

FAU Studien aus dem Maschinenbau 425

Reinhardt Seidel

Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses

Reinhardt Seidel

Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 425

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Reinhardt Seidel

Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen
FAU University Press
2023

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Seidel, Reinhardt. 2023. *Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 425. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-652-7.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-651-0 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-652-7 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-652-7

**Modellbasierte Optimierung des
Selektivwellenlötprozesses**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Reinhardt Martin Seidel, M.Sc.

aus Dortmund

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen
Prüfung: 3. März 2023

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Nowottnick,
Universität Rostock

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber und meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für sein Vertrauen, seine Anregungen und die Entfaltungsmöglichkeiten am Lehrstuhl. Zusätzlich danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller, Inhaber des Lehrstuhls für Gießereitechnik der FAU, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Mein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Nowottnick, Inhaber des Lehrstuhls für Zuverlässigkeit und Sicherheit elektronischer Systeme an der Universität Rostock für die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker danke ich für sein Engagement als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums.

Diese Dissertation basiert zu großen Teilen auf Forschungsprojekten, die durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanziert wurden. Den an den Projekten SiWOLAK und SmartSelective beteiligten Industriepartnern danke ich herzlich für die konstruktive Zusammenarbeit und große Unterstützung. Hier sind im besonderen Maße Dr.-Ing. Thomas Ahrens, Jürgen Friedrich, Dr.-Ing. Christopher Kästle und Dr.-Ing. Andreas Reinhardt für Ihre Beiträge als Projektpaten und die Bereitstellung von Versuchskapazitäten hervorzuheben. Weiterhin bin ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl und speziell denen aus dem Forschungsbereich Elektronikproduktion zu großem Dank verpflichtet. Besonders danken und namentlich nennen möchte ich hier unseren Forschungsbereichsleiter Alexander Hensel und die Kollegen Marcel Sippel, Konstantin Schmidt, Nils Thielen, Felix Häußler, Philipp Bräuer, Christian Voigt und Julian Praß, die durch ihre Anregungen in eingehenden fachlichen Diskussionen meine Forschung mit geformt haben.

Meinen Eltern gebührt an dieser Stelle ein besonders großer Dank, für Ihre immerwährende Unterstützung und Rückhalt während meines gesamten Ausbildungs- und Lebenswegs. Meinem Sohn Benjamin danke ich, dass er während der Fertigstellung dieser Arbeit regelmäßig auf mich verzichtet hat. Zuletzt danke ich meiner Frau Adelyne, die stets an meiner Seite ist und immer an mich glaubt gerade dann, wenn ich es nicht tue.

S.D.G.

Lauf an der Pegnitz, 27.9.2023

Reinhardt Martin Seidel

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	

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
A	Ampere	Stromstärke
C_{el}	Farad	Elektrische Kapazität
C_{th}	J/K	Thermische Kapazität
C		Kosten
c_p	Jkg ⁻¹ K ⁻¹	Spezifische Wärmekapazität
D	mm	Außendurchmesser
d	mm	Innendurchmesser
F		Lotvolumenanteil (VoF-Methode)
f		Funktion
H	Henry	Induktivität
h		Höhe
i		Zähler
k		Anzahl Faktorstufenkombination
l	mm	Länge, Dicke
m	kg	Masse
N		Versuchsumfang
n		Versuchswiederholung
\dot{Q}	W	Wärmeleistung
r	mm	Innenradius
R	mm	Außenradius
R_{th}	K/W	Thermischer Widerstand
t	s	Zeit
T	°C	Temperatur
$u(y)$	m/s	Ortsabhängige Strömungsgeschwindigkeit
V	Volt	Spannung
V_n	m ³	Volumen
x, y, z		Kartesische Koordinaten
X		Features/ Eingangsgröße
Y		Label/ Ausgangsgröße
Z_{th}	K/W	Thermische Impedanz
α	Wm ⁻² K ⁻¹	Wärmeübergangskoeffizient
δ	°	Verdrehung
η	Pa s	Viskosität

θ	°	Verkipfung
ρ	kg/m ³	Dichte
σ		Standardabweichung
σ_0	N/m	Oberflächenspannung
λ	Wm ⁻² K ⁻¹	Wärmeleitfähigkeit
Indizes		
<i>k</i>		Kontakt
<i>Abstand</i>		Abstand
<i>Abfluss</i>		Lotdüsenabflussdicke
∞		Umgebung
<i>g</i>		Glasübergang
<i>d</i>		Decomposition (Zersetzung)
<i>Loch</i>		Loch
<i>Lot</i>		Lotlegierungsspezifische Eigenschaft
<i>Pin</i>		Pinspezifische Eigenschaft
<i>LP</i>		Leiterplatte
<i>BT</i>		Bauteil
<i>O</i>		Oberfläche
<i>Q</i>		Querschnitt
<i>D</i>		Düsenpezifische Eigenschaft
<i>Layer</i>		Kupferlage
<i>eff</i>		Effektivwert
<i>konv</i>		konvektiv
<i>max</i>		Maximum
<i>th</i>		thermisch
<i>vert</i>		Vertikal
<i>horz</i>		Horizontal
<i>diss</i>		Dissipation
Abkürzung		Bedeutung
ACO		Ant Colony Optimization
ADS		Aufwind-Differenzen-Schema
AOI		Automatische optische Inspektion
BPMN		Business Process Model and Notation
CAD		Computer aided design
CFL		Courant-Friedrichs-Levy
CTE		Coefficient of thermal expansion
Cu		Kupfer
DACH		Deutschland, Österreich, Schweiz

DfM	Design for Manufacturing
DoE	Design of Experiments
EDA	Electronic Design Automation
Elko	Elektrolytkondensator
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FN	False negative
Foko	Folienkondensator
FR4	Flame Retardant
GA	Genetic Algorithm
HAL	Hot Air Leveling
HF	Hochfrequenz
IMP	Intermetallische Phase
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean absolute percentage error
ML	Maschinelles Lernen
MLCC	Multi layer ceramic capacitor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors
MSE	Mean Squared Error
NN	Neuronale Netze
N ₂	Stickstoff
NiAu	Nickel-Gold
O ₂	Sauerstoff
OSP	Organic Solderability Preservative
Pb	Blei
PCB	Printed circuit board
PiP	Pin-in-Paste
PISO	Pressure implicit with splitting operators
PLIC	Piecewise Linear Interface Construction
PSO	Particle Swarm Optimization
RMSE	Root mean squared error
ROE/RUE	Risk of over-/ underestimation
SA	Simulated Annealing
SiWOLAK	Thermische Simulation von Wellen- und Selektivlötprozessen zur Optimierung des Leiterplattendesigns und der Anlagenparameter für IPC-konforme Kontaktierung von THT-Bauelementen

SMT	Surface mount technology
Sn	Zinn
SnCuNi	Zinn Kupfer Nickel
THR	Through hole reflow
THT	Through hole technology
TN	True negative
TNR	True negative rate (Spezifität)
TP	True positive
TPR	True positive rate (Sensitivität)
TSP	Traveling Salesman Problem
TV	Thermisches Via
ULP	User Language Program
VA	Vollständige Anbindung
VIF	Variation inflation factor
VOC	Volatile organic compounds
VoF	Volume of fluid
WF	Wärmefalle

Bildverzeichnis

Bild 1:	Quantitativer Vergleich elektrischer Eigenschaften von am Markt verfügbaren SMT- und THT-Bauteilen für die THT-Bauteiltypen MOSFET, Kondensator, Induktivität (Daten aus [S1])	6
Bild 2:	Anteil mischbestückter Flachbaugruppen aus der Umfrage unter 21 europäischen High-Mix Low-Volume Fertigungsstandorten aus den Marktsegmenten Automotive, Industrieelektronik, Luft- und Raumfahrt und Militär [17]	7
Bild 3:	Prozesskette einseitig und beidseitig mischbestückter Flachbaugruppen [9, 18].....	8
Bild 4:	Normungsseitige Einordnung von Verfahren für die Lötung von THT-Bauteilen hinsichtlich ihrer Erwärmung und des primären Wärmeübergangsmechanismus [23-25, S1, S2]	10
Bild 5:	Gegenüberstellung von Lötverfahren für THT-Bauteile hinsichtlich fertigungstechnisch relevanter Auswahlkriterien auf Basis der Bewertung in Tabelle 7 im Anhang [3, 35, 43, 44, S2]	13
Bild 6:	Ablauf des Selektivwellenlötprozesses mit den Funktionen der Prozessschritte anhand der Punktlötung eines einzelnen MOSFET-Drain Pins mit gemessenen Temperaturverläufen auf Lotzielseite, Bauteilpin und Bauteilkörper	15
Bild 7:	Fehlerbilder bei THT-Lötstellen unterteilt nach statistisch streuenden Prozessfehlern und reproduzierbaren Fehlern mit thermischer Ursache (Bildquelle * [59], ** [60], ***[61], **** [62])	18
Bild 8:	Röntgentechnische Beurteilung des Lotdurchstiegs als Kriterium für das Lötergebnis in Anlehnung an IPC-A-610 [2]	20
Bild 9:	Einflussfaktoren auf den Lotdurchstieg bei Wellenlötprozessen [S1, S2]	22
Bild 10:	Qualitative Definition des Prozessfensters auf Grundlage der Wärmebeständigkeit der Materialien [68]	29

Bild 11:	Beschreibung des Aufbaus, Nomenklatur, Parameter und Varianten der Anbindung von Kupferlagen an die Durchkontaktierung des Leiterplattendesigns	31
Bild 12:	Thermographisch ermittelte Wärmeverteilung einer zweilagigen Leiterplatte mit Vollanbindung und thermischer Entkopplung (1) und partielle Erwärmung von Bauteilen (2) während des Lötprozesses	37
Bild 13:	Definition der Forschungsfragen und des Vorgehens	42
Bild 14:	Lagenaufbau der 6-Lagen-Leiterplatte mit 140 µm Außenlagen und 95 µm Innenlagen und 40 µm Hülsendicke, 1,6 mm Leiterplattendicke, 1,4 mm Lochdurchmesser	44
Bild 15:	Vorgehen zur optischen und röntgentechnischen Bestimmung des Lotdurchstiegs in Anlehnung an IPC-A-610 [2] und verfeinerte Diskretisierung der Inspektionsauflösung ..	44
Bild 16:	Einfluss der primären Prozessparameter auf den Lotdurchstieg aus dem Foko DoE mit Gap-Ratio 19 %, N = 49, erklärte Streuung 68 %, Residuen Mittelwert: 0 mit Standardabweichung: 0,11 (Daten aus [135])	46
Bild 17:	Einfluss der primären Prozessparameter auf den Lotdurchstieg aus dem MOSFET DoE, mit Gap-Ratio 25 %, N = 57, erklärte Streuung 54 %, Residuen normalverteilt um Mittelwert: 0 mit Standardabweichung: 0,18 (Daten aus [135]) ..	46
Bild 18:	Einfluss der primären Prozessparameter auf den Lotdurchstieg aus dem Elko DoE, mit Gap-Ratio 31 %, N = 54, erklärte Streuung 69 %, Residuen normalverteilt um Mittelwert: 0 mit Standardabweichung: 0,15 (Daten aus [135]) ..	47
Bild 19:	Haupteinflussdiagramm des Lotdüsendurchmessers auf den Lotdurchstieg in Abhängigkeit des Orts der Lagenanbindung an die Kupferhülse, N = 20 (Daten aus [135])	48
Bild 20:	Einfluss exzentrischer Lötung mit Offsets zwischen Düsenmittelpunkt und Lötstellenmittelpunkt auf den Lotdurchstieg für vier unterschiedliche Lagenanbindungen, Residuen Standardabweichung: 0,05, mit N = 44, n = 5; , 100 °C, 280 °C, 5 s, Düse 6/10, Folienkondensator, Wärmefallenanbindung in Lagen Top (1), 3, 4, Bottom (6)	49

Bild 21:	Geometrische Einteilung der Lotkontaktfläche in geeignete Lötbereiche und parametrisierte Identifizierung der Freistellung	50
Bild 22:	Thermographische Ermittlung der Temperaturentwicklung einer Leiterplatte während des Lötzykluses	50
Bild 23:	Einfluss des Bauteilpins und der Lage der Kupferanbindung auf den Lotdurchstieg auf Basis der Versuchspläne, ergänzt um zusätzliche Kombinationen aus Bauteilpin-Kupferlagendesign; Regressionsanalyse N = 185, erklärte Streuung 57 %, Residuen Mittelwert 0, Residuen Standardabweichung 0,17 (Daten aus [135])	51
Bild 24:	Einfluss der quantitativen thermischen Eigenschaften der Bauteilpins auf den Lotdurchstieg im Zentralpunkt der DoEs für verschiedene Lagen der Anbindung (Daten aus [135])	52
Bild 25:	Messung der Temperatur im Bauteilkern während des Lötprozesses (oben); Definition der Bauteiltemperaturmessung in der Spezifikation des Fokos (oben links) [138]; Ermittlung des geeigneten Prozessfensters anhand der maximalen Temperatur im Bauteilkern während des Foko DoE, N = 36	53
Bild 26:	Wechselwirkungsdiagramm größerer Gap-Ratios auf den Lotdurchstieg in Abhängigkeit von Vorheiztemperatur, Lötkontaktzeit und Kupferlagenanbindung; Parameter Gap-Ratio DoE: Foko, Düse 6/10, Lottemperatur 280 °C, Kupferlagendesign WF mit Anbindung in den Lagen Top (1), 3, 4, Bottom (6), N = 579, n = 3, Regressionsanalyse: erklärte Streuung: 56,8 %, Residuen Mittelwert 0, Residuen Standardabweichung 0,125 (Daten aus [P1])	55
Bild 27:	Einfluss größerer Gap-Ratios auf Prozessrobustheit hinsichtlich Vorheiztemperatur und Potential zur Reduktion der Lötkontaktzeit, Parameter Gap-Ratio DoE: Düse 6/10, Lottemperatur 280 °C, Kupferlagendesign WF mit Anbindung in den Lagen Top (1), 3, 4, Bottom (6), N = 579, n = 3, Regressionsanalyse: erklärte Streuung: 56,8 %, Residuen Mittelwert 0, Residuen Standardabweichung 0,125 (Daten aus [P1])	55

Bild 28:	Einfluss der Gap-Ratio auf die maximale Bauteilverkipfung θ bei der Bestückung eines runden Pins und theoretische kapillare Steighöhe ohne thermische Effekte.....	56
Bild 29:	Einfluss der Gap-Ratio auf die maximale Bauteilverdrehung δ bei der Bestückung eines runden Pins.....	57
Bild 30:	Einfluss der Lagendicke in Abhängigkeit der Anbindungsanlage bei massiver Kupferanbindung an die Kupferhülse, Prozessparameter: Vorheizung 80 °C, Lottemperatur 260 °C, Kontaktzeit 2 s; Bauteil: Foko-Pin; Regressionsanalyse mit N = 14, erklärte Streuung: 73,4 %, Residuen normalverteilt um Mittelwert 0 mit Standardabweichung 0,1 (Daten aus [135])	58
Bild 31:	Einfluss von WF auf den Lotdurchstieg in Abhängigkeit des thermischen Widerstands der WF R_{wf} , Prozessparameter: Foko DoE-Zentralpunkt, Regressionsanalyse mit N = 64, erklärte Streuung = 60,3 %, Residuen Mittelwert = 0, Residuen Standardabweichung = 0,1 (Daten aus [135])	59
Bild 32:	Einfluss von TV auf den Lotdurchstieg, Regressionsanalyse mit N = 34, erklärte Streuung: 35 %, Residuen Mittelwert = 0, Residuen Standardabweichung = 0,15 (Daten aus [135])	60
Bild 33:	Messshuttle und beispielhaftes Temperaturprofil zur Bestimmung des Wärmeübergangs zwischen der Welle und dem Messshuttle.....	62
Bild 34:	Untersuchung der Messstreuung des gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten und der maximalen Messkörpertemperatur bei Messparametern: 280 °C Lottemperatur, 60 °C Vorheiztemperatur, Düse 6/10, Wellenhöhe 3,5 mm, z-Abstand 2 mm, N = 45; Mittelwertabweichung statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$); Gesamt Standardabweichung 446, Mittelwert 4820 $Wm^{-2}K^{-1}$...	64
Bild 35:	Messprinzip zur thermischen Charakterisierung von Bauteilen und Lötstellen unbekanntem inneren Aufbau, Beispiel Foko mit einem RC-Glied (in Anlehnung an [S6, S7])	65
Bild 36:	Unterscheidbarkeit unterschiedlicher Bauteilpins und Kupferlagendesigns anhand der jeweiligen thermischen Widerstände und Kapazitäten (Daten z. T. aus [S6, S7])	66

Bild 37:	Validierung der Kerntemperaturvorhersage für den Lötprozess im Foko DoE Zentralpunkt für 3/6 Düse und Kupferlagenanbindung Bottom auf Basis der gemessenen Impedanzen für den Foko und Abgleich mit dessen Spezifikationsgrenze [138]	67
Bild 38:	Aufbau des Simulationsmodells ausgehend von der parametrisierten Geometriemodellerstellung (1, 2), der Vernetzung (3), der Definition der Randbedingungen (4) (in Anlehnung an [P11, S8, S9])	72
Bild 39:	Temperaturabhängige Fluideigenschaften für SAC305 zur Modellierung des Erstarrungsverhaltens des Lotes mit den Materialparametern aus Tabelle 13 und Tabelle 14 im Anhang (Daten aus [P11, S8, S9])	73
Bild 40:	Zweistufige Berechnung des Simulationsmodells; 1. Vorberechnung des Strömungsfelds und 2. Berechnung des Lotdurchstiegs	75
Bild 41:	Netzstudie zur Ermittlung einer geeigneten Diskretisierung des Rechnernetzes (Daten aus [P11, S9])	76
Bild 42:	Vorgehen zur Auswertung der Simulationsergebnisse am Beispiel eines zweilagigen Kupferlagendesigns mit 35 μm , Foko-Pin, 75 °C Vorheizung und 260 °C Lottemperatur (Daten aus [P11, S9])	77
Bild 43:	Abgleich des 2D- und 3D-Modells anhand einer Lötstelle mit Bottom-Lagenanbindung (rechts oben), Drain-Pin und dem experimentellen Lötergebnis bei 100 °C Vorheizung und 280 °C Lottemperatur zur Validierung (rechts unten) (Daten aus [S8])	77
Bild 44:	Validierung der Simulationsergebnisse durch Vergleich mit Lötergebnissen, RMSE 10 %, Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang (Daten aus [P11, S8, S9])	78
Bild 45:	Einfluss der Variation der Leiterplattendicke (1) und des Lochdurchmessers (2) auf den Lotdurchstieg, am Beispiel Kupferlagenanbindung: 4. Lage, Bauteil: source (Daten aus [S8, S9])	79

Bild 46:	Bestimmung des Gültigkeitsbereichs der Gap-Ratio-Kennzahl zur Beschreibung äquivalenter Lochdimensionen, hier Variation der Leiterplattendicke (1 mm bis 5 mm) und des Lochdurchmessers (1,15 mm bis 1,6 mm) bei konstantem Pindurchmesser (1 mm) je Kupferanbindung (Daten aus [S8])	80
Bild 47:	Einfluss der Lage der Anbindung; für Leiterplattendicken 2 mm (1) und 5 mm (2) (Daten aus [S8])	81
Bild 48:	Einfluss der Kupferlagendicke (außen/innen) auf den Lotdurchstieg unter Variation der Außenlagendicke (1) und der Innenlagendicke (2) bei Leiterplattendicke 1,6 mm (Daten aus [S8])	82
Bild 49:	Einfluss des vergrößerten horizontalen thermischen Widerstands durch Reduktion des Anschlussquerschnitts zwischen Durchmetallisierung und Kupferlage auf den Lotdurchstieg und Temperaturentwicklung auf der Lotzielseite für WF in 1. Lage (Top-Lage) mit Foko-Pin (Daten aus [S8])	83
Bild 50:	Analytischer Ansatz zur Beschreibung thermischer Eigenschaften von THT-Bauteilpins und Leiterplattendesigns [13, P3]	85
Bild 51:	Beschreibung des THT-Selektivwellenlötprozesses mittels des Lötwärmebedarfs (1) einer Mehrlagenleiterplatte, Randbedingungen (2) und beispielhafte analytische Ergebnisbewertung des Lotdurchstiegs anhand der gemittelten Temperaturen der Elemente in der z-Position n (3) und (4) in Anlehnung an [P3]	89
Bild 52:	Validierung des analytischen Vorhersagemodells anhand kritischer Lötstellen und Prozessparameter, RMSE 29%; Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang	91
Bild 53:	Aufbau des python basierten SmartEP-Frameworks in Anlehnung an die Struktur des DSTM [153] für die modellgestützte Umsetzung fertigungsgerechter Designs und optimierter Fertigungsprozesse am Beispiel der Absicherung der THT-Fertigbarkeit (in Anlehnung an [P9, P16, S4, S13, S14])	95

Bild 54:	BPMN-Ablauf der Optimierung des Selektivwellenlötprozesses mit Hilfe des SmartEP-Softwareframeworks, Nummerierung nach den Modulen in Bild 53	96
Bild 55:	Vorgehen zur Entwicklung vertrauenswürdiger ML-Modelle durch anschließende Auditierung des Modellverhaltens	97
Bild 56:	Zusammenfassung des Prozessdatenmodells in Anlehnung an [P12–P14].....	100
Bild 57:	Quantitative Bewertung des Modellverhaltens anhand der kritischen Lötstellen aus Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang und Bewertung des anwendungsspezifischen Risikos für fehlerhafte Vorhersagen	103
Bild 58:	Modellaudit des ML-Modells mit gerberbasierter Featuregenerierung auf der Lötstelle 4 der kritischen Lötstellen Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang zur Validierung des Modellverhaltens in Anlehnung an [P12, P15]	104
Bild 59:	Quantitativer Vergleich der Modellfehler und Vorhersagedauer der entwickelten Vorhersagemodelle anhand der Vorhersageergebnisse für die Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22 und der Bewertung aus Tabelle 23 im Anhang.....	105
Bild 60:	Problembeschreibung des TSP beim Selektivwellenlöten mit festen Liniensegmenten [S14]	108
Bild 61:	Benchmark der Algorithmen auf Grundlage der besten Parameterkonfiguration der TSP-Algorithmen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit für das vorliegende Optimierungsproblem (Daten aus [S14])	110
Bild 62:	Vergleich der initialen Fluxroute und der TSP-optimierten Route mit Hilfe der kombinierten Algorithmen Greedy, Simulated Annealing (SA) und 2-Opt (Daten aus [S14])	110
Bild 63:	Ablauf zur Optimierung des Lötprogramms.....	111

Bild 64:	Ergebnis der Modellvorhersage vor und nach der ML-TSP-Optimierung für 20 Lötstellen bei 280 °C Lottemperatur und 120 °C initialer Vorheiztemperatur sowie Analyse der Sensitivität des Lötergebnisses auf die Modellvorhersage mit Hilfe der Monte Carlo-Simulation mit N=100 mit einer Standardabweichung der Vorheiztemperatur von 10 %.....	113
Bild 65:	Reduktion der Time-to-Market durch modellbasierte Prozessentwicklung auf Grundlage digitaler Prozessmodellierung.....	114
Bild 66:	Ablauf der Abschätzung des Lotdurchstiegs in der Web-Anwendung im industriellen Umfeld	115
Bild 67:	Haupteffektdiagramm gemeinsam ausgewertete Versuchspläne aus Tabelle 4, N = 160, erklärte Streuung: 62 %	128
Bild 68:	Einfluss der Leiterplattendicke auf den Lotdurchstieg, Lochdurchmesser 1,4mm, Innenlagendicke 95 µm, Außenlagendicke 140 µm, Lötstellendesign-Bauteil: (1) 4. Layer-Source, (2) Bottom-Layer-Drain, (3) Top-Layer-Gate....	133
Bild 69:	Simulationsstudie zum Lochdurchmesser, Leiterplattendicke 1,6 mm, Lötstellendesign-Bauteil: (1) 4. Layer-Source, (2) Bottom-Layer-Drain, (3) Top-Layer-Gate.....	133
Bild 70:	Abschätzung der maximalen Lagendicke für Prozessparameter im Zentralpunkt für verschiedene Innenlagendicken, Bauteilpin Source, Leiterplattendicke 5 mm.....	134
Bild 71:	Einfluss der Schmelztemperatur auf den Lotdurchstieg anhand typischer bleihaltiger und bleifreier Lotlegierungen; Lötstellendesign-Bauteil: (1) 4. Layer-Source, (2) Bottom-Layer-Drain, (3) Top-Layer-Gate.....	135
Bild 72:	Einfluss der Prozessparameter Vorheiztemperatur und Lottemperatur auf den Lotdurchstieg für niedrigschmelzendes Zinn-Bismut Lot; Lötstellendesign-Bauteil: (1) 4. Layer-Source, (2) Bottom-Layer-Drain, (3) Top-Layer-Gate	135
Bild 73:	NN-Architektur für das Analytische und das Gerberbasierte Neuronale Netz.....	139

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Untersuchungen zu Kupferauflösungsraten mit verschiedenen Lotlegierungen, Temperaturen und Versuchsaufbauten mit nicht fließendem (statisch) und fließendem (dynamisch) Lotstrom	25
Tabelle 2:	Vergleich vorhandener Ansätze zur Definition der Lötbarkeit.....	28
Tabelle 3:	Designempfehlungen für THT-Lötstellen aus der Literatur für bleifrei und bleihaltige Flowlötprozesse.....	33
Tabelle 4:	Stufen und Faktoren der DoEs	45
Tabelle 5:	Abgleich der Vorhersagewerte mit den 127 Lötgergebnissen in einer binären Konfusionsmatrix (Daten aus [S6, S7]).....	68
Tabelle 6:	Designparameter der Wärmefallendesigns und des Simulationsmodells (Daten aus [S8])	84
Tabelle 7:	Qualitative Gegenüberstellung von THT-Lötverfahren und Gewichtungen für High-mix Low-Volume Fertigungsumgebungen [S1, S2]	125
Tabelle 8:	Versuchsparameter für Tauchtests nach IPC TM650 zur Qualifizierung der Wärmebeständigkeit von Basismaterial .	126
Tabelle 9:	Übersicht über Lebensdauerstudien von THT-Lötstellen	126
Tabelle 10:	Designempfehlungen für die Anordnung von THT-Bauteilen auf der Leiterplatte aus der Literatur für bleifreie und bleihaltige Wellenlötprozesse	127
Tabelle 11:	Empfehlungen für die Prozessparametrisierung aus der Literatur für bleifreie und bleihaltige Wellenlötprozesse	128
Tabelle 12:	Angenommene Materialparameter für Festkörper Epoxidharz, Kupfer (Daten wie in [P11, S8, S9]).....	129
Tabelle 13:	Materialeigenschaften für den erstarrten Zustand und im Erstarrungsbereich (*fiktive Lotlegierung) (Daten wie in [P11, S8, S9])	129
Tabelle 14:	Koeffizienten zur Bestimmung der temperaturabhängigen Loteigenschaften (Daten aus [P11, S8, S9]); (*fiktive Lotlegierung)	130

Tabelle 15: Parameter des Lötstellendesigns für die Netzstudie des Simulationsmodells (Daten aus [S9])	131
Tabelle 16: Prozessparameter der Netzstudie des Simulationsmodells (Daten aus [S9]).....	131
Tabelle 17: Parameter der Diskretisierungsnetze und Ergebnisse der Netzstudie (Daten aus [P11, S9]).....	132
Tabelle 18: Bestimmung äquivalenter Lötparameter über die homologe Temperatur der Lotlegierung	136
Tabelle 19: Hyperparameterraum für ML-Modell Training je Layer	137
Tabelle 20: Allgemeine Modell Hyperparameter	138
Tabelle 21: Variation des Lötwärmebedarfs durch Veränderung der Lötstellendesigns (Daten aus [S8, S9])	140
Tabelle 22: Variation des Lötwärmebedarfs und des Wärmeangebots durch Lötstellendesign, Kontaktzeit und Düsendurchmesser (Daten aus [S8, S9]), * _{3D} -Modell mit WF ₁₄₁	
Tabelle 23: Quantitativer Vergleich der Modellfehler und Vorhersagedauer der entwickelten Vorhersagemodelle anhand der Vorhersageergebnisse für die Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22	142

1 Einleitung

Elektronik ist in einer zunehmend digitalen und elektrifizierten Welt der physische Grundbaustein aller elektronifizierter Systeme. Daher kommen der ressourceneffizienten Entwicklung und Fertigung von elektronischen Flachbaugruppen eine gesellschaftlich, ökologisch und ökonomisch große Bedeutung zu. [1]

Elektronische Schaltungen werden in Leiterplatten, englisch Printed Circuit Boards (PCB), verdrahtet und überwiegend mit Hilfe der Surface Mount Technology (SMT), zu Deutsch Oberflächentechnologie, und der Through Hole Technology (THT), zu Deutsch Durchstecktechnologie zu elektronischen Flachbaugruppen verarbeitet. Aus elektrischen, thermischen und mechanischen Gründen können THT-Bauteile nicht vollständig durch SMT-Bauteile ersetzt werden. Logische Schaltungen werden meist mit SMT-Bauteilen und leistungselektronische Schaltungen mit THT-Bauteilen bestückt. Beide Technologien werden aus Platz-, Kosten- und Zuverlässigkeitsgründen auf einer Flachbaugruppe als Mischbestückung funktionsintegriert.

In der daraus resultierenden Fertigungsprozesskette mischbestückter Baugruppen stellt das Löten der THT-Bauteile den letzten Prozessschritt dar. Um vorher bestückte Bauteile nicht thermisch zu schädigen, werden dafür überwiegend selektiv erwärmende Lötverfahren, meist das Selektivwellenlöten, eingesetzt. Durch die örtlich begrenzte Erwärmung ist auch die verfügbare Lötwärmeleistung begrenzt. Übersteigt der Lötwärmebedarf einer THT-Lötstelle die innerhalb der Prozessgrenzen übertragbare Lötwärme, so erreicht der THT-Lotdurchstieg nicht zuverlässig die Abnahmekriterien [2]. Damit ist die Lötstelle nicht fertigungsgerecht gestaltet. Fertigungsgerecht gestaltete Baugruppen können mit geringerer Temperaturbelastung gelötet werden [P1, P2]. Dadurch verbessert sich die Lebensdauer der Baugruppe, sowie die Nachhaltigkeit der Fertigung hinsichtlich der Energie- und der Ressourceneffizienz durch reduzierten Ausschuss. Die Lötqualität nicht fertigungsgerechter Lötstellen streut zudem stärker, wenn maschinenseitig Prozessschwankungen auftreten [P1]. Durch die zeitlich nachgelagerte Stellung der THT-Lötstufe wirkt sich deren typischerweise größere Fehlerrate von ~3000 ppm im Vergleich zu SMT-Fehlerraten von bis zu <10 ppm, negativ auf die Wertschöpfung und die Produktivität aus [3].

