

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
1.1	Auswirkungen der Miniaturisierung . . . . .	14
1.2	Fragestellung . . . . .	15
1.3	Gliederung der vorliegenden Arbeit . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>17</b>
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
<b>3</b>	<b>Messung von Halbleiterverlusten</b>	<b>47</b>
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
<b>4</b>	<b>Entwärmung diskreter Wide Band Gap Halbleiter</b>	<b>125</b>
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
<b>5</b>	<b>Miniaturisierung leistungselektronischer Schaltzellen</b>	<b>163</b>
5.1	Rahmenbedingungen für die Miniaturisierung von Schaltzellen	164
5.1.1	Kategorisierung von SiC- und GaN-Halbleitern ent- sprechend 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
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>205</b>
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	205
6.2	Bedeutung für die Miniaturisierung . . . . .	207
6.3	Schlussfolgerungen und Ausblick . . . . .	207
<b>Anhang</b>		<b>211</b>
A	Berechnung der inneren Induktivität eines Koaxialshunts . . .	211
B	Berechnung des systematischen Messfehlers des entwickelten TIM-Prüfstands . . . . .	225
<b>Quellenverzeichnis</b>		<b>229</b>
	Literatur . . . . .	229
	Onlinequellen . . . . .	236

Datenblätter . . . . .	237
<b>Abkürzungen</b>	<b>243</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>245</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>248</b>