

Inhalt

1	Warum muss man eine Hochvolt-Qualifikation besitzen, um an modernen Kraftfahrzeugen mit E-Antrieben arbeiten zu dürfen?...	1
1.1	Einleitung mithilfe von Arbeits-Situationen im Alltag	1
1.2	Verankerung der Qualifikation in der DGUV Information 209-093.....	5
1.3	Warum elektrisch angetriebene Kfz jetzt?	11
1.4	Probleme beim Ausbau der E-Mobilität	15
1.5	Wie sieht die Prognose für die Zukunft aus?	20
1.6	Wer kauft nun diese E-Fahrzeuge?	24
1.7	Ist die Umweltbilanz von E-Pkw besser als bei konventionellen Pkw?...	25
1.8	Welche Reichweiten sind in Zukunft zu erwarten und wie entwickeln sich dazu die Batterien?	25
1.9	Zeichnen sich Rohstoff-Engpässe für die E-Mobilität ab?	27
2	Grundsätzlicher Aufbau von HV-Fahrzeugen.....	28
2.1	Die typischen Hochvolt-Bauteile	30
3	Antriebskonzepte: Definitionen und Klassifizierung von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Elektro-Antrieben	34
3.1	Definition Hybridfahrzeug.....	34
3.2	Aufbau eines Hybridfahrzeugs.....	35
3.3	Einteilung der E-Fahrzeuge nach Anordnung der Antriebe	36
3.4	Klassifizierung von Parallelhybrid-Fahrzeugen	37
3.5	Einteilung der Hybridfahrzeuge nach Leistung bzw. nach Hybridisierungsgrad	39
3.6	Einteilung der E-Fahrzeuge nach Aufbau des Antriebsstrangs.....	40
4	Welche Gefahren treten für den Entwickler, den Mitarbeiter in der Werkstatt, beim Abschleppdienst oder für den Ersthelfer bei Unfällen beim Umgang mit elektrisch betriebenen Kfz auf und wie wird diesen begegnet?.....	54
4.1	Statistische Erfahrungen der Berufsgenossenschaften mit Elektrounfällen	57
4.2	Gefährdung durch Einwirkung elektrischer Ströme	59
4.2.1	Physiologische Wirkung des elektrischen Stromes.....	59
4.2.2	Auswirkungen des elektrischen Stroms auf den menschlichen Organismus ...	62
4.3	Gefährdung durch Lichtbogeneinwirkung	65
4.3.1	Augenschäden durch Lichtintensität und Strahlung	67
4.3.2	Schäden durch Hitzeentwicklung	67
4.4	Gefährdung durch Sekundärunfälle	68
4.5	Schutzmaßnahmen gegen elektrische Körperdurchströmung und Lichtbogeneinwirkung im öffentlichen Netz und im Kfz	68
4.5.1	Definition/Einteilung von Gefährdungsklassen	68