Die frühzeitige Identifikation nicht fertigungsgerechter Lötstellen ist einerseits in kostengetriebenen High-Volume-Segmenten der Elektronik-

fertigung aufgrund der Skalierung von großer Bedeutung. Andererseits können höhere Kosten der Prozessentwicklung und -optimierung im High-Mix/Low-Volume-Segment, wie etwa der Prototypenfertigung, nicht auf große Stückzahlen umgelegt werden. Die fertigungsgerechte Gestaltung (Design for Manufacturing – DfM) von THT-Lötstellendesigns ist folglich wichtig für die Produktivität der Fertigungsunternehmen sowie für die terminergerechte Produkteinführung (Time-to-Market) und damit ein Schlüssel für eine wettbewerbsfähige Fertigung.

Der Stand der Technik zur Beurteilung der Fertigungsgerechtigkeit basiert einerseits auf Fertigungserfahrung. Diese ist nicht geeignet speicherbar und läuft Gefahr bedingt durch den demographischen Wandel mittelfristig aus den Unternehmen abzufließen. Andererseits wird die Konformität von Leiterplattenlayouts mit den im Electronic Design Automation Tool (EDA) hinterlegten axiomatischen Designregeln (Design-Rules) überprüft. Die Designregeln reglementieren dabei geometrische Designparameter des Kupferlagendesigns basierend auf Erfahrungswissen, Versuchsreihen sowie Normen. Die axiomatischen Designregeln steuern somit nicht-lineare Zusammenhänge zwischen geometrischen Designparametern und dem Lötwärmebedarf als linear-kausales Modell. Der teils nicht-lineare Zusammenhang zwischen Designparametern, Fertigungsparametern und dem Lotdurchstieg als Kriterium der Fertigbarkeit kann folglich auf diese Weise nicht zuverlässig abgesichert werden [4, 5, P1, P2]. Dieses Defizit führt regelmäßig zu hohen Kosten durch Designreviews oder thermisch schädigende Prozessführung oberhalb der Lötwärmebeständigkeit der Flachbaugruppe und teurer Nacharbeit [6, 7].

Dem gegenüber steht der algorithmische Ansatz, bei dem präskriptive Methoden genutzt werden, um die Produkteigenschaften im Hinblick auf deren Robustheit im Fertigungsprozess zu beurteilen [5]. Durch Prozessmodellierung erlaubt dieser Ansatz die entwicklungsbegleitende Beurteilung der Fertigbarkeit anhand des Lotdurchstiegs jeder THT-Lötstelle. Damit können gemäß der gemeinhin anerkannten „Rule-of-ten“ durch frühzeitige Fehleraufdeckung die Entwicklungs- und Fehlerbehebungskosten gesenkt sowie die Markteinführungszeit reduziert werden [5, 8, 9]. Weiterhin können ergänzend zu der Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit das Design und der Fertigungsprozess bereits im Entwicklungsstadium digital, kostengünstig und iterativ hinsichtlich der Gesamtproduktivität optimiert werden. Bisher veröffentlichte Ansätze für die Prozessmodellierung beim Wellenlöten sind insbesondere numerische Simulationen, die mit hohem Zeitaufwand verbunden sind [10, 11]. Publierte analytische und datenbasierte

Ansätze vernachlässigen oder vereinfachen das Lötstellendesign unzulässig [12, 13, P3].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Lotdurchstieg im Selektivwellenlötprozess zu modellieren. Dafür werden experimentelle, numerische, analytische und datenbasierte Prozessmodelle entwickelt und verglichen. Auf Grundlage des datenbasierten Prozessmodells kann die Lötqualität auf Lötstellenebene gemäß dem algorithmischen Ansatz entwicklungsbegleitend abgesichert werden. Weiterhin kann der Selektivwellenlötprozess anhand der Modellvorhersagen digital optimiert werden.

Hierzu wird zunächst die wirtschaftliche und technologische Bedeutung von THT-Bauteilen und deren Lötung auf mischbestückten Flachbaugruppen dargestellt. Zudem werden vorhandene Veröffentlichungen zur experimentellen, analytischen, numerischen und datengetriebenen Beschreibung des Selektivwellenlötprozesses analysiert. Daraus werden der Handlungsbedarf sowie die resultierenden Forschungsfragen abgeleitet.

Auf Basis des Stands der Forschung zu den Prozesseinflussfaktoren und experimentellen statistischen Versuchsplänen wird zunächst induktiv auf die Prozesseinflussfaktoren und die Wirkmechanismen geschlossen. Diese Annahmen werden in den sich anschließenden Kapiteln in die Modellierungsansätze integriert. Auf diese Weise werden die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Prozesseinflussfaktoren und der Wirkmechanismen deduktiv validiert.

Aufbauend auf den experimentell ermittelten Einflussfaktoren werden mit Hilfe eines numerischen multiphysikalischen Simulationsmodells die Einflussfaktoren seitens des Lötstellendesigns analysiert. Daraus wird dann ein idealisiertes analytisches Berechnungsverfahren zur Abschätzung des Lotdurchstiegs in Abhängigkeit des Lötstellendesigns beschrieben. Auf Grundlage der experimentellen Lötdaten und experimentell, analytisch und numerisch ermittelter Kenngrößen zur Beschreibung des Lötwärmebedarfs kann Expertenwissen in die datengetriebenen Modelle auf Basis Maschinellem Lernen (ML) integriert werden. Die Prozessoptimierung wird dann innerhalb eines entwickelten Software-Frameworks mit Hilfe der ML-Modelle, Algorithmen zur Näherung des Traveling Salesman Problems (TSP) sowie einer Monte Carlo Simulation durchgeführt. Die Anwendung der entwickelten algorithmischen Methode zur Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit von THT-Lötstellen wird zuletzt in Form einer Web-Anwendung für die Nutzung bereitgestellt.

2 Grundlagen der Aufbau- und Verbindungstechnik für THT-Bauteile

Dieses Kapitel erläutert die technologischen Einsatzbereiche von THT- und SMT-Bauteilen auf mischbestückten Flachbaugruppen. Weiterhin werden THT-Löttechnologien beschrieben und die Wahl für das Selektivwellenlöten begründet. Der Selektivwellenlötprozess als weit verbreitetes, robustes und automatisierbares Verfahren für die Lötung von THT-Bauteilen wird mit seinem Prozessablauf, Einflussfaktoren und Abnahmekriterien umfassend analysiert. Diese Analyse der publizierten Forschung bildet die Grundlage für die Versuchspläne sowie die Modellierungs- und Optimierungsansätze in den anschließenden Kapiteln 3 bis 5. Diese Modelle basieren auf der anschließend eingeführten Definition für die Fertigbarkeit von THT-Lötstellen. Weiterhin werden die veränderbaren Parameter des THT-Lötstellendesigns als die Freiheitsgrade zur Optimierung der Fertigbarkeit beschrieben. Aus dem Stand der Forschung hinsichtlich publizierter Ansätze zur Bewertung der Fertigbarkeit von Lötstellen wird der Handlungsbedarf für die Entwicklung automatisierter Modelle zur Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit von THT-Lötstellen abgeleitet.

2.1 Technologische und wirtschaftliche Gründe für den Einsatz von THT-Bauteilen in der Flachbaugruppenfertigung

Im Kontext zunehmender Automatisierung im industriellen und privaten Bereich, der Elektrifizierung der Mobilität und der Energieversorgung mit erneuerbaren Energien, steigt die Notwendigkeit und der Bedarf hochleistungsfähiger und zuverlässiger elektronischer Flachbaugruppen. Die Steigerung der Funktionsdichte führt dabei zur Kombination von Leistungs- und Logikschaltungen auf einer Leiterplatte. Dadurch entfallen Handhabungs- und Montageaufwände beim Zusammenbau mehrerer Flachbaugruppen zu einem Modul. Durch weniger Steckverbindungsstellen kann von einer besseren Zuverlässigkeit des Gesamtmoduls ausgegangen werden [14]. Zudem verkleinern sich Modulbaugröße und Signalwege. Diese Vorteile überwiegen die Nachteile durch komplexere Lötverfahrensketten zur Fertigung einer SMT/THT-mischbestückten Flachbaugruppe sowie schlechtere Zugänglichkeit für die Reparatur defekter Bauteile. Im Folgenden werden Einsatzbereiche, Prozessketten und die THT-Verbindungstechnik auf mischbestückten Flachbaugruppen eingeführt.

2.1.1 Einsatz von THT-Bauteilen auf mischbestückten Flachbaugruppen

Besonders in Anwendungen unter harschen Einsatzbedingungen wie Militär, Luft- und Raumfahrt oder hoher geforderter Zuverlässigkeit im Automobil- und Energiesektor sind die mechanische, elektrische oder thermische Belastbarkeit von Bauteilen und Lötstellen wesentlich [15, 16]. Aus elektrischen, thermischen und mechanischen Gründen sind THT-Bauteile in vielen Anwendungen nicht durch SMT-Bauteile ersetzbar [9, 15]. Das zeigt auch das Ergebnis einer Marktrecherche in Bild 1. Für den quantitativen Vergleich werden in der Studie verschiedene Bauteiltypen anhand auf dem Markt verfügbarer SMT- und THT-Bauteile verglichen. Vergleichskriterien sind dabei die jeweiligen relevanten elektrischen Kenngrößen Spannung, Kapazität, Induktivität und Stromstärke.

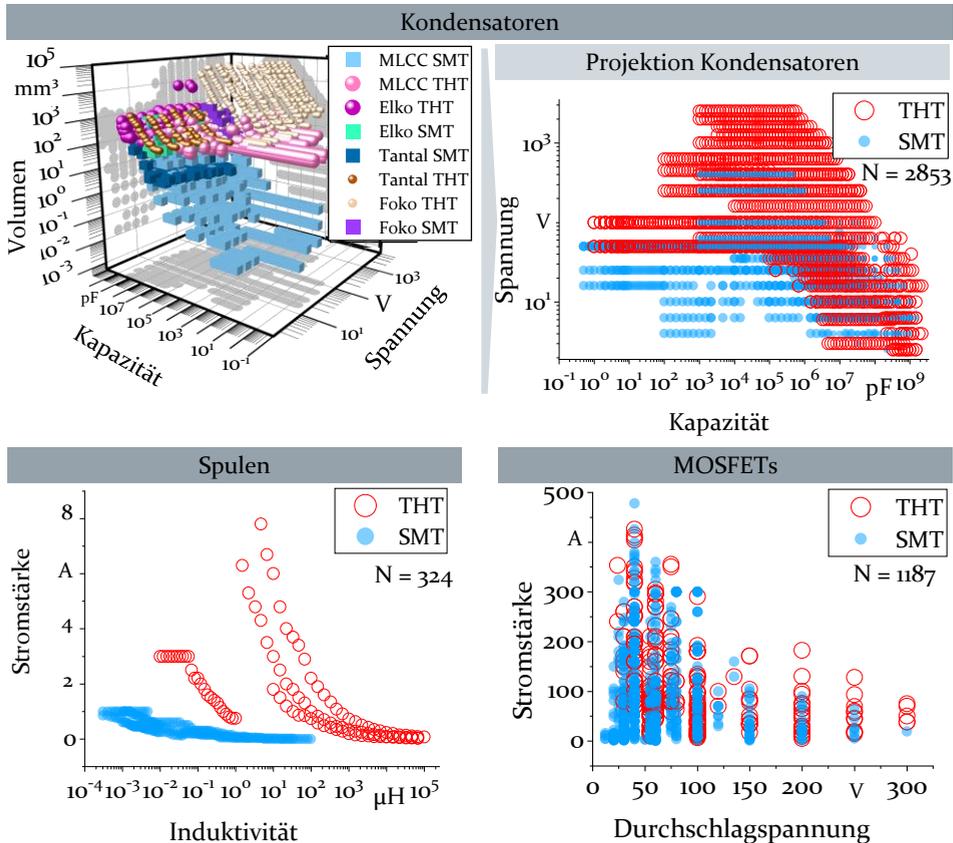


Bild 1: Quantitativer Vergleich elektrischer Eigenschaften von am Markt verfügbaren SMT- und THT-Bauteilen für die THT-Bauteiltypen MOSFET, Kondensator, Induktivität (Daten aus [S1])

Es zeigen sich einerseits große Überlappungsbereiche, in denen zwischen den Bauteilpacketechnologien gewählt werden kann. Andererseits lassen sich aus der Darstellung auch die technologischen Grenzen von SMT-Bauteilen im ausgewerteten Datensatz aufzeigen. Bei Kondensatoren zeigt sich, dass insbesondere ab einer Spannung von etwa 300 V kein SMT-Kondensator verfügbar ist. Für Induktivitäten ist insbesondere die Stromstärke von rund 1 A und die Induktivität von etwa 100 μH als Grenze für die SMT-Bauform zu sehen. MOSFETs für Stromstärken über 100 A bei Spannungen oberhalb von 150 V sind in THT-Bauform verfügbar, wobei die Grenzen hier stärker verschwimmen. Diese Studie zeigt, dass Bauteile ab etwa den genannten elektrischen Kennwerten als voluminösere THT-Bauform ausgeführt werden müssen.

Die Notwendigkeit für den Einsatz von THT-Bauteilen bestätigt sich bei Betrachtung des Anteils mischbestückter Flachbaugruppen in der mittelständisch geprägten Elektronikfertigung. Wie eigene Umfrageergebnisse unter 21 europäischen elektronikfertigenden Unternehmen in Bild 2 zeigen, ist der Anteil mischbestückter Flachbaugruppen im Produktmix weiterhin am größten [17]. Dieses Ergebnis spiegelt das vorangegangener Veröffentlichungen [15] wider. Reine SMT-Baugruppen werden aus wirtschaftlichen Gründen grundsätzlich angestrebt, sind jedoch aus oben genannten Gründen technologisch nicht immer umsetzbar. Reine THT-Baugruppen sind hauptsächlich in leistungselektronischen Anwendungen zu finden.

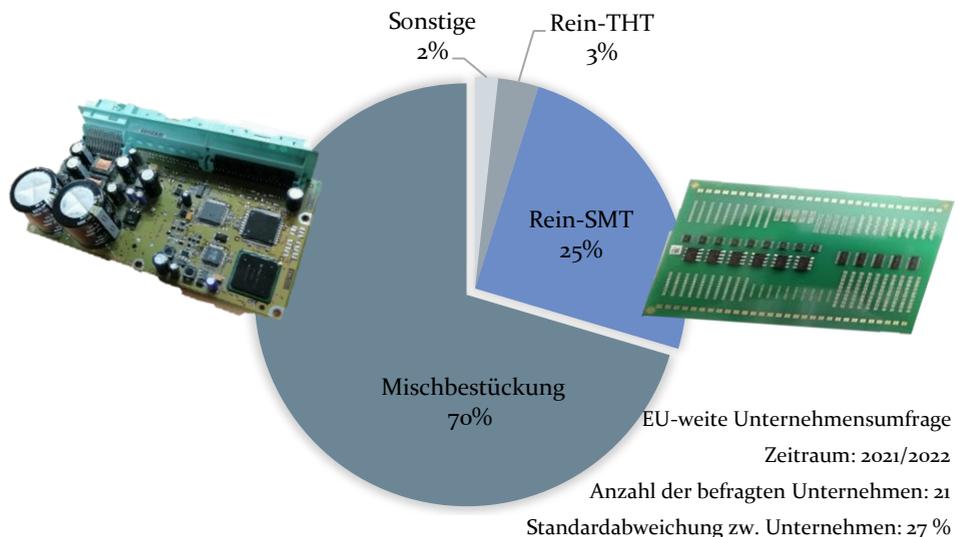


Bild 2: Anteil mischbestückter Flachbaugruppen aus der Umfrage unter 21 europäischen High-Mix Low-Volume Fertigungsstandorten aus den Marktsegmenten Automotive, Industrieelektronik, Luft- und Raumfahrt und Militär [17]

2.1.2 Montage von THT-Bauteilen in der Prozesskette mischbestückter Flachbaugruppen

Aus den im vorhergehenden Kapitel gewonnenen Erkenntnissen zeigt sich die Notwendigkeit zur Mischbestückung von SMT- und THT-Bauteilen auf einer Flachbaugruppe. Daraus lassen sich alternative Prozessabläufe für verschiedene Bestückungsszenarien ableiten. Die alternativen Prozessabläufe für die Fertigung mischbestückter Flachbaugruppen sind in Bild 3 skizziert.

SMT- und THT-Lötstellen auf einseitig bestückten Leiterplatten können simultan durch Pin-in-Paste (PiP) oder sequenziell mittels Reflow- und Wellenlötén gefertigt werden. THT-Bauteile auf beidseitig SMT-bestückten Flachbaugruppen müssen selektiv mit Hilfe einer Lötmaske in der Wellenlötanlage oder einem selektiv erwärmenden Verfahren gelötét werden. THT-Bauteile auf der Seite B von beidseitig THT-bestückten Baugruppen erfordern eine selektive Lötung, etwa durch eine Selektivwelle.

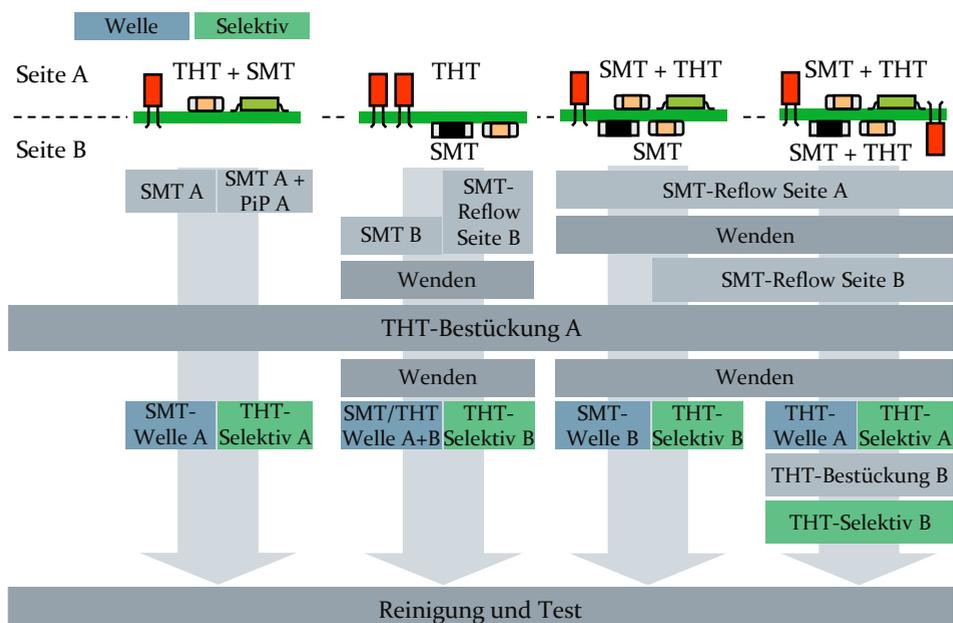


Bild 3: Prozesskette einseitig und beidseitig mischbestückter Flachbaugruppen [9, 18]

Aus der Prozesskette lassen sich einige Konsequenzen für die Fertigung ableiten. Insbesondere selektiv erwärmende Verfahren wie das Selektivwellenlötén sind häufig der Engpass für die Taktzeit. Zudem werden die Baugruppen nach dem SMT-Prozess zum zweiten Mal erwärmt. Das führt zu erhöhter thermischer Belastung bereits gelöteter Bauteile, thermo-

mechanischer Spannungen und zu bleibendem Verzug der Leiterplatte [6, 19]. Je nach Oberflächenfinish beeinträchtigt jede thermische Belastung die Benetzbarkeit, was die Lötstellenqualität der THT-Lötstellen verschlechtert [20]. Weiterhin vernichten Lötfehler im letzten Fertigungsschritt die Wertschöpfung vorangegangener Prozessschritte, wodurch der THT-Fertigungsstufe ein großer wirtschaftlicher Einfluss zukommt. Eine mögliche Nacharbeit von Lötfehlern erhöht weiter die Fertigungskosten und reduziert insbesondere die erwartbare Lebensdauer [6].

2.1.3 Weichlöten von THT-Bauteilen

Im Folgenden werden die gängigen THT-Lötverfahren in der Elektronik eingruppiert, erklärt und deren Eigenschaften dargelegt. Die Wahl für das Selektivwellenlöten als geeignetes Lötverfahren in der High-Mix/ Low-Volume Fertigung basiert schlussendlich auf wirtschaftlichen und technologischen Kriterien [21].

Normungsseitig ist die Einordnung der Lötverfahren nicht überschneidungsfrei, wie in Bild 4 dargelegt. Die Montage elektronischer Bauteile auf der Leiterplatte entspricht der Realisierung des zweiten Integrationslevels [16]. Die Herstellung der mechanischen, elektrischen und thermischen Verbindung wird in der Flachbaugruppenfertigung überwiegend mit Fügen durch Löten entsprechend DIN 8593-7:2003-09 [22] ausgeführt. Eine tiefere Einordnung der verschiedenen Weichlötprozesse in der Elektronik wird in der DIN ISO 857-2 [23] bzw. der DIN EN ISO 4063 [24] vorgenommen.

DIN EN 857-2 [23] unterscheidet anhand der Lotliquidustemperatur zwischen Hartlöten ($T_{liquidus} > 450\text{ °C}$) und dem in der Elektronik eingesetzten Weichlöten ($T_{liquidus} < 450\text{ °C}$). Je nach Lötverfahren und Wärmeeintragsmechanismus und -medium können durch die niedrigen Lotschmelztemperaturen beim Weichlöten in der Elektronik mehrere Verbindungen simultan und kostengünstig hergestellt werden, ohne thermische Schäden zu verursachen [25]. DIN EN ISO 4063 teilt vorhandene Lötverfahren in solche mit örtlich begrenzter (Gruppe 94) und vollständiger Erwärmung (Gruppe 95) ein [24]. Hinsichtlich der Produktivität sind Verfahren mit vollständiger Erwärmung denen mit örtlich begrenztem thermischen Energieeintrag bei vielen Lötstellen auf einer Leiterplatte überlegen. Da in letzterem Fall die Lötstellen sequenziell mit einem definierten Wärmeeintrag gelötet werden müssen, ist bei diesen Verfahren der Rüstaufwand hinsichtlich der Lötprogrammgenerierung und die Zykluszeit größer. Dafür kann der Prozess besser an spezielle Anforderungen an Lötwärmebedarf und -beständigkeit einzelner Lötstellen angepasst werden [13, 26]. Bei Verfahren

mit vollständiger Erwärmung muss dagegen ein für alle Lötstellen und Bauteile ausreichendes bzw. erträgliches Temperaturprofil definiert werden [12].

Weichlöten (DIN ISO 857-2 / DIN EN ISO 4063)			
Vollständige Erwärmung (DIN EN ISO 4063 Gruppe 95)			
Gr. 953	Gruppe 951		
Pin in Paste	Wellenlöten	Welle mit Maske	
			
Konvektion Heißgas	Konvektion flüssiges Lot		
Örtlich begrenzte Erwärmung (DIN EN ISO 4063 Gruppe 94)			
Gr. 944	Gr. 945	Gr. 943	
Multiwelle	Selektiv-/ Miniwelle	Laserlöten	Kolbenlöten
			
Konvektion flüssiges Lot		Therm. Strahlung	Konduktion Festkörper

Bild 4: Normungsseitige Einordnung von Verfahren für die Lötung von THT-Bauteilen hinsichtlich ihrer Erwärmung und des primären Wärmeübergangsmechanismus [23–25, S1, S2]

Nachfolgend wird auf die Eigenschaften der Fertigungsverfahren detaillierter eingegangen. Die Verarbeitung von THT-Bauteilen in der SMT-Stufe wird **Through-Hole-Reflow** (THR)-Verfahren, auch Pin in Paste (PiP) genannt. Dabei wird Lotpaste im SMT-Prozess mittels Schablonendruckes in die durchkontaktierten Löcher eingebracht. Anschließend wird die mit SMT- und THT-Bauteilen bestückte Baugruppe im Reflow-Ofen gelötet. Durch die Einsparung des zusätzlichen THT-Fertigungsschritts ist dieses Verfahren kostengünstiger. [15, 21, 27] Um den Spagat zwischen Lotpastenbedarf von miniaturisierten SMT-Bauteilpads und den THT-Lötstellen auf mischbestückten Baugruppen zu ermöglichen, werden im Allgemeinen Stufenschablonen, ein zweiter Druckvorgang oder Lot-Preforms eingesetzt

[15, 21, 28]. Die reduzierte Zuverlässigkeit und verstärkte Rissbildung [29], Fehlstellenbildung (engl. Voids), überschüssige Lotreste [27] sowie vermehrte Flussmittelrückstände aus der Lotpaste sind verfahrensbedingte Nachteile von THR. Insbesondere ist die Einsatzmöglichkeit einiger Bauteiltypen und -materialien, wie etwa Elektrolyte in Elektrolytkondensatoren, LCD-Displays oder THT-Folienkondensatoren, durch mangelnde Wärmebeständigkeit eingeschränkt [15, 30]. Die Werkstoffeigenschaften von Vergussmassen, Ferritkernen in Spulen und Elektrolyt erlauben keine hohen Temperaturen, wie sie im Reflowofen vorherrschen [31]. Zudem sind die Bauteilabmessungen im Reflowöfen durch die Durchfahrthöhe auf typischerweise ca. 30-40 mm begrenzt. Bei größerer Durchfahrthöhe wären aufgrund des schlechteren Wärmeeintrags wiederum noch höhere Über-temperaturen in der Peak-Zone notwendig. Der notwendige Energieeintrag für eine Lötverbindung steht somit der Lötwärmebeständigkeit der Bauteile gegenüber [13]. Größere thermische Massen und verdeckte Lötstellen verhindern den Wärmeeintrag über Luftkonvektion und müssen daher mit Verfahren mit größerem Wärmeenergieeintrag gelötet werden. Somit können nur bestimmte THT-Bauteile im THR-Verfahren verarbeitet werden.

Bei **Flow-Lötverfahren** wird die Verbindung durch das simultane Einbringen des flüssigen Lotes und der damit einhergehenden Wärme hergestellt. Dazu gehören das Wellenlöten, Wellenlöten mit Maske, Multiwellenlöten und das Selektivwellenlöten.

Beim **Wellenlöten** wird die Baugruppe unterseitig über eine stehende Lotwelle gefahren. Dadurch wird die gesamte Baugruppe erwärmt und die THT-Bauteile gelötet. Das Lötprogramm muss derart abgestimmt werden, dass es den Anforderungen aller Lötstellen hinsichtlich Lötwärmebedarf und Lötwärmebeständigkeit gleichermaßen genügt [12]. Damit ist die Flexibilität eingeschränkt, auf besondere thermische Anforderungen einzelner Lötstellen auf einer Baugruppe einzugehen [30]. Der große thermische Schock beim Kontakt der gesamten Baugruppe mit der Lotwelle kann zudem thermomechanische Spannungen und Verzug verursachen, was durch produktspezifische Niederhalter verhindert werden kann [10]. Durch die simultane Lötung aller Lötstellen ist das Verfahren verglichen mit weiter unten genannten Selektivverfahren pro Lötstelle kostengünstig. Die Wellenlötanlagen verursachen jedoch höhere Wartungsaufwände als z. B. SMT-Reflow-Prozesse in der Flachbaugruppenfertigung [3, 32].

Durch Einsetzen der Baugruppe in eine Lötmaske mit produktspezifischen Öffnungen auf der Lötseite können THT-Bauteile auf beidseitig SMT-bestückten Baugruppen auch in einer Wellenlötanlage gelötet werden. Die

Auslegung der Lötmasken ist dabei ein wichtiger Parameter für einen robusten Lötprozess [33, 34]. Besonders der Abstand zwischen Maskenkante und THT-Pins in freigestellten Bereichen muss für eine lötgerechte Prozessgestaltung eingehalten werden [33]. Daraus folgen eine geringere produktspezifische Flexibilität und ein Handhabungsaufwand der Rahmen in der Fertigung. Bei beidseitig THT-bestückten Leiterplatten muss die Maske für die Seite A insbesondere die THT-Lötstellen der zweiten Seite B abdecken, damit im ersten Lötvorgang nicht alle Löcher für beide Bestückseiten zugelötet werden.

Beim **Multiwellenlöten**, auch Huptauchlöten oder Diplöten genannt, sind mehrere selektive Düsen produktspezifisch konfiguriert. Alle THT-Lötstellen werden dann durch das Absenken der Leiterplatte simultan mit den Lotwellen in Kontakt gebracht und gelötet. Das reduziert die Taktzeit im Vergleich zum Wellenlöten. Allerdings besteht, wie beim Wellenlöten keine Möglichkeit flexibel auf Lötstellen mit unterschiedlichen thermischen Anforderungen einzugehen. [3]

Für eine flexiblere, schonendere Lötung eignet sich die **Selektivwelle**, teils auch als Miniwelle bezeichnet. Die stehende Lotwelle wird hier durch eine Lotdüse erzeugt. Diese Düse wird relativ zur feststehenden Leiterplatte verfahren, wodurch jede Lötstelle einzeln angefahren, selektiv erwärmt und gelötet werden kann. Die selektive Lötung ermöglicht bei hoher Reproduzierbarkeit zudem eine zuverlässige und thermisch schonende Lötung von Lötstellen mit sehr unterschiedlichen thermischen Anforderungen auf der gleichen Baugruppe [30, P2]. Dies ermöglicht die Machbarkeit von Löt-situationen mit eingeschränkter Zugänglichkeit etwa auf dicht gepackten, beidseitig THT-bestückten Baugruppen. Der erhöhte Aufwand bei der baugruppenspezifischen Programmerstellung ist dabei als Nachteil anzusehen [26, 35].

Das **Laserlöten** wird insbesondere für Spezialanwendungen eingesetzt. Es zeichnet sich durch die hohe Energieeffizienz, Flexibilität, kurze Prozesszeiten und geringe thermische Last aus [36, 37]. Die aufwändige Parametrisierung und Regelung des empfindlichen Prozesses zahlt sich jedoch nur für große Losgrößen aus [37]. Schwankungen in der Absorption der Laserstrahlung bzw. Emissivität bei prozessbegleitender Temperaturüberwachung können die Robustheit des Lötergebnisses beeinträchtigen [25].

