

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	13
1.1 Auswirkungen der Miniaturisierung	14
1.2 Fragestellung	15
1.3 Gliederung der vorliegenden Arbeit	16
2 Stand der Technik	17
2.1 Siliziumcarbid (SiC)	19
2.1.1 Aufbau und Eigenschaften	19
2.1.2 Verfügbare Bauteile	20
2.1.3 Funktionsweise von SiC-MOSFETs	22
2.1.4 Schaltfrequenzen	25
2.1.5 Varianten	26
2.2 Galliumnitrid (GaN)	26
2.2.1 Aufbau und Eigenschaften	27
2.2.2 Funktionsweise	31
2.2.3 Bauteilarten	33
2.2.4 Schaltfrequenzen	38
2.3 Auswirkungen von WBG-Bauelementen auf die Leistungselektronik	39
2.3.1 Schaltzelle	39
2.3.2 Treiber	40
2.3.3 Magnetische Komponenten	41
2.3.4 Kühlung	42
2.3.5 Elektromagnetische Verträglichkeit	44

2.4	Zusammenfassung	45
3	Messung von Halbleiterverlusten	47
3.1	Methoden zur Messung von Halbleiterverlusten	49
3.1.1	Kalorimetrische Verlustmessung	49
3.1.2	Doppelpulstest	51
3.2	Einfluss von Stromsensoren auf eine Messschaltung	56
3.2.1	Annahmen und Näherungen	57
3.2.2	Veränderung des Stromes durch den Sensor	60
3.2.3	Sensor-Messfehler	62
3.2.4	Messdaten-Aufzeichnung	71
3.2.5	Berechnung des gesamten Fehlers	74
3.3	Stromsensoren für den Doppelpulstest	75
3.3.1	Induktive Sensoren	79
3.3.2	Strommesswiderstände	87
3.4	Einsatzbereiche für Stromsensoren	116
3.5	Zusammenfassung	123
4	Entwärmung diskreter Wide Band Gap Halbleiter	125
4.1	Bestandteile eines Kühlsystems	126
4.1.1	Wärmestrom im Halbleiter	126
4.1.2	Thermisch-mechanische Anbindung diskreter Halbleiter	127
4.1.3	Thermisch-elektrische Anbindung diskreter Halbleiter	128
4.1.4	Kühlkörper	134
4.2	Entwärmung kompakter Bauteile	135
4.3	Vermessung thermischer Interface-Materialien	136
4.3.1	Messprinzip ohne Kompensationsheizung	138
4.3.2	Messprinzip mit Kompensationsheizung	148
4.3.3	Kalibrierung des Prüfstands	154
4.4	Zusammenfassung	162
5	Miniaturisierung leistungselektronischer Schaltzellen	163
5.1	Rahmenbedingungen für die Miniaturisierung von Schaltzellen	164
5.1.1	Kategorisierung von SiC- und GaN-Halbleitern entsprechend ihrer Sperrspannungen	165

5.2	Methodik zur Abschätzung der Auswirkungen der bisherigen Ergebnisse	166
5.2.1	Berechnung der maximalen Schaltfrequenz	167
5.2.2	Annahmen für den Vergleich von Bauteilen verschiedener Technologien	175
5.3	GaN-Schaltzellen bis 100 V	180
5.3.1	Direktvergleich eines 100 V Si-MOSFET mit einem GaN-E-HEMT bei Nennströmen von 0,5 A	181
5.3.2	Direktvergleich eines 100 V Si-MOSFET mit einem GaN-E-HEMT bei Nennströmen von 90 A	183
5.4	GaN- und SiC-Schaltzellen um 650 V	188
5.4.1	Direktvergleich von 650 V Si-, SiC- und GaN-Halbleitern für Nennströme von 20 A	189
5.4.2	Direktvergleich von 650 V Si-, SiC- und GaN-Halbleitern für Nennströme um 60 A	191
5.5	SiC-Schaltzellen bis 1700 V	196
5.5.1	Direktvergleich eines 1700 V Si-IGBT mit einem Si- und einem SiC-MOSFET für Nennströme um 6 A	197
5.5.2	Direktvergleich eines 1700 V Si-IGBT mit einem SiC-MOSFET für Nennströme um 70 A	198
5.6	Zusammenfassung	198
6	Zusammenfassung und Ausblick	205
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	205
6.2	Bedeutung für die Miniaturisierung	207
6.3	Schlussfolgerungen und Ausblick	207
Anhang		211
A	Berechnung der inneren Induktivität eines Koaxialshunts	211
B	Berechnung des systematischen Messfehlers des entwickelten TIM-Prüfstands	225
Quellenverzeichnis		229
Literatur	229	
Onlinequellen	236	

Datenblätter	237
Abkürzungen	243
Abbildungsverzeichnis	245
Tabellenverzeichnis	248