

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>ix</b>
<b>Bildverzeichnis .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>xxvii</b>
<b>1     <b>Einleitung</b> .....</b>	<b>1</b>
1.1   Motivation und Hintergrund .....	1
1.2   Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
<b>2     <b>Stand der Technik und Forschung</b> .....</b>	<b>5</b>
2.1   Aufbau leistungselektronischer Module .....	5
2.2   Konventionelle Verfahren zur Schaltungsträgerherstellung in der Leistungselektronik.....	7
2.2.1   Direct Copper Bonded (DCB) .....	7
2.2.2   Active Metal Brazing (AMB) .....	11
2.2.3   Dickschichttechnik .....	13
2.2.4   Zusammenfassung konventionelle Substrattechnologien .....	15
2.3   Additive Fertigungstechnologien zur Schaltungsträgerherstellung für Hochtemperaturanwendungen .....	16
2.3.1   Thermisches Spritzen .....	16
2.3.2   Gedruckte Elektronik .....	18
2.3.3   Laserbasierte Metallisierungsmethoden.....	20
2.3.4   Zusammenfassung additiver Metallisierungsmethoden .....	25
2.4   Licht-Materie-Wechselwirkungen .....	26
2.4.1   Atomare und molekulare Oszillatoren .....	29
2.4.2   Metalle .....	31
2.5   Grundlagen des Laser Powder Bed Fusions.....	35
2.6   Grundlagen der Laserbearbeitung von Keramiken .....	49
2.7   Zusammenfassung des Standes der Technik und Forschung.....	52
<b>3     <b>Konzeptionierung der Versuchsumgebung</b>.....</b>	<b>55</b>
3.1   Angepasste Concept Laser Mlab Cusing R* .....	56
3.2   Relevante Prozessparameter .....	60
3.3   Verwendete Materialien .....	63
3.3.1   Werkstoff Kupfer .....	63
3.3.2   Aluminiumoxid Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	68

<b>4</b>	<b>Laser Powder Bed Fusion von Kupfer ohne keramisches Substratmaterial .....</b>	<b>73</b>
4.1	Theoretische Überlegungen und Einzelspuranalysen zum Laserstrahlschmelzen von Kupfer .....	74
4.2	Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters .....	77
4.3	Analyse verschiedener Einflussfaktoren auf das Schmelzverhalten sowie die Prozessstabilität .....	80
4.3.1	Einfluss der Lasergeschwindigkeit und des Fokusspots .....	81
4.3.2	Einfluss des Hatchabstandes .....	86
4.3.3	Einfluss der Schichtstärke .....	89
4.3.4	Einfluss des vorliegenden Temperaturniveaus und der Belichtungsfläche .....	92
4.3.5	Entstehende Prozessfehler .....	99
4.3.6	Plasmabildung während des Prozesses .....	100
4.3.7	Zusammenfassung und Zusammenhänge der Schmelzanalyse .....	103
4.4	Analyse des entstehenden Gefüges .....	105
4.5	Qualifizierung der physikalischen Materialeigenschaften .....	107
4.5.1	Mechanische Eigenschaften .....	108
4.5.2	Elektrische und thermische Eigenschaften .....	110
4.6	Zusammenfassung .....	112
<b>5</b>	<b>Laser Powder Bed Fusion auf Aluminiumoxid .....</b>	<b>115</b>
5.1	Laserstrahl-Keramik-Wechselwirkungen im Dauerstrichbetrieb .....	115
5.2	Prozessanalysen von Kupfer-Metallisierungen auf $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	123
5.2.1	Einzelspuranalysen von Kupfer-Keramik-Verbunden .....	125
5.2.2	Parameterentwicklung mit der Zielgröße der Haftfestigkeit sowie Dichte der Kupfer-Metallisierung auf Aluminiumoxid .....	126
5.3	Qualifizierung relevanter Metallisierungseigenschaften .....	139
5.3.1	Haftmechanismus im Metall-Keramik-Interface .....	140
5.3.2	Elektrische Eigenschaften der Metallisierung .....	143
5.3.3	Temperaturwechselbeständigkeit .....	144
5.3.4	Teilentladungsfestigkeit .....	147
5.4	Kupfer-Bismut-Legierung als alternative Metallisierung .....	150
5.4.1	Haftfestigkeit, elektrische Leitfähigkeit und Metallisierungsdichte .....	151
5.4.2	Temperaturwechselbeständigkeit und Teilentladungsfestigkeit .....	152
5.5	Zusammenfassung und Potential räumlicher Metallisierungen .....	154

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>157</b>
<b>7</b>	<b>Summary and outlook.....</b>	<b>163</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>169</b>
	Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen .....	196
	Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten.....	198
	<b>Anhang.....</b>	<b>201</b>