Inhaltsverzeichnis

Vorwort I

Kurzfassung II

Abstract III

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis IX

1 Einleitung 1

2 Ladesysteme und Fahrzeugbatterien aus Systemsicht 5
2.1 Stand der Technik und Wissenschaft . . . 5
2.1.1 Applikationen . . . 6
2.1.2 Heutiger Stand der Entwurfsmethoden . . . 8
2.2 Systemtopologie . . . 8
2.2.1 Varianten der Systemtopologien für einphasige Ladegeräte . 9
2.2.2 Varianten der Systemtopologien für mehrphasige Ladegeräte 12
2.3 Topologien zur Leistungsfaktorkorrektur . . . 13
2.3.1 Topologien für einphasige Leistungsfaktorkorrekturen . . . 14
2.3.2 Topologien für dreiphasige Leistungsfaktorkorrekturen . . . 20
2.4 Topologien der DC/DC-Wandler . . . 21
2.4.1 CLLC-Wandler . . . 21
2.4.2 Dual-Active-Bridge . . . 30
2.5 Fahrzeugbatteriemodelle . . . 37
2.5.1 Impedanzspektroskopie . . . 38
2.5.2 Generisches Batteriemodell . . . 40
2.5.3 Modell eines Fahrzeugbatteriesystems . . . 42

3 Systemorientierte Entwurfsmethodik 44
3.1 Motivation einer systemorientierten Auslegungsmethodik durch Systembetrachtungen . . . 45
3.2 Entwicklung einer Entwurfsmethodik . . . 47
3.3 Integration einer Rapid Prototyping Umgebung in die Entwurfsmethodik . . . 52
3.3.1 Entwurfsprozess eines Ladegerätes unterstützt durch eine Rapid Prototyping Umgebung . . . 52

3.3.2 Vorteile und Ziele der RP-Umgebung 55
3.3.3 Anforderungen an die RP-Umgebung 56
3.3.4 Entwurf der RP-Umgebung 59
3.3.5 Übergang von der RP-Umgebung zum eigenständigen Funktionsmuster 63
3.4 Methode zur Modellbildung der Leistungselektronik 64
3.4.1 Motivation zur Entwicklung einer Methode zur Modellbildung der Leistungselektronik 64
3.4.2 Methode zur Berechnung der Strom- und Spannungszeitverläufe 66
3.5 Erweiterung der Modellbildung für Systembetrachtungen 73

4 Anwendung der Entwurfsmethodik 75
4.1 Definition der Anforderungen 75
4.2 Vorauswahl und Eingrenzung der Systemtopologien, Topologien für die Leistungsfaktorkorrektur und DC/DC-Wandler 76
4.3 Anwendung der Methode zur Modellbildung der Leistungselektronik 80
4.3.1 Modellbildung des CLLC Wandlers 80
4.3.2 Modellbildung der Dual-Active-Bridge 89
4.3.3 Modellbildung der Leistungsfaktorkorrektur 98
4.3.4 Modellbildung des Netzfilters 103
4.3.5 Modellbildung der Batterie und des Ausgangsfilters 106
4.4 Initiale Auslegung und Dimensionierung der Leistungselektronik . 106
4.4.1 Initiale Auslegung und Dimensionierung des CLLC-Wandlers 107
4.4.2 Initiale Auslegung und Dimensionierung der DAB 110
4.4.3 Initiale Auslegung und Dimensionierung der Leistungsfaktorkorrektur 112
4.4.4 Initiale Auslegung des Netzfilters und Auswahl einer Netznachbildung 114
4.5 Topologie- und Komponentenanalyse 114
4.5.1 Analyse des CLLC-Wandlers 114
4.5.2 Analyse der DAB 132
4.5.3 Analyse der Leistungsfaktorkorrektur 139
4.6 Optimierungspotential durch Systemanalyse 142
4.6.1 Betriebsstrategie des Ladegerätes: Wahl der Zwischenkreisspannung 142
4.6.2 Auswirkungen der Leistungspulsation: Wahl der Zwischenkreiskapazität und der Reglerdynamik des DC/DC-Wandlers 145
4.6.3 Netzfilter: Gleich- und Gegentaktströme 152
4.6.4 Zusammenwirken des DC/DC-Wandlers, des Ausgangsfilters und der Batterie; Anforderungen an das Ausgangsfilter 155
4.7 Zusammenfassung: Vorbereitung zur praktischen Evaluation der Entwürfe 162