4.5.2	Gefährdungsgrenzen	70
4.5.3	Aufbau elektrischer Netze, Gefährdungssituationen	71
4.5.4	Schutzvorkehrungen in elektrischen Installationen und Geräten	72
4.5.5	Schutzmaßnahmen in Kraftfahrzeugen	79
4.5.6	Festlegung „HV-eigensicheres Fahrzeug“	80
4.5.7	Sicherheitsmaßnahmen bei Arbeiten an Hochvolt-Fahrzeugen	89
4.5.8	Persönliche Schutzausrüstung (PSA)	102
4.6	Verhalten bei Unfällen, Erste Hilfe	104
4.6.1	Rechtliche Grundlagen bei Hilfeleistungen	104
4.6.2	Ablaufschema lebensrettender Sofortmaßnahmen	104
4.6.3	Eigensicherung als Helfer, Bergung aus Gefahrenbereichen	105
4.6.4	Schema von Notfallmeldungen	105
4.6.5	Einsatz eines AED (automatisierter externer Defibrillator)	106
5	Welche rechtlichen Vorschriften müssen beim Umgang in der Werkstatt mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen beachtet werden? Welche Anforderungen werden an das Werkstatt-Personal gestellt?	108
5.1	(Un-)überschaubarer „Wald“ von Gesetzen, Verordnungen und Vorschriften	108
5.1.1	Fachkundige Person Hochvolt (FHV)	113
5.1.2	Fachkundig unterwiesene Person (FUP)	115
5.1.3	Sensibilisierte Person.	117
5.1.4	Elektrotechnischer Laie	117
5.1.5	Leitung und Aufsicht	118
5.1.6	Fachkundige Leitung	118
5.1.7	Betriebliche Organisation.	119
5.1.8	Unternehmerverantwortung.	123
5.1.9	Ausbildung und Qualifikation der Mitarbeiter.	125
5.2	Fachkundige Person Hochvolt (FHV) mit Qualifikation Stufe 3 für Arbeiten an unter Spannung stehenden HV-Komponenten	126
5.2.1	DGUV Vorschrift 3 und „Arbeiten unter Spannung“	127
5.2.2	DGUV I 209-093 und Qualifikation Stufe 3 mit „Arbeiten unter Spannung“	130
5.3	Grundsätze zur Gefährdungsbeurteilung laut DGUV Information 209-093:	131
5.3.1	Wie wird eine Gefährdungsbeurteilung erstellt?	132
5.3.2	Betriebsanweisung.	136
5.4	Hersteller-Produktschulung – Gebrauchsanweisung	141
5.5	Besonderheiten bei der HV-Qualifizierung für Arbeiten im Fertigungsprozess	142
5.5.1	Montage	142
5.5.2	Inbetriebnahme (Finish) nach der Montage	143
5.5.3	Elektrische Prüfungen	143
5.6	Besonderheiten bei Pannenhilfe, Bergen und Verschrotten	144
5.7	Erhaltung der fachlichen Fähigkeit	145
5.8	Folgen von Pflichtverletzungen	146
5.9	Beispiele für Zertifikate „Fachkundiger für Arbeiten an HV-Systemen in Kfz“	148

6	Welches elektrotechnische Grundlagenverständnis muss man auffrischen, um „fit“ für die Hochvolt-Technik in modernen „E-Kfz“ zu sein?	150
6.1	Größen im elektrischen Stromkreis messen und berechnen.	150
6.1.1	Die elektrische Spannung U	150
6.1.2	Der elektrische Strom I	151
6.1.3	Der elektrische Stromkreis.	152
6.1.4	Der elektrische Widerstand R	153
6.1.5	Die elektrische Leistung P	154
6.2	Schaltpläne.	155
6.2.1	Stromlaufplan in zusammenhängender und aufgelöster Darstellung am Beispiel einer Kfz-Innenbeleuchtung	155
6.2.2	Übersichtsschaltplan am Beispiel VW e-up	157
6.2.3	Beispiel normgerechter Stromlaufplan Hybridfahrzeug Toyota Prius I	158
6.2.4	Beispiel eines Hersteller-Stromlaufplans eines VW Touareg Hybrid	159
6.3	Elektrische Schaltungen.	160
6.3.1	Parallelschaltung von elektrischen Verbrauchern	160
6.3.2	Parallelschaltung von Spannungsquellen	161
6.3.3	Reihenschaltung von elektrischen Verbrauchern (am Beispiel der Instrumentenbeleuchtung aus 6.3.1)	162
6.3.4	Reihenschaltung von Spannungsquellen.	163
6.3.5	Warum brauchen wir so hohe Spannungen bei E-Mobilität?	164
6.4	Wechselspannung mit dem Oszilloskop messen.	165
6.5	Elektronische Bauteile	166
6.5.1	Die Diode	166
6.5.2	Einfache Gleichrichtung	167
6.5.3	Brücken-Gleichrichtung	168
6.5.4	B6 Brücken-Gleichrichtung einer 3-Phasen-Wechselspannung (3~)	169
6.5.5	Beispiele für Anwendungen von Dioden im Kraftfahrzeug	170
6.5.6	Die Zener-Diode	171
6.5.7	Anwendungen von Z-Dioden im Kraftfahrzeug	172
6.5.8	Der bipolare Transistor	173
6.5.9	Anwendungsbeispiel Transistor als Schalter (Endstufe): Beleuchtung Nfz	174
6.5.10	Der (unipolare) Feldeffekt-Transistor am Beispiel N-Kanal-MOS-FET	175
6.5.11	Anwendungsbeispiel MOS-FET (Endstufe) im Kraftfahrzeug	176
6.5.12	Der IGBT-Transistor	177
6.5.13	Anwendung des IGBT-Transistors als Wechselrichter in HV-Klima-Kompressoren	178
6.5.14	Der Thyristor	179
6.5.15	Thyristor-Anwendung in Motorrad-Drehstrom-Gleichrichter und -„Regler“	180
6.6	Grundlagen Generator	181
6.6.1	Spannungserzeugung durch Induktion der Bewegung (Generator-Prinzip)	181
6.6.2	Was ist Drehstrom?	183
6.6.3	Drehstromgenerator (Stern- und Dreieckschaltung)	184
6.6.4	Bauteile des Drehstrom-Generators	187
6.6.5	Gleichrichtung der 3-Phasen-Wechselspannung im herkömmlichen Kfz	188
6.6.6	Drehstrom-Generator mit Erreger-Dioden und Regler	189
6.6.7	Hochvolt-Generator im Fahrzeug	190
6.6.8	Gleichrichten als erste Aufgabe des Inverters in elektrisch angetriebenen Kfz	191