Kolbenlöten wird häufig als Handlötverfahren eingesetzt, etwa bei Reparaturlöten oder Kleinserien. Aufgrund des vergleichsweise großen Wärmeübergangswiderstands zwischen Lötspitze und Lötstelle ist der ausreichende Wärmeeintrag kritisch [38]. Daher wird mit Kolbentemperaturen

bis 400 °C gelötet, um eine ausreichend hohe Heizleistung eintragen zu können, was zu örtlicher Überhitzung führen kann. Höhere Löttemperaturen und -zeiten beschleunigen das Wachstum der intermetallischen Phase sowie das Korngrößenwachstum der Lötstelle und beeinflussen damit deren mechanische Eigenschaften unter Umständen negativ [39, 40]. Ein ausreichender Lotdurchstieg ist dadurch bei thermisch anspruchsvollen Lötstellen unter Umständen nicht zu erreichen [30]. Beim Handlöten ist zusätzlich die Reproduzierbarkeit des Lötergebnisses eingeschränkt und erfordert Übung und Erfahrung des eingesetzten Personals.

Als lötfreie Alternative können THT-Pins eingepresst (Press-fit) werden. Der Pin wird in eine Durchkontaktierung gesteckt und durch Kaltverschweißung mechanisch im Loch gehalten. Dieses Verfahren erfordert eine präzise Tolerierung und Positionierung der Steckpins durch Montagevorrichtungen, da es sonst zum Verbiegen der Pins kommen kann. [15, 41, 42]

Die eingeführten Lötverfahren werden in Bild 5 qualitativ anhand produktionstechnischer und technologischer Kriterien gegenübergestellt. Die Bewertung und die Gewichtung der Kriterien sind in Tabelle 7 im Anhang dargestellt. Neben den in Bild 3 in Kapitel 2.1.2 aufgezeigten prozesstechnischen Notwendigkeiten zeigt sich die Selektivwelle für die Lötung von kleinen und mittleren Losgrößen dicht bestückter Flachbaugruppen alternativen Verfahren überlegen.

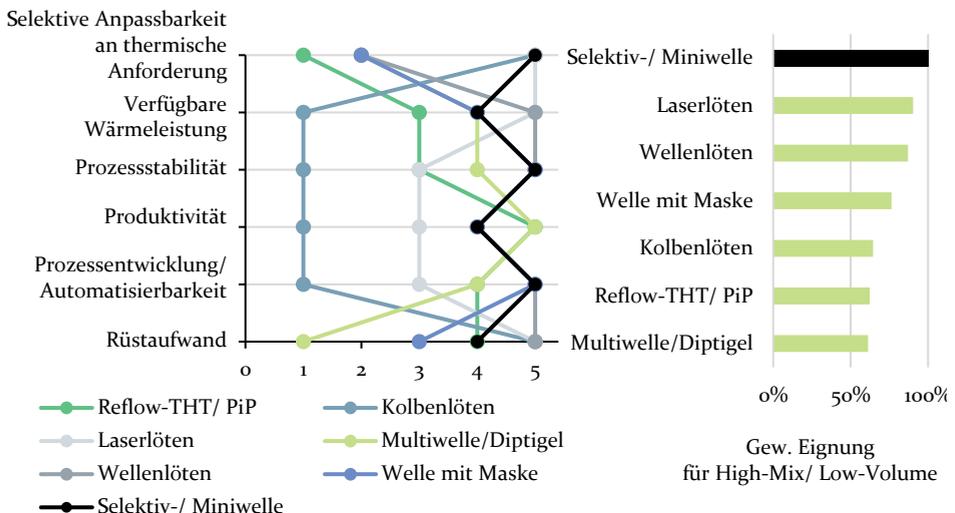


Bild 5: Gegenüberstellung von Lötverfahren für THT-Bauteile hinsichtlich fertigungstechnisch relevanter Auswahlkriterien auf Basis der Bewertung in Tabelle 7 im Anhang [3, 35, 43, 44, S2]

Dies gilt insbesondere, wenn das Bauteilspektrum hinsichtlich seiner thermischen Anforderungsprofile groß ist [25]. In Kombination mit dem hohen Maß an Reproduzierbarkeit der Lötqualität ist das Verfahren prädestiniert für hoch beanspruchte, sicherheitskritische Baugruppen wie Inverter in Einsatzfeldern wie Automotive, Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt und Militär. [21, 26, 45]

2.2 Selektivwellenlöten mischbestückter Flachbaugruppen

Der vorangegangene Abschnitt leitet die Notwendigkeit von THT-Bauteilen auf mischbestückten Flachbaugruppen und deren Lötung mit Hilfe des Selektivwellenlötverfahrens her. Im Folgenden wird nun der Selektivwellenlötprozess sowie die Abnahmekriterien für die Lötqualität und die Einflussfaktoren auf den Lotdurchstieg eingehend erläutert.

2.2.1 Prozessablauf des Selektivwellenlötens

Der Selektivwellenlötprozess besteht aus drei operativen Schritten. Nach dem Flussmittelauftrag wird die bestückte Leiterplatte vorgeheizt. Anschließend stellt die Selektivwelle die Verbindung zwischen Bauteil und Durchkontaktierung her. Danach kühlt die Baugruppe ab. [26]

Die Prozessschritte werden in Bild 6 anhand der prozesstechnischen, thermischen und metallurgischen Aspekte erläutert. Der Flussmittelauftrag (1) wird in Selektivwellenlötanlagen mittels Drop-jet-Fluxer selektiv auf und in die Lötstellen appliziert [46]. Durch Aktivierung des Flussmittels werden die Metalloberflächen von Verunreinigungen gereinigt, Oxidschichten durch Reduktion aufgebrochen und ein Oxidationsschutz der Löt pads bis zur Lötung sichergestellt. Dadurch wird die Benetzung ermöglicht. Gegenüber flächigem Flussmittelauftrag kann der Flussmittelverbrauch durch den Drop-jet-Fluxer auf bis zu 5 % reduziert werden [47, 48]. Im Prozess ist die Menge auf das Optimum zwischen vollständigem Lotdurchstieg und möglichst geringen Flussmittelrückständen, Lotbrücken und Lotkugeln einzustellen. Da korrosive Flussmittelrückstände nach dem Lötprozess vermieden werden müssen, ist die Wahl des Flussmittels und die aufgetragene Menge unter Berücksichtigung dessen Wirktemperatur, auf das Temperaturprofil im Lötprozess abzustimmen [49, 50].

Der nächste Prozessschritt besteht in der unterseitigen Vorheizung (2) der gesamten Baugruppe mittels Infrarot-, Strahlungs- oder Konvektionsheizung [51]. Je nach Wärmebeständigkeit der Bauteile kann zusätzlich eine

bauteilseitige Oberheizung eingesetzt werden. Während der Vorheizung wird der Lösemittelanteil im Flussmittel getrocknet [47, 52] und das Flussmittel aktiviert.

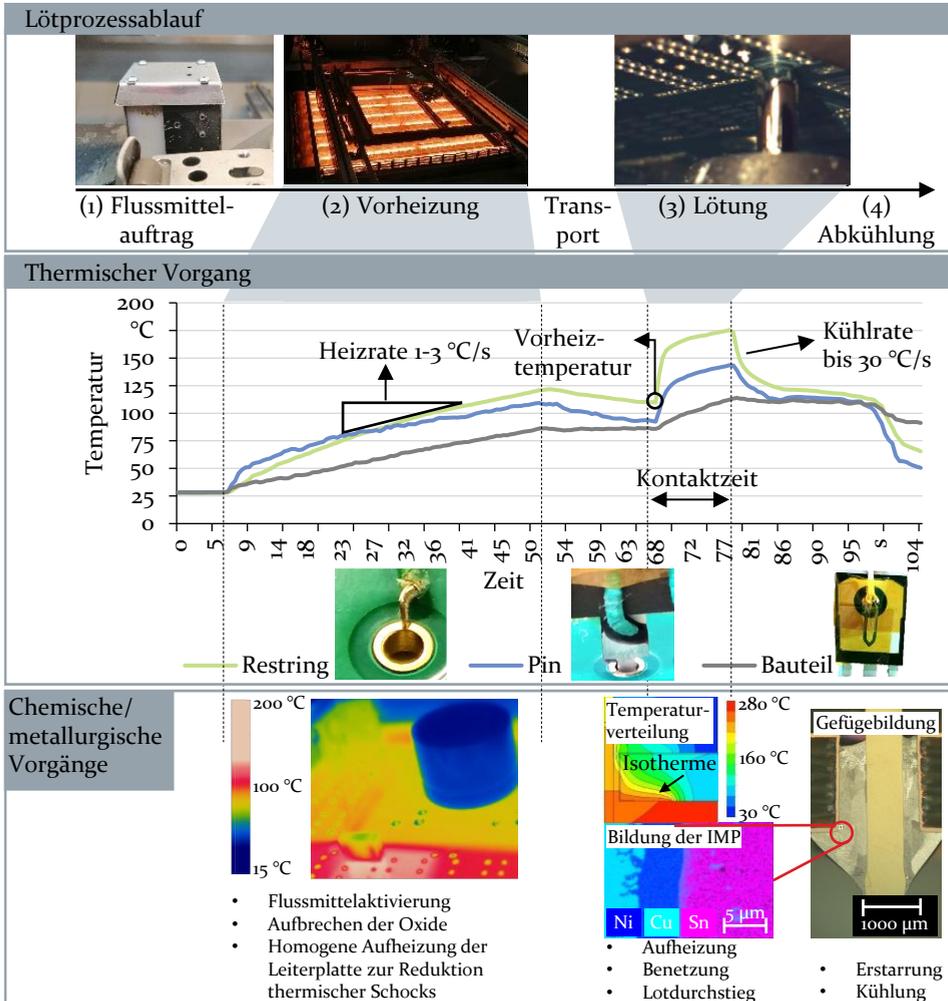


Bild 6: Ablauf des Selektivwellenlötprozesses mit den Funktionen der Prozessschritte anhand der Punktlötung eines einzelnen MOSFET-Drain Pins mit gemessenen Temperaturverläufen auf Lotzielseite, Bauteilpin und Bauteilkörper

Das Temperaturfenster hängt von der spezifischen Flussmittelzusammensetzung ab. Zu geringe Temperaturen können mangelnde Trocknung des Lösemittels zur Folge haben [53], was zu mangelnder Benetzung führen kann [52]. Im Rahmen der Arbeit bezieht sich die Vorheiztemperatur einer Lötstelle auf den Zeitpunkt unmittelbar vor dem Lotwellenkontakt. Zu hohe Temperaturen führen zu Degradierung des Flussmittels und damit zu

Wirkungslosigkeit. Durch die Vorheizung werden Benetzung und Lotdurchstieg durch die erhöhte Temperatur gefördert [50]. Weiterhin werden thermische Schocks und thermische Gradienten beim Lotwellenkontakt der Leiterplatte reduziert [19, 52].

Typische Vorheizungstemperaturen liegen zwischen 90 °C und 130 °C auf der Leiterplattenoberseite. Bei mehrlagigen Leiterplatten mit hohem Kupferanteil muss die Vorheizung für einen ausreichenden Lotdurchstieg im oberen Bereich des angegebenen Temperaturfensters gehalten werden. Die notwendige Heizzeit hängt von der thermischen Masse der Leiterplatte und der resultierenden Heizrate in Folge der Heizleistung der Heizmodule ab. Die gemessenen Heizraten liegen dabei zwischen 0,5 und 3 °C/s, wie in Bild 6 dargestellt.

Während der Lötung, Bild 6 (3), wird die Lotwelle entweder als Punktlötung oder als Schleplötung mit den Lötstellen für etwa 2-10 s in Kontakt gebracht. Dabei erwärmt sich die Lötstelle und der Bauteilpin durch den konvektiven Wärmeübertrag weiter. Bei Erreichen der Lotschmelztemperatur in der Lötstelle führt die Benetzung der Oberflächen mit Lot zum Lotdurchstieg im Lotspalt. Die stoffschlüssige Verbindung wird durch Diffusionsprozesse hergestellt, in Folge derer die intermetallische Phase an den Grenzflächen zwischen dem verflüssigten Lotmaterial und den nicht aufgeschmolzenen Oberflächen der Fügepartner entsteht. Die Isothermen der Temperaturverteilung verlaufen dabei glockenförmig um die Lötstelle, wie der Simulationsplot in Bild 6 (3) zeigt [54, P4]. Benetzende Lotdüsen mit einem Innendurchmesser typischerweise zwischen 3 mm bis 30 mm bilden eine ringsum ablaufende, stehende Lotwelle. Das flüssige Lot wird von einer elektromagnetischen Pumpe aus dem Lotbad in die Düse gefördert. Der Lotvolumenstrom hängt von der Düsengröße und der Pumpleistung ab, beeinflusst den Lotdurchstieg nicht messbar [55, P2]. Für eine Lotdüse mit Innendurchmesser von 3 mm liegt der Volumenstrom nach eigenen Messungen im Bereich von 30-40 g/s. Die Düse wird mit N₂ umströmt (50-100 ppm O₂), um Oxid- und Krätzbildung und folglich Brückenbildung und schlechteren Lotdurchstieg zu vermeiden [47, 56]. Die Lottemperatur liegt mit 30-80 K oberhalb der Schmelztemperatur (homologe Temperatur ~1,06-1,16) der Lotlegierung. Diese Übertemperatur ist notwendig, um trotz des geringen Lotmassenstroms ausreichend Lötwärme zur Verfügung zu stellen. Je kleiner die Lotdüse, desto geringer die eingetragene Lötwärme aufgrund der geringeren Kontaktfläche und des geringeren Lotmassenstroms. Dies muss teils mit höheren Lottemperaturen ausgeglichen werden. Die industriell weit verbreitete bleifreie, nicht-eutektische Zinn-Silber-Kupfer-Lotlegierung SAC305 hat einen Schmelzbereich zwischen

217 °C und 221 °C. Daher ist der Lötwärmebedarf bleifreier Lötprozesse größer.

Innerhalb des Prozesses kann von einer Kühlrate nicht gelöteter Bereiche von etwa 1-2 °C/s ausgegangen werden. Nach Beendigung des Lötprogramms kühlt die Lötstelle ab. Die gemessene Abkühlrate durch natürliche Konvektion liegt bei bis zu 30 °C/s und klingt im Kühlverlauf ab, Bild 6 (4). Die Abkühlrate beeinflusst dabei die Gefügebildung der Lötstelle. Eine aktive Kühlung etwa durch erzwungene Konvektion reduziert die Kühlzeit, kann jedoch bei zu großen Temperaturgradienten zu thermischen Spannungen und Verzug führen. [39]

2.2.2 Abnahmekriterien der Lötqualität für THT-Lötstellen

Standardisierte Abnahmerichtlinien ermöglichen die Sicherstellung gleichbleibender Qualität für die Fertigung zuverlässiger Flachbaugruppen über verschiedene Chargen und Fertigungsstandorte hinweg. Die Anwendung folgender Richtlinien und Normen wird, neben individuellen Absprachen, typischerweise in der Auftragsfertigung für die Beurteilung der Fertigungsqualität von THT-Lötstellen vertraglich festgelegt.

- DIN EN 61192: Anforderungen an die Ausführungsqualität von Lötverbindungen [57]
- IPC J-STD-001D: Anforderungen an gelötete elektrische und elektronische Baugruppen [58]
- IPC-A-610: Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen [2]

Die Abnahmerichtlinien gehen dabei von einer optischen Inspektion aus. In den Normen werden Lötstellenanomalien definiert und toleriert. Dazu gehören Form-, Lage- und Distanztoleranzen der Lotmenisken, der Bauteilpins und der bestückten Bauteile. Dabei werden Baugruppen entsprechend ihres Anforderungsprofils in drei Klassen eingeteilt.

- Klasse 1: Allgemeinelektronik (nur Funktion, keine Zuverlässigkeit – Unterhaltungselektronik)
- Klasse 2: Hohe Anforderung (Zuverlässigkeit – Industriesteuerungen)
- Klasse 3: Hochleistungselektronik (hochzuverlässige Sicherheitskritische Anwendungen – Automotive, Luft- und Raumfahrt, Militär)

Aus der jeweiligen Klassenzugehörigkeit ergeben sich die genauen Abnahmegrenzwerte je Fehlertyp. Die Inspektion der THT-Lötstellen beruht in

Industrieprozessen auf automatischer optischer Inspektion (AOI) [P5]. Typische Fehlerbilder werden in Bild 7 zusammengefasst und im Folgenden eingeordnet.

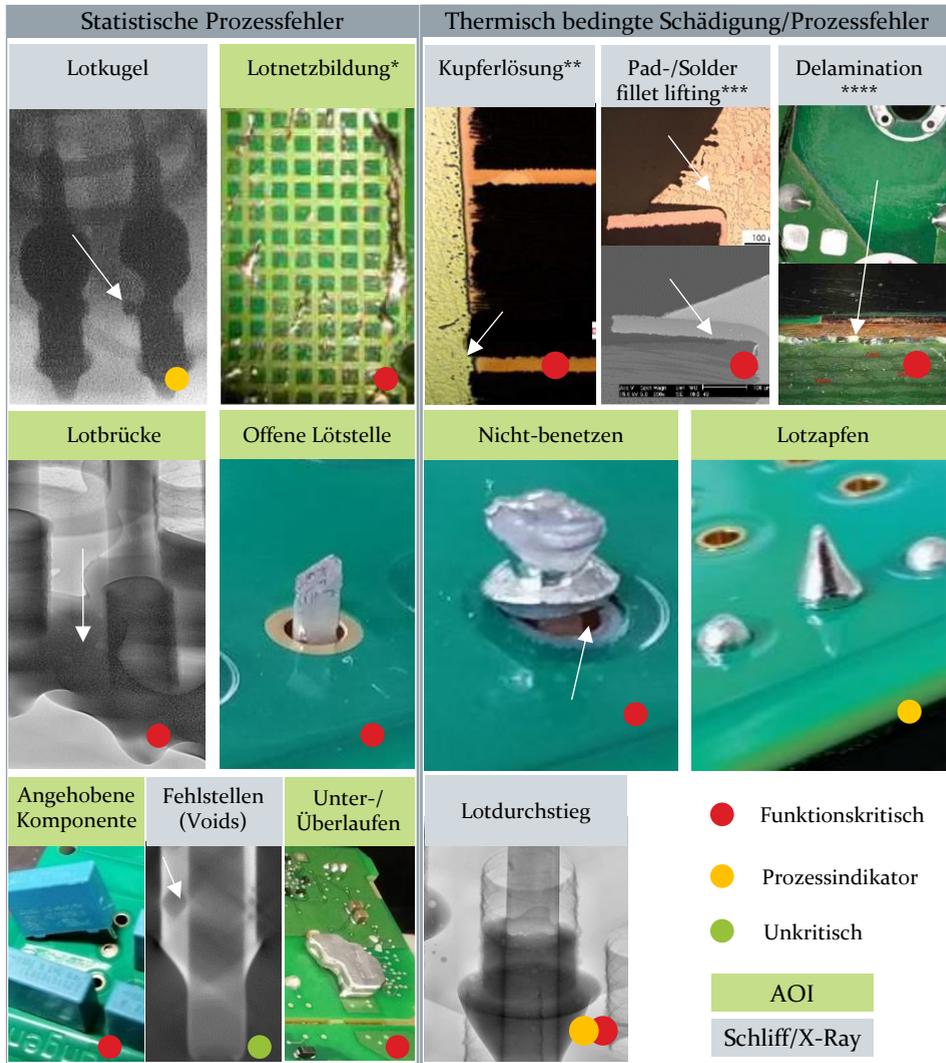


Bild 7: Fehlerbilder bei THT-Lötstellen unterteilt nach statistisch streuenden Prozessfehlern und reproduzierbaren Fehlern mit thermischer Ursache (Bildquelle * [59], ** [60], ***[61], **** [62])

Nicht durch Bauteile verdeckte oder in der Leiterplatte liegende Fehler sind, wie gekennzeichnet, mit AOI erkennbar. Verdeckte Fehler erfordern eine röntgentechnische Inspektion und bei sehr feinen Fehlerbildern,

zerstörende Prüfung durch Schlitze. Die Fehlerrate auf Grund statistischer Streuung der Fertigung im Lötprozess ist mit ca. 3000 ppm zu beziffern [3].

Lotrückstände, wie **Lotkugelbildung** (engl. Solder Balling) und **Lotnetz-
bildung**, werden durch das Zusammenspiel von Lotstrom und Flussmittel-
typ und -menge beeinflusst [4]. Insbesondere viel Flussmittelrückstand än-
dert die Adhäsionseigenschaften des Lötstopplacks und beeinflusst damit
Lotkugelbildung und Lotnetzbildung [59].

Eine **Lotbrücke** (engl. Bridging) ist vorzeitig an falscher Position erstarrtes
Lot, das ungewollt eine Verbindung zwischen zwei Löt pads herstellt. Die
Neigung zur Brückenbildung von hängt von Flussmitteltyp und -menge ab
[4, 63]. Lotbrücken entstehen bevorzugt bei unzureichender Flussmittelak-
tivität [47]. Seitens der Lotlegierung wird Brückenbildung durch Germa-
nium gehemmt [64] und durch Bismut, Kupferverunreinigung [65] sowie
Krätze [66] gefördert. Konstruktiv begünstigen große Löt pads sowie ein zu
geringer Pinüberstand die Brückenbildung [47, 55]. Prozessseitig fördern
zu niedrige Vorheiztemperaturen und Löt kontaktzeiten die Brückenbil-
dung [48]. **Lotzapfen** entstehen ebenfalls bei zu schnellem Entfernen der
Wärmequelle, da das Lot plötzlich erstarrt, bevor ein Meniskus geformt
wird.

Nichtgelötete, **offene Lötstellen** können durch erhöhte Leiterplattenver-
wölbung in Kombination mit zu geringer Wellenhöhe oder verbliebenen
Oxiden auf Oberflächen durch mangelnde Flussmittelbenetzung oder -ak-
tivität entstehen [35, 67]. Zudem kann bei Bauteilpins mit hohen thermi-
schen Massen ein zu geringer Lötwärmeeintrag durch zu geringe Vorheiz-
temperatur oder kurze Löt kontaktzeiten die Benetzung versagen. Dies
kann gleichermaßen zu offenen bzw. **nichtbenetzten** Lötstellen führen.

Durch Berührung der Düsenwand, etwa durch Leiterplattenverwölbung
oder -verzug können **Komponenten angehoben** werden. Bei sehr
leichten Komponenten mit gleichzeitig großen Bohrlöchern kann auch der
Lotstrom zu einer Anhebung führen.

Fehlstellen (engl. Voids) in THT-Lötstellen werden in den genannten
Richtlinien nicht reglementiert. Diese treten bei bleifreien Loten häufiger
auf als bei bleihaltigen Lotlegierungen. Sie entstehen insbesondere bei di-
cken Leiterplatten sowie kleinen Lotspalten [68] und überwiegend an den
Übergängen von Lot zu Pin und Durchkontaktierung [69].

Die korrosive Eigenschaft von flüssigem Zinn führt neben dem Angriff der
Lötanlagen [70] zu **Ablegierung** der Leiterplattenmetallisierung [71]. Die
Verringerung des Kupferquerschnitts an den Durchkontaktierungen kann

bis hin zu Leiterbahnunterbrechung und Funktionsausfall führen [72, 73]. Die Restkupferstärke ist daher in IPC-6012B auf 12,3 µm festgelegt [73].

Zu große Temperaturschocks beim Kontakt mit der Lotwelle können aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Kupfer und Epoxid-Basismaterial (FR4) zu **Pad bzw. Solder fillet lifting** führen [61]. Bei Überschreitung der nach IPC-TM650 qualifizierten Wärmebeständigkeit kann im Basismaterial **Delamination** zwischen Epoxidharz und Glasgewebe auftreten [62].

Die vertikale Lotspaltfüllung, als **Lotdurchstieg** bezeichnet, gilt als Hauptabnahmekriterium für THT-Lötstellen, das durch das Lötstellendesign maßgeblich beeinflusst wird [68, P2, P3]. Daher wird der Lotdurchstieg im Rahmen dieser Arbeit als Kriterium für die fertigungsgerechte Auslegung von Lötstellen herangezogen. Die Begründung dieser Wahl wird besonders in den Kapiteln 2.2.3 und 2.3 weiter erklärt. Der Lotdurchstieg wird durch Formel (1) definiert und wie in Bild 8 illustriert als Quotient aus Lothöhe h und Leiterplattendicke l_{LP} bewertet.

$$\text{Lotdurchstieg} = \frac{h}{l_{LP}} \quad (1)$$

Die drei Normen definieren die Abnahmegrenzwerte bezüglich des Lotdurchstiegs übereinstimmend (Bild 8). Für die Abnahme des THT-Lötprozessergebnisses wird meist die IPC-A-610 angewendet.

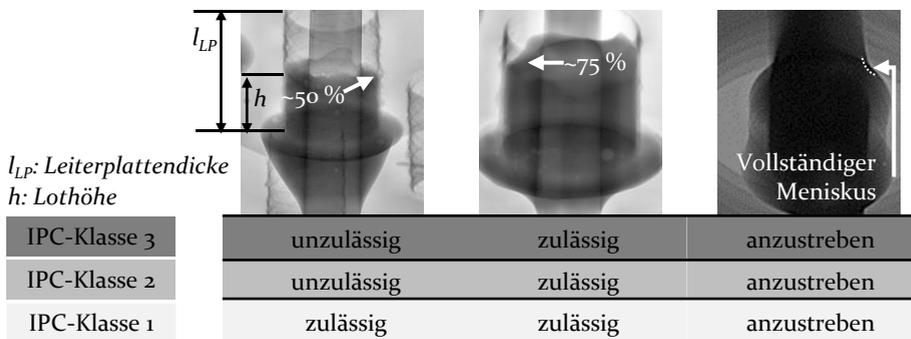


Bild 8: Röntgentechnische Beurteilung des Lotdurchstiegs als Kriterium für das Lötresultat in Anlehnung an IPC-A-610 [2]

Anzustreben ist jeweils immer der vollständige Lotdurchstieg. Je nach Baugruppenklassifizierung und vertraglicher Regelung sind geringere Lotdurchstiege zulässig. In applikationsspezifischen Fällen ist ein Lotdurchstieg unter 100 % nicht zulässig [2]. Dazu gehören Anwendungen, die die Baugruppe thermischem Schock aussetzen sowie Hochfrequenz-

baugruppen (HF), bei denen sich das HF-Verhalten der Baugruppen durch mangelnden Lotdurchstieg verändert. Zudem ist die Stromtragfähigkeit bei Hochstromanwendungen durch den geringeren Kontaktquerschnitt einer Teilfüllung eingeschränkt. Im Fall einer Kupferlagenanbindung auf der Leiterplattenoberseite wird der Strom dann nur über die durchmetallisierte Kupferhülse von ca. 20-25 µm geführt, was zu Überhitzung und Brand führen kann. Grundsätzlich bestätigen veröffentlichte Untersuchungen [68, 74-77] zur Zuverlässigkeit von THT-Lötstellen mit vertikaler Teilfüllung die Wichtigkeit vollständiger Lotfüllung für sicherheitskritische und hochbeanspruchte Elektronik (siehe Tabelle 9 im Anhang). Die thermomechanische Wechselbelastung aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten (coefficient of thermal expansion-CTE) von Lot, Kupfer und Basismaterial [56, 68, 78, 79] führt zu mechanischen Spannungen in der Leiterplatte. Insbesondere bei mangelndem Lotdurchstieg ohne Pinüberstand auf der Lötseite führt das zu Frühausfällen [68]. Vibrationsbelastung in Kombination mit thermischer Alterung kann zur Ablösung der Kupferlagen und Brüchen in Lot, Pin und Metallisierung führen [74].

Durch die Positionierung der THT-Lötstufe am Ende der Prozesskette in der Flachbaugruppenmontage, vergleiche Bild 3, ist fertigungsgerechtes Design von THT-Lötstellen von großer Bedeutung. Eine nicht abnahmekonforme Lötung führt dann gehäuft zur Vernichtung der Wertschöpfung aller vorheriger Fertigungsschritte, wenn eine Reparatur nicht zulässig oder unmöglich ist.

2.2.3 **Einflüsse und Störgrößen auf Flowlötprozesse**

Aus der Prozessbeschreibung und der Identifikation des Lotdurchstiegs als kritische Zielgröße des Lötprozesses werden die relevanten Einflussparameter auf den Wellen-/Selektivwellenlötprozess im Ursachen-Wirkungsdiagramm in Bild 9 zusammengefasst. Die Einflussfaktoren auf den Lotdurchstieg werden anschließend beschrieben. Die zugrundeliegende analysierte Literatur bezieht sich hier sowohl auf bleihaltige als auch auf bleifreie Wellen- und Selektivwellenlötprozesse. Der methodische Schwerpunkt dieser Untersuchungen der Einflüsse liegt auf experimentellen und nachrangig numerischen und datengetriebenen Ansätzen.

Die eingesetzten **Materialien** für Leiterplatte, Bauteile, Oberflächenfinish, Flussmittel und Lotlegierung beeinflussen den Lotdurchstieg bedingt durch deren materialspezifische Wärmebeständigkeit und die Wärmetransporteigenschaften sowie Benetzungs-, Fließ- und Erstarrungseigenschaften.

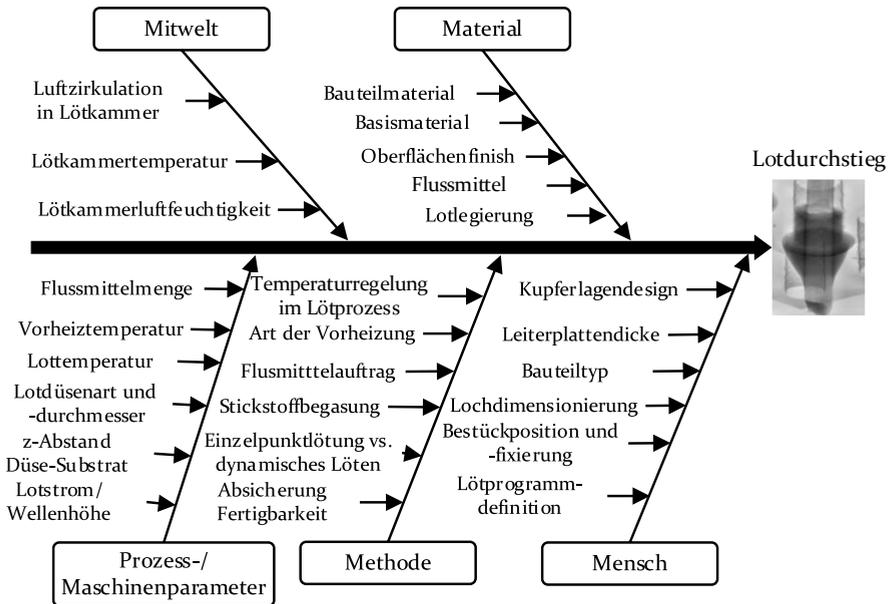


Bild 9: Einflussfaktoren auf den Lotdurchstieg bei Wellenlötprozessen [S1, S2]

Die eingesetzten Materialien und der physische Aufbau des Bauteils mit der Kontaktierung zwischen Pin und Bauteilkörper bestimmen über den thermischen Widerstand und die thermische Kapazität das Aufheizverhalten im Lötprozess individuell auf Bauteilpinlevel [56, P3]. Leiterplatten werden in der Regel aus glasfaserverstärktem Epoxidharz (FR4) als Basismaterial und Kupferlagen schichtweise aufgebaut. Die Glasübergangstemperatur (T_g), die Zersetzungstemperatur (T_d) und Testergebnisse nach IPC-TM650 für die Standardprüfpunkte T260 sowie T288 (siehe Tabelle 8 im Anhang) werden in der Produktspezifikation genannt. Diese Kennwerte sind Anhaltspunkte für die Beurteilung der Wärmebeständigkeit des Laminats im Lötprozess. Eine höhere thermische Belastbarkeit vergrößert das Prozessfenster für den Lotdurchstieg. [56]

Das **Oberflächenfinish** von Bauteilpin und Leiterplattenmetallisierung ist der direkte Kontaktpartner zur Lotlegierung. Es schützt die darunter liegende Kupferschicht vor Bildung von Kupferoxid, welches durch die milden, in der Elektronikfertigung eingesetzten Flussmittel nicht aufgebrochen werden könnte. Das Oberflächenfinish bestimmt daher die Benetzbarkeit und das Alterungsverhalten bei thermischer Belastung der Lötstelle etwa durch mehrere Lötvorgänge und damit den Lotdurchstieg [56, 80]. Dadurch ist auch der Lotdurchstieg betroffen. Nickel-Gold (NiAu) und Chemisch-Zinn werden aufgrund der guten Langlebigkeit, Benetzbarkeit

und geringerer Oxidationsneigung im Vergleich mit Hot Air Leveling (HAL) und Organic Solderability Preservative (OSP) [20, 56] meist in Prozessketten mit mehreren Lötvorgängen eingesetzt [80]. Zudem bieten nickelbasierte Oberflächen einen Diffusionsschutz gegen Kupferlösung [81].

