

Inhalt

1	Warum muss man eine Hochvolt-Qualifikation besitzen, um an modernen Kraftfahrzeugen mit E-Antrieben arbeiten zu dürfen?	11
2	Welches elektrotechnische Grundlagen-Verständnis muss man auffrischen, um „fit“ für die Hochvolt-Technik in modernen „E-Kfz“ zu sein?	13
2.1	Einleitung	13
2.1.1	Warum elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge jetzt?	14
2.1.2	Wie sieht die Prognose für die Zukunft aus?	15
2.1.3	Wird sich die „Hybrid-“, die reine „Plug-In E-Antriebs-“ oder die „Brennstoffzellen-Technik“ durchsetzen?	18
2.2	Größen im elektrischen Stromkreis messen und berechnen	18
2.2.1	Die Elektrische Spannung U	18
2.2.2	Laborversuch zum Spannungsfall im einfachen Stromkreis	19
2.2.3	Der elektrische Strom I	20
2.2.4	Der elektrische Stromkreis	20
2.2.5	Der elektrische Widerstand R	21
2.2.6	Laborversuch zum ohmschen Gesetz	22
2.2.7	Laborversuch zur direkten Widerstandsmessung	23
2.2.8	Rechenaufgaben zum Ohmschen Gesetz	23
2.2.9	Die elektrische Leistung P	24
2.2.10	Rechenaufgaben zur elektrischen Leistung	24
2.2.11	Testaufgaben zu 2.2	25
2.3	Schaltpläne	27
2.3.1	Stromlaufplan in zusammenhängender und aufgelöster Darstellung am Beispiel der Innenbeleuchtung	27
2.3.2	Beispiel normgerechter Stromlaufplan Hybridfahrzeug Toyota Prius I	29
2.4	Elektrische Schaltungen	30
2.4.1	Parallelschaltung von elektrischen Verbrauchern	30
2.4.2	Laborversuche zur Parallelschaltung	31
2.4.3	Rechenaufgaben zur Parallelschaltung	32
2.4.4	Parallelschaltung von Spannungsquellen	32
2.4.5	Reihenschaltung von elektrischen Verbrauchern (am Beispiel der Instrumentenbeleuchtung aus 2.4.1)	33
2.4.6	Laborversuche zur Reihenschaltung	34
2.4.7	Rechenaufgaben zur Reihenschaltung	35
2.4.8	Reihenschaltung von Spannungsquellen	36
2.4.9	Warum brauchen wir so hohe Spannungen bei E-Mobilität?	37
2.4.10	Testaufgaben zu 2.3 und 2.4	38
2.5	Elektrische Spannung speichern	39
2.5.1	Arten der Spannungserzeugung (Überblick)	39
2.5.2	Spannungserzeugung durch elektrochemische Vorgänge	40
2.5.3	Laborversuch zur Galvanischen Zelle	41
2.5.4	Elektrochemische Spannungsreihe	41
2.5.5	Laborversuch zu Klemmenspannung und Innenwiderstand	42
2.5.6	Anwendungsbeispiele für galvanische Zellen	43
2.5.7	Unterschied zwischen einer galvanischen Zelle und einem Akku	44
2.5.8	Aufbau einer herkömmlichen Starterbatterie (Akkumulator)	44
2.5.9	Lade- und Entladevorgänge in einem Blei-Akku	46
2.5.10	Blei-Akkus ... und die Anwendung im Kraftfahrzeug	47
2.5.11	Kennzeichnung herkömmlicher Fahrzeug-Blei-Akkus	48

2.5.12	Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd)	49
2.5.13	NiMH-Akku ... und die Anwendung in elektrisch angetriebenen Kfz.	49
2.5.14	Lithium-Technik.	50
2.5.15	Ladevorschriften.	53
2.5.16	Kühlung der Hochvolt-Batterien	55
2.5.17	Rechenaufgaben zu Fahrzeug-Batterien	59
2.5.18	Der Kondensator als Ladungs- und Energiespeicher	62
2.5.19	Rechenaufgaben zum Kondensator	64
2.5.20	Laborversuche zum Kondensator als Ladungsspeicher	66
2.5.21	Lade- und Entladekurve des Kondensators mit dem Oszilloskop darstellen	67
2.5.22	Anwendungsbeispiel Kondensator im Kfz: Sound-Anlage.	68
2.5.23	Doppelschicht-Kondensatoren im Kfz	69