7	Elektrische Energie speichern	192
7.1	Die Bleibatterie als Bordnetz-Spannungsquelle im Fahrzeug	192
7.1.1	Unterschied zwischen einer galvanischen Zelle und einem Akku	192
7.1.2	Aufbau einer herkömmlichen Starterbatterie (Akkumulator)	192
7.1.3	Lade- und Entladevorgänge in einem Blei-Akku	194
7.1.4	Blei-Akkus ... und die Anwendung im Kraftfahrzeug	196
7.2	Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd)	197
7.3	NiMH-Akku ... und die Anwendung in elektrisch angetriebenen Kfz	198
7.4	Lithium-Technik für HV-Batterien	201
7.4.1	Aufbau und Funktion Li-Ionen-Akku	201
7.4.2	Bauformen Li-Ionen-Akkus	202
7.4.3	Zell-Fertigung	204
7.4.4	Begriffserklärungen bei Li-Ionen Batterien	207
7.4.5	Alterung Li-Ionen-Akku	208
7.4.6	Arbeitsbereich Li-Ionen-Zelle	210
7.4.7	Lebensdauer von Li-Ionen-Zellen	211
7.4.8	Unterschiedliche Elektroden-Materialien für Li-Ionen-Zellen	213
7.4.9	Feststoffbatterien mit Li-Ionen-Technik	215
7.4.10	Sicherheitskonzepte für HV-Batterien mit Li-Ionen-Technik	216
7.4.11	Aufbau einer HV-Batterie	219
7.4.12	Zell-Balancing	221
7.4.13	Batterie-Bauformen/-Größen	222
7.4.14	Zusammenfassung Li-Ion-Batterien	224
7.4.15	Was ist bei Unfällen von HV-Fahrzeugen mit Li-Ion-Batterien zu beachten?	224
7.4.16	Transport und Lagerung von Li-Ionen-Batterien	226
7.4.17	Reparatur und Recycling von Li-Ionen-Batterien	229
7.5	HV-Batterien im Einsatz	232
7.5.1	Kühlung der NiMH- und Li-Ion-Hochvolt-Batterien	232
7.5.2	Rechenaufgabe zu HV-Batterien zur Verdeutlichung der Zusammenhänge	236
7.6	Der Kondensator als Ladungs- und Energiespeicher	240
7.6.1	Rechenaufgaben zum Kondensator	241
7.6.2	Lade- und Entladekurve des Kondensators mit dem Oszilloskop darstellen	244
7.6.3	Anwendungsbeispiel Kondensator im Kfz: Sound-Anlage	245
7.6.4	Doppelschicht-Kondensatoren im Kfz	246
7.6.5	Wozu werden Kondensatoren in E-Antrieben von Kraftfahrzeugen benötigt?	249
7.6.6	Kondensator zum Glätten von Mischspannungen (Laborversuch)	249
7.6.7	Der Kondensator im Zwischenkreis des Inverters	252
8	Elektrische Ströme elektromagnetisch schalten (Relais und Schütz)	255
8.1	Magnetismus	255
8.2	Drehzahl- und Rotorlagensensorik	257
8.3	Rotoren mit Dauermagneten	259
8.4	Elektromagnetismus	260
8.5	Wirkung von Eisen im Magnetfeld	262
8.6	Elektromagnetisches Relais	265
8.7	Schütze in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen	266