Flüssige **Flussmittel** bestehen aus einem flüchtigen Trägermedium, Alkohol (VOC) oder Wasser (VOC-free), in dem der Aktivator mit einem Gewichtsanteil bis 20 % gelöst ist. In den Normen IPC-J-STD-004, DIN EN 61190-1 und DIN EN ISO 9454 werden Flussmittel auf Grundlage der nichtflüchtigen Anteile gruppiert. Die Unterscheidungsmerkmale sind der Hauptbestandteil des Aktivators (Kolophonium, Harz, organisch, anorganisch) und die Aktivierung (aufsteigend: Lo, L1, Mo, M1, Ho, H1) sowie der Halogenidanteil [82–84]. Die Nomenklatur nach der DIN EN 61190-1 und der am häufigsten eingesetzten IPC-J-STD-004 unterscheidet sich hauptsächlich in den Grenzwerten für den Halogenidanteil, ab denen das Flussmittel halogenid-frei genannt werden darf. Im Lötprozess nicht vollständig verbrauchte Flussmittelrückstände sind hygroskopische Salze, die in Verbindungen mit absorbierte Luftfeuchtigkeit zu Korrosion und Beeinträchtigung der Lebensdauer führen. Diese müssen daher entfernt werden [49, 85, 86]. Auch Rückstände von sogenannten No-Clean (halogenid-freien) Flussmitteln können die Zuverlässigkeit der Baugruppe beeinflussen [86–88]. Aus Umweltsichtpunkten ist der Einsatz halogenid-freier Flussmittel auf Wasserbasis zu bevorzugen [52]. Zudem sind diese Flussmitteltypen kein Gefahrgut [47]. Wegen der geringeren Verdampfungsenergie hat die Wahl alkoholbasierter Flussmittel energetische Vorteile [52]. Die geringen Temperaturen aufgrund der geringen lokalen Erwärmung beim Selektivwellenlötten führen zu mehr Flussmittelrückständen [86], weshalb ein geringer Feststoffgehalt zu bevorzugen ist [85, 86]. Ein höherer Feststoffgehalt erhöht die Aktivierung und verbessert dadurch den Lotdurchstieg. Eine gleichmäßige Benetzung der Lötstellen mit Flussmittel ist dabei grundsätzlich notwendig für einen zuverlässigen Lötprozess [45, 49, 55, 63, 89]. Damit ist die genaue örtliche Einbringung des Flussmittels in den Lötspalt für den Lotdurchstieg wichtiger als die applizierte Menge [63].

Die Einführung der **Bleifrei-Lote** mit einer ca. 20 % höheren Schmelz- bzw. Erstarrungstemperatur im Vergleich zu bleihaltigen Loten und schlechteren Fließ- und Benetzungseigenschaften [69, 90–92] führt bei gleicher Temperaturverteilung in der Lötstelle zu früherer Erstarrung der Lotschmelze und damit geringerem Lotdurchstieg [55, P2]. Eine niedrige Erstarrungstemperatur ermöglicht dagegen ein größeres Prozessfenster zwischen Lötwärmebeständigkeit und Erstarrungstemperatur und folglich

schnellere Lötprozesse, da der Wärmebedarf seitens der Lotlegierung geringer ist. Dadurch wird die Baugruppe thermisch weniger belastet [46], was sich positiv auf die Lebensdauer der Bauteile auswirkt. Geringere Schmelztemperaturen führen allerdings auch zu geringerer Kriechfestigkeit in Anwendungen bei folglich höheren homologen Temperaturen. Aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen werden alternative Lotlegierungen entwickelt und hinsichtlich Schmelztemperatur, Fließeigenschaften, Benetzbarkeit, Kupferaffinität und Rohstoffkosten optimiert, um zuverlässige Lötresultate zu erzielen [61, 72, 91–93]. Die Fragestellung nach der Fertigbarkeit einer THT-Lötstelle wird dadurch jedoch nicht gelöst, sondern nur das Prozessfenster verschoben [94].

Ein wichtiger Aspekt im industriellen Lötprozess sind schleichende Veränderungen der Lotlegierung im Fertigungsprozess durch Verunreinigung, insbesondere durch Kupferlösung [89]. Je größer der Zinngehalt, Lottemperatur und Lotgeschwindigkeit, desto höher die Rate der Kupferlösung [60, 71, 73, 92, 95–99]. Verschiedene Studien (siehe Tabelle 1) mit unterschiedlichen Messaufbauten zeigen, dass beim bleifreien Selektivwellenlötprozess eine Kupferlösungsrate von 1–1,5 $\mu\text{m/s}$ angenommen werden kann [60, 95, 96, 98]. In bleihaltigem Lot liegt die Kupferlösung etwa um 0,5 $\mu\text{m/s}$ [96]. Aus der Veränderung der Legierungszusammensetzung resultieren relevante Änderungen der Loteigenschaften [90], wie Erhöhung der Erstarrungstemperatur mit dem oben beschriebenen Einfluss auf den Lotdurchstieg [65].

In kleinen Lotbädern bei Selektivwellenlötanlagen (mit ~10–15 kg) steigt die Kupferkonzentration schneller im Vergleich zu großen Wellenlötanlagen (50–800 kg) [56]. Entsprechend kritisch sind thermisch anspruchsvolle Lötstellen, da diese lange Lötkontaktzeiten bei hohen Lottemperaturen erfordern und entsprechend hoher Kupferlösung ausgesetzt sind [73, 100]. Der Zusatz von Nickel oder Germanium verringert die Kupferlösung [91, 93]. Alternative Legierungen wie Zinn-Kupfer-Nickel-Legierungen (SnCuNi) zeigen geringere Kupferlösungsraten, aber auch höhere Schmelztemperaturen [31, 61, 73, 100].

Der Einfluss schwankender Lufttemperatur zwischen 30 und 40 °C und Luftfeuchtigkeit zwischen 25 und 40 % innerhalb der Lötammer wurde in [P2] untersucht. Für das Selektivwellenlöten zeigt sich keine statistische Signifikanz.

Tabelle 1: Untersuchungen zu Kupferauflösungsraten mit verschiedenen Lotlegierungen, Temperaturen und Versuchsaufbauten mit nicht fließendem (statisch) und fließendem (dynamisch) Lotstrom

	Lot- legie- rung	Mess- aufbau	Tempera- tur in °C	Kupfer- lösungs- rate [$\mu\text{m/s}$] statisch	Kupfer- lösungs- rate [$\mu\text{m/s}$] dyna- misch
[13]	Sn60Pb40		250-300		0,2 - 0,5
[99]	SAC305			0,35	
[98]	SAC305	Welle	243-265	0,4 - 0,6	1-1,5
[92]	SnCu	Welle	250; 300; 350	0; 0,03; 0,2	0,2; 0,5; 1,5
[64]	SnCu, SAC305	Welle	260; 280; 300		3; 12; 35
[96]	SAC305	Welle	260; 280; 300		0,8; 1,4; 1,7
	Sn-37Pb		260; 280; 320		0,4; 0,5; 0,5
[60]	Sn100	Selektiv- welle	270		0,5 - 0,75
	SAC305	Selektiv- welle	260		1,2 - 1,3
[97]	Sn	Reagenz- glas	240; 270; 300	0,03; 0,075; 0,13	
	SAC305		240; 270; 300	0,02; 0,05; 0,075	

Prozess-/ Maschinenseitig werden in der Literatur insbesondere die Prozessgrößen Vorheizung, Lottemperatur und Lötkontaktzeit untersucht. Es zeigt sich konsistent über die verschiedenen Arten des Flowlötens hinweg, dass die Parameter des Wärmeeintrags das Lötresultat maßgeblich bestimmen. Sowohl experimentell als auch simulativ kann für Wellen- und Selektivwellenprozesse gezeigt werden, dass höhere Vorheiz- und Lottemperaturen den Lotdurchstieg fördern. [26, 48, 55, 56, 63, 89, 94, 101–103, P2, P4] Bei Lötstellen mit geringen thermischen Massen können gute Lötungen mit geringen Lottemperaturen und entsprechend längeren Lötkontaktzeiten erreicht werden [89]. Lötstellen mit großem Lötwärmebedarf erreichen ein quasi-thermisches Gleichgewicht, ab dem eine längere

Lötkontaktzeit keinen Nutzen hinsichtlich des Lotdurchstiegs erzielt [P2]. Bei der Wahl der Lötkontaktzeit konkurrieren technische und wirtschaftliche Zielstellungen nach geringer thermischer Belastung, Kupferlösung und kurzen Zykluszeiten. Größere Lotdüsen bringen einerseits durch den größeren Lotmassstrom und andererseits durch die größere Kontaktfläche mehr Wärmeenergie in die Lötstelle ein und tragen so zu robusteren Lötprozessen bei, erfordern allerdings auch mehr freigestellte Fläche auf der Platine [26]. Bei Lotwellen und nichtbenetzenden Lotdüsen wird die Baugruppe typischerweise mit einer Neigung von 7° über den Lotstrom gefahren [104]. Von der Veränderung des Löt winkels ist vor dem Hintergrund der Prozessstreuung kein signifikanter Einfluss auf den Lotdurchstieg zu erwarten [104]. Benetzende Lotdüsen beim Selektivwellenlöten werden ohne Neigung gelötet. Dabei muss der z-Abstand zwischen Düsenoberkante und Leiterplattenunterkante trotz möglichem Leiterplattenverzug konstant gehalten werden [26, 35]. Ein signifikanter Einfluss des Lotmassstroms auf den Lotdurchstieg konnte innerhalb darstellbarer Prozessgrenzen nicht nachgewiesen werden [P2]. Jedoch zeigen Untersuchungen Wechselwirkungen zwischen Flussmittel und Lotstrom mit Einfluss auf Brücken und Lotkugelbildung beim bleifreien Wellenlöten [4, 59]. Die Lötung in Stickstoffatmosphäre reduziert die Krätzebildung und verbessert die Prozessrobustheit sowie die Benetzung [20, 55, 56, 105, 106].

Methodisch beeinflussen die Wahl des Flussmittelauftragsprinzips, die Art der Vorheizung und die Art der Regelung der Vorheiztemperatur die Robustheit des Lötprozesses hinsichtlich des Lotdurchstiegs. Im Lötvorgang kann zwischen Einzelpunktlötung und dynamischer Lötung mehrerer Lötstellen im Vorbeifahren unterschieden werden. Die Wahl des Leiterplattentransports in Universal- oder Spezialrahmen mit Niederhalter definiert die Positioniergenauigkeit der Leiterplatte. Die Maschinenkonfiguration als Batch- oder Durchlaufmaschine beeinflusst die Abkühlzeiten der Lötrahmen zwischen den Lötungen. Kalte Lötrahmen können besonders die Temperaturverteilung in den am Rand gelegenen Lötstellen und damit den Lotdurchstieg beeinflussen.

Die Prozessentwicklung hinsichtlich der Temperaturprofile und der Löt Reihenfolge werden durch **Mitarbeiter** initiativ auf Grundlage von Expertise definiert und durch „Trial-and-Error“ iterativ optimiert. Dabei wird das Löt ergebnis jeweils manuell optisch oder röntgentechnisch bewertet [61]. Im Gegensatz zum akademischen Umfeld fehlen in Unternehmen Tools, Know-how oder Zeit für methodische Ansätze, wie etwa für Design of Experiments (DoE), numerische oder datenbasierte Ansätze [12, 26, 48, 101]. Durch die überwiegend manuelle Bestückung von THT-Bauteilen und

durch deren im Allgemeinen nicht fixierte Position ist die Varianz in der Bestückposition im Loch ein zu beachtender Aspekt, wie Simulationsergebnisse suggerieren [104, 107]. Versuche zeigen hier jedoch eine untergeordnete praktische Relevanz [P2]. Weiterhin wird das Leiterplattendesign mit Hilfe von EDA-Programmen durch Mitarbeiter erstellt und hinsichtlich der bekannten, integrierten Designregeln und Betriebskriterien wie Stromtragfähigkeit und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) angepasst. Da die Anforderungen an eine Baugruppe durch deren Einsatzzweck definiert ist, sind die Wahl der Leiterplattendicke, Lagenzahl und -dicke, Bauteiltypen und Lochdurchmesser überwiegend festgeschrieben. Die Beurteilung und Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit von Lötstellen wird in Unternehmen methodisch durch Richtlinien und Designregel-Kataloge in Kombination mit Design- und Fertigungserfahrung realisiert. Diese Designregeln enthalten insbesondere geometrische Grenzwerte etwa für Lochdurchmesser, Lötmaskenabstände und Bauteilorientierung, wie sie auch in der veröffentlichten Literatur für das Wellenlöten (siehe Kapitel 2.3.3) zu finden sind [33, 108, 109]. Die Zusammenstellung dieser Parameter definiert die thermischen Eigenschaften der Lötstellen. Das Lötstellendesign ist der prozessdominierende und daher der in der Produktentwicklung primär beeinflussbare Parameter, der den Lötwärmebedarf der Lötstellen und damit die Fertigbarkeit der Baugruppe ursächlich festlegt. [10, 56, 68, 89, 94, P2-P4] Dieser Wärmebedarf ist jedoch von überwiegend linearen Designregeln aufgrund der hohen kombinatorischen Anzahl von Möglichkeiten nicht erfassbar oder quantifizierbar.

2.3 Definition und Zusammenhang des Lötstellen-designs und der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen

Wie oben analysiert, hat das Kupferlagendesign einen signifikanten und reproduzierbaren Einfluss auf das Aufheizverhalten im Lötprozess und bestimmt damit die Fertigbarkeit. Die Tatsache, dass eine funktionsgerecht konstruierte Baugruppe durch thermische Überlastung beim Fügen durch Weichlöten in ihrer Qualität und Zuverlässigkeit funktional irreversibel geschädigt werden kann, unterstreicht die Relevanz der fertigungsgerechten Gestaltung von Lötstellendesigns. Im Folgenden wird die Fertigbarkeit beim Weichlöten in der Elektronik definiert, Aufbau und Nomenklatur des Kupferlagendesigns eingeführt und der bisher veröffentlichte Stand der Technik zur Absicherung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen dargelegt.

2.3.1 Definition der Fertigbarkeit einer THT-Lötstelle

DIN 8514 [110] definiert die Hartlötbarkeit eines Bauteils als ein Resultat des Zusammenspiels aus Werkstoffen, Konstruktion und der Fertigung. Damit umfasst diese Norm insbesondere den Aspekt des Lötwärmebedarfs.

Lötbarkeit wird beim Weichlöten in der Elektronik u.a. nach IPC/EIA J-STD-002A [111] und DIN EN 60068-2-20 [112] als Synonym für Benetzbarkeit verstanden. Damit ist die Definition der Lötbarkeit in der Elektronik im Sinne der Fertigungsgerechtigkeit durch Normen nur unzureichend beschrieben, wie Tabelle 2 zusammenfasst.

Tabelle 2: Vergleich vorhandener Ansätze zur Definition der Lötbarkeit

		Benetzbarkeit	Lötwärmebeständigkeit	Widerstand gegen Auflösung	Lötwärmebedarf
DIN 8514	[110]	x	x		x
IPC/EIA J-STD-002A	[111]	x		x	
DIN EN 60068-2-20	[112]	x	x		
Klein-Wassink	[13]	x	x	x	x

Klein-Wassink bezieht in [13] den Widerstand der Metalllegierung gegen Auflösung sowie den Lötwärmebedarf in die Definition der Weichlötbarkeit mit ein. Weichlötbarkeit wird dabei als Synonym für Fertigbarkeit beim Weichlöten verstanden. Klein-Wassink berücksichtigt somit sämtliche normungsseitig nur teilweise berücksichtigte Aspekte.

Aus diesem Verständnis des Begriffs der Weichlötbarkeit lassen sich direkt Implikationen auf das Prozessfenster ableiten, wie schematisch in Bild 10 skizziert. Mit dem durch das Lötstellendesign definierten Lötwärmebedarf wird die Untergrenze des erforderlichen Prozessfensters für die IPC-konforme Füllung der Lötstelle festgelegt.

Die Lötkontaktzeit ist aufgrund der Kupferlösung von 1-1,5 μm für einen Lottemperaturbereich von 260-300 $^{\circ}\text{C}$ unter Einhaltung der Restkupferschichtdicke von 12,3 μm bei einer Standard-Kupferhülsenmetallisierung von 25 μm auf ca. 8-10 s begrenzt [100]. Lötwärmebeständigkeit von Basismaterial und Bauteilen limitieren insbesondere längerfristige Maximaltemperaturen in der Vorheizung und Lotkontaktzeit. [30, 67] Die

Qualifizierung der Wärmebeständigkeit von Bauteilen und Laminaten wird durch Tauchtests im Lotbad für diskrete Versuchspunkte nach IPC TM650 durchgeführt. Dies lässt jedoch große Bereiche möglicher Prozessfenster unbestimmt. Das binäre Testergebnis wird als i.O./n.i.O. für den jeweiligen Versuchspunkt hinsichtlich Delamination in der Spezifikation vermerkt.

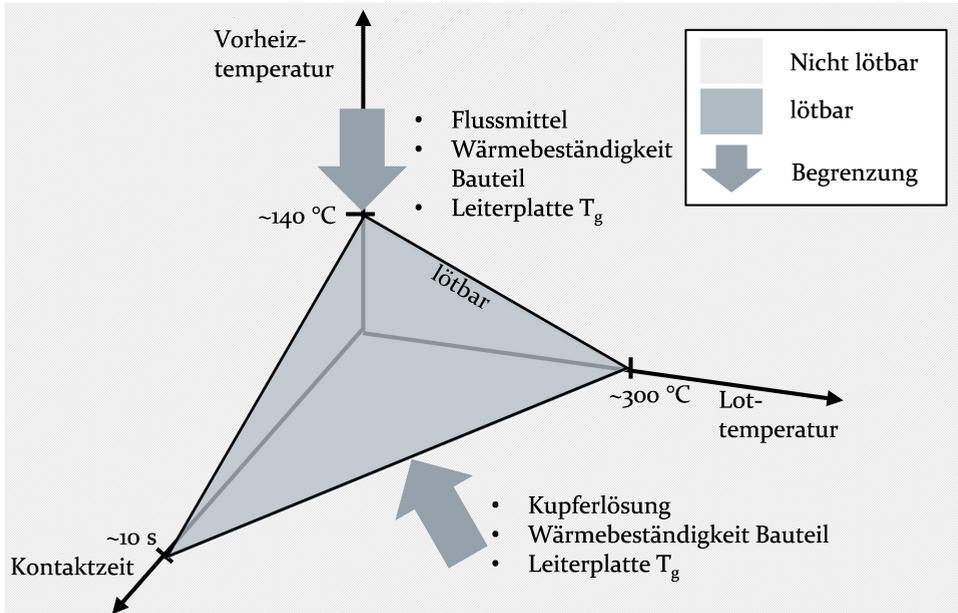


Bild 10: Qualitative Definition des Prozessfensters auf Grundlage der Wärmebeständigkeit der Materialien [68]

Typische Versuchspunkte sind in Tabelle 8 im Anhang aufgeführt. Durch die Überschussheizung oberhalb der Zieltemperatur kann eine thermische Schädigung der Bauteile erzeugt werden, was bei der Parametrisierung des Lötprozesses zu berücksichtigen ist [113]. Für bleifreie Selektivwellenlötprozesse liegt die Temperaturdifferenz zwischen Lotsolidus und Lottemperatur im Bereich von $\Delta T = 40\text{-}80\text{ K}$, womit das Problem der thermischen Schädigung stärker auftritt als bei SnPb-Loten mit niedrigerer Schmelztemperatur. Durch erhöhte Erstarrungstemperatur von bleifreien Loten ist das Prozessfenster also verkleinert, was den Einfluss der Lotlegierung durch frühere Erstarrung im Lotspalt hervorhebt. Zu hohe Temperaturen führen zu vorzeitiger Flussmitteldegradierung, Überhitzung der Lötpartner, verstärkter Kupferlösung und Schädigungsmechanismen wie Fillet-/ Pad-lifting durch thermischen Schock [30, 47, 61].

Der Begriff der **Fertigbarkeit** beim Weichlöten in der Elektronik wird in dieser Arbeit daher in Anlehnung an [13] wie folgt verstanden:

Eine Lötstelle ist fertigbar, wenn der Lötwärmebedarf der definierten Lötstelle die im Lötprozess verfügbare Lötwärme nicht übersteigt. Zudem muss die Bedingung erfüllt werden, dass bei den für den geforderten vertikalen Lotdurchstieg notwendigen Prozessparametern zwar eine intermetallische Phase, aber weder eine für die Funktion relevante thermische noch metallurgische Schädigung entsteht. Benetzbarkeit der Oberflächen wird dabei als notwendige Bedingung vorausgesetzt.

Bei Anwendung der eingeführten Definition der Fertigbarkeit kann eine Lötstelle als fertigungsgerecht gelten, wenn der Lötwärmebedarf innerhalb des Prozessfensters, gemäß Bild 10, gedeckt werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden modellbasierte Verfahren entwickelt, die diese Fertigbarkeit beurteilen. Im Vordergrund steht im Weiteren der Aspekt des Lötwärmebedarfs, der im Produktdesign initial definiert wird.

2.3.2 Geometrischer Aufbau und Designparameter einer THT-Lötstelle

Mehrlagige Leiterplatten sind schichtweise alternierend aus Kupferlage und Basismaterial aufgebaut. Hinsichtlich der Nomenklatur werden die Designelemente des Leiterplattendesigns für THT-Lötstellen, angelehnt an den IPC Normungskanon, wie folgt definiert und in Bild 11 beschrieben. In der IPC-A-610 werden Lotquellseite und Lotzielseite unterschieden. Die Primärseite wird vom Designer festgelegt und entspricht per Definition der Seite mit der komplexesten Bestückung. Die Kupferlagen werden von Primärseite bis Sekundärseite aufsteigend nummeriert. In der vorliegenden Arbeit wird die Primärseite als Lotzielseite/Bauteilseite definiert. Die vertikale elektrische Verbindung zwischen den einzelnen Kupferschichten des Lagenaufbaus wird durch metallisierte Bohrungen realisiert. In die Durchkontaktierungen werden dann THT-Bauteilpins eingelötet. Im Leiterplattendesign stehen dem Designer die im Folgenden eingeführten Varianten und Parameter zur Gestaltung des Lötstellendesigns zur Verfügung. Freiheitsgrade bestehen hier insbesondere in der Gestaltung der Anbindung zwischen Lochmetallisierung, der Durchkontaktierung und den Kupferlagen.

An die Durchkontaktierung werden Leiterbahnen und Kupferschichten für die Leistungs- und Signalübertragung angebunden. Die Gestaltung der Anbindung heißt Kupferlagendesign. Neben einfachen Signalleitungen (4) kann die Durchkontaktierung ohne Freistellung (1) der Kupferschicht an eine größere Kupferfläche als vollständige Anbindung (VA) (2) angebunden werden.

Die daraus resultierende gute thermische Leitfähigkeit und elektrische Stromtragfähigkeit im Betrieb der Leiterplatte stehen der Fertigbarkeit diametral gegenüber. Die Konstruktionselemente Wärmefalle (WF) (2) und thermische Vias (TV) (5) unterstützen die vertikale Durchwärmung des Lagenaufbaus an der Lötstelle. WF können zur thermischen Entkopplung in Masse- oder Spannungsversorgungslagen eingebracht werden [42]. Durch die reduzierte Stegbreite wird die Wärmedissipation im Lötprozess eingeschränkt. Die Steglänge, Stegbreite und Steganzahl i bestimmt dann den thermischen Widerstand der WF [P3]. Zur Verbesserung der vertikalen Leitfähigkeit des isotropen Schichtverbunds können TV, kleine metallisierte Löcher, radial um die Lötstelle verteilt werden.

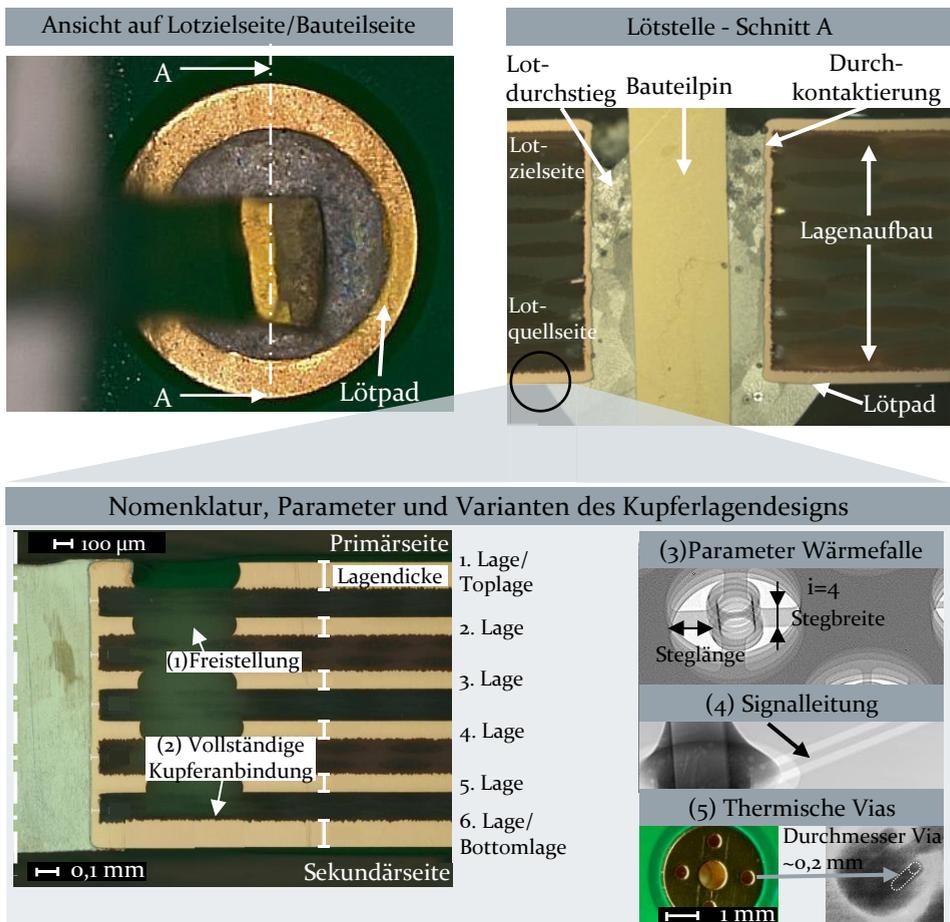


Bild 11: Beschreibung des Aufbaus, Nomenklatur, Parameter und Varianten der Anbindung von Kupferlagen an die Durchkontaktierung des Leiterplattendesigns

Der Begriff der Lötstelle bezeichnet die Zusammenstellung aus Lagenaufbau, Kupferlagendesign, Lochdimensionierung und Bauteilpin. Die Lochdimensionierung beschreibt dabei das Zusammenspiel aus Lochdurchmesser, Pindurchmesser und Leiterplattendicke. Das Leiterplattendesign beschreibt den Aufbau der Leiterplatte einer Flachbaugruppe.

2.3.3 Ansätze zur Absicherung und Verbesserung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen

Eine Ursache für die Notwendigkeit der Absicherung der Fertigbarkeit sind gegenläufige Ziele für fertigungsgerechte und funktionsgerechte Auslegung der Flachbaugruppe hinsichtlich der Stromtragfähigkeit und des Thermomanagements im Betrieb. Weiterhin führen Konstruktionselemente des Kupferlagendesigns wie TV, WF und größere Bohrlöcher zu unerwünschten größeren parasitären Induktivitäten mit negativem Einfluss auf die EMV [42]. In diesem Kapitel wird das aktuelle Vorgehen zur Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit sowie dessen Grenzen aufgezeigt. Methodisch kann dabei zwischen regelbasierten und modellbasierten Ansätzen zur Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit unterschieden werden.

Zur Absicherung geometrischer, thermischer und elektrischer Aspekte der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen werden vor allem regelbasierte Ansätze in Form von Designregeln aus Erfahrungswissen oder veröffentlichten Richtlinien, Normen und Studien angewendet [42]. Diese Regeln dienen dabei als standardisierte Kommunikationsgrundlage zwischen Design und Fertigung. Der Aspekt der Fertigbarkeit als kritisches Kriterium wird dabei nur mit der Empfehlung adressiert, WF für große Leiterbahnen und Kupferlagendicken einzusetzen, siehe auch Tabelle 3 [42].