2.5.24	Wozu werden Kondensatoren in E-Antrieben von Kraftfahrzeugen benötigt?	71
2.5.25	Kondensator zum Glätten von Mischspannungen (Laborversuch)	72
2.5.26	Der Kondensator im Zwischenkreis des Inverters	74
2.5.27	Testaufgaben zu 2.5 (Spannung speichern)	75
 2.6	Elektrische Ströme elektromagnetisch schalten	78
2.6.1	Magnetismus	78
2.6.2	Drehzahl- und Rotorlagensorik.	80
2.6.3	Rotoren mit Dauermagneten	82
2.6.4	Elektromagnetismus	82
2.6.5	Wirkung von Eisen im Magnetfeld	84
2.6.6	Elektromagnetisches Relais	87
2.6.7	Schütze in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen	88
2.6.8	Weitere Sicherheits-Relais/Schütze in E-Fahrzeugen	91
2.6.9	Testaufgaben zu 2.6 (Elektrische Ströme elektromagnetisch schalten)	93
 2.7	Wechselspannung	95
2.7.1	Messen mit dem Oszilloskop (analog)	95
2.7.2	Messen mit dem Oszilloskop (digital)	96
2.7.3	Wechselspannung mit dem Oszilloskop messen.	97
2.7.4	Messen mit dem Oszilloskop (Motortester)	97
 2.8	Elektronische Bauteile	99
2.8.1	Die Diode	99
2.8.2	Einfache Gleichrichtung (Laborversuch)	100
2.8.3	Brücken-Gleichrichtung (Laborversuch)	101
2.8.4	Dioden-Fehler und Oberwelligkeit (Laborversuch)	102
2.8.5	Beispiele für Anwendungen von Dioden im Kraftfahrzeug.	104
2.8.6	Die Zener-Diode	105
2.8.7	Spannungsstabilisierung mithilfe der Z-Diode (Laborversuch)	106
2.8.8	Die Kennlinie einer Z-Diode aufnehmen und zeichnen (Laborversuch)	107
2.8.9	Kennlinie einer Z-Diode oszilloskopieren (exemplarisch) (Laborversuch)	108
2.8.10	Prüfung einer Z-Diode mit dem Komponenten-Tester (exemplarisch) (Laborversuch)	109
2.8.11	Anwendungen von Z-Dioden im Kraftfahrzeug	110
2.8.12	Berechnung des Vorwiderstands einer Z-Diode	111
2.8.13	Der bipolare Transistor	111
2.8.14	Prinzipschaltungen und Berechnungen am Transistor.	112
2.8.15	Rechenaufgaben zum (bipolaren) Transistor	113
2.8.16	Der NPN-Transistor als Schalter (Laborversuch)	114
2.8.17	Der PNP-Transistor als Schalter (Laborversuch)	115
2.8.18	Anwendungsbeispiel Transistor als Schalter (Endstufe): Beleuchtung Nfz	115
2.8.19	Der (unipolare) Feldeffekt-Transistor am Beispiel N-Kanal-MOS-FET.	116
2.8.20	N-Kanal-MOS-FET als Schalter (Laborversuch)	117
2.8.21	Anwendungsbeispiel MOS-FET (Endstufe) im Kraftfahrzeug	118
2.8.22	Der Thyristor	119
2.8.23	Thyristor-Anwendung in Motorrad-Drehstrom-Gleichrichter und -„Regler“	120
2.8.24	Der IGBT-Transistor (Laborversuch)	121
2.8.25	Anwendung des IGBT-Transistors als Wechselrichter in HV-Klima-Kompressoren	122
2.8.26	Testaufgaben zu 2.7 und 2.8	123

3	Welche elektrischen Maschinen und Geräte werden in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen verwendet?	125
3.1	Generator	125
3.1.1	Spannungserzeugung durch Induktion der Bewegung (Generator-Prinzip)	125
3.1.2	Laborversuch zur Spannungserzeugung durch Induktion der Bewegung	126
3.1.3	Was ist Drehstrom?	127
3.1.4	Drehstromgenerator (Stern- und Dreieckschaltung)	128
3.1.5	Bauteile des Drehstrom-Generators	131
3.1.6	Gleichrichtung der 3-Phasen-Wechselspannung	132
3.1.7	Drehstrom-Generator mit Erreger-Dioden und Regler	133
3.1.8	Transistor-Regler	135
3.1.9	Transistor-Regler (Laborversuch)	136
3.1.10	Leistungsstarke wassergekühlte Drehstrom-Generatoren	137
