



Konstantin Siebke (Autor)  
**Systemorientierte Entwurfsmethodik für  
Fahrzeugladegeräte**



**IMAB** Institut für Elektrische Maschinen,  
Antriebe und Bahnen  
TU Braunschweig

Konstantin Siebke

Systemorientierte Entwurfsmethodik für  
Fahrzeugladegeräte



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8504>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Ladesysteme und Fahrzeugbatterien aus Systemsicht</b>	<b>5</b>
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
<b>3 Systemorientierte Entwurfsmethodik</b>	<b>44</b>
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
<b>4</b>	<b>Anwendung der Entwurfsmethodik</b>	<b>75</b>
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

<b>5</b>	<b>Praktische Umsetzung und Evaluation der Entwurfsmethodik</b>	<b>164</b>
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
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>208</b>
	<b>Anhang</b>	<b>212</b>
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-Halbrücke . . . . .	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
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>236</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>238</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>245</b>