	Eigenschaften von Getrieben	52
2.4.1	Mehrgängige Getriebe	53
2.4.2	Wandlerautomatikgetriebe	54
2.4.3	Stufenlose Getriebe	55
2.5	Elektrische Antriebsstränge	55
2.5.1	Getriebe für elektrische Traktionsmotoren (TEM)	55
2.5.2	Antriebsstrangkonfiguration	58

3	Hybride Fahrzeugantriebe	63
3.1	Grundlagen	63
3.2	Hybride Fahrzeugklassen	64
3.2.1	Micro-Hybrid (MCHEV)	66
3.2.2	Mild-Hybrid (MHEV)	66
3.2.3	Full-Hybrid (FHEV)	67
3.2.4	Plug-in-Hybrid (PHEV)	68
3.3	Hybride Betriebsarten	69
3.3.1	Lastpunktverschiebung	69
3.3.2	Boosten	74
3.3.3	Segeln	74
3.4	Hybride Antriebsstränge	75
3.4.1	Serieller Hybridantrieb	75
3.4.2	Paralleler Hybridantrieb	78
3.4.3	Leistungsverzweigter Hybridantrieb	83
3.4.4	Anfahren	92
3.4.5	Elektrisches Fahren	92
3.4.6	Output-Split	92
3.4.7	Compound-Split	95
3.4.8	Zusammenfassung	97
4	Fahrwiderstände und Energieverbrauch	99
4.1	Fahrwiderstandskraft	99
4.1.1	Luftwiderstand	100
4.1.2	Rollwiderstand	101
4.1.3	Steigungswiderstand	101
4.1.4	Beschleunigungskraft	102
4.1.5	Zusammenfassende Bewertung	103
4.1.6	Reichweitenverlust bei schneller Autobahnfahrt	103
4.2	Energie- und Leistungsfluss	104
4.3	Nebenverbraucher	105
4.3.1	Heizung	106
4.3.2	Weitere Nebenaggregate	106
4.4	Rekuperation	107
4.4.1	One-Pedal-Driving	108
4.5	Fahrzyklen	110
4.5.1	NEFZ für VKM	110
4.5.2	NEFZ für Hybridfahrzeuge	112
4.5.3	WLTP für VKM	113
4.5.4	WLTP für Hybridfahrzeuge	115
4.5.5	EPA	118
4.5.6	Weitere Fahrzyklen	118

4.6	Abweichung Testverfahren und Realverbrauch	119
4.7	CO ₂ -Effizienzklassen	119
5	Betriebsstrategie	121
5.1	Optimierung der Betriebsstrategie	123
5.1.1	Regelbasierte Optimierung.	123
5.1.2	Online-Optimierung.	123
5.2	Prädiktive Betriebsstrategie	124
5.3	Interaktion mit dem Fahrer.	125
5.3.1	Feedback an den Fahrer	125
5.3.2	Berücksichtigung von Fahrerwünschen	127
5.3.3	Betriebsstrategie bei nicht getretenem Gaspedal	128
6	Energiespeicher	129
6.1	Begriffe.	131
6.2	Elektrochemische Speicher im Vergleich.	133
6.3	Grundlagen elektrochemischer Speicher	135
6.3.1	Aufbau und Funktionsprinzip	135
6.3.2	Batterieverluste.	137
6.3.3	Batteriespannung	137
6.3.4	Einfache verhaltensbasierte Batteriemodelle	138
6.3.5	Alterung von Batterien.	139
6.3.6	Verfügbare Energiemenge	142
6.4	Blei-Akkumulator	144
6.5	Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH).	145
6.6	Redox-Flow-Batterie	146
6.7	Lithium-Ionen-Batterie	146
6.7.1	Aufbau und Funktionsweise.	147
6.7.2	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten	150
6.7.3	Kathodenmaterialien (positive Elektrode)	154
6.7.4	Anodenmaterialien (negative Elektrode)	155
6.7.5	Lithium-Plating und Dendritenbildung	157
6.7.6	Elektrolyt und Leitsalz.	157
6.7.7	Separator	159
6.8	Lithium-Schwefel-Batterien.	159
6.9	Ladeverfahren.	160
6.9.1	Strom-Spannungs-Laden (I/U-Verfahren, CC-CV-Verfahren).	160
6.9.2	Pulsladung	164
6.9.3	Stufenladung	165
6.10	Balancing	165
6.11	Bauformen von Batteriezellen	167
6.12	Batteriestack.	169
6.13	Batteriemanagementsystem	172

6.14	Wasserstoff	172
6.14.1	Eigenschaften von Wasserstoff	172
6.14.2	Brennstoffzelle	173
6.14.3	Brennstoffzellen-System	175
6.14.4	Betriebseigenschaften	177
6.14.5	Wasserstoffspeicher	178
6.15	Brandgefahr	182
6.16	Energiespeicher für Pkw im Vergleich	183
7	Grundlagen elektrischer Maschinen	185
7.1	Funktionsprinzip	185
7.2	Drehstrom	187
7.3	Drehstrommaschinen	189
7.3.1	Permanentmagneterrgte Synchronmaschinen (PMSM)	189
7.3.2	Fremderregte Synchronmaschinen (FESM)	193
7.3.3	Asynchronmaschinen (ASM)	194
7.4	Grundsätzliche Bauarten von elektrischen Maschinen	197
7.4.1	Drehfeldmaschinen	198
7.4.2	Gleichfeldmaschinen	198
7.4.3	Wechselfeldmaschinen	199
7.5	Konstruktiver Aufbau	200
7.5.1	Wicklungen	201
7.5.2	Rotoren	205
7.6	Spannungserzeugung	207
7.7	Magnetische Kraftwirkung	210
7.7.1	Lorentzkraft	210
7.7.2	Reluktanzkraft	213
7.8	Grunddrehzahlbereich	215
7.9	Feldschwäcbereich	215
7.10	Werkstoffe	218
7.10.1	Leiterwerkstoffe	218
7.10.2	Weichmagnetische Materialien	219
7.10.3	Hartmagnetische Materialien	223
7.11	Gesamtverluste und Wirkungsgrad	227
8	Synchronmaschine	231
8.1	d - q -Koordinaten	231
8.2	Mathematisches Modell	234
8.3	Drehmomentbildung	236
8.3.1	Rotorvarianten	237
8.4	Vorsteuerwinkel	239
8.5	Parameterebene	240