Stand der Technik zur Kontrolle des Lötwärmebedarfs und damit zur Absicherung des vertikalen Lotdurchstiegs als quantitative Messgröße der Fertigbarkeit ist der Einsatz von Expertenerfahrung sowie die Formulierung allgemeiner, experimentell ermittelter Designregeln. Designregeln basieren auf praktischer Erfahrung oder Versuchsstudien. Tabelle 3 fasst veröffentlichte Parameter und entsprechende Empfehlungen für das Design von THT-Lötstellen zusammen, die experimentell bzw. numerisch ermittelt wurden. Ein klarer Konsens besteht insbesondere in der Wahl eines möglichst großen Lotspalts als Differenz von Lochdurchmesser D_{Loch} und Pindurchmesser d_{pin} [11, 31, 34, 109, 114]. Wegen der großen Relevanz der Leiterplattendicke l_{LP} ist diese in die Lochdimensionierung mit einzubeziehen. Die Kennzahl Gap-Ratio aus [109] wird daher nach Formel (2) definiert.

$$Gap - Ratio = \frac{D_{Loch} - d_{Pin}}{l_{LP}} \quad (2)$$

Weiterhin ist bekannt, dass insbesondere thermisch massive Kupferanbindungen auf der Lotquellseite angebracht werden sollten [P2]. Weitere Empfehlungen können hinsichtlich des minimalen Pinüberstands, der Restringbreite und der Bauteilorientierung beim dynamischen Wellenlöten gegeben werden.

Tabelle 3: Designempfehlungen für THT-Lötstellen aus der Literatur für bleifrei und bleihaltige Flowlötprozesse

		Wert	Lot	Prozess	Quelle
Lochdimensionierung	Gap-Ratio	>15 %-20 %	○	Welle	[109]
		25-35 %	○	Selektiv	[P1]
		>13 %	○	Welle	[33]
	Pin/Hhole Ratio	0,2	●○	Welle	[34, 114]
	Aspect-Ratio t/D		●	Welle	[11]
	Lochspalt	0,125 mm < Lochspalt ≤ 0,35 mm	-	-	[115]
Kupferlagenanbindung	Besser mehr dünne als wenige dicke Layer bei gleicher Kupfermasse			Welle	[68]
	Bottom -Anbindung besser		○	Selektiv	[P2]
	Wärmefallen in Top-Anbindungen und bei großen Leiterbahnen		○	Selektiv	[42, P2]
Summe Stegbreiten Wärmefalle	aller einer	< 4 mm für Lage 35 µm < 2 mm für Lage 70 µm	-	-	[115]
Restringbreite	0,15 mm		○	Welle	[55]
	25 µm Innenlage; 50 µm Außenlage		-	-	[42]
			Pb-frei ○ Pb ●		

Sobald ein Leiterplattendesign für die Serienfertigung freigegeben ist, besteht in der Regel keine Änderungsmöglichkeit mehr. Insbesondere Auftragsfertiger müssen dann oft ohne Kenntnis des genauen Designs die Prozessentwicklung experimentell durchführen. Tabelle 11 im Anhang gibt Anhaltspunkte für die Prozessentwicklung. Da eine optimale Prozesseinstellung vom Leiterplattenlayout abhängt, sind jedoch nur qualitative Zusammenhänge und grobe Richtwerte vorhanden. Die zahlreichen Veröffentlichungen zum Thema experimentelle Prozessentwicklung und -optimierung beim Wellen-/Selektivwellenlöten zeigen den hohen Aufwand, der für jedes Leiterplattendesign neu betrieben werden muss. [12, 25, 26, 48, 55, 100, 105, 116, 117, P2] Aufgrund des unbekanntenen Wärmebedarfs und Zeitdrucks wird in der Praxis der Wärmeeintrag häufig zu groß gewählt [113], wodurch die Wärmebeständigkeit u. U. überschritten wird.

Zur Erweiterung des Prozessfensters bzw. für den Einsatz einer Oberseitenheizung können empfindliche Bauteile gezielt gekühlt werden [30] oder durch Hitzeschilde geschützt werden, um deren limitierte Lötwärmebeständigkeit zu überbrücken. Alternativ kann durch Reduktion der Lotliquiddustemperatur der Lötwärmebedarf reduziert werden [46, 64, 65, 118]. Dadurch vergrößert sich das Prozessfenster. Die grundsätzliche Notwendigkeit zur quantitativen Beurteilung der Fertigbarkeit wird damit nicht obsolet. Eine Röntgenuntersuchung kann erfahrenen Lötfachleuten qualitative Hinweise auf mögliche Probleme beim Löten wegen thermisch großer Massen geben. Für Bauteile kann die qualitative Bestimmung der Lötbarkeit mit Benetzungstests nach DIN- oder IPC- Standards durchgeführt werden [111, 112]. Diese Methoden erlauben jedoch keinen direkten Rückschluss auf die Fertigbarkeit und geeignete Prozessparameter.

Alternativ zur regelbasierten, axiomatischen Absicherung der Lötbarkeit werden algorithmische, also analytische, simulationsgestützte und datenbasierte Modellierungsstrategien erforscht. Ziel ist jeweils die Ermittlung eines übertragbaren Prozessmodells, das gemäß Formel (3) als mathematische Abbildungsvorschrift f , die Eingangsgrößen X eindeutig auf den Lösungsraum Y abbildet.

$$f: X \rightarrow Y \tag{3}$$

Für analytische und simulationsgestützte Ansätze werden dafür mathematische Modelle aus bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhängen assembliert. Diese Zusammenstellung ist die Grundlage für die Berechnung. Somit wird die Abbildungsvorschrift f direkt festgelegt und wird auch als „White-Box“-Modellierung bezeichnet. Der

Geltungsbereich bzw. die Allgemeingültigkeit von f wird anschließend durch den Vergleich von Versuchsdaten und Modellergebnissen empirisch abgesichert.

Die übertragbare Beschreibung des Lötwärmebedarfs von Bauteilen und Lötstellen als Teil von X ist für den vorliegenden Anwendungsfall bisher ungelöst, ist jedoch eine notwendige Voraussetzung für die Erstellung von Vorhersagemodellen. Es kann zwischen Top-down- und Bottom-up-Ansätzen unterschieden werden. Bauteilhersteller geben konstruktions-technische und Materialinformationen von Bauteilen jedoch grundsätzlich nicht heraus, was eine wesentliche Hürde bei der Prozessmodellierung darstellt.

Numerische Verfahren eignen sich zur Berechnung komplexer multiphysikalischer Vorgänge, wie dem THT-Wellen- und Selektivwellenlötprozess. Strömungsmechanische Vorgänge werden durch die geltenden Masse-, Impuls- und Energieerhaltungsgleichungen beschrieben. Die als Navier-Stokes-Gleichungen bekannten partiellen Differenzialgleichungssysteme müssen für technische Problemstellungen in der Regel mit Hilfe numerischer Verfahren berechnet werden, da nur Sonderfälle analytisch lösbar sind. Diese partiellen Differenzialgleichungen zweiter Ordnung werden örtlich und zeitlich diskretisiert. Dieses Vorgehen wird in der Literatur alternativ zur experimentellen Parameterbestimmung genutzt, um mit der numerischen Vorhersage des Lotdurchstiegs auch Prozessparameter einzelner Lötstellen zu ermitteln [25, 101, 102]. Die Ansätze beschränken sich meist auf bleihaltiges Wellenlöten. Angesichts des hohen Zeitaufwands für die numerische Lösung eignet sich dieser Ansatz für akademische Erforschung des Prozesses, aber nicht für die Beurteilung größerer, zusammenhängender Leiterplattendesigns in einer industriellen Umgebung.

Diesen sogenannten „White-Box“-Ansätzen stehen „Black-Box“-Ansätze gegenüber. Dabei wird die Abbildungsvorschrift f durch Verallgemeinerung von Mustern in empirischen X - Y -Trainingsdatensätzen mit Hilfe von überwachten maschinellen Lernalgorithmen (ML) erlernt. Die Gültigkeit dieses datenbasierten Modells wird anschließend durch den Abgleich der Modellvorhersage Y' aufgrund von X' mit unbekanntem, nicht im Trainingsdatensatz enthaltenen, empirischen X' - Y' Testdatensätzen überprüft. Die physikalischen Zusammenhänge werden dadurch implizit rekonstruiert, liegen aber im Gegensatz zu „White-Box“ Modellen nicht erklärbar vor. Da nicht vollständig geprüft werden kann, ob die Zusammenhänge in jedem Fall korrekt generalisiert und damit erlernt wurden, sind Modellvorhersageergebnisse nicht rückwirkend erklärbar [119]. Diese Eigenschaft ist ein wichtiger Grund für Vorbehalte in der industriellen Anwendung. Daher

verlangt die Anwendung der Vorhersage Vertrauen in das „Black-Box“-Modell [120–122]. Veröffentlichte **datenbasierte** Ansätze behandeln einerseits die Prozessdatenanalyse mit überwachten und unüberwachten Lernverfahren mit dem Ziel multivariante Zusammenhänge zu identifizieren und Fehlerkosten zu minimieren. Dabei wird der Prozess durch die Einflussfaktoren Anzahl der Kupferlagen, Flussmitteltyp und -menge, Vorheiz- und Lottemperaturen und Lötkontaktzeit als numerische Messgrößen abgebildet [4, 93, 116, 117]. Andererseits bestehen Ansätze zur Vorhersage von Leiterplattentemperaturen und der Empfehlung eines einheitlichen Prozessparametersatzes für eine Vielzahl von Baugruppen mit Hilfe von neuronalen Netzen (NN). Durch die sehr grobe Beschreibung der Leiterplattendesigns durch deren Gewicht [12] und der Lagenzahl [117, 123] wird der Wärmebedarf nicht auf Lötstellenebene formuliert. Diese generalisierenden Ansätze zur Darstellung der thermischen Eigenschaften von Bauteilen und Leiterplatten werden dem individuellen Verhalten einzelner Lötstellendesigns nicht gerecht. Damit ist die Übertragbarkeit auf andere Leiterplattendesigns nicht zuverlässig möglich.

Die **analytische** Modellierung bietet insbesondere große Vorteile hinsichtlich der Erklärbarkeit der Modellergebnisse. In der Literatur wird nach Möglichkeiten zur Beschreibung der thermischen Eigenschaften der anisotropen Wärmeleitfähigkeit von Leiterplatten gesucht. Thermische Eigenschaften beliebig aufgebauter Körper können top-down messtechnisch und mathematisch als effektive Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten [124] und der thermischen Impedanz $Z_{th}(t)$ mittels thermischen Ersatzschaltungen aus RC-Gliedern bestimmt werden [7, 125, 126]. Dabei wird Wärmeleistung $P_{Heizung}$ in einen Körper eingebracht und mit der Systemantwort $T_x(t)$ die thermische Impedanz $Z_{th}(t)$ nach Formel (4) ermittelt. Aus der Systemantwort werden dann mit Hilfe eines thermischen Ersatzschaltbilds die thermischen Widerstände R_{th} und Kapazitäten C_{th} modelliert [7, P6].

$$Z_{th}(t) = \frac{T_x(t) - T_x(0)}{P_{Heizung}} \quad (4)$$

Bisher veröffentlichte Top-down-Ansätze charakterisieren bekannte Konstruktions- und Materialaufbauten von Bauteilen und Leiterplatten. Dabei ist das Ziel die Wärmedissipationseigenschaften der im Bauteil entstehenden Verlustleistung im Betrieb an die Umgebung auszulegen [124–126, P6]. Diese Modellierung ist jedoch nicht auf den Fall der Lötung anwendbar, da hier das Aufheizverhalten bei Wärmeeintrag am Pin relevant ist. Alternativ kann das Verhalten eines bekannten inneren Aufbaus bottom-up abgeschätzt werden. Für den vergleichsweise langsamen und globalen

Aufheizprozess im Konvektionsreflowofen lassen sich für Bauteile und Leiterplattendesigns effektive Wärmeleitfähigkeiten [13, 127–130] sowie Zeitkonstanten [131] als Ersatzkennwerte ermitteln, um die jeweiligen thermischen Eigenschaften des anisotropen Lagenaufbaus näherungsweise abzubilden. Die thermographischen Aufnahmen in Bild 12 zeigen jedoch beispielhaft, wie sich die Temperatur partiell in Leiterplatten, siehe Bild 12 (1), und Bauteilen, siehe Bild 12 (2), in Abhängigkeit des jeweiligen Typs verteilt.

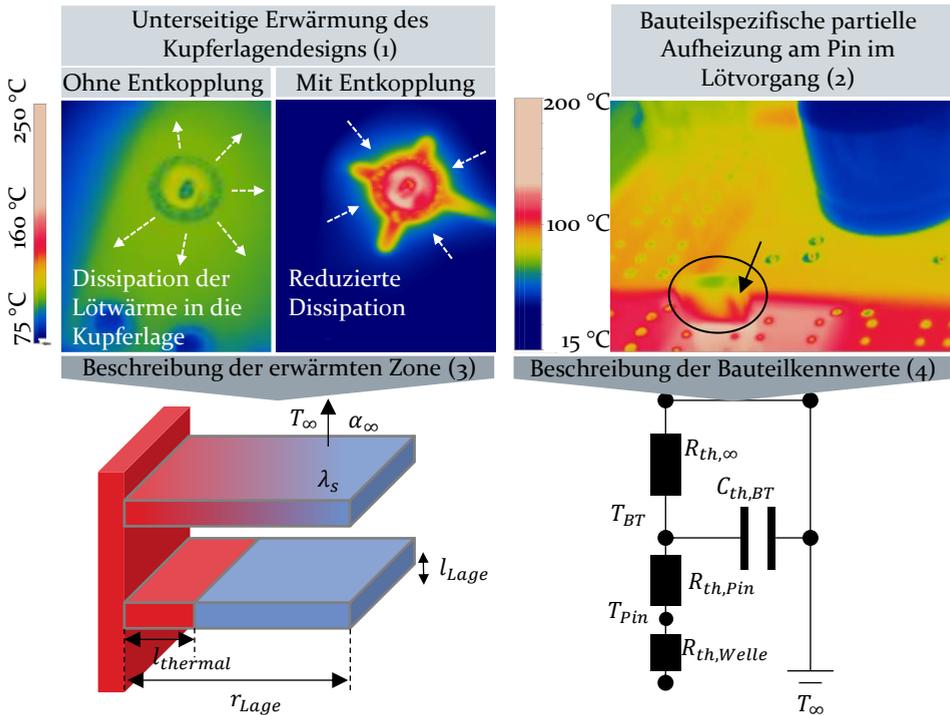


Bild 12: Thermographisch ermittelte Wärmeverteilung einer zweilagigen Leiterplatte mit Vollanbindung und thermischer Entkopplung (1) und partielle Erwärmung von Bauteilen (2) während des Lötprozesses

Das muss bei der Berechnung des Wärmebedarfs berücksichtigt werden. Das AIF-IGF Projekt 16.174 N „Prozessoptimierung beim Selektivlöten für Anwendungen in der Leistungselektronik“ schlägt analytische Modelle zur Abschätzung der Temperaturentwicklung der THT-Lötstellen vor, bei dem der Kupfergehalt der Leiterplatte gemittelt wird [132]. Klein-Wassink zeigt eine Berechnungsvorschrift zur Wärmeeinflusszone in der Leiterplatte auf, siehe Skizze in Bild 12 (3) [13]. Aus dem Verhältnis von horizontaler Wärmeleitung λ_{LP} entlang der Leiterplatte und vertikaler Wärmedissipation α_∞ an die Umgebung kann die thermische Abklinglänge $l_{thermal}$

berechnet werden [13, 133]. Diese kann aus der Analogie zu Finnen an Wärmeübertragern gewonnen werden und beschreibt die äquivalente Finnenlänge, bei der bei konstanter Temperaturdifferenz ein äquivalenter Wärmeübertrag stattfindet.

$$l_{thermal} = \sqrt{\frac{\lambda_n l_n}{\alpha_\infty}} \quad (5)$$

Mit:

Parameter	Unit	Beschreibung
$l_{thermal}$	[m]	Thermische Abklinglänge der Finne
λ	[J m ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit des Lagenmaterials n
α_∞	[Wm ⁻² K ⁻¹]	Wärmeübergangskoeffizient zur Umwelt ~ 5 Wm ⁻² K ⁻¹
l	[m]	Dicke der Lage n

Die Temperaturentwicklung von Bauteilpin T_{Pin} und Körper T_{BT} kann weiterhin mit Hilfe des in Bild 12 (4) skizzierten Ersatzschaltbilds mit folgenden Gleichungen (6) bis (11) aus [13] berechnet werden.

$$T_{Pin}(t) = T_{Lot} - \frac{R_{th,Welle}}{R_{th,Welle} + R_{th,Pin}} \cdot (T_{Lot} - T_{BT}(t)) \quad (6)$$

$$T_{BT}(t) = T_{BT,0} + \frac{T_{Lot} - T_\infty}{1 + \frac{R_{th,Welle} + R_{th,Pin}}{R_{th,\infty}}} \cdot (T_{BT,0} - T_\infty) \cdot \left(1 - e^{-\frac{R_{th,Pin} \cdot t}{R_{th,Pin} \cdot C_{th,BT}}}\right) \quad (7)$$

$$R_{th,Pin} = \frac{l_{Pin}}{A_{Q,Pin} \cdot \lambda_{Pin}} \quad (8)$$

$$C_{th,BT} = m \cdot c_p \quad (9)$$

$$R_{th,Welle} = \frac{1}{\alpha_{Welle} \cdot A_{Welle}} \quad (10)$$

$$R_{th,\infty} = \frac{1}{\alpha_\infty \cdot A_{BT,0}} \quad (11)$$

Parameter	Unit	Beschreibung
R_{th}	[K W ⁻¹]	Thermischer Widerstand von: Pin, Bauteil (BT), Welle, Umgebung (∞)
$C_{th,BT}$	[J K ⁻¹]	Thermische Kapazität Bauteilkörper

2.4 Herleitung des Forschungsbedarfs zur modellbasierten Optimierung des Selektivwellenlötens von THT-Lötstellen

$T_{BT,0}$	[°C]	Vorheizung Bauteilkörper
T_{Lot}	[°C]	Lottemperatur
T_{∞}	[°C]	Umwelttemperatur in der Lötammer $\sim 30^{\circ}\text{C}$
α_{Welle}	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Wärmeübergangskoeffizient Welle $\sim 5000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
α_{∞}	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Wärmeübergangskoeffizient zur Umwelt $\sim 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
m	Kg	Masse des Bauteils
A	$[\text{m}^2]$	Fläche von Oberfläche (O), Querschnitt (Q)

Die Bauteilkennwerte und die Dissipationslänge sind eine Beschreibung des Wärmebedarfs. Dafür muss jedoch der thermische Widerstand $R_{th,Pin}$ des jeweiligen Bauteilpins bekannt sein oder abgeschätzt werden, über den die Wärme in die angeschlossene thermische Kapazität des Bauteilkörpers $C_{th,BT}$ dissipiert wird. Die Berechnung der thermischen Eigenschaften, Klein-Wassink folgend, durch Bestimmung der geometrischen Abmessungen und Abschätzung der Materialien sind fehlerhaft, da im Prozess nur ein unbekannter Bereich real zum Lötwärmebedarf beiträgt, wie Bild 12 (2) zeigt. Weiterhin ist die vereinfachte Beschreibung des Kupferlagendesigns nicht ausreichend.

Die bisher veröffentlichten regelbasierten, analytischen, numerischen oder datengetriebenen Ansätze zur Komplexitätsreduktion des Kupferlagendesigns eignen sich nicht für die lokale Auflösung der transienten Temperaturentwicklung in z-Richtung selektiv erwärmter Schichtmodelle. Für die Vorhersage des Lotdurchstiegs ist jedoch gerade die lokale Temperaturentwicklung in vertikaler Richtung der Lötstelle relevant. Damit sind die Ansätze nicht für eine Absicherung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen geeignet.

2.4 Herleitung des Forschungsbedarfs zur modellbasierten Optimierung des Selektivwellenlötens von THT-Lötstellen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Notwendigkeit der Mischbestückung sowie die Bedeutung des Leiterplattendesigns für die Fertigbarkeit von THT-Lötstellen mittels Selektivwellenlötens hergeleitet. Die THT-Lötstellen müssen daher unter Einhaltung geltender Abnahmekriterien selektiv gelötet werden, was bei Anwendung aktueller Methoden zur Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit mit erheblichen finanziellen und qualitativen Einbußen einhergehen kann. Die entwicklungsbegleitende Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit von THT-Lötstellen hat somit große Relevanz für wirtschaftliche Faktoren der Flachbaugruppenfertigung

hinsichtlich der Time-to-Market und dem Ressourcenbedarf bei Produktneuanläufen bzw. Prototypen.

Daraus ergibt sich das Einsatzpotential von Vorhersagemodellen. Generell werden datenbasierte DfM-Ansätze in der Forschungslandschaft kaum berücksichtigt [P7–P9, S3, S4]. Für die entwicklungsbegleitende Absicherung der Fertigbarkeit sind die bisher vorhandenen Methoden und insbesondere Designregeln ein unzulänglicher Ansatz, da der Lötwärmebedarf als Parameter der Fertigbarkeit nicht beschreibbar ist. Vor diesem Hintergrund werden daraus Forschungsfragen abgeleitet und der Lösungsweg hergeleitet.

2.4.1 Motivation zur modellbasierten Absicherung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen

Es wurde bisher gezeigt, dass Ansätze zur modellbasierten Bestimmung des Lotdurchstiegs sowie robuster Prozessparameter nicht bekannt sind. Die maßgebliche Hürde ist dabei der Mangel aussagekräftiger, reproduzierbarer und mathematisch formulierbarer Modellierungsansätze zur Beschreibung des thermischen Verhaltens einzelner Lötstellen. Dieser Mangel verschärft sich bei Leiterplattendesigns mit mehreren Kupferlagen. Die Komplexität übersteigt das menschliche Urteilsvermögen bezogen auf das thermische Verhalten im Lötprozess aufgrund der großen kombinatorischen Anzahl möglicher Lötstellendesigns. Dabei verstärkt der steigende Kupfergehalt in mehrlagigen Leiterplatten die anisotropen Wärmeleiteneigenschaften des Kupfer-Epoxidharz-Schichtsystems und verschlechtert die Fertigbarkeit. Weiterhin wird die Komplexität durch nichtlineare Zusammenhänge zwischen Design- bzw. Prozessparametern mit dem Lotdurchstieg erhöht. Dazu gehören z. B. das Pin/Loch-Durchmesser Verhältnis und die Lötkontaktzeit [114, P2]. Zusätzlich sind thermische Eigenschaften von Lotlegierungen temperaturabhängig [134]. Zudem wird die Abschätzung des Prozessfensters durch konkurrierende Ziele, wie Lotdurchstieg und geringe thermische Belastung des Bauteils im Betrieb, erschwert [114]. Insbesondere für schwere Masselagen in Kombination mit thermisch empfindlichen Bauteilen muss auf schonende Lötung geachtet werden, was aufgrund der großen Wärmedissipation über massive Kupferanbindungen im Konflikt mit dem Lotdurchstieg stehen kann [31].

Wegen der großen Komplexität können ohne Modelle keine kostengünstigen, schnellen und zuverlässigen Aussagen zu Fertigbarkeit bzw. Prozessparameterempfehlung gemacht werden. Das erhöht insbesondere die

Time-to-Market und den Ausschuss. Dazu kommt noch, dass Expertenwissen nicht ohne weiteres skalierbar, reproduzierbar oder speicherbar ist.

Modelle ermöglichen die entwicklungsbegleitende Prozessmodellierung und bergen somit kurzfristige und längerfristige Potentiale. Kurzfristige Vorteile des Einsatzes von Modellen zur Beurteilung der Fertigbarkeit von Leiterplattendesigns bestehen in:

- der quantifizierten Beurteilung der Fertigbarkeit für die Kommunikation zwischen Entwicklungs- und Fertigungsdomäne [9],
- der Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit in einem frühen Designstadium, in dem Änderungen wenig Kosten verursachen (Rule-of-Ten) [33],
- der personenunabhängigen, reproduzierbaren und zuverlässigen Bewertung,
- der Einsparung von Entwicklungskosten und -zeit durch virtuellen Variantenabgleich [25],
- der virtuellen, kostengünstigen Lötprozessdefinition und -optimierung,
- einer Qualitätssteigerung durch stabilere Prozesse und geringere thermische Schädigung.

Ein längerfristiger Nutzen entsteht außerdem durch:

- die Verminderung der Auswirkung des Fachkräftemangels,
- die Berücksichtigung technologischer Einflussgrößen, die bislang unentdeckt blieben,
- den personenunabhängigen, langfristigen Verbleib von Erfahrungswissen im Unternehmen trotz Mitarbeiterfluktuation und Verrentung aufgrund des demographischen Wandels,
- eine künftig stärker computerbasierte Aus-/Fortbildung von Design- und Fertigungsfachkräften anhand von Modellen ohne Materialkosten.

2.4.2 Definition der Forschungsfragen

Der Selektivwellenlötprozess ist ein nichtlinearer physikalischer Prozess. Insbesondere die Konstruktionsparameter der Lötstelle bestimmen die thermischen Eigenschaften der Lötpartner und in der Folge das Prozessergebnis. Die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Modellierungsmethoden zur Absicherung und Umsetzung fertigungsgerechter THT-Lötstellen sind für die Anwendung im Selektivwellenlötens ungeeignet. Der Grund dafür liegt

zusammengefasst in den Annahmen, die die Komplexität des Leiterplattendesigns unzulässig idealisieren. Die in der Industrie eingesetzten Designregeln reglementieren Parameter des Lötstellendesigns, welche sich nichtlinear auf das Prozessergebnis auswirken. Damit können diese linearen Designregeln der Absicherung der Fertigbarkeit nicht gerecht werden. Zudem ist dieser axiomatische Ansatz in seiner Komplexität beschränkt. Die daraus folgenden Fertigungsprobleme führen zu erhöhten Entwicklungs- und Produktionskosten, was die Wettbewerbsfähigkeit von Elektronikproduzenten mindert. Die alternative, algorithmische Absicherung der Fertigbarkeit durch Prozessmodellierung birgt folglich technisch und wirtschaftlich erhebliches Potential.

In dieser Arbeit wird durch Modellierung des Selektivwellenlötprozesses der Lotdurchstieg berechnet. Auf Grundlage dieses primären Qualitätskriteriums kann dann die Absicherung und Optimierung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen modellbasiert erfolgen. Vor dem Hintergrund des Forschungsstands sind die in Bild 13 definierten Forschungsfragen zu beantworten. Dafür wird der skizzierte Lösungsweg gewählt und in den nachfolgenden Kapiteln erarbeitet. Ziel des skizzierten Vorgehens ist letztlich die aussagekräftige und übertragbare Modellierung des Lötprozesses und der Einsatz des Modells zur Optimierung des Lötprozesses.

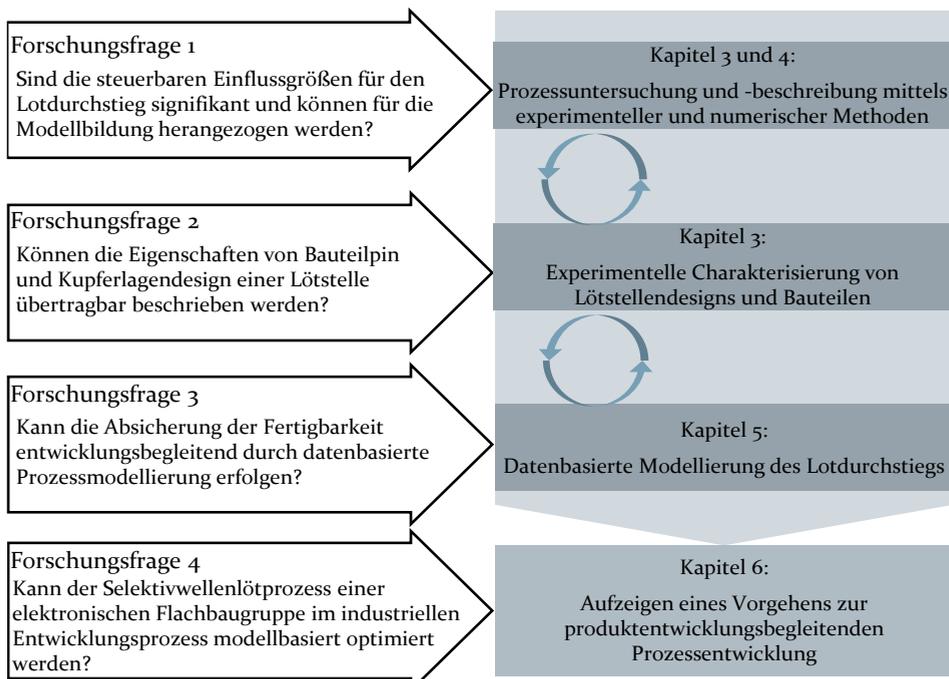


Bild 13: Definition der Forschungsfragen und des Vorgehens

3 Experimentelle Prozessbeschreibung und –auslegung

Zur Ermittlung der Einflussfaktoren auf den Lotdurchstieg im Selektivwellenlötprozess werden in diesem Kapitel die prozess- und lötstellenseitigen Parameter mit Hilfe von statistischen Versuchsplänen untersucht. Des Weiteren wird die Wärmeübertragung von der Lotwelle auf die Leiterplatte bestimmt [S5]. Durch Kombination des Wärmeübergangs mit den messtechnisch ermittelten thermischen Impedanzen der Bauteilpins und Lötstellen ist zudem eine rechnerische Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für Lötstellen mit unbekanntem Kupferlagendesign möglich. Diese Ergebnisse sind überwiegend im Rahmen des AIF-IGF Projekts SiWOLAK entstanden [135, P10] und wurden der Fachwelt in den promotionsbezogenen Veröffentlichungen [P1, P2, P6] zugänglich gemacht und in den studentischen Arbeiten [136, S5–S7] validiert. Die experimentelle Beschreibung und Priorisierung der Einflussfaktoren auf den Selektivwellenlötprozess sowie die erzeugten Experimentaldaten bilden die Grundlage für die rechnergestützten Modellierungsmethoden folgender Kapitel.

3.1 Experimentelle Untersuchung der Einflüsse auf den Lotdurchstieg

Statistische Versuchspläne sind eine effiziente und effektive Methode zur Untersuchung komplexer Zusammenhänge [137]. Vollständig faktorielle Versuchspläne erlauben die Analyse von Haupteffekten und Wechselwirkungen. Durch einen Zentralpunkt kann zudem nicht-lineares Verhalten detektiert werden. Es wird im Folgenden mehrstufig vorgegangen. Zunächst wird der Einfluss der primären Prozessparameter Vorheiztemperatur, Lottemperatur, Lötkontaktzeit, Düsendurchmesser und -positionierung ermittelt. Weiterhin wird der Einfluss der Lötreihenfolge als sekundärer Einfluss auf die Vorheiztemperatur untersucht. Anschließend werden die diskreten Bauteil- und Kupferlagendesignaspekte beleuchtet. Die relevanten thermischen Eigenschaften der Bauteile unterscheiden sich auf Pinlevel [56, P2, P3]. Daher wird der Bauteileinfluss im Rahmen der Versuche anhand eines Folienkondensators (Foko) [138], eines Metalloxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET) [139] und eines Elektrolytkondensators (Elko) [140] als typische Vertreter für THT-Bauteile untersucht. Durch den Bezug auf die zugrundeliegenden thermischen Eigenschaften des Pins, lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere

Bauteile übertragen. Für die Einordnung des Design- und Bauteileinflusses im Vergleich zu Prozessparametern werden beispielhaft ein 6-lagiges Leiterplattendesign mit Variation des Anbindungsortes in Bottom-, Top- und Innenlage untersucht, wie in den Schlibbildern in Bild 14 gezeigt.