3.1.11	Exemplarische Kennlinie eines luftgekühlten Generators	139
3.1.12	Berechnung von Arbeit, Leistung, Wirkungsgrad und Riementrieb beim Generator	139
3.1.13	Hochvolt-Generator im Fahrzeug	141
3.1.14	Gleichrichten als erste Aufgabe des Inverters in elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen	142
3.2	DC/AC- und DC/DC-Wandler	142
3.2.1	Spannungserzeugung durch Induktion der Ruhe (Trafo-Prinzip)	142
3.2.2	Trafo-Prinzip (Laborversuch)	143
3.2.3	Rechenaufgaben zum Trafo-Prinzip	144
3.2.4	Anwendungsbeispiele zum Trafo-Prinzip	146
3.2.5	Blockschaltbild eines Inverters im Kfz (einschließlich DC/DC-Wandler)	147
3.2.6	Aufbau und Funktion eines einfachen DC/DC-Wandlers (Laborversuch) – Zweite Aufgabe des Inverters: Anheben bzw. Absenken der HV-Spannung im Kfz	148
3.2.7	Aufbau und Funktion einer Ladepumpe bzw. eines Aufwärtswandlers im Kraftfahrzeug	149
3.2.8	Funktion eines DC/AC-Wandlers mit IGBT-Transistoren (Laborversuch)	150
3.2.9	Versuchsaufbau und Ergebnis eines DC/AC-Wandlers bzw. eines Inverters	151
3.2.10	Wie erzeugt der Inverter einen sinusförmigen Drehstrom für ein steuerbares Drehfeld? – Dritte Aufgabe des Inverters in einem elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeug	152
3.2.11	Testaufgaben zu 3.1 und 3.2	154
3.3	Drehstrommotor	156
3.3.1	Das Drehfeld aus dem öffentlichen Netz	156
3.3.2	Entstehung der Drehbewegung in einem Drehstrommotor	157
3.3.3	Prinzip des Synchron-Drehstrommotors	158
3.3.4	Einsatzbeispiele für Synchron-Motoren in HV-Fahrzeugen	162
3.3.5	Asynchron-Drehstrommotor	164
3.3.6	Vergleich von Synchron- und Asynchron-Maschine als scheibenförmiger Motor-Generator für Mild-Hybrid-Anwendungen	166
3.3.7	Kennlinien und Laufverhalten von drehzahl- und lastgesteuerten Drehstrommotoren im Kraftfahrzeug	167
3.3.8	Rechenaufgaben zu Drehstrommotoren	170
3.3.9	Asynchron-Motor im E-Fahrzeug	172
3.3.10	Wie kann man mit Gleichstrom ein Drehfeld für einen Drehstrommotor erzeugen?	173
3.3.11	Lehrmittel zum Thema Drehstrommotor im Kraftfahrzeug	174
3.3.12	Kraftfahrzeug-HV-Bordnetze	175
3.4	Gleichstrommotor	176
3.4.1	Arbeitsprinzip des Gleichstrommotors	176
3.4.2	Aufbau und Funktion des Gleichstrommotors	178
3.4.3	Elektro-Motorische Gegenkraft (EMG)	180
3.4.4	Bauarten von Gleichstrommotoren	182
3.4.5	Starterdiagramm	183
3.4.6	Drehzahlregelung	184
3.4.7	Gleichstromsteller	185
3.4.8	Laborversuch zum Gleichstromsteller	186
3.4.9	Gleichstromsteller im Elektrofahrzeug	187
3.4.10	Laborversuch zur Freilauf-Diode	188

3.4.11	Anwendungen des Gleichstrommotors im Kraftfahrzeug	189
3.4.12	Starter als spezielle Anwendung im Kraftfahrzeug	189
3.4.13	Bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC)	197
3.4.14	Der BLDC-Motor als Antriebsmotor in E-Fahrzeugen	200
3.5	Leitungen, Kabel, Verbindungssysteme, Ladeeinrichtungen	200
3.5.1	Leitungen, besondere Spezifikationen für HV-Kabel	200
3.5.2	Schutz für HV-Leitungen	202
3.5.3	Verlegung von HV-Leitungen	203
3.5.4	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) für HV-Kabel	205
3.5.5	Verbindungssysteme für HV-Kabel	206
3.5.6	Ladegeräte für E- und Plug-In-Hybridfahrzeuge	209