8.6	Besondere Betriebszustände.	242
8.6.1	Leitungsunterbrechung.	242
8.6.2	Aktiver Kurzschluss.	242
9	Asynchronmaschine.	245
9.1	Einphasiges Ersatzschaltbild.	246
9.2	Betriebsverhalten.	248
10	Leistungselektronische Bauteile.	251
10.1	Silizium-Halbleiter.	251
10.1.1	Diode.	252
10.1.2	Leistungselektronische Schalter.	254
10.2	Wide-Bandgap-Halbleiter.	264
10.2.1	Galliumnitrid.	265
10.2.2	Siliziumkarbid.	266
10.2.3	Galliumarsenid.	267
11	Topologie elektrischer Antriebsstränge.	269
11.1	DC/AC-Wandler (Wechselrichter).	273
11.1.1	Schaltungskonzept.	274
11.1.2	Pulsweitenmodulation (PWM).	275
11.1.3	Gleichtaktspannung (Common-Mode-Spannung).	277
11.2	Regelung.	277
11.2.1	Rotororientierte Regelung der Synchronmaschine.	277
11.2.2	Offline-Sollstromvorgabe.	279
11.2.3	Id-Iq-Stromebene.	282
11.2.4	Feldorientierte Regelung einer Asynchronmaschine.	286
11.3	DC/DC-Wandler (Gleichspannungssteller).	288
11.3.1	Schaltungskonzept.	288
11.3.2	Hochsetzsteller.	289
11.3.3	Tiefsetzsteller.	289
12	Ladesysteme.	291
12.1	Überblick.	291
12.2	Ladeleistungen und -zeiten.	292
12.3	Ladesysteme.	294
12.3.1	IEC-Stecker.	295
12.3.2	CCS-Stecker.	298
12.3.3	CHAdeMO-Stecker.	300
12.3.4	Plug & Charge.	301
12.3.5	Tesla Ladestecker.	301
12.4	Schaltungstechnik.	302
12.4.1	AC-Laden mit Ladegerät.	302
12.4.2	DC-Laden.	302

12.4.3	AC-Inverter-Laden	302
12.4.4	Elektrische Sicherheit	304
12.5	Kontaktloses Laden	304
12.5.1	Technologie	305
12.6	Wasserstofftankstellen	306
13	Energieversorgung	309
13.1	Energieverbrauch	310
13.1.1	Megacities	310
13.1.2	Pkw-Flotten	311
13.1.3	Pkw-Fahrleistung	314
13.1.4	Kraftstoffverbrauch	316
13.2	Energieträger	318
13.2.1	Verbrennungskraftstoffe	319
13.2.2	Erdöl	320
13.2.3	Autogas (LPG)	321
13.2.4	Erdgas (CNG, LNG)	322
13.2.5	Synthetische Kraftstoffe	323
13.2.6	Elektrischer Strom	326
13.2.7	Wasserstoff	334
13.3	Zukünftige regenerative Stromversorgung	340
13.3.1	Strombedarf im Jahr 2050	340
13.3.2	Private Stromerzeugung	343
13.3.3	Netzstabilisierung	344
13.3.4	Langzeitspeicher	348
14	Umwelteinflüsse	351
14.1	Nachhaltigkeit	351
14.1.1	Weltklima	352
14.1.2	Klimaschutzziele der Bundesrepublik Deutschland	353
14.2	Schadstoffemissionen	354
14.2.1	Schadstoffe und Umweltwirkungen	354
14.2.2	Anthropogene CO ₂ -Emissionen	355
14.2.3	Feinstaubemissionen PM ₁₀	357
14.3	Spezifische CO ₂ -Emissionen der Energieträger	358
14.3.1	Fossile Kraftstoffe	358
14.3.2	Elektrische Energie	359
14.3.3	Synthetischen Kraftstoffe	363
14.3.4	Wasserstoff	364
14.4	CO ₂ -Emissionen Well-to-Wheel (WtW)	366
14.4.1	Szenarien Pkw-Emissionen	368

14.5	Life-Cycle-Analyse	373
14.5.1	Rohstoffe	373
14.5.2	Emissionen während der Fahrzeugproduktion	381
14.5.3	Vergleich der CO ₂ -Emissionen im Lebenszyklus	384
14.5.4	Second Life	388
14.5.5	Recycling	389
15	Kosten	393
15.1	Infrastruktur zur Energieerzeugung und -verteilung	394
15.1.1	Batterieelektrische Fahrzeuge	394
15.1.2	Brennstoffzellenfahrzeuge	404
15.2	Anschaffungskosten der Fahrzeuge	411
15.2.1	Preisentwicklung Batterien	411
15.2.2	Preisentwicklung batterieelektrischer Fahrzeuge	412
15.2.3	Brennstoffzellenfahrzeuge	414
15.3	Unterhaltskosten	415
15.3.1	Batterieelektrische Fahrzeuge	415
15.3.2	Brennstoffzellenfahrzeuge	415
	Schlussbetrachtung	417
	Glossar	421
	Stichwortverzeichnis	425