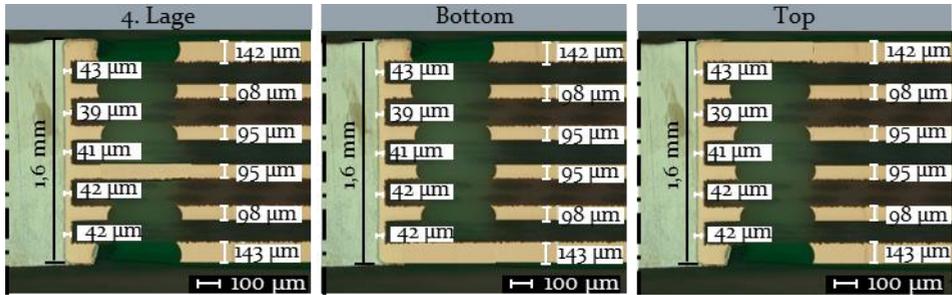


Bild 14: Lagenaufbau der 6-Lagen-Leiterplatte mit 140 µm Außenlagen und 95 µm Innenlagen und 40 µm Hülsendicke, 1,6 mm Leiterplattendicke, 1,4 mm Lochdurchmesser

Das Oberflächenfinish Nickel-Gold (NiAu) erlaubt mehrfaches Aufheizen ohne relevante Degradierung der Oberflächenbenetzbarkeit und eignet sich daher für die Versuchsreihen [56]. Das verwendete Flussmittel ist ein ORLo [141], die Lotlegierung ist eine SAC305 Legierung [142]. Für jede einzelne Lötstelle wird der Lötprozess separat durchlaufen, um gleichbleibende thermische Randbedingungen sicherzustellen. Im Vergleich zu IPC-A-610 [2] wird die Bewertung zur Detaillierung der statistischen Modelle um die grau hinterlegten Messwerte in Bild 15 verfeinert. Verdeckte Lötstellen werden mit Hilfe von Röntgeninspektion bewertet.

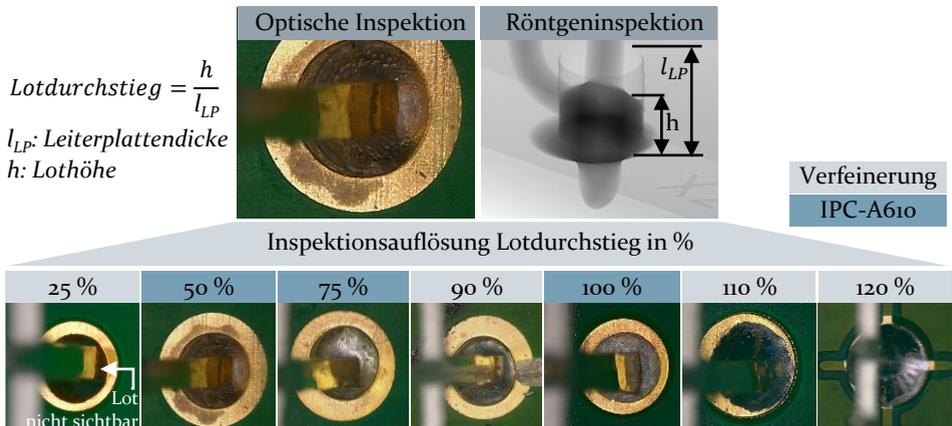


Bild 15: Vorgehen zur optischen und röntgentechnischen Bestimmung des Lotdurchstiegs in Anlehnung an IPC-A-610 [2] und verfeinerte Diskretisierung der Inspektionsauflösung

3.1.1 Untersuchung primärer Prozessparameter

Die Untersuchungen der primären Prozessparameter basieren auf drei vollfaktoriellen Versuchsplänen mit Zentralpunkt. Die Faktoren und Stufen sowie die Berechnung der Replikation sind in Tabelle 4 aufgezeigt.

Tabelle 4: Stufen und Faktoren der DoEs

		Stufen	Foko	MOSFET	Elko	
Lötpartner	Bauteil		Foko	Source	Elko	
				Drain		
				Gate		
	Anbindungsdesign			1. Lage VA	1. Lage VA	1. Lage VA
				6. Lage VA	3. Lage VA	6. Lage VA
					6. Lage VA	1. Lage WF
						6. Lage WF
Anzahl Lötstellen-Bauteilkombinationen			2	3	4	
Prozessparameter	Vorheizung	-	80	80	80	
		0	100	100	100	
		+	120	120	120	
	Lottemperatur	-	260	260	260	
		0	280	280	280	
		+	300	300	300	
	Lötkontaktzeit	-	2	4	4	
		0	5	7	7	
		+	7	10	10	
	Düse	-	3	3		
		0	3	3		
		+	4	4	4	
Anzahl Faktorstufen-Kombinationen k			34	51	36	
Technolog. relevanter Effekt $\Delta\mu$			0,125	0,125	0,125	
Prozessstreuung σ			0,08	0,08	0,08	
Replikationen n			0,72	0,48	0,68	

Da Bauteilpins und Lötstellen im Gegensatz zu den kontinuierlichen Prozessparametern diskrete Stufen bilden, muss je Bauteil ein DoE angelegt werden. Den Studien wird die in [P2] ermittelte Prozessstreuung von 8 % zugrunde gelegt. Der mindestens zu detektierende technologische Effekt $\Delta\mu$ wird, in Anlehnung an die halbe Spezifikationsbreite zwischen 75 % und 100 % Lotdurchstieg nach IPC-A-610 auf 12,5 % festgelegt. Daraus kann mit der Anzahl der Faktorstufenkombinationen k nach [137] die Anzahl der notwendigen Realisierungen zu $n = 1$ bestimmt werden. Die Anzahl N der Versuchslötungen weicht teils aufgrund zusätzlicher Validierungslötungen von der ermittelten Anzahl m ab. Die Lötergebnisse der verschiedenen Lötstellen-Bauteilkombinationen werden in Bild 16, Bild 17 und Bild 18 zusammengefasst. Bei allen Versuchsplänen kann auf Grundlage des niedrigen Variation Inflation Factor (VIF) von einer unabhängigen Koeffizientenwahl bei der Regressionsanpassung ausgegangen werden, was die Aussagekraft der Ergebnisse unterstreicht. Die Einflüsse von Bauteil und Lötstellendesign werden im weiteren Verlauf auf Grundlage dieser Versuche ermittelt.

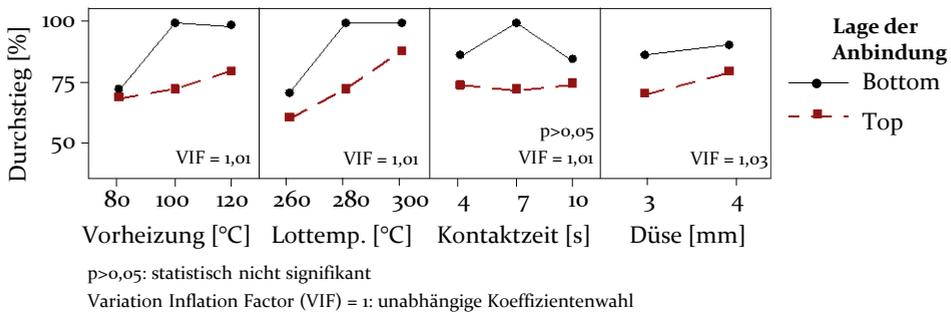


Bild 16: Einfluss der primären Prozessparameter auf den Lotdurchstieg aus dem Foko DoE mit Gap-Ratio 19 %, $N = 49$, erklärte Streuung 68 %, Residuen Mittelwert: 0 mit Standardabweichung: 0,11 (Daten aus [135])

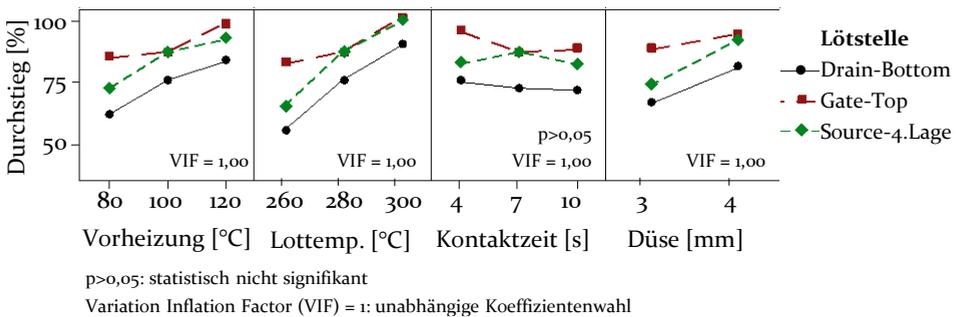


Bild 17: Einfluss der primären Prozessparameter auf den Lotdurchstieg aus dem MOSFET DoE, mit Gap-Ratio 25 %, $N = 57$, erklärte Streuung 54 %, Residuen normalverteilt um Mittelwert: 0 mit Standardabweichung: 0,18 (Daten aus [135])

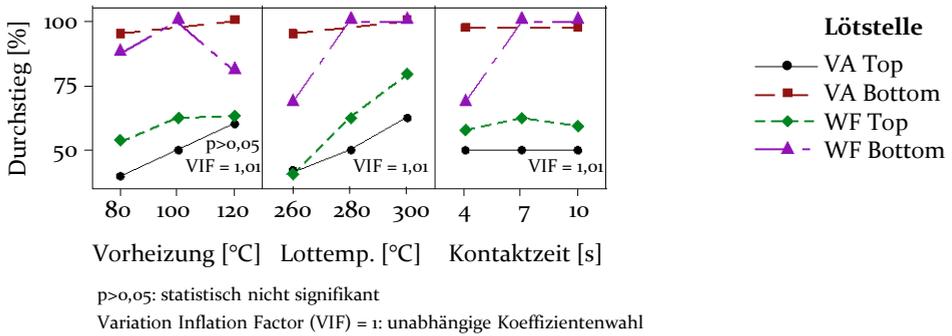


Bild 18: Einfluss der primären Prozessparameter auf den Lotdurchstieg aus dem Elko DoE, mit Gap-Ratio 31 %, N = 54, erklärte Streuung 69 %, Residuen normalverteilt um Mittelwert: 0 mit Standardabweichung: 0,15 (Daten aus [135])

In Bild 67 im Anhang werden die drei Versuchspläne gemeinsam ausgewertet, wobei sich die grundlegenden Aussagen mit den Folgenden decken. Die primären Prozessparameter Vorheizung, Lottemperatur der Lötkontaktzeit sowie dem Düsendurchmesser definieren den Wärmeeintrag und damit den Lotdurchstieg für eine Lötstelle mit gegebenem Lötwärmebedarf. Äquivalent zu [P₂, P₄] zeigt sich unterhalb des vollständigen vertikalen Lotdurchstiegs und über die variierten Lötstellendesigns hinweg ein weitgehend wechselwirkungsfreier, linearer Zusammenhang zwischen Vorheizungs- bzw. Lottemperatur und dem resultierenden Lotdurchstieg.

Die Kontaktzeit zeigt einen statistisch nicht signifikanten Einfluss, da bei Erreichen des quasi-thermischen Gleichgewichts aus Wärmezufuhr und -dissipation keine weitere Aufheizung der Lötstelle möglich ist. Der Zusammenhang zwischen der Kontaktzeit und dem Lotdurchstieg ist aufgrund der abklingenden Temperaturdifferenz näherungsweise exponentiell mit negativem Exponenten. Bei Erreichen des thermischen Gleichgewichts oder des vollständigen Lotdurchstiegs für die gegebenen thermischen Prozessrandbedingungen ist damit die Sättigung erreicht [P₂]. Eine weitere Kontaktzeitverlängerung führt demnach nicht mehr zu einer Verbesserung des Lotdurchstiegs. Temperaturmessungen im Prozess (vergleiche Bild 6) sowie die Messungen und Berechnungsmodelle aus Kapitel 3.3 und Simulationsmodelle aus Kapitel 4.1 bestätigen die exponentielle Temperaturentwicklung auf dem Restring der Lotzielseite der Lötstelle.

Bei der Wahl des Düsendurchmessers für die Lötung ist der Abstand der Lötstelle zu anderen SMT-Bauteilen auf der Lotquellseite entscheidend. Durch geeignete Bauteilfreistellung auf der Lotquellseite, etwa auf beidseitig SMT-bestückten Leiterplatten, können größere Düsen genutzt werden. Das steigert einerseits die Produktivität durch parallele Lötung mehrerer

Lötstellen. Damit wird einerseits über innerhalb des Düsendurchmessers gelegene Lötstellen simultan Wärme vertikal zu den Kupferlagen auf die Lotzielseite transportiert. Dadurch kann die notwendige Lötkontaktzeit, durch die größere eingebrachte Wärme, reduziert werden. Andererseits ist die absolute eingetragene Wärmeleistung durch die größere Lotkontaktfläche größer. Bei sonst gleichbleibenden Lötbedingungen können so auch thermisch kritische Lötstellen besser gelötet werden, wie weitere Versuche in Bild 19 zeigen, siehe besonders „Drain-Bottom VA“ und die VA in der 4. Lage.

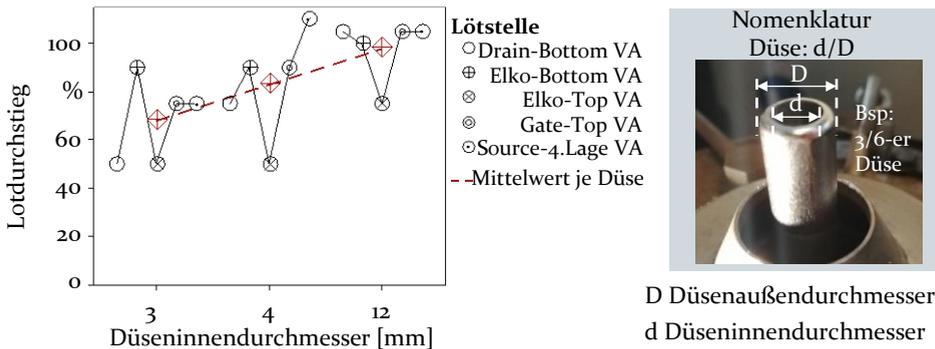


Bild 19: Haupteinflussdiagramm des Lotdüsendurchmessers auf den Lotdurchstieg in Abhängigkeit des Ortes der Lagenanbindung an die Kupferhülse, N = 20 (Daten aus [135])

Neben der Düsengröße beeinflusst auch deren Positionierung relativ zur Lötstellenmitte den Lotdurchstieg. Eine Versuchsreihe mit drei Stufen Düsenoffsets und je fünf Messungen zeigt, dass eine exzentrische Lötung in der Nähe der Düseninnenwand im Bereich $l_{Abstand}$ zu einer erheblichen Abnahme des Lotdurchstiegs führt, wie in Bild 20 verdeutlicht. Aus dem maximalen Offset zwischen Düsen und Lötstellenachse $d/2$ kann der geeignete Radius r_K der Düsenfläche für eine sichere Lötung bestimmt werden.

$$r_K = \frac{d}{2} - l_{Abstand} \quad (12)$$

Aus dem Abstand der Achsen $l_{max,BT}$ simultan zu lösender Lötstellen lässt sich hiermit die empfehlenswerte Düsengröße d nach Formel (13) bestimmen.

$$d \geq l_{max,BT} + (2 \cdot l_{Abstand}) \quad (13)$$

Dabei zeigen insbesondere die Lötversuche des MOSFETs in Bild 19 mit Pinaußenabstand von 12 mm, dass die Berücksichtigung von $2 \cdot l_{Abstand}$ für große Düsen auf Grund des großen Lotmassenstroms unkritischer ist.

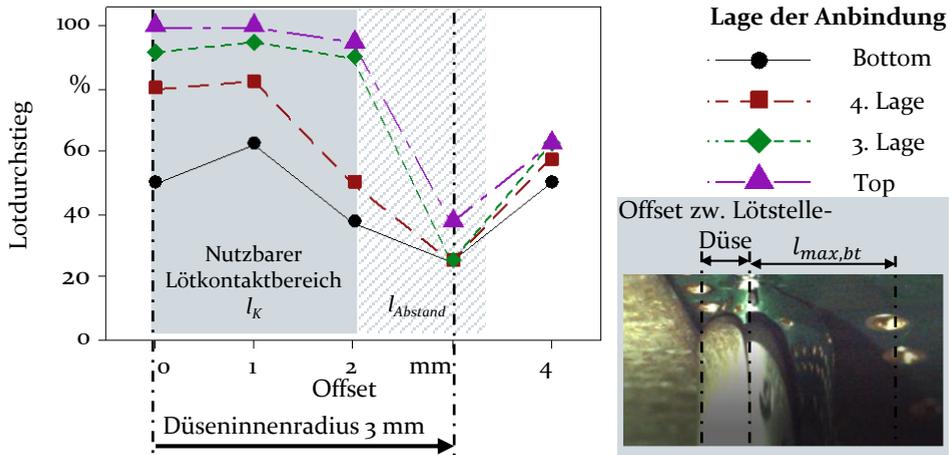


Bild 20: Einfluss exzentrischer Lötung mit Offsets zwischen Düsenmittelpunkt und Lötstellenmittelpunkt auf den Lotdurchstieg für vier unterschiedliche Lagenanbindungen, Residuen Standardabweichung: 0,05, mit $N = 44$, $n = 5$; , 100 °C, 280 °C, 5 s, Düse 6/10, Folienkondensator, Wärmefallenanbindung in Lagen Top (1), 3, 4, Bottom (6)

Auf Basis der Lötstellen aus den Versuchsplänen aus Tabelle 4 und Bild 19 muss die Freistellung im Design um eine bzw. mehrere Lötstellen herum Formel (14) genügen.

$$D_{Freistellung} > 2 \cdot (D/2 + l_{Abfluss}) + l_{max, BT} \quad (14)$$

Dabei entspricht $l_{Abfluss}$ der Dicke des abfließenden Lotstroms an der Düsenaußenwand (siehe Bild 21). Diese Definition steht in Einklang mit der Empfehlung nach [143], siehe auch Tabelle 10 im Anhang.

Die Wahl der Lötzeilenfolge der Lötstellen auf der Platine beeinflusst die Vorheiztemperatur der folgenden Lötstellen bereits vor deren Lotwellenkontakt, weil die Wärmeausbreitung allgemein rascher voranschreitet als die Bewegung der Lotdüse. Während einer Lötung werden über die Kupferlagen thermisch angekoppelte, nahegelegene Lötstellen mitgeheizt. Außerhalb der Lötung kühlt die Platine ab. Bild 22 zeigt, wie sich die Heizrate einer 4 lagigen Leiterplatte im Mittel entlang der Lötungen entwickelt. Am von den Lötungen unbeeinflussten Referenzpunkt erreicht die Heizrate während der Vorheizung bis zu 3,5 K/s und kühlt entlang des Prozesses mit ca. -0,5 bis -1 K/s ab. Schwankungen der Lufttemperatur und -feuchtigkeit innerhalb der Lötammer der Lötanlage sind statistisch nicht signifikant für den Lotdurchstieg [P2].

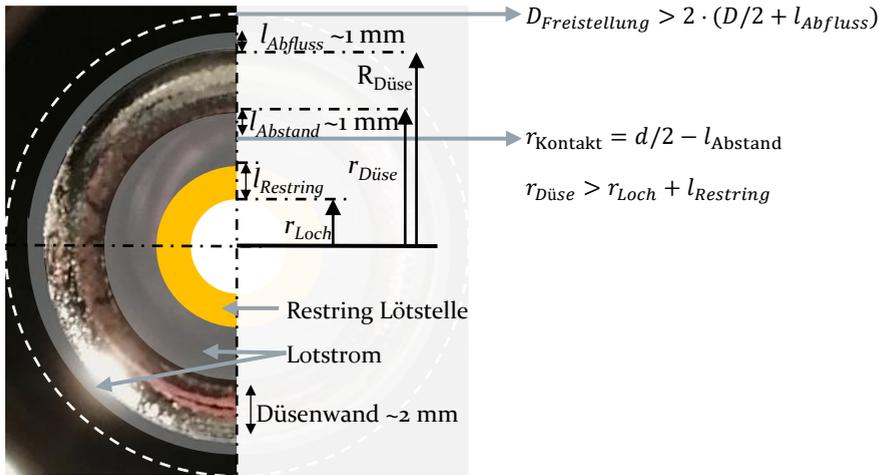


Bild 21: Geometrische Einteilung der Lotkontakfläche in geeignete Lötbereiche und parametrisierte Identifizierung der Freistellung

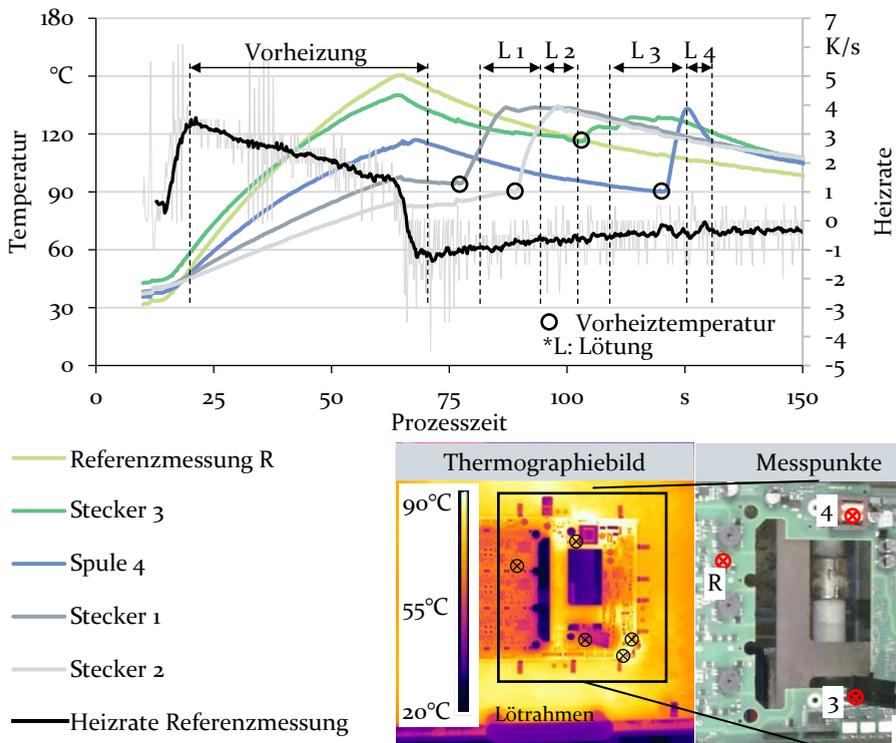


Bild 22: Thermographische Ermittlung der Temperaturentwicklung einer Leiterplatte während des Lötzykluses

Übereinstimmend mit der Literatur zeigt sich, dass maschinenseitig Vorheiztemperatur, Lottemperatur und Düsendurchmesser den größten

Einfluss auf den vertikalen Lotdurchstieg haben. Lötstellenseitig konnte zudem die Signifikanz des Lötwärmebedarfs der Lötstelle, definiert durch Bauteil und Kupferlagendesign, bestätigt werden.

3.1.2 Einfluss der thermischen Eigenschaften des Bauteilpins

Der Lötwärmebedarf ist bauteil- und bauteilpinspezifisch und beeinflusst dadurch die zeitlichen Temperaturentwicklung der Lötstelle bei der Lötung. Der innere Aufbau und die Materialeigenschaften der Bauteile sind der Grund dafür. In diesem Kapitel wird der Einfluss der Bauteilpins auf den Lotdurchstieg auf Grundlage der durchgeführten Versuchspläne aus Tabelle 4 ermittelt. Die Betrachtung der Aspekte Bauteilpin und Kupferlagendesign in den DoEs zeigt den Einfluss dieser Kombination auf den Lötterfolg. Bild 23 (1) zeigt qualitativ den Einfluss der thermischen Eigenschaften des Bauteilpins auf das Lötergebnis für Vollanbindungen in der 4. Lage, Bottom- und Top-Lage für eine diskrete Unterscheidung zwischen den Pins.

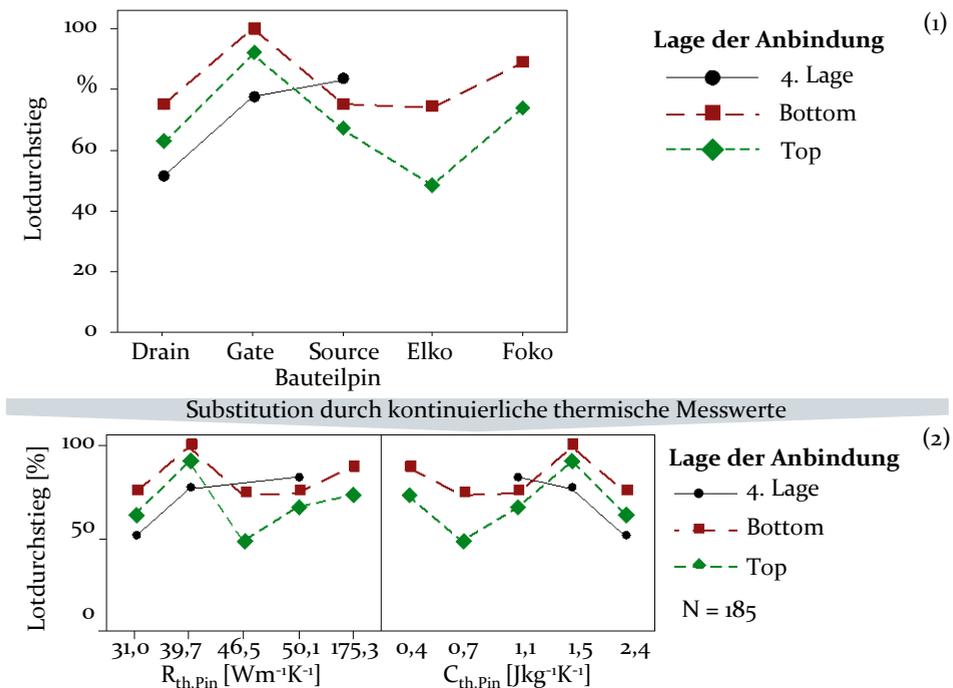


Bild 23: Einfluss des Bauteilpins und der Lage der Kupferanbindung auf den Lotdurchstieg auf Basis der Versuchspläne, ergänzt um zusätzliche Kombinationen aus Bauteilpin-Kupferlagendesign; Regressionsanalyse N = 185, erklärte Streuung 57 %, Residuen Mittelwert 0, Residuen Standardabweichung 0,17 (Daten aus [135])

Es wird deutlich, dass der Elko und der MOSFET-Pin „drain“ als große lokale Wärmesenken im Durchschnitt den Lotdurchstieg hemmen. Die Substitution der diskreten Bauteilpinbeschreibung durch Modellierung mit deren thermischen Ersatzwiderständen und -kapazitäten aus Kapitel 3.3 erlaubt die Einordnung beliebiger Bauteile anhand dieser kontinuierlichen Merkmale, wie Bild 23 (2) verdeutlicht.

Bei separater Betrachtung der Daten der DoE-Zentralpunkte in Bild 24 können die Bauteileinflüsse getrennt von Prozessparametereinflüssen betrachtet werden. Der Lotdurchstieg wird bei steigendem resultierendem thermischem Widerstand und sinkender resultierender thermischer Kapazität besser. Die Beschreibbarkeit von thermischen Eigenschaften mit kontinuierlichen Kriterien ist eine notwendige Voraussetzung für die übertragbare Modellierung beliebiger THT-Bauteile. Diese Quantifizierung des Wärmebedarfs durch die thermische Impedanz kann zur weiteren Modellierung in analytischen, numerischen und datengetriebenen Modellen zur Dimensionsreduktion eingesetzt werden.

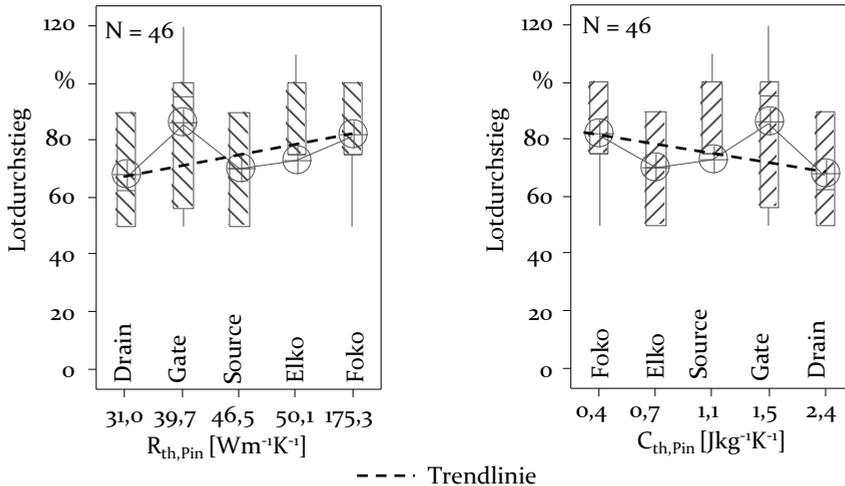


Bild 24: Einfluss der quantitativen thermischen Eigenschaften der Bauteilpins auf den Lotdurchstieg im Zentralpunkt der DoEs für verschiedene Lagen der Anbindung (Daten aus [135])

3.1.3 Einfluss des Kupferlagendesigns

In diesem Kapitel wird untersucht, wie die Designparameter Lochdimensionierung, Kupferlagendicke und Kupferlagendesign den Lötwärmebedarf und damit die Lötung beeinflussen. Diese Parameter stellen den Lösungsraum für die Verbesserung des Lotdurchstiegs seitens des Leiterplatten-

designs dar, wenn das jeweilige Bauteil festgelegt und dadurch das Prozessfenster, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, durch dessen Lötwärmebeständigkeit limitiert ist. Bei thermisch empfindlichen Bauteilen, wie etwa Folienkondensatoren oder LCD-Displays, entscheidet daher das Leiterplattendesign über die Fertigbarkeit. Am Beispiel des Folienkondensators für temperaturempfindliche Bauteile werden zunächst geeignete Prozessparameter definiert. Anschließend werden die Einflüsse von Parametern des Kupferlagendesign auf den Lotdurchstieg aufgezeigt, um daraus Designregeln abzuleiten.

Definition der Prozessparameter

Bei der Definition des Prozessfensters muss die in der Spezifikation genannte maximal zulässige Bauteiltemperatur einbezogen werden. Für die Definition der Prozessparameter werden die gemessenen maximalen Kerntemperaturen während der Durchführung des Foko DoEs aus Tabelle 4 (siehe Bild 25) ausgewertet.