8.8	Weitere Sicherheits-Relais/Schütze sowie Entladewiderstände in E-Fahrzeugen	274
9	AC/DC-, DC/AC- und DC/DC-Wandler im HV-Fahrzeug	277
9.1	DC/DC-Wandler für die Bordnetz-Spannungsversorgung des HV-Fahrzeugs	277
9.1.1	Spannungserzeugung durch Induktion der Ruhe (Trafo-Prinzip).	278
9.1.2	Der Transformator an Gleichspannung (DC)	279
9.1.3	Technische Ausführung der DC/DC-Wandler mit Mittelanzapfung des Trafos . .	280
9.1.4	Blockschaltbild eines Inverters im Kfz (einschließlich DC/DC-Wandler)	281
9.2	DC/DC-Wandler im Eingang des Inverters	283
9.2.1	Aufbau und Funktion eines Hochsetzers (Ladepumpe, Aufwärtswandler)	284
9.2.2	Aufbau und Funktion eines Tiefsetzers (Abwärtswandler).	285
9.2.3	Gesamtschaltung des DC/DC-Wandlers im Eingang des Inverters	286
9.3	DC/AC- und AC/DC-Wandler bzw. Wechsel- und Gleichrichter des HV-Fahrzeugs	287
9.3.1	Prinzipielle Wechselrichtung des DC/AC-Wandlers einer Phase.	288
9.3.2	Prinzipielle Wechselrichtung für die drei Phasen eines Drehstrommotors	289
9.3.3	Prinzipielle Erzeugung eines sinusförmigen Stromverlaufs im Inverter	291
9.3.4	Der Wechselrichter als Hochsetzer	294
9.4	AC/DC-Wandler im Ladegerät des HV-Fahrzeugs	295
9.4.1	Einphasiges Laden.	296
9.4.2	Zweiphasiges Laden	299
9.4.3	Dreiphasiges Laden	300
9.4.4	Dreiphasiges Laden an 400 V am Beispiel des Chameleon-Laders des Renault ZOE	301
9.5	HV-Booster	305
10	Drehstrom-Maschine als Antriebsmotor	309
10.1	Das Drehfeld aus dem öffentlichen Netz	309
10.2	Entstehung der Drehbewegung in einem Drehstrommotor	310
10.3	Prinzip des Synchron-Drehstrommotors	311
10.4	Einsatzbeispiele für Synchron-Motoren in HV-Fahrzeugen	317
10.5	Asynchron-Drehstrommotor	324
10.6	Vergleich von Synchron- und Asynchron-Maschine als scheibenförmiger Motor-Generator für Mild-Hybrid-Anwendungen	326
10.7	Kennlinien und Laufverhalten von drehzahl- und lastgesteuerten Drehstrommotoren im Kraftfahrzeug	327
10.8	Leistungsfaktor $\cos \varphi$ bei Drehstrommotoren.	334
10.9	Asynchron-Motor im E-Fahrzeug.	334
11	Gleichstrommotor.	337
11.1	Arbeitsprinzip des Gleichstrommotors.	337
11.2	Aufbau und Funktion des Gleichstrommotors	339
11.3	Elektro-Motorische Gegenkraft (EMG)	342
11.4	Bauarten von Gleichstrommotoren	343

11.5	Drehzahlregelung	344
11.6	Gleichstromsteller durch Antakten (PWM und Tastverhältnis)	345
11.7	Gleichstromsteller im Elektrofahrzeug	347
11.8	Freilauf-Diode (in HV-Schaltungen)	348
11.9	Bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC)	349
11.10	Der BLDC-Motor als Antriebsmotor in E-Fahrzeugen	352
12	HV-Leitungen, Verbindungssysteme und Stecker	353
12.1	Leitungen, besondere Spezifikationen für HV-Kabel	353
12.2	Schutz für HV-Leitungen	355
12.3	Verlegung von HV-Leitungen	359
12.4	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) für HV-Kabel	360
12.5	Verbindungssysteme für HV-Kabel	363
13	Isolationsüberwachung	369
13.1	Prinzip der Überwachung und ECE R 100	369
13.2	Überwachung mit zwei Reaktionsschwellen	370
13.3	Veränderlicher Isolationswiderstand im HV-System	371
13.4	Funktionsprinzip des Iso-Wächters	374
13.5	Auswirkung eines 1. Fehlers im HV-Netz des Fahrzeugs mit Iso-Wächter	376
14	Potenzialausgleich als Schutzmaßnahme im E-Fahrzeug	378
14.1	Aufgabe des Potenzialausgleichs	378
14.2	Beispiele zur Ausführung vom Potenzialausgleich	381
14.3	Zusätzlicher Potenzialausgleich durch Abschirmung	382
14.4	Auswirkung eines 2. Fehlers im IT-Netz der HV-Anlage des Fahrzeugs ...	384
14.5	HV-Leitungen mit EMV-Verschraubungen und Massebänder für Potenzialausgleich herstellen	386
15	Ladetechnik	401
15.1	IEC-Normen – Sicherheitsvorschriften	401
15.1.1	DIN EN 62196-1 (VDE 0623-5-1):2015-06 Allgemeine Anforderungen für konduktives Laden	402
15.1.2	DIN EN 62196-2 (VDE 0623-5-2):2020-02 Anforderungen und Maße für Kompatibilität beim AC-Laden	410
15.1.3	DIN EN 62196-3 (VDE 0623-5-3):2015-05: kombinierte Fahrzeugkupplungen und -stecker	414
15.1.4	DIN EN IEC 61851-1 (VDE 0122-1):2019-12 Kommunikation für konduktive Ladesysteme für E-Kfz.	416
15.2	Lademodi, Ladeleistungen und Lade-Infrastruktur	424
15.2.1	Lademodi	424
15.2.2	Lade-Leistung	424
15.2.3	Schaltungsbeispiel für ein Ladegerät in einem Smart ED II	428
15.2.4	Steckvorrichtungen und Ladeströme	430