5 Praktische Umsetzung und Evaluation der Entwurfsmethodik 164
5.1 Potential der Wide-Bandgap Leistungshalbleiter und schaltungstechnische Aspekte bei der Applikation . . . 164
5.1.1 Möglichkeiten zur Steigerung der Leistungsdichte . . . 165
5.1.2 Induktivitätsarmer Aufbau der Kommutierungsmasche . . . 166
5.1.3 EMV, hohe Strom- und Spannungssteilheiten . . . 167
5.1.4 Magnetische Bauelemente . . . 167
5.2 Entwicklung und Aufbau eines GaN Vollbrückenmoduls . . . 167
5.3 Praktische Komponenten-, Topologie- und Systemanalyse . . . 169
5.3.1 Messung der parasitären Ausgangskapazität in situ . . . 170
5.3.2 Messungen des CLLC-Wandlers mit initialer Auslegung . . . 172
5.3.3 Messungen des CLLC-Wandlers mit optimierter Auslegung 176
5.3.4 Messungen der DAB . . . 181
5.3.5 Messungen der Leistungsfaktorkorrektur . . . 189
5.4 Evaluation und Vorbereitung zum Aufbau des Funktionsmusters . 205

6 Zusammenfassung und Ausblick 208

Anhang 212
A RP-Umgebung . . . 212
A.1 Steuerung der RP-Umgebung . . . 212
A.2 Bestückungsoptionen der RP-Umgebung . . . 214
A.3 PWM-Signale für die Steuerung der RP-Umgebung . . . 215
A.4 Informations- und Energiefluss in der RP-Umgebung . . . 216
B Lösungen und Lösungsweg zum Modell des CLLC-Wandlers . . . 217
B.1 Lösungen der CLLC-Wandler Schaltzustände . . . 217
B.2 Definition des Gleichungssystems zum P0 Schaltzustand . . . 221
B.3 Definition des Gleichungssystems zum 0P0 Schaltzustand . 221
C Lösungen der DAB Schaltzustände . . . 222
C.1 P Schaltzustand . . . 222
C.2 N Schaltzustand . . . 222
C.3 Pc Schaltzustand . . . 222
C.4 Nc Schaltzustand . . . 223
D Matrizen für das Gleichungssystem des Modells der Leistungsfaktorkorrektur . . . 224
E Verlustmodelle der Leistungshalbleiter und magnetischen Bauelemente . . . 225
E.1 Verlustmodellbildung der Leistungshalbleiter . . . 225
E.2 Verlustmodellbildung der magnetischen Bauelemente . . . 226
F Schaltverhalten der GaN-Halbbrücke . . . 227
G Aufbau der magnetischen Bauelemente . . . 229
G.1 Magnetische Bauelemente für den CLLC-Wandler . . . 229
G.2 Magnetische Bauelemente für die DAB . . . 231
G.3 Magnetische Bauelemente für die Leistungsfaktorkorrektur . 232

H Aufbau des Ein- und Ausgangsfilters 233
I Messungen zum CLLC-Wandler 234
I.1 Messungen zum CLLC-Wandler mit initialer Auslegung . . 234
I.2 Messungen zum CLLC-Wandler mit optimierter Auslegung 235

Tabellenverzeichnis **236**

Abbildungsverzeichnis **238**

Literaturverzeichnis **245**