3.5.7	Schaltungsbeispiel für ein Ladegerät in einem Smart ED	210
3.5.8	Ladesäulen	212
3.5.9	Ladeleitungen und Steckverbinder für Ladeeinrichtungen von E-Fahrzeugen	214
3.5.10	Lade- und Batterie-Tausch-Konzepte	217
3.6	Antriebskonzepte	220
3.6.1	Übersicht verschiedener Generator- und Startersysteme	220
3.6.2	Übersicht Antriebskonzepte	221
3.6.3	Entwicklung des Kurbelwellen-Startgenerators als Vorstufe zum Mild-Hybrid	221
3.6.4	Definition Hybridfahrzeug	223
3.6.5	Micro-Hybrid	223
3.6.6	Mild-Hybrid	223
3.6.7	Full- oder Strong-Hybrid	223
3.6.8	Einteilung der Fahrzeuge nach Anordnung der Antriebe	224
3.7	Werkstatt-Arbeiten und Diagnose	231
3.7.1	Diagnose mit dem Werkstatt-Tester	231
3.7.2	Isolations-Widerstand prüfen	232
3.7.3	HV-Spannung prüfen	233
3.7.4	HV-Spannung herstellerspezifisch prüfen	233
3.7.5	Herstellerspezifische Testgeräte	234
3.7.6	Mechanische Austausch-Arbeiten von Hochvolt-Bauteilen	236
4	Welche Gefahren treten für den Mechatroniker in der Werkstatt beim Umgang mit elektrisch betriebenen Kfz auf und wie wird diesen begegnet?	239
4.1	Gefährdung durch Einwirkung elektrischer Ströme	239
4.1.1	Physiologische Wirkung des elektrischen Stroms	239
4.1.2	Auswirkungen auf den menschlichen Organismus	240
4.2	Gefährdung durch Lichtbogeneinwirkung	241
4.2.1	Augenschäden durch Lichtintensität und Strahlung	241
4.2.2	Schäden durch Hitzeentwicklung	241
4.3	Gefährdung durch Sekundärunfälle	241
4.4	Schutzmaßnahmen gegen elektrische Körperdurchströmung und Lichtbogeneinwirkung im öffentlichen Netz und im Kfz	242
4.4.1	Definition/Einteilung von Gefährdungsklassen	242
4.4.2	Gefährdungsgrenzen	242
4.4.3	Aufbau elektrischer Netze	243
4.4.4	Schutzberehrungen in elektrischen Installationen und Geräten	244
4.4.5	Schutzmaßnahmen in Kraftfahrzeugen	247
4.4.6	Festlegung „HV-eigensicheres Fahrzeug“	247
4.4.7	Sicherheitsmaßnahmen bei Arbeiten an Hochvolt-Fahrzeugen	249
4.5	Verhalten bei Unfällen, Erste Hilfe	252
4.5.1	Rechtliche Grundlagen bei Hilfeleistungen	252

4.5.2	Ablaufschema lebensrettender Sofortmaßnahmen	252
4.5.3	Eigensicherung als Helfer, Bergung aus Gefahrenbereichen.	253
4.5.4	Schema von Notfallmeldungen.	253
4.5.5	Einsatz eines AED (automatisierter externer Defibrillator)	253
5	Welche rechtlichen Vorschriften müssen in der Werkstatt beim Umgang mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen beachtet werden? Welche Anforderungen werden an das Werkstatt-Personal gestellt?	255
5.1	(Un-)überschaubarer „Wald“ von Gesetzen, Verordnungen und Vorschriften.	255
5.1.1	Elektrofachkraft.	260
5.1.2	Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten	260
5.1.3	Elektrotechnisch unterwiesene Person.	260
5.1.4	Elektrotechnischer Laie	260
5.1.5	Verantwortliche Elektrofachkraft	260
5.1.6	Verantwortung der Elektrofachkraft	261
5.1.7	Unternehmerverantwortung	261
5.1.8	Fachkundiger für Arbeiten an HV-eigensicheren Fahrzeugen	262
5.1.9	Bedeutung dieser Vorschriften für Schulen, Bildungszentren und deren (Schul-) Leitungen beim Erwerb und bei der Nutzung von HV-Fahrzeugen	262
5.2	Auswirkungen der Gesetze und Vorschriften.	263
5.2.1	Folgen von Pflichtverletzungen.	263