15.2.5	Adapter für Ladestecker.	438
15.2.6	Wallboxen.	438
15.2.7	Ladesäulen.	439
15.2.8	Transportable DC-Großlader.	444
15.2.9	DC-Ladestationen mit Pantograf.	444
15.2.10	Laden von Fahrzeug-Flotten.	447
15.2.11	Streckenladen mit Pantograf.	448
15.2.12	Laden bezahlen an öffentlichen Ladesäulen.	449
15.3	Laden und Kommunikation mit Ladeinfrastruktur in der Praxis.	450
15.3.1	Beschreibung des Ladeprüfadapters.	450
15.3.2	Prüfen der Ladespannung.	453
15.3.3	Prüfen des Ladestroms.	456
15.3.4	Prüfen der Ladekommunikation.	459
15.3.5	Isolationsprüfung der Ladeeinrichtung mithilfe des Prüfadapters.	471
15.3.6	Prüfung der Ladestecker-Verriegelung.	473
16	Werkstatt-Arbeiten und Diagnose.	476
16.1	Diagnose mit dem Werkstatt-Tester – keine Freischaltung erforderlich. . .	476
16.2	Isolationswiderstand messen.	477
16.3	HV-Spannung prüfen.	481
16.4	HV-Spannung herstellerspezifisch prüfen.	481
16.5	Messung des Potenzialausgleichwiderstands.	482
16.6	Herstellerunabhängige Testgeräte mit Dokumentation.	484
16.7	Herstellerspezifische Testgeräte.	486
16.8	Mechanische Austauscharbeiten von Hochvolt-Bauteilen.	488
17	Hochvolt im Nutzfahrzeug.	495
17.1	Elektrische Klein-Lkw am Beispiel eSprinter.	498
17.2	Elektrische mittelschwere Verteiler-Lkw am Beispiel eActros.	500
17.2.1	eActros Gen. 1.	500
17.2.2	Funktion der Bremswiderstände am Beispiel des HV-Bordnetzes eines eActros Gen. 1.	504
17.2.3	Das HV-Netz des eActros Gen. 1.	506
17.2.4	eActros Gen. 2.	507
17.2.5	Das HV-Netz des eActros Gen. 2.	512
17.2.6	eActros und Aufbau-Varianten.	513
17.2.7	Frightliner eCascadia.	514
17.3	Beispiele elektrisch angetriebener Lkw von Scania.	515
17.3.1	Hybrid-Lkw am Beispiel des Scania P bzw. G 320 Hybrid.	515
17.3.2	Hybrid-Lkw mit Pantograf am Beispiel des Scania R 450 Hybrid.	516
17.3.3	Rein elektrischer Lkw Scania 45 R oder S.	518
17.4	Elektrisch angetriebener Omnibus am Beispiel eCitaro von EvoBus.	519
17.4.1	Herstellung eines eCitaro.	520
17.4.2	Varianten des eCitaro.	522
17.4.3	Tausch eines Stromsensors in der HV-Batterie eines eCitaro Hybrids.	523
17.5	Lkw umrüsten mit HV-Elektroantrieb.	525
17.5.1	Umrüstprojekt ELIAS mit 44-t-Sattelzugmaschine von MAN.	526

