

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xxi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Aufbau- und Verbindungstechnik für THT-Bauteile.....	5
2.1 Technologische und wirtschaftliche Gründe für den Einsatz von THT-Bauteilen in der Flachbaugruppenfertigung	5
2.1.1 Einsatz von THT-Bauteilen auf mischbestückten Flachbaugruppen	6
2.1.2 Montage von THT-Bauteilen in der Prozesskette mischbestückter Flachbaugruppen	8
2.1.3 Weichlöten von THT-Bauteilen	9
2.2 Selektivwellenlöten mischbestückter Flachbaugruppen	14
2.2.1 Prozessablauf des Selektivwellenlötens	14
2.2.2 Abnahmekriterien der Lötqualität für THT-Lötstellen	17
2.2.3 Einflüsse und Störgrößen auf Flowlötprozesse	21
2.3 Definition und Zusammenhang des Lötstellendesigns und der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen.....	27
2.3.1 Definition der Fertigbarkeit einer THT-Lötstelle.....	28
2.3.2 Geometrischer Aufbau und Designparameter einer THT-Lötstelle.....	30
2.3.3 Ansätze zur Absicherung und Verbesserung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen	32
2.4 Herleitung des Forschungsbedarfs zur modellbasierten Optimierung des Selektivwellenlötens von THT-Lötstellen	39
2.4.1 Motivation zur modellbasierten Absicherung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen	40
2.4.2 Definition der Forschungsfragen.....	41
3 Experimentelle Prozessbeschreibung und -auslegung.....	42
3.1 Experimentelle Untersuchung der Einflüsse auf den Lotdurchstieg	43
3.1.1 Untersuchung primärer Prozessparameter	45
3.1.2 Einfluss der thermischen Eigenschaften des Bauteilpins	51

3.1.3	Einfluss des Kupferlagendesigns.....	52
3.2	Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs von der Lotwelle auf die Lötstelle	60
3.2.1	Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten an der Lotwelle.....	61
3.2.2	Beurteilung der Messmittelfähigkeit.....	63
3.3	Experimentelles Verfahren zur Abschätzung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen.....	64
3.3.1	Bestimmung der thermischen Impedanz von Bauteilen und Lötstellen	65
3.3.2	Abschätzung des Prozessfensters geeigneter Lötparameter.....	67
3.3.3	Validierung der Methode zur Vorhersage des Lotdurchstiegs.....	68
4	Numerische und analytische Ansätze zur Berechnung des Lotdurchstiegs	71
4.1	Numerische Modellierung des Selektivwellenlötprozesses durch multiphysikalische Simulation	71
4.1.1	Aufbau des fluidmechanischen Modells zur Berechnung des transienten Lotdurchstiegs.....	72
4.1.2	Validierung des numerischen Modells anhand von Lötversuchen	76
4.1.3	Numerische Untersuchung der Designparameter auf den Lotdurchstieg.....	78
4.2	Analytische Abschätzung des Lotdurchstiegs	84
4.2.1	Analytische Modellierung der Lötstelle	85
4.2.2	Prozesssynthese und Ergebnisbewertung.....	88
4.2.3	Validierung des analytischen Modells anhand verschiedener Lötstellen und Prozessparameter.....	91
5	Datenbasierte Prozessmodellierung zur Absicherung der Fertigbarkeit mit Hilfe lernender Algorithmen.....	93
5.1	Entwicklung eines datenbasierten Modellierungsvorgehens für elektronische Flachbaugruppen.....	93
5.1.1	Beschreibung des SmartEP-Frameworks für die Modellierung und Optimierung des Selektivwellenlötprozesses.....	94

5.1.2	Definition eines Vorgehens zur Entwicklung vertrauenswürdiger ML-Prozessmodelle	96
5.2	Entwicklung des Prozessdatenmodells und Training der ML-Modelle	100
5.2.1	Ableitung des Prozessdatenmodells zur Beschreibung des Selektivwellenlötprozesses.....	100
5.2.2	Vorhersage des Lotdurchstiegs mit Hilfe von ML-Modellen.....	101
5.3	Vergleich der Modellierungsstrategien	105
6	Optimierung der Produkt- und Prozessentwicklung.....	107
6.1	Automatisierte Prozessentwicklung und -optimierung.....	107
6.1.1	TSP-Zykluszeitoptimierung beim Selektivfluxen	108
6.1.2	Automatisierte Lötprogrammdefinition und -optimierung	110
6.2	Integration eines Manufacturability-Checks in die Produkt- und Prozessentwicklung	114
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	117
8	Summary and outlook.....	121
Anhang	125
	Marktrecherche zu Einsatzbereichen von SMT- und THT-Bauteilen	125
	Eigenschaften und Einflüsse von THT-Lötverfahren.....	125
	THT-Leiterplattendesign und Prozessentwicklung.....	127
	Ergänzende Experimentalergebnisse	128
	Materialdaten.....	129
	Simulationsparameter	131
	Ergänzende Simulationsstudien.....	133
	ML-Hyperparameterraum	137
	Modellbenchmark	140
Literaturverzeichnis	143
Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen	163
Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten	166