5.2.2	Gefährdungsbeurteilung (Risikobewertung).	263
5.2.3	Betriebsanweisung – Gebrauchsanweisung – Hersteller-Produktschulung.	265
5.2.4	Unterweisung des Werkstatt-Personals/der Auszubildenden	267
5.2.5	Elektrisches Freischalten der betroffenen Fahrzeuge (Grundsatz)	269
5.2.6	Spannungsfreiheit feststellen und dokumentieren.	269
5.3	Beispiele für Zertifikate „Fachkundiger (ehemals Elektrofachkraft) für HV-Systeme in Kfz“	270
5.4	Zertifikat für die Sensibilisierung für die Durchführung nicht-elektrotechnischer Arbeiten an HV-Fahrzeugen	273
5.5	Höhere Anforderungen für Entwickler, Nach- und Umrüster von Fahrzeugen und bei Arbeiten unter Spannung.	273
5.6	Besondere Rechtsvorschrift für die Prüfung „Zusatzzqualifikation Fachkraft ...“ der IHK.	275
6	Beschreibung der Technik und des Freischaltens anhand exemplarischer Beispiele konkreter Serienfahrzeuge	279
6.1	Beispiel „Mild-Hybrid“: Mercedes S 400 Hybrid.	279
6.1.1	Aufbau des Systems mit Einbindung ins Kraftfahrzeug.	279
6.1.2	Bauteile	280
6.1.3	Betroffene Nebenaggregate	281
6.1.4	Rekuperatives Bremsen	281
6.1.5	Schaltung rekuperatives Bremssystem (RBS)	283
6.1.6	Kühlung der HV-Aggregate	285
6.1.7	Funktion und Anzeige des Energieflusses	286
6.1.8	Sicherheitsphilosophie des Herstellers	286
6.1.9	Freischalten und Spannungsfreiheit feststellen und dokumentieren	287
6.2	Beispiel „Voll-Hybrid“: Toyota Prius mit Integration der Motor-Generatoren in das Getriebe für Frontantrieb.	288
6.2.1	Überblick Hybridfahrzeug	288
6.2.2	Aufbau des Systems mit Einbindung ins Kraftfahrzeug	289

6.2.3	Bauteile und Besonderheiten beim Toyota Prius	289
6.2.4	Aufgaben der Hauptkomponenten	290
6.2.5	Wozu wird ein Inverter benötigt?	291
6.2.6	Auslegung des Verbrennungsmotors	292
6.2.7	Hybrid-Antriebseinheit	293
6.2.8	Antrieb und Fahrsituationen	294
6.2.9	Nomografisches Diagramm	297
6.2.10	Bedienung und Anzeigen	298
6.2.11	12-V-Spannungsversorgung und Aufbau des Hochvolt-Bordnetzes	299
6.2.12	Sicherheitsphilosophie des Herstellers	302
6.3	Beispiel „Elektrofahrzeug“: Smart ED (Electric Drive)	308
6.3.1	Kleiner Überblick über weitere Elektrofahrzeuge	308
6.3.2	Welche Regeln gelten beim Umgang mit rein elektrischen Kraftfahrzeugen im Vergleich zu Hybridfahrzeugen?	309
6.3.3	Bauteile und Besonderheiten beim smart fortwo ed	309
6.3.4	Erläuterungen zu den Hauptkomponenten	310
6.3.5	Freischalten und Spannungsfreiheit feststellen und dokumentieren	315
6.4	Beispiel „Brennstoffzellen-Fahrzeug“: Mercedes B-Klasse F-Cell	317
6.4.1	Geschichtliche Entwicklung	317
6.4.2	Brennstoffzellensysteme	317
6.4.3	Funktionsprinzip der PEM-Brennstoffzelle	318
6.4.4	Aufbau eines Brennstoffzellen-Stacks	319
6.4.5	Schematischer Aufbau eines BZ-Fahrzeugs	320
6.4.6	Vorgänge im Fahrbetrieb	320
6.4.7	Wasserstoff-Speichersysteme	321
6.4.8	Wirkungsgrade	322
6.5	Beispiele für weitere Hybrid- und E-Fahrzeuge	324
6.5.1	Mercedes Atego Hybrid als Beispiel für den Einsatz von E-Antrieben im Nutzfahrzeug-Bereich	324
6.5.2	Elektro-Fahrräder	325
6.5.3	Elektro-Roller, Elektro-Bikes, Elektro-Dreiräder	326
Lösungen	329	
Anhang	369	
7.1	Fachbegriffe nach Langenscheidt	369
7.2	Bildquellenverzeichnis	370
7.3	Stichwortverzeichnis	371