17.5.2 Umrüstung einer Sattelzugmaschine von IVECO durch das Unternehmen EFORCE 526

18 Hochvolt im Motorrad. 528

18.1 Beispiel Harley Davidson LiveWire 529

18.2 Beispiel BMW Elektroroller CE 04 538

18.3 Beispiel Horwin CR6 Pro. 544

19 Hochvolt in Flurförder- und Schienen-Fahrzeugen. 550

19.1 Hochvolt in Flurförder-Fahrzeugen 550

19.1.1 Beispiel Flurförder-Fahrzeuge der Unternehmen MAFI und Trepel 554

19.2 Hochvolt in Schienen-Fahrzeugen. 559

19.2.1 Beispiel Hochvolt in Straßenbahnen 559

19.2.2 Beispiel Hochvolt in Zügen 561

20 Beschreibung der Technik und des Freischaltens anhand von Beispielen konkreter Serienfahrzeuge 566

20.1 Beispiel „Plug-In Hybrid“: Mercedes GLC 350e Plug-In Hybrid. 566

20.1.1 Aufbau des Systems mit Einbindung in Kfz 567

20.1.2 Bauteile. 568

20.1.3 Funktionen 575

20.1.4 Sicherheitsphilosophie des Herstellers: 578

20.1.5 Facelift 300de 4MATIC Plug-In Hybrid. 583

20.2 Beispiel „Voll-Hybrid“: Toyota Prius. 585

20.2.1 Der Toyota Hybridantrieb 586

20.2.2 Erläuterung zum „Voll-Hybrid“ System 586

20.2.3 Hauptkomponente Ottomotor 589

20.2.4 Hauptkomponente Hybrid-Antriebseinheit 590

20.2.5 Antrieb und Fahrsituationen. 592

20.2.6 Nomografisches Diagramm 598

20.2.7 12-V-Spannungsversorgung und Aufbau des Hochvolt-Bordnetzes. 599

20.2.8 Wozu wird ein Inverter benötigt? 602

20.2.9 Prius Plug-In Hybrid ab 2017 606

20.2.10 Sicherheits-Philosophie des Herstellers 607

20.2.11 Sicherheitsmaßnahmen beim Arbeiten am Hochvoltsystem 608

20.3 Beispiel „Elektrofahrzeug“: BMW i3 611

20.3.1 Einbauorte der Hochvolt-Komponenten 612

20.3.2 Technische Daten: E-Maschine, HV-Batterie, Verbrennungsmotor und Fahrleistungen. 613

20.3.3 Aufbau des Antriebssystems 613

20.3.4 Bezeichnung der Elektromaschinen nach GS90023 614

20.3.5 Prinzipielle Funktionsweise der elektrischen Maschine. 614

20.3.6 Leistung- und Drehmoment-Daten der E-Maschine 615

20.3.7 Aufbau der E-Maschine 616

20.3.8 Elektrische Schnittstellen zwischen Leistungselektronik und E-Maschine 617

20.3.9 Sensoren 617

20.3.10 Aufbau und Funktion des Getriebes	618
20.3.11 Elektromaschinen-Elektronik EME	620
20.3.12 Merkmale und Aufbau der Hochvolt-Batterie	624
20.3.13 Elektrischer Kältemittelkompressor EKK	629
20.3.14 Elektrische Heizung	629
20.3.15 Range Extender REX	630
20.3.16 Sicherheitsmaßnahmen durch Hochvolt-Kontaktüberwachung	632
20.3.17 Fahrzeug spannungsfrei schalten	633
20.3.18 Aufstarten des HV-Systems (bei jedem Fahrtantritt)	633
20.4 Beispiel „Brennstoffzellen-Fahrzeug“: Hyundai Nexso.....	634
20.4.1 Geschichtliche Entwicklung	634
20.4.2 Brennstoffzellensysteme	635
20.4.3 Funktionsprinzip der PEM-Brennstoffzelle	637
20.4.4 Aufbau eines Brennstoffzellenstacks	638
20.4.5 Schematischer Aufbau eines BZ-Fahrzeuges	639
20.4.6 Vorgänge im Fahrbetrieb	641
20.4.7 Wasserstoff-Speichersysteme	642
20.4.8 Wirkungsgrade	647
Anhang	648
Bildquellenverzeichnis	648
Sachwortverzeichnis	650