

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 Entwurfs- methodik	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 Modellbil- dung der Leistungselektronik	64
3.4.2	Methode zur Berechnung der Strom- und Spannungszeit- verläufe	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 Leistungsfak- torkorrektur	112
4.4.4	Initiale Auslegung des Netzfilters und Auswahl einer Netz- nachbildung	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 Zwischenkreis- spannung	142
4.6.2	Auswirkungen der Leistungspulsation: Wahl der Zwischen- kreiskapazität 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 Ausgangsfil- ters 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 schaltungs- technische 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 Leistungsfak- torkorrektur	224
E	Verlustmodelle der Leistungshalbleiter und magnetischen Bauele- mente	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