

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	xi
Bildverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxv
Formelverzeichnis	xxvii
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund.....	3
1.2 Ziel der Arbeit.....	4
2 Stand der Technik – Aufbau- und Verbindungstechnik in der Leistungselektronik	7
2.1 Leistungselektronik, ihre Aufgaben und Funktionsweise.....	7
2.2 Aufbau- und Verbindungstechnik von Leistungsmodulen	9
2.2.1 Isolationssubstrate	12
2.2.2 Oberseitenkontaktierung des Halbleiters	13
2.2.3 Vergussmaterialien.....	14
2.2.4 Weichlöten	14
2.2.5 Silberverbindungssintern.....	16
2.3 Die Niedertemperaturverbindungstechnik mit Silber.....	18
2.3.1 Verbindungsbildung durch Sintern	21
2.3.2 Silber als Fügematerial.....	21
2.3.3 Drucksinterprozess mit mikroskaligem Silber.....	23
2.3.4 Konzeptionelle Bewertung der Silbersintertechnologie	25
2.4 Kupfer – Ein alter Werkstoff als Basis für Zukunftstechnologien.....	27
2.4.1 Kupfer als Substitutionsmaterial für Silber in der Sinterverbindungstechnik.....	29
2.4.2 Aktuelle Ansätze des Kupfer-Verbindungssinterns.....	32
2.4.2.1 Verbindungsbildung mit Kupfer im drucklosen Sinterprozess	33
2.4.2.2 Verbindungsbildung im Drucksinterprozess.....	34
2.5 Ableitung des Forschungsbedarfes	37

3 Konzeptionelle Vorgehensweise, Methoden und Material.....	39
3.1 Substitutionskonzept für eine Niedertemperaturverbindungstechnik auf Basis von Kupfer.....	39
3.2 Prozessablauf und -grenzen des Kupferverbindungssinterns	40
3.3 Kupfermaterial.....	43
3.3.1 Elektrolytische Kupferpulver.....	43
3.3.2 Verdüste Kupferpulver.....	45
3.3.3 Gemahlene Kupferpulver	46
3.4 Pulveranalyse.....	47
3.4.1 Partikelgrößenverteilung.....	47
3.4.2 Klopfdichte	48
3.4.3 Spezifische Oberfläche	48
3.4.4 Organische Elementaranalyse	49
3.4.5 Thermische Analyse	50
3.5 Herstellungsprozess der Kupferpasten	51
3.6 Herstellung gesinterter Fügeverbindung	52
3.6.1 Pastendruck	52
3.6.2 Trocknung	52
3.6.3 Bestückung	53
3.6.4 Drucksinterprozess.....	53
3.7 Methoden zur Bestimmung von Materialeigenschaften der gesinterten Kupferschicht.....	55
3.7.1 Bestimmung der Dichte und Porosität gesinterter Schichten und Verbindungen	56
3.7.2 Messung der elektrischen Leitfähigkeit an gesinterten Kupferschichten.....	57
3.7.3 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit gesinterter Kupferschichten	58
3.7.4 Ermittlung der mechanischen Eigenschaft der gesinterten Kupferschicht	61
3.7.4.1 Thermische Ausdehnung.....	63
3.7.4.2 Zugfestigkeit.....	64
3.7.4.3 Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften.....	65
3.7.4.4 Kriechen	67
3.7.5 Beurteilung der Fügeverbindungen	69
3.7.5.1 Schertest.....	69
3.7.5.2 Biegetest	71
3.7.5.3 Zugschertest.....	71

3.8	Beschleunigte Alterung der Fügeverbindung	72
3.8.1	Hochtemperaturlagerung	73
3.8.2	Temperaturwechseltest.....	73
3.8.3	Aktiver Lastwechseltest	75
3.8.4	Hochbeschleunigter Wärme- und Feuchte-Stress-Test.....	79
3.8.5	Auswertung der Lebensdauer.....	79
4	Evaluation und Selektion von Kupferpartikeln als Fügematerial-Komponente	81
4.1	Eigenschaften der Kupferpartikel	81
4.2	Thermisches Verhalten der Kupferpulver	85
4.3	Beurteilung der Kupfer-Pasten.....	91
4.4	Evaluation der Druckergebnisse.....	91
4.5	Beurteilung der Probenkörperherstellung	92
4.6	Evaluation der Zugscherfestigkeit	93
4.7	Evaluation der Fügeverbindung an Testaufbauten	94
4.7.1	Schertest	95
4.7.2	Dornbiegetest.....	98
4.8	Bewertungsmatrix und Auswahl der Kupferpartikel	98
5	Eigenschaften und Charakterisierung gesinterter Kupferschichten.....	101
5.1	Gefüge und Porosität der Kupferschicht	101
5.2	Elektrische Leitfähigkeit.....	105
5.3	Thermische Leitfähigkeit	107
5.4	Mechanische Eigenschaften	110
5.4.1	Thermische Ausdehnung	110
5.4.2	Mechanische Festigkeit und Plastizität der gesinterten Kupferschicht.....	112
5.4.3	Dynamisch-mechanische Eigenschaften der druckgesinterten Kupferschicht	117
5.4.4	Kriechverhalten.....	118
5.5	Anwendung und Einordnung als Fügematerial	122

6	Verbindungsbildung.....	127
6.1	Organische und oxidische Schichten der Kupferflocken.....	128
6.2	Auswertung und Deutung	130
7	Mechanische und thermomechanische Zuverlässigkeit der Kupferverbindungsschicht im Modulaufbau	133
7.1	Auswirkungen der Hochtemperaturauslagerung auf die Kupfersinterschicht.....	133
7.2	Auswirkungen des Temperaturschock-Test auf die Fügeverbindung.....	137
7.2.1	Schädigungen der Kupferfügeschicht im thermischen Schocktest.....	139
7.2.2	Auswertung und Einordnung der thermo-mechanischen Schädigung	144
7.3	Belastung der Fügeschicht im aktiven Lastwechsel-Test.....	147
7.4	Belastung im hochbeschleunigten Wärme- und Feuchte-Stress-Test.....	150
7.5	Fehlermechanismen und Lebensdauer einer Kupfersinterverbindung	151
8	Einflussfaktoren auf die Kupferverbindungsschicht.....	153
8.1	Mahlhilfsstoffe und ihre Wirkung auf die Fügeverbindung	153
8.2	Einfluss von Halbleiter-Bauteilen.....	154
8.3	Einfluss der Endoberfläche der Metall-Keramik-Substrate	157
8.4	Rakelrichtung im Schablonendruck	161
8.5	Einfluss der Test-Temperatur auf die mechanische Festigkeit	162
8.6	Einfluss des Drucksinterprozesses.....	164
8.6.1	Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter auf die Scherfestigkeit der Fügeverbindung	165
8.6.2	Lineare Variation der Prozessfaktoren.....	169
8.6.3	Prozessfenster der Niedertemperatur- verbindungstechnik mit Kupfer	175
8.6.4	Bewertung der technischen Umsetzbarkeit und Anwendung für Leistungselektronik.....	176

9	Zusammenfassung und Ausblick.....	179
9.1	Resümee	179
9.2	Ausblick.....	182
10	Summary and Outlook	183
11	Anhang.....	185
Literaturverzeichnis.....		195
Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen.....		232
Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten.....		234