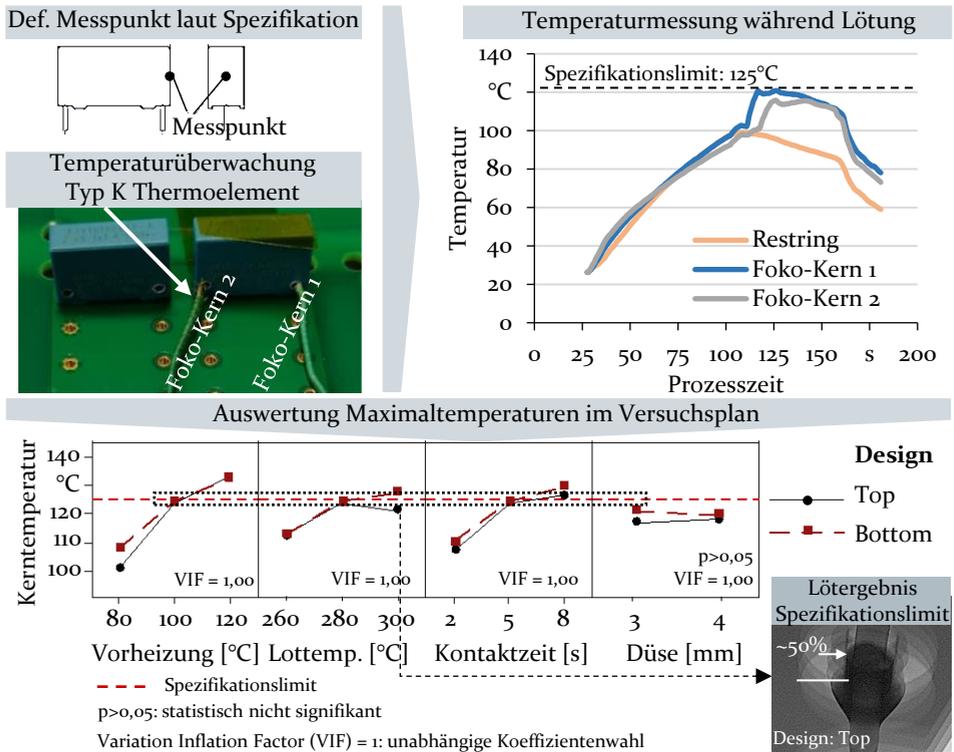


Bild 25: Messung der Temperatur im Bauteilkern während des Lötprozesses (oben); Definition der Bauteiltemperaturmessung in der Spezifikation des Fokos (oben links) [138]; Ermittlung des geeigneten Prozessfensters anhand der maximalen Temperatur im Bauteilkern während des Foko DoE, N = 36

Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Vorheiztemperatur zusammen mit der Lottemperatur und der Lötkontaktzeit einen großen Einfluss auf die maximal erreichte Bauteiltemperatur hat. Wie in Bild 25 aufgezeigt, eignet sich der Zentralpunkt des Foko-DoEs für weitere Designparameterstudien. Die Top-Anbindung im Zentralpunkt weist für die Düse 3/6 einen Lotdurchstieg von ca. 50% auf, was als Benchmark für die folgenden Designanpassungen dient. Mit den gewählten Prozessparametern werden Designparameterstudien unter Variation folgender Parameter gelötet:

- Lochdimensionierung
- Kupferlagendicke und -anbindung
- Reduktion der anisotropen Wärmeleiteigenschaften des Kupferlagenaufbaus der Leiterplatte

Lochdimensionierung

Auf Grundlage eines weiteren vollfaktoriellen Versuchsplans wird der Einfluss des Lochdurchmessers auf den Lotdurchstieg und die Implikation hinsichtlich der Parameter Lötkontaktzeit und Vorheiztemperatur ermittelt. Die Variation des Lochdurchmessers von 0,9 bis 1,4 mm in 0,1 mm Schritten ergibt mit 0,6 mm Pindurchmesser und 1,6 mm Leiterplattendicke einen untersuchten Bereich des Gap-Ratios nach Formel (2) von 19 % bis 63 %.

Bild 26 und Bild 27 zeigen, dass größere Lotspalte den Lotdurchstieg verbessern. Größere Lotspalte reduzieren zudem die Abhängigkeit des Lotdurchstiegs von der Lage der Anbindung, weil der Wärmeeintrag durch den größeren Lotstrom verbessert wird. Der Einfluss von Kontaktzeit und Vorheizung ist konsistent mit vorangegangenen Ergebnissen.

Bild 27 verdeutlicht, dass über die verschiedenen Kupferlagenanbindungen hinweg gemittelt bei größeren Löchern sowohl geringere Vorheiztemperaturen als auch kürzere Kontaktzeiten zu äquivalenten Lötgergebnissen führen. Vor dem Hintergrund der Abkühlung der Leiterplatte (siehe Bild 22) kann der Prozess robuster und schonender implementiert werden und gleichzeitig Zykluszeit eingespart werden.

Der Grund für diesen Effekt liegt einerseits im erhöhten Wärmeenergieeintrag durch den größeren Lotmassetransport in den Spalt [31]. Andererseits kann bei einem größeren Spalt das Flussmittel gleichmäßiger von unten in den Lochspalt bis zur Lotzielseite gelangen. Diese Effekte dominieren die abnehmenden Kapillarkräfte bei größerem Spalt übereinstimmend mit den Ergebnissen in [63] (siehe Bild 28).

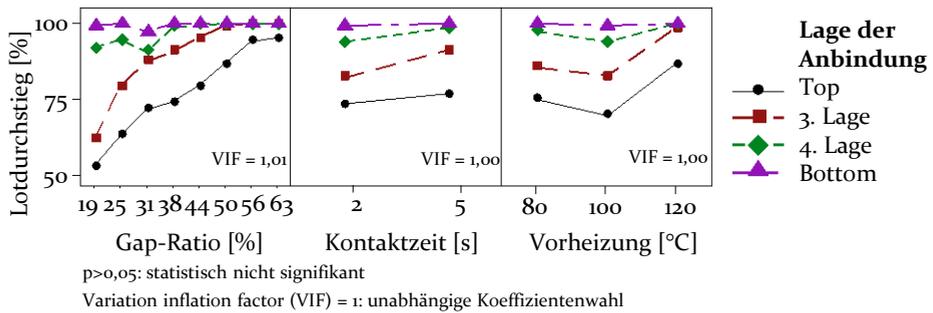


Bild 26: Wechselwirkungsdiagramm größerer Gap-Ratios auf den Lotdurchstieg in Abhängigkeit von Vorheiztemperatur, Lötkontaktzeit und Kupferlagenanbindung; Parameter Gap-Ratio DoE: Foko, Düse 6/10, Lottemperatur 280 °C, Kupferlagendesign WF mit Anbindung in den Lagen Top (1), 3, 4, Bottom (6), N = 579, n = 3, Regressionsanalyse: erklärte Streuung: 56,8 %, Residuen Mittelwert 0, Residuen Standardabweichung 0,125 (Daten aus [P1])

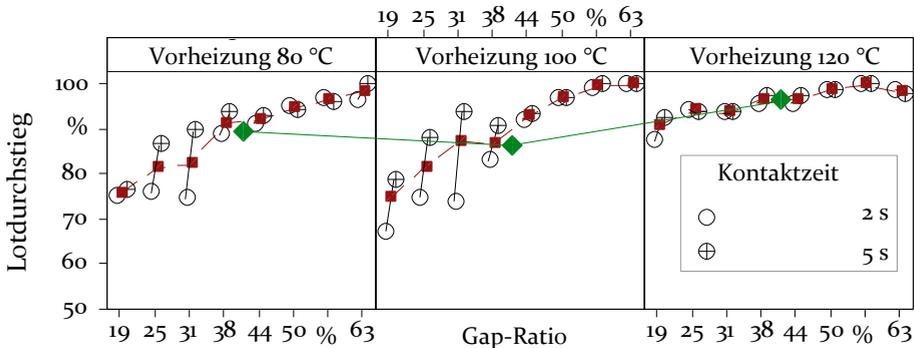


Bild 27: Einfluss größerer Gap-Ratios auf Prozessrobustheit hinsichtlich Vorheiztemperatur und Potential zur Reduktion der Lötkontaktzeit, Parameter Gap-Ratio DoE: Düse 6/10, Lottemperatur 280 °C, Kupferlagendesign WF mit Anbindung in den Lagen Top (1), 3, 4, Bottom (6), N = 579, n = 3, Regressionsanalyse: erklärte Streuung: 56,8 %, Residuen Mittelwert 0, Residuen Standardabweichung 0,125 (Daten aus [P1])

In [114] wird im Unterschied zu diesen Untersuchungen rein simulativ und mit einer Durchkontaktierung ohne Kupferlagenanbindung gezeigt, dass der Lotdurchstieg, entsprechend der steigenden Kapillarkräfte bei kleineren Lotspalten, steigt. Dieser Zusammenhang schlägt sich experimentell jedoch nicht auf den Lotdurchstieg nieder, wie diese (Bild 26, Bild 27) und weitere experimentelle Studien für Selektivwellen- [31] und Wellenlöten zeigen [33, 34, 60, 68, 109]. Im industriellen Umfeld wird häufig weitgehend unabhängig von der Leiterplattendicke ein umlaufender Lochspalt von 0,1-0,2 mm gewählt. Das entspricht bei einer typischen Leiterplattendicke von 1,6 mm einer Gap-Ratio von 13-25 %. Dies steht bei Leiterplatten ab 2 mm Dicke im Konflikt zu der Empfehlung von Chang et al. aus [109] für das

Wellenlötten eine Gap-Ratio von mind. 15-20 % zu wählen. Übereinstimmend mit den gezeigten Ergebnissen besteht der Konsens dieser Veröffentlichungen darin, dass größere Spaltmaße einen positiven Einfluss auf den Lotdurchstieg haben. Schlussfolgernd kann daraus abgeleitet werden, dass die Bedeutung der Kapillarkräfte im Vergleich zu den verschlechterten Prozessbedingungen für Flussmitteldurchdringung und Wärmeeintrag im allgemeinen Prozessverständnis in Expertenkreisen überschätzt wird, siehe auch Bild 28. Je nach Wahl des Prozessfensters relativ zum Lötwärmebedarf können Design- und Prozessparameter trotz großer Gap-Ratios weiterhin einen signifikanten Einfluss haben [P2].

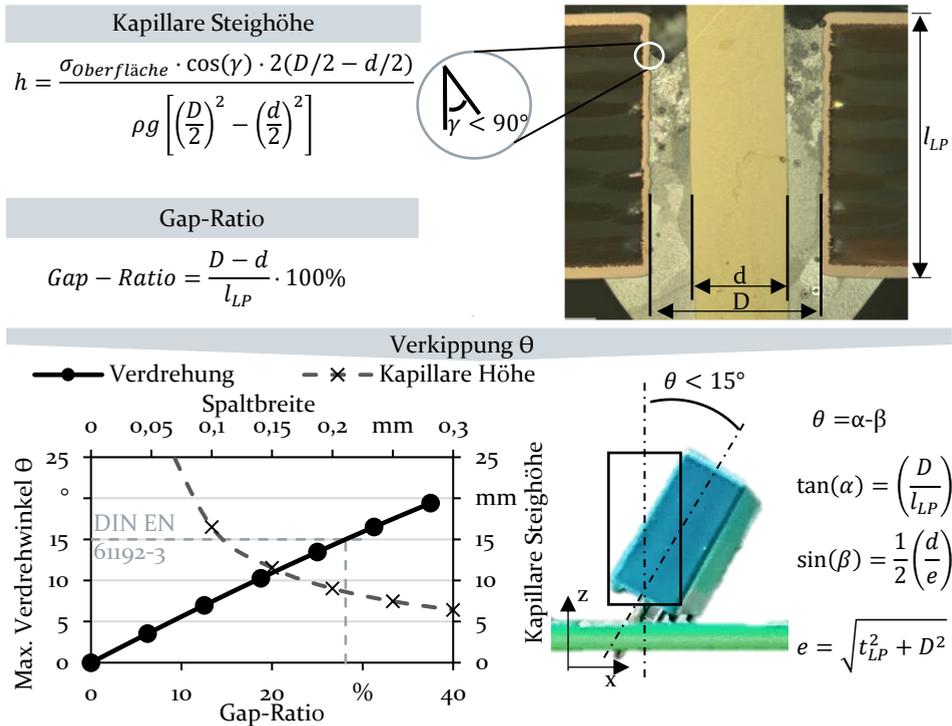


Bild 28: Einfluss der Gap-Ratio auf die maximale Bauteilverkipfung θ bei der Bestückung eines runden Pins und theoretische kapillare Steighöhe ohne thermische Effekte

Bei der Montage ermöglichen größere Lochdurchmesser auch größere Bestücktoleranzen, was eine roboterbasierte Bestückung erleichtert. Durch ungenauere Positionierung an der Bestückposition werden jedoch vermehrtes Verkippen und Verdrehen durch Vibration beim Transport der Baugruppe sowie Lötfehler durch Aufschwimmen der Bauteile beim Lötten über der Welle begünstigt. Bei Anwendung der IPC-2221 [42] und der Abnahmekriterien DIN EN 61192-3 [57] ist der Grenzwert für die Bauteilverkipfung von 15° zu beachten, welcher bei Inline-Packages oberhalb von

einer Gap-Ratio von etwa 28% theoretisch erreicht werden kann, wie Bild 28 zeigt. Zudem können erhöhte Abweichungen in der Positioniergenauigkeit in x- und y-Richtung sowie Verkippung und Verdrehung Probleme bei automatischen Funktionstests und Steckverbindungen für Kundenschnittstellen hervorrufen, siehe Bild 29.

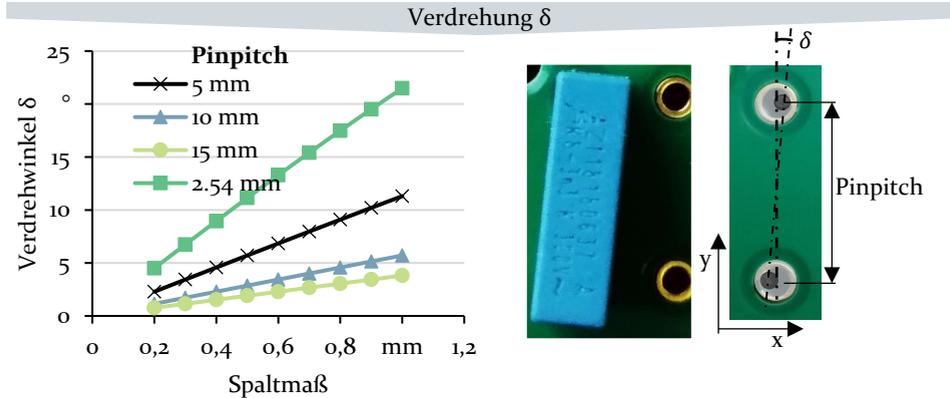


Bild 29: Einfluss der Gap-Ratio auf die maximale Bauteilverdrehung δ bei der Bestückung eines runden Pins

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit führt eine Vergrößerung des Lotspalts zu geringerer, eine Vergrößerung der Leiterplattendicke hingegen zu erhöhter Lunkenneigung [68]. Größere Löcher verursachen erhöhte parasitäre Induktivitäten in der Schaltung [42], aber reduzierte Kriechdehnung bei thermomechanischer Beanspruchung [77], was sich auch positiv auf die Ermüdungslebensdauer auswirkt [144].

Kupferlagendicke und -anbindung

Die Wahl der Anbindungslage an die Durchmetallisierung und deren Schichtdicke ist in der Regel technologisch durch die geforderte Stromtragfähigkeit oder durch Aspekte des Thermomanagements im Betrieb festgelegt (IPC-2221 bzw. IPC-2152).

Die Erhöhung des angeschlossenen Kupferquerschnitts führt zu einer Verringerung des thermischen Widerstands in horizontaler Richtung, wodurch die Entwärmung im Betrieb und bei der Lötung verbessert wird. Die so erhöhte Wärmespreizung führt zu einer Erhöhung des Lötwärmebedarfs [68, P2, P3], was in Bild 30 verdeutlicht wird. Neben der Lagendicke ist außerdem die Lage der Anbindung entscheidend. Anbindungen im Leiterplatteninneren und auf der Lotzielseite wirken sich negativ auf den Lotdurchstieg aus. Zudem ist bei gleichem Gesamtkupferquerschnitt eine dicke statt zwei dünner Schichten zu bevorzugen. Die Kupferlagen-

anbindung auf der Lotquellseite ist übereinstimmend mit den Ergebnissen der Versuchspläne in Kapitel 3.1.1 zu bevorzugen.

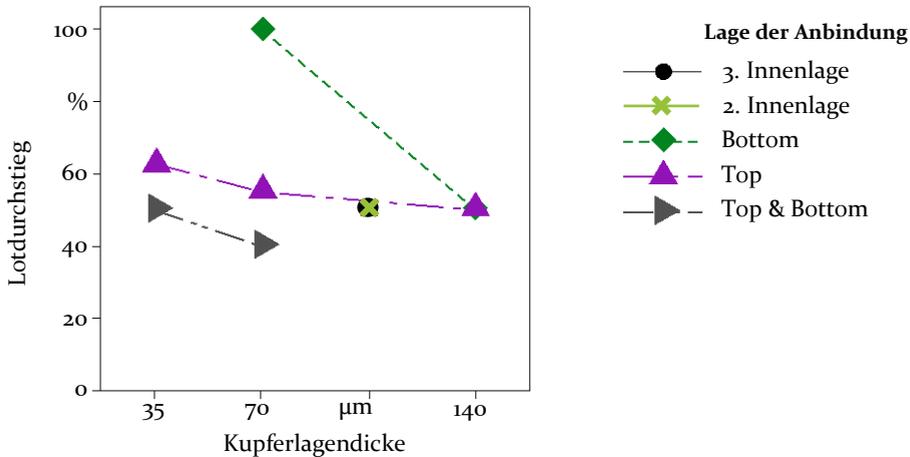


Bild 30: Einfluss der Lagendicke in Abhängigkeit der Anbindungs-lage bei massiver Kupferanbindung an die Kupferhülse, Prozessparameter: Vorheizung 80 °C, Lottemperatur 260 °C, Kontaktzeit 2 s; Bauteil: Foko-Pin; Regressionsanalyse mit N = 14, erklärte Streuung: 73,4 %, Residuen normalverteilt um Mittelwert 0 mit Standardabweichung 0,1 (Daten aus [135])

Reduktion der anisotropen Wärmeleiteigenschaften des Kupferlagenaufbaus

Zur Förderung des Lotdurchstiegs können einerseits WF eingesetzt werden, die die horizontale Wärmespreizung durch Erhöhung des thermischen Widerstands reduzieren. Andererseits kann die Wärmeleitfähigkeit in vertikaler Richtung durch TV erhöht werden.

WF wirken als thermische Entkopplung in leitenden Kupferebenen [42]. Durch die Reduktion des angebundenen Kupferquerschnitts A_Q vergrößert sich der horizontale thermische Widerstand $R_{th,WF}$. Dadurch wird die Entwärmung der Lötstelle während des Lötprozesses gehemmt und der Lotdurchstieg gefördert [P2, P4]. Die Konstruktionsparameter sind die Lagendicke l_{Lage} , Stegbreite b_{Steg} , Steganzahl i und die Steglänge l_{Steg} , wie in Bild 31 skizziert. Damit lässt sich die Designfrage auf die Position der Lagenanbindung und den thermischen Widerstand der WF $R_{th,WF}$ aus den parallelgeschalteten Stegen nach Formel (15) reduzieren.

$$R_{th,WF} = \frac{l_{Steg}}{\lambda_{cu} \cdot i \cdot b_{Steg} \cdot l_{Lage}} \quad (15)$$

Anhand des Versuchsplans mit der sechslagigen Versuchsleiterplatte wurden die Stegbreiten (0,3-1,5 mm) und -längen (0,2-1,0 mm) sowie deren Anzahl (2-8) variiert. Die Versuchslötungen in Bild 31 bestätigen den Ansatz der Modellierung der WF durch den thermischen Widerstand. Varianzen und Diskontinuitäten in den Lötgergebnissen sind auf die grobe Inspektionsauflösung zurückzuführen. Größere thermische Widerstände $R_{th,WF}$ führen demnach zu verbessertem Lotdurchstieg. Auch der Vergleich zum Referenzdesign mit vollständiger Anbindung an die Toplage unterstreicht die Wirksamkeit dieses Designelements. Empfehlungen für die Stegbreiten werden in IPC2222 [115] gegeben (siehe auch Tabelle 3). Da die Kupferlagendicke aufgrund der geforderten Stromtragfähigkeit global für die jeweilige Lage der Leiterplatte gewählt werden, sind nur Steglänge und -anzahl die lokal veränderbaren Parameter.

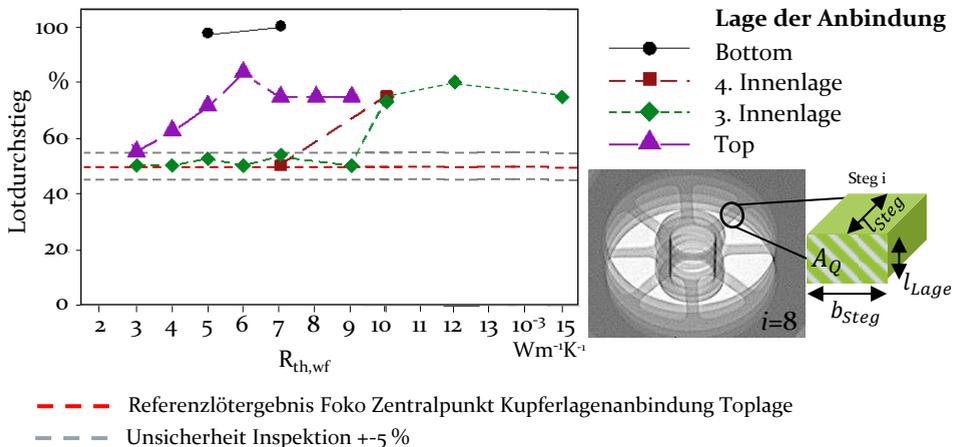


Bild 31: Einfluss von WF auf den Lotdurchstieg in Abhängigkeit des thermischen Widerstands der WF R_{wf} , Prozessparameter: Foko DoE-Zentralpunkt, Regressionsanalyse mit $N = 64$, erklärte Streuung = 60,3 %, Residuen Mittelwert = 0, Residuen Standardabweichung = 0,1 (Daten aus [135])

Das Einbringen von TVs im Restrिंग der THT-Lötstelle unterstützt den vertikalen Wärmetransport beim THT-Löten senkrecht zu den Kupferschichten und mildert so die thermisch stark anisotropen Wärmeleitungseigenschaften des Kupfer-FR4-Schichtverbunds der Leiterplatte. Die Durchmesser der metallisierten Löcher liegen in der Größenordnung von 0,2 mm. Der vertikale thermische Widerstand der Lötstelle kann gegenüber der einfachen Durchmetallisierung durch die vier parallelgeschalteten TVs etwa halbiert werden. Bild 32 zeigt den unterstützenden Einfluss der TVs auf den Lotdurchstieg verglichen mit einer vollständig angebotenen Kupferlage. TV können zusätzlich in den Restrिंग einer WF eingebracht werden. Insbesondere die Kombination aus TV und WF ermöglicht eine

erhebliche Verbesserung des Lotdurchstiegs im Vergleich zum Referenzdesign mit vollständiger Anbindung an die Toplage.

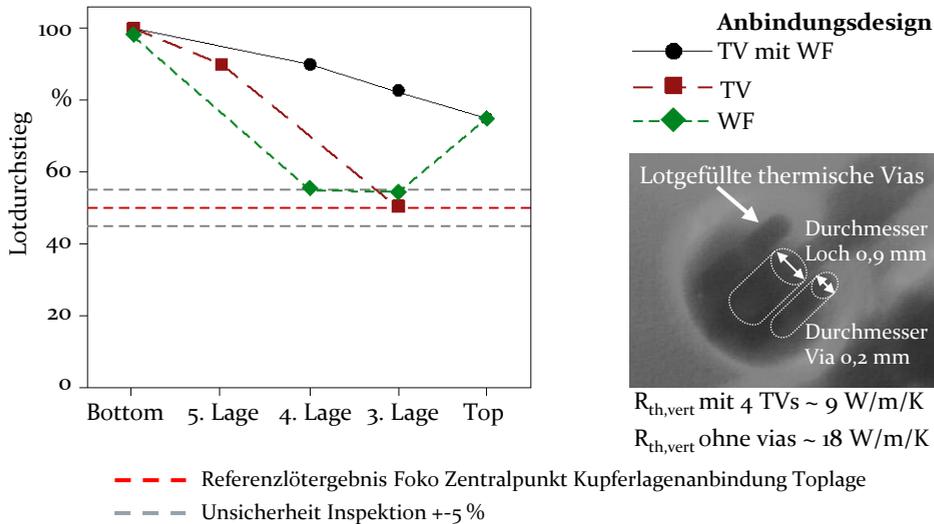


Bild 32: Einfluss von TV auf den Lotdurchstieg, Regressionsanalyse mit $N = 34$, erklärte Streuung: 35 %, Residuen Mittelwert = 0, Residuen Standardabweichung = 0,15 (Daten aus [135])

Zusammenfassend konnte in diesem Abschnitt gezeigt werden, dass der Lötwärmebedarf einer Lötstelle das Lötergebnis maßgeblich beeinflusst. Die Haupteinflussgrößen auf den Lötwärmebedarf sind dabei die Dimensionierung der Lochgröße im Verhältnis zu Pindurchmesser und Leiterplattendicke. Weiterhin wird die Dissipation der Lötwärme durch die Anzahl, Dicke, Ort und der Kupferlagenanbindung an die Durchmetallisierung bestimmt. Bis dato ist der Lötwärmebedarf nur qualitativ beschreibbar. Durch geeignete Leiterplattendesigns können industrietypische Vorheiz- und Löttemperaturen sowie Lötkontaktzeiten reduziert werden. Weiterhin wurden Designregeln aus Kapitel 2.3.3 hinsichtlich der Lochdimensionierung sowie der Wärmefallenauslegung bestätigt und konkretisiert.

3.2 Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs von der Lotwelle auf die Lötstelle

Nach der Definition der Fertigbarkeit in Kapitel 2.3.1 steht dem Lötwärmebedarf das Lötwärmeangebot gegenüber. In diesem Kapitel wird der Wärmeeintrag empirisch quantifiziert. Klein-Wassink nennt in [13] für eine bleihaltige Welle einen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von $10.000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Für bleihaltige Legierungen wurden zudem

Wärmeübergangswerte im Erstarrungsvorgang zwischen 8.000 und 10.000 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ veröffentlicht [145]. Diese Werte können als Anhaltspunkt für folgende Versuche herangezogen werden.

Die empirisch ermittelten Gleichungen zur Berechnung des Wärmeübergangs sind nur für kleine Temperaturbereiche und für äquivalente Fluidregime gültig. Die veröffentlichten Formelzusammenhänge zur Berechnung des Wärmeübergangs sind mit Hilfe von dimensionslosen Größen formuliert, wie dem Verhältnis aus z-Abstand zu Düseninnendurchmesser d. Die Gültigkeitsbereiche vorhandener allgemeiner empirisch ermittelter Formelzusammenhänge ($2 \leq z/d \leq 12$) für die Berechnung von Wärmeübergängen in Prallströmungen sind einerseits für die Verhältnisse im Selektivwellenlötprozess nicht anwendbar [146–148]. Andererseits findet die Lötung in Staupunktnähe der Prallströmung statt. Der Wärmeübergang in dieser Region kann von den vorhandenen Gleichungen nicht erfasst werden [148].

Eine experimentelle Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α für eine fließende bleifreie Lotlegierung als Selektivwelle ist in der Literatur nicht bekannt. Grundsätzlich besteht die Schwierigkeit in der Bestimmung des konvektiven Wärmeeintrags in der relativ großen Streuung experimenteller Messwerte und Diskrepanzen zu Simulationsergebnissen, wie vergleichbare Studien im Reflowofen zeigen [131, 135, 148]. Die Beschreibung des Lötwärmeeintrags von der flüssigen Lotwelle auf die Lötpartner ist die Voraussetzung für die rechnerische Abschätzung der Wärmeentwicklung in den Kapiteln 3.3 und 4.2.

3.2.1 Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten an der Lotwelle

Da der konvektive Wärmeeintrag als strömungsmechanische Größe nicht direkt gemessen werden kann, muss der Wärmeeintrag empirisch aus dem Temperaturverlauf eines bekannten Probekörpers ermittelt werden. Der konvektive Wärmeeintrag Q_{konv} wird mit der Fourier'schen Gleichung (16) über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α an einer definierten Fläche A beschrieben, an der die Temperaturdifferenz zwischen der Lotwelle T_{Welle} und dem sich aufheizenden Messkörper $T_{\text{Körper}}(t)$ anliegt.

$$Q_{\text{konv}} = \alpha \cdot A \cdot (T_{\text{Welle}} - T_{\text{Körper}}(t)) \quad (16)$$

Zu diesem Zweck wird eine Messvorrichtung mit bekannten thermischen Eigenschaften entwickelt, mit deren Hilfe die Eigenschaften der

Wärmeübertragung von der Lotwelle ermittelt werden können. Für die Bestimmung des Wärmeeintrags wird das Modell „ideal gerührter Behälter“ (Lumped capacitance model) benutzt, welches gültig ist, wenn Temperaturgradienten innerhalb des Probekörpers vernachlässigbar sind, also die Biot Zahl $\ll 1$ [149, S5] ist. Zur Bestimmung des Wärmeeintrags wird, vergleichbar mit dem Vorgehen in [131] für Reflowöfen, ein Kupfermesskörper mit bekannten thermischen und geometrischen Eigenschaften $m \cdot c$ auf definierter Kontaktfläche A von der Lotwelle T_{Welle} beginnend mit der Anfangstemperatur T_0 erwärmt. Aus der Temperaturentwicklung $T(t)$ im Inneren des Körpers wird der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt.

Konstruktiv ist der Messkörper wie in Bild 33 aufgebaut. Ein definierter, an der Oberfläche oxidiertes Kupferzylinder mit Bohrung wird in eine FR4-Platte ohne Kupferlagen eingebracht.

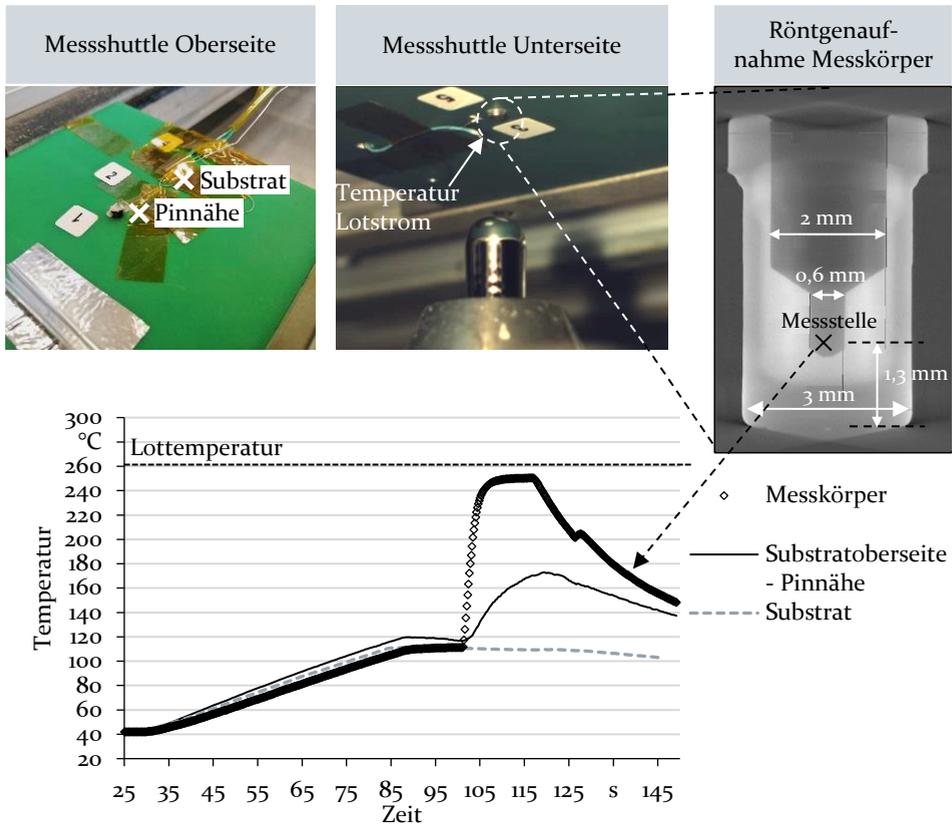


Bild 33: Messshuttle und beispielhaftes Temperaturprofil zur Bestimmung des Wärmeübergangs zwischen der Welle und dem Messshuttle

Durch die Einbettung des Probekörpers in das Trägermaterial FR4 mit Wärmeleitfähigkeit von $\sim 0,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ist die Erwärmung des Trägermaterials vernachlässigbar zu betrachten. Daher kann angenommen werden, dass die über die Kontaktfläche eingetragene Wärmeenergie während der Messdauer überwiegend zur Erwärmung des Kupfer-Messkörpers mit einer Wärmeleitfähigkeit von $380 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ führt. Die Messungen auf dem Substrat bestätigen diese Annahme. Durch die Einbettung des Messkörpers in das Substrat ist die Wärmeeintragsfläche exakt definiert. Die Temperatur im Probekörper wird mit einem isoliert verschweißten Mantelthermoelement vom Typ-K gemessen, welches zur Sicherung der Position im Kupferzylinder von außen mit Keramikkleber gehalten wird.

Im Messvorgang wird der Messkörper auf 60°C vorgeheizt und anschließend von der Selektivwelle für eine definierte Zeit von 15 s berührt, bis ein quasistationäres thermisches Gleichgewicht erreicht ist. Während der Messung werden die Temperaturen am Messaufbau im Messkörper, auf der Ober- und Unterseite des Trägersubstrats sowie im Lotstrom überwacht. Zur Ermittlung von α wird der Verlauf der Messkörpertemperatur mit Gleichung (17) und den Messkörpereigenschaften mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate approximiert.

$$T(t) = T_{max} - T_0 e^{-t \frac{\alpha A}{m c}} \quad (17)$$

3.2.2 Beurteilung der Messmittelfähigkeit

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der Messmethode werden die Messergebnisse hinsichtlich der gemessenen Maximaltemperatur und des ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten für unveränderte Prozessparameter in einer industriellen Fertigungsumgebung an zwei unterschiedlichen Versuchstagen verglichen. Die eingestellten Lotwellenparameter entsprechen typischen Fertigungsprozessparametern.

Bild 34 zeigt die zusammengefassten Messergebnisse. Die gemessene Maximaltemperatur im Messkörper sowie deren geringe Streuung von ca. 1°C unterstreichen die hohe Reproduzierbarkeit der Messungen durch den Messaufbau und des Maschinenzustands. Zudem erweist sich der Wärmeübergang im Selektivwellenlötprozess im industriellen Umfeld als sehr stabil. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Messaufbau fähig ist.

Die Messungen zeigen zudem einen mittleren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von etwa $5000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Auf Grund der laminar

ablaufenden Selektivwelle ist das Messergebnis verglichen mit dem von Klein-Wassink genannten Wert von $10.000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ für eine nicht weiter spezifizierte bleifreie Welle folglich plausibel. Trotz der messbaren Streuung des Wärmeübergangskoeffizienten schlägt sich dies nicht messbar auf die Robustheit des Lotdurchstiegs im Prozess nieder. Untersuchungen zeigen, dass selbst die Veränderung des Strömungsregimes durch Erhöhung der Lotfördermenge an der Pumpe innerhalb eines anwendbaren Lötprozessfensters keinen signifikanten Einfluss auf den Lotdurchstieg hat [P2].

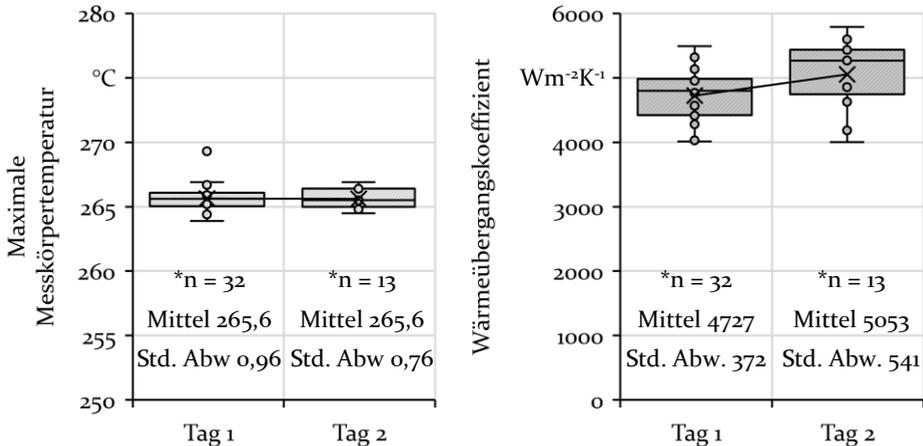


Bild 34: Untersuchung der Messstreuung des gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten und der maximalen Messkörpertemperatur bei Messparametern: $280 \text{ }^\circ\text{C}$ Lottemperatur, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ Vorheiztemperatur, Düse 6/10, Wellenhöhe 3,5 mm, z-Abstand 2 mm, $N = 45$; Mittelwertabweichung statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$); Gesamt Standardabweichung 446, Mittelwert $4820 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

3.3 Experimentelles Verfahren zur Abschätzung der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen

Der Wärmebedarf von Lötstellen und Bauteilen und damit das quantitative thermische Verhalten im Lötprozess ist mit dem aktuellen Stand der Technik im Leiterplattendesignprozess nicht ermittelbar, wie in Kapitel 2.3.3 erläutert. Dieser ist jedoch signifikant für das Lötergebnis. Auf Grund der Lösungseigenschaften der Wärmeleitungsgleichung als partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung ist die Kontinuität der Temperaturentwicklung ohne Schwingungen sichergestellt [150, 151]. Damit ist das thermische Verhalten beschreibbar. Als Alternative zu einer zeitaufwändigen, iterativen experimentellen Ermittlung geeigneter Lötprozessparameter wird in diesem Kapitel mit der Messung der thermischen Impedanz die Charakterisierung des transient-thermischen Verhaltens beliebiger Bauteile und

Lötstellen vorgenommen. Basierend auf diesen Messergebnissen des Wärmebedarfs kann die Prozessparameterabschätzung zusammen mit der in Kapitel 3.2 ermittelten Wärmezufuhr rechnerisch erfolgen.

3.3.1 Bestimmung der thermischen Impedanz von Bauteilen und Lötstellen

Die thermische Impedanz $Z_{th}(t)$, das transient-thermische Verhalten eines Körpers, kann durch ein thermisches Ersatzschaltbild als Modellansatz zur Beschreibung dieses Körpers bestehend aus in Reihe geschalteten RC-Gliedern beschrieben werden [P6]. In einem Foster-Netzwerk sind mehrere thermischen Widerstände R_{th} und Kapazitäten C_{th} jeweils parallel zu einem RC-Glied geschaltet. Die RC-Glieder werden in dem Modellansatz dann in Reihe geschaltet, wie in Bild 35 skizziert.

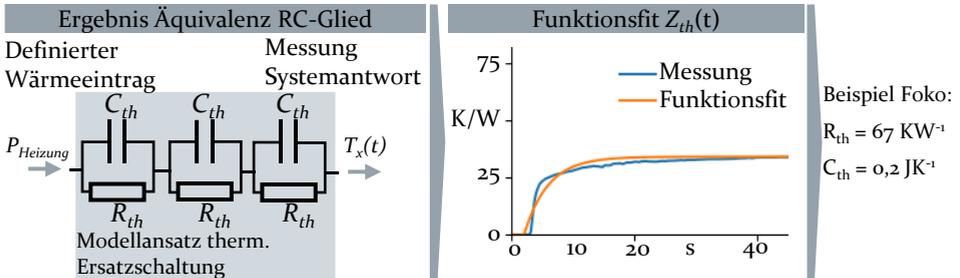


Bild 35: Messprinzip zur thermischen Charakterisierung von Bauteilen und Lötstellen unbekanntem inneren Aufbau, Beispiel Foko mit einem RC-Glied (in Anlehnung an [S6, S7])

Mit Hilfe dieses Messprinzips in Anlehnung an [7] kann der Wärmepfad, den das Lot im Prozess überwinden muss, messtechnisch und zerstörungsfrei im nicht gelöteten Zustand charakterisiert werden. Dieser Top-down-Ansatz erlaubt die quantitative Ermittlung der thermischen Impedanz $Z_{th}(t)$ von Körpern unbekanntem inneren Aufbau. Aus dem Leistungseintrag $P_{Heizung}$ auf der Lotquellseite und der sich ergebenden thermischen Systemantwort $T_x(t)$ auf der Lotzielseite des vermessenen Objekts, kann mit Formel (4) der transiente thermische Widerstand $Z_{th}(t)$ bestimmt werden. Über den Fit mehrerer RC-Glieder mit der Ansatzfunktion Formel (19) kann der transiente thermische Widerstand $Z_{th}(t)$ bestimmt werden.

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n Z_{th,i} = \sum_{i=1}^n R_{th,i} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{th,i} \cdot C_{th,i}}} \right) \quad (18)$$

Die Systemantwort lässt sich für alle vorliegenden Bauteile mit $n = 3$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 > 0,98$ beschreiben. Mit der ermittelten thermischen Ersatzschaltung kann dann das Aufheizverhalten berechnet werden. Damit kann das thermische Verhalten des Körpers für andere Leistungseinträge $P_{Lötung}$ im Lötprozess mit Formel (19) abgeschätzt werden.

$$\frac{dT(t)}{dt} = P_{Lötung} \frac{dZ_{th}(t)}{dt} \quad (19)$$

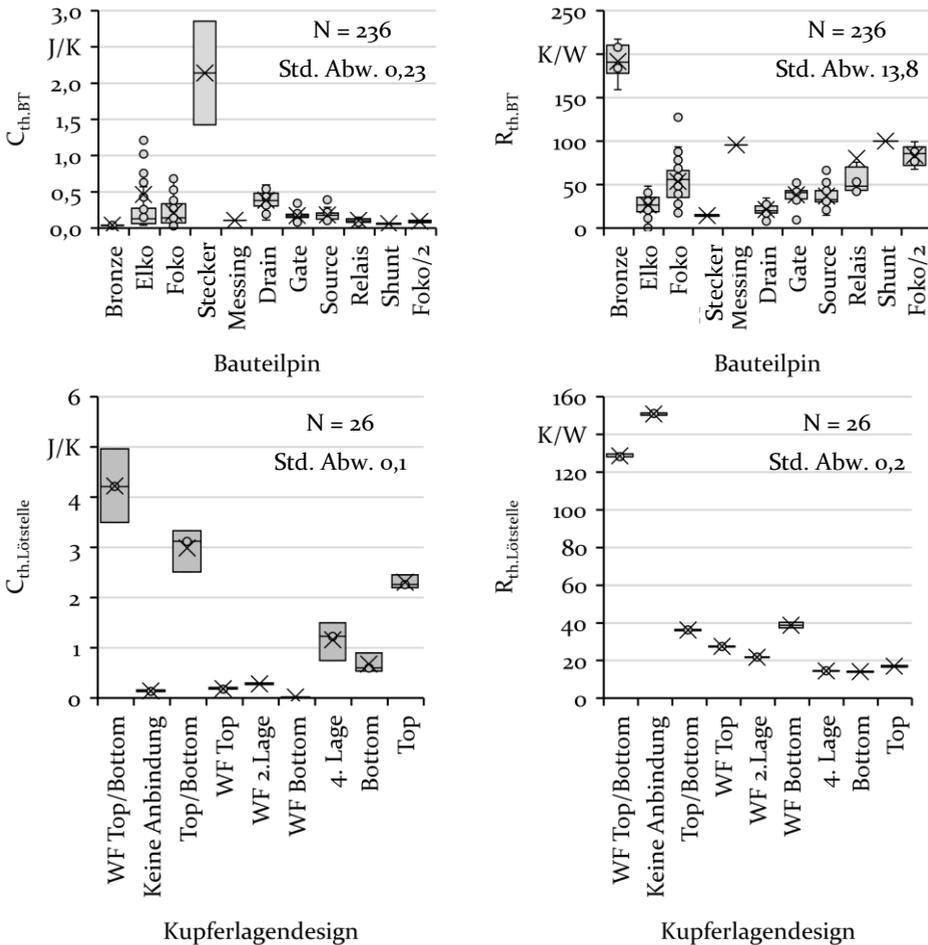


Bild 36: Unterscheidbarkeit unterschiedlicher Bauteilpins und Kupferlagendesigns anhand der jeweiligen thermischen Widerstände und Kapazitäten (Daten z. T. aus [S6, S7])

Es wird dabei angenommen, dass die volle Leistung P_{Heizung} durch das Netzwerk der Ersatzschaltung fließt. Bei Bauteilpins ist der daraus resultierende Fehler sehr klein, da die Dissipation von Heizleistung in die Umgebung über die Luft durch natürliche Konvektion vernachlässigbar ist.

Bei einer Lötstelle wird ein unbekannter Teil der Leistung in die Leiterplatte dissipiert und wird damit nicht durch das Ersatzschaltbild erfasst. Durch die Messung lassen sich beliebige Bauteilpins und Kupferlagendesigns beschreiben und quantitativ einordnen, wie in Bild 36 gezeigt.

3.3.2 Abschätzung des Prozessfensters geeigneter Lötparameter

Auf die gemessenen Impedanzen aufbauend, ist eine rechnerische Bestimmung geeigneter Prozessfenster möglich (siehe Bild 37). Als Modellparameter werden der in Kapitel 3.2 durchschnittlich gemessene Wärmeübergangskoeffizient von $5000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, die bekannte Kontaktfläche zwischen Lotwelle und Lötpartner sowie die gemessene thermische Impedanz von Bauteilpin, -kern und Lötstelle als Systemreaktion der Lötpartner herangezogen.

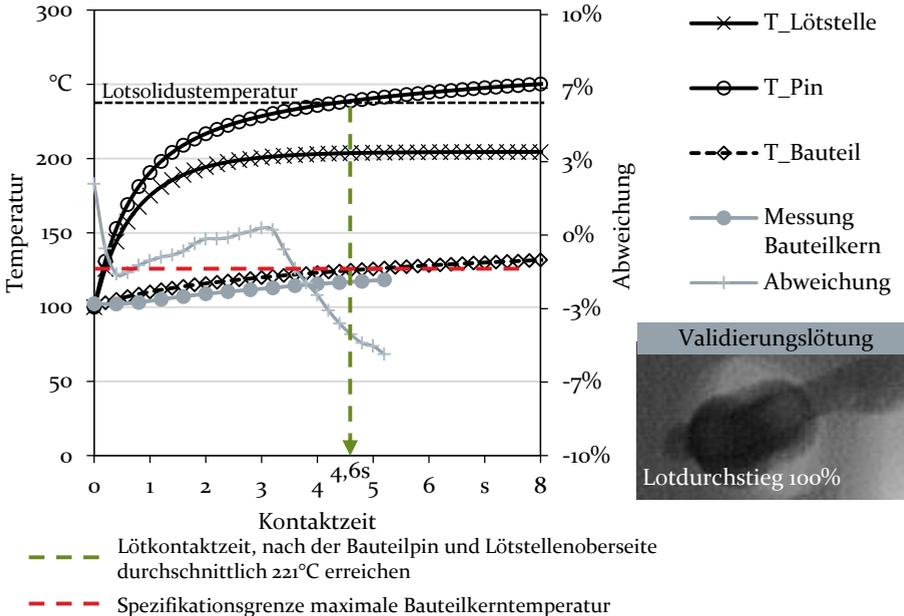


Bild 37: Validierung der Kerntemperaturvorhersage für den Lötprozess im Foko DoE Zentralpunkt für 3/6 Düse und Kupferlagenanbindung Bottom auf Basis der gemessenen Impedanzen für den Foko und Abgleich mit dessen Spezifikationsgrenze [138]

Damit erfolgt rechnerisch die Prozessparameterfindung durch Gleichung (19) mit $n = 3$ RC-Gliedern. In gleicher Weise ist die Abschätzung der Bauteilkerntemperatur möglich, welche häufig ein limitierender Faktor für das Prozessfenster ist. Dafür muss die Impedanz zwischen Pin und Bauteilkern gemessen werden. Wird bei der Lötung die Bauteilkerntemperatur des Folienkondensators gemessen, so kann die mit diesem Modell prognostizierte Kerntemperaturentwicklung mit der im Lötprozess abgeglichen werden. Es zeigt sich, dass der Fehler für typische Lötkontaktzeiten im einstelligen Prozentbereich in Celsius liegt. So kann für bekannte Bauteile ein Prozessfenster hinsichtlich ihrer Wärmebeständigkeit bestimmt werden.

3.3.3 Validierung der Methode zur Vorhersage des Lotdurchstiegs

Nach der Überprüfung der Funktionsfähigkeit des experimentell-analytischen Modellierungsverfahrens wird nun die Aussagekraft hinsichtlich des Lotdurchstiegs überprüft. Dafür wird die Annahme getroffen, dass Bauteilpin und Lötstelle über die Lotsäule thermisch gekoppelt sind und sich die Temperaturen dadurch aneinander angleichen. Überschreitet die gemittelte Temperatur von Lötstelle und Bauteilpin auf der Lotzielseite die Lotliquidustemperatur, so kann von einer hinreichenden Erwärmung und folglich vollständigem Lotdurchstieg ausgegangen werden [P11]. Bei der Legierung SAC305 sind das 221 °C.

Wie in Bild 37 skizziert, zeigt sich, dass nach ca. 4-5 Sekunden Lötkontaktzeit der Lotdurchstieg erreicht wird. Die Vergleichslötung im Zentralpunkt bestätigt diese Vorhersage. Dieses Vorgehen wird äquivalent auf weitere 127 Lötstellen übertragen. Die binäre Vorhersage des Lotdurchstiegs wird dann mit den Lötgergebnissen in Tabelle 5 verglichen.

Tabelle 5: Abgleich der Vorhersagewerte mit den 127 Lötgergebnissen in einer binären Konfusionsmatrix (Daten aus [S6, S7])

		Vorhersagewert Lotdurchstieg	
		<100%	≥100%
Wahrer Wert Lotdurchstieg	<100%	71 (TN)	6 (FP)
	≥100%	31 (FN)	19 (TP)
Vorhersagequalität	Sensitivität (TPR)	0,38	
	Spezifität (TNR)	0,92	
	norm. Genauigkeit	0,65	

Zur Beurteilung der Aussagekraft werden aus der Konfusionsmatrix die Kenngrößen Sensitivität (True positiv rate - TPR), die Spezifität (True negativ rate - TNR) sowie die normierte Genauigkeit (Balanced Accuracy) mit den Formeln (20) bis (22) berechnet.

$$\text{Sensitivität (TPR)} = \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Negative}} \quad (20)$$

$$\text{Spezifität (TNR)} = \frac{\text{True Negative}}{\text{True Negative} + \text{False Negative}} \quad (21)$$

$$\text{Balanced Accuracy} = \frac{\text{TPR} + \text{TNR}}{2} \quad (22)$$

Dabei ist „*True Positiv*“ ein korrekt vorhergesagter, vollständiger Lotdurchstieg. Insbesondere die hohe TNR zeigt, dass kritische Lötstellen mit diesem Rechenmodell zuverlässig erkannt werden können. Die thermischen Eigenschaften sind folglich nachweislich signifikant für den Lotdurchstieg. Auf Grundlage der Ergebnisse zur Bestimmung des transienten Wärmebedarfs und dem Wärmeangebot können die Temperaturentwicklung und damit der Lotdurchstieg abgeschätzt sowie geeignete Prozessparameter empfohlen werden. So kann die Beschreibung des großen THT-Bauteilspektrums auf nur jeweils zwei Parameter zur Beschreibung des Wärmebedarfs reduziert und alle Bauteilpins durch die kontinuierlichen Werte übertragbar beschrieben werden. Diese Reduktion der Bauteilbeschreibung auf die thermischen Eigenschaften wird in den Kapiteln 4 und 5 für die Modellbildung angewendet.

4 Numerische und analytische Ansätze zur Berechnung des Lotdurchstiegs

In diesem Kapitel werden eine multiphysikalische Simulation und ein analytischer Ansatz entwickelt, mit deren Hilfe das Lötergebnis auf Grundlage von Designdaten berechnet werden kann. Mit Hilfe der multiphysikalischen Simulation können sowohl der Wärmetransport als auch die strömungsmechanischen Einflussgrößen Lotstrom und Kapillarkräfte sowie das Erstarrungsverhalten der Lotlegierung modelliert werden. Mit dem validierten Simulationsmodell werden dann Parameterstudien der Lötstellendesignparameter durchgeführt. Auf Grundlage dieser Untersuchungen werden dann valide Annahmen zur Vereinfachung abgeleitet. Mit diesen Annahmen wird ein idealisierter analytischer Ansatz zur Berechnung des Lotdurchstiegs aufgezeigt, der keine Softwarelizenzen und Simulationskenntnisse erfordert. Damit kann die Fertigungsgerechtigkeit einzelner Lötstellen bereits im Designstadium entwicklungsbegleitend virtuell abgeschätzt werden. Beide Ansätze zusammengenommen ergeben Kennzahlen zur Beschreibung des Lötwärmebedarfs von THT-Lötstellen für die datengetriebene Modellierung im Kapitel 5.

4.1 Numerische Modellierung des Selektivwellenlötprozesses durch multiphysikalische Simulation

Die physikalischen Zusammenhänge durch die Kopplung des Wärme- und Massenstroms als Energieeintragsmechanismus zur Erwärmung von Lötstellen mit mehrlagigen Kupferlagendesigns beim Selektivwellenlötprozess sind komplex. Der Selektivwellenlötprozess wird daher mit einer multiphysikalischen Simulation abgebildet. In dieser Arbeit wird dafür ANSYS Fluent genutzt. In diesem Kapitel wird ein Modellierungsvorgehen eingeführt, mit dem der Lotdurchstieg mit Hilfe des multiphysikalischen Simulationsmodells berechnet kann. Im Folgenden wird das Modell beschrieben, dessen Aussagekraft validiert und das transiente Lotdurchstiegsverhalten untersucht. Zudem erlaubt die Simulation eine kostengünstige Analyse einer großen Anzahl von Kupferlagendesigns ohne aufwändige Prototypenfertigung. Dazu gehören insbesondere die Lochdimensionierung sowie der Kupferlagenaufbau. Das Vorgehen ist im Rahmen des Projekts SiWOLAK [135] unter Mitwirkung studentischer Arbeiten [S8–S10]

entwickelt und in promotions-bezogenen eigenen Veröffentlichungen [P11] der Fachwelt zugänglich gemacht worden.

4.1.1 Aufbau des fluidmechanischen Modells zur Berechnung des transienten Lotdurchstiegs

Für die Berechnung des Lotdurchstiegs wird im Folgenden das Modellierungsvorgehen dargelegt und in Bild 38 veranschaulicht. Mit Hilfe eines Pythonskripts wird die Lötstelle automatisiert gemäß des Lötstellendesigns definiert und die Geometrie in ANSYS Spaceclaim erzeugt (Bild 38 (1-2)). Zur räumlichen Diskretisierung wird das CAD-Modell in finite Kontrollvolumina unterteilt (Bild 38 (3)). Die temperaturabhängigen Materialmodelle und die Prozessrandbedingungen werden in ANSYS Fluent definiert, siehe Bild 38 (4). Zur Abbildung des Lötprozesses werden Materialmodelle für die Festkörper und die Fluiddomäne definiert. Die Leiterplatte wird über temperaturunabhängige Materialmodelle für Kupfer, Epoxidharz und Lötstopplack abgebildet (siehe Tabelle 12 im Anhang). Die Lötstopplackschicht wird grundsätzlich mit einer Dicke von 45 μm angenommen.

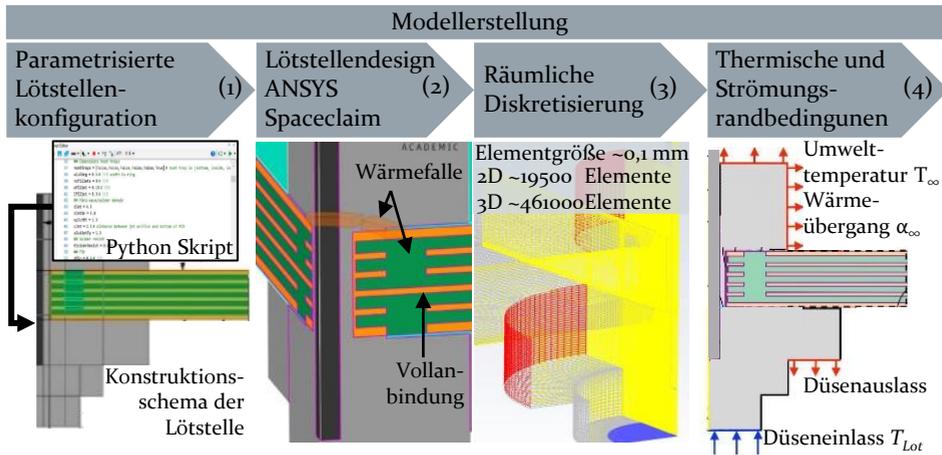


Bild 38: Aufbau des Simulationsmodells ausgehend von der parametrisierten Geometriemodellerstellung (1, 2), der Vernetzung (3), der Definition der Randbedingungen (4) (in Anlehnung an [P11, S8, S9])

Zur Modellierung des Bauteilpins werden die in Kapitel 3.3 gemessenen thermischen Widerstände $R_{th,exp}$ und Kapazitäten $C_{th,exp}$ mit Pinmasse m_{pin} und Pinquerschnitt A_{pin} mit den Formeln (23) und (24) in äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{pin} und spezifische Wärmekapazität c_{pin} für den modellierten Dummy-Pin umgerechnet.

$$\lambda_{pin} = \frac{l_{pin}}{R_{th,exp} \cdot A_{pin}} \quad (23)$$

$$c_{pin} = \frac{C_{th,exp}}{m_{pin}} \quad (24)$$

Zur Abbildung des Erstarrungsverhaltens der Lotlegierung und Begrenzung des Lotdurchstiegs bei Unterschreitung der Lotsolidustemperatur in der Lotsäule werden die Oberflächenspannung, die Viskosität und die Dichte des Lotes temperaturabhängig definiert, wie in Bild 39 skizziert.

--- Oberflächenspannung in N/m — Viskosität in mPa s — Dichte in Kg/m³

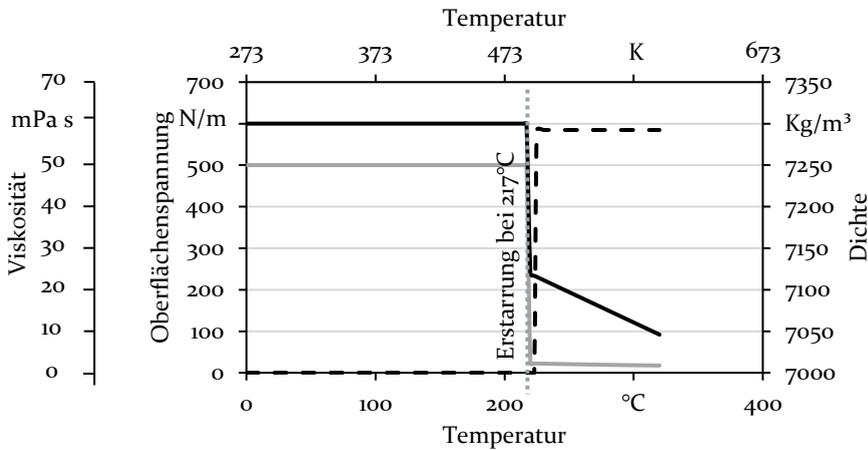


Bild 39: Temperaturabhängige Fluideigenschaften für SAC305 zur Modellierung des Erstarrungsverhaltens des Lotes mit den Materialparametern aus Tabelle 13 und Tabelle 14 im Anhang (Daten aus [P11, S8, S9])

Schematisch werden die Fluideigenschaften mit durch die temperaturabhängigen Formeln (25) bis (27) für die Oberflächenspannung $\sigma_0(T)$, die Dichte $\rho(T)$ und die Viskosität $\eta(T)$ aus [152] abgebildet. Tabelle 14 im Anhang listet die jeweiligen Koeffizienten A-G sowie thermodynamische Materialeigenschaften und den Benetzungswinkel oberhalb der Liquidustemperatur auf.

$$\sigma_0(T) = A - B \cdot T \quad (25)$$

$$\rho(T) = C - D \cdot T \quad (26)$$

$$\eta(T) = E - F \cdot T + G \cdot T^2 \quad (27)$$

Durch das Absinken der Oberflächenspannung bei Erstarrungstemperatur bzw. im Erstarrungsbereich nicht-eutektischer Lotlegierungen werden die

Kapillarkräfte so reduziert, dass das Lot nicht weiter im Loch steigen kann. Die Eigenschaften im erstarrten Zustand sind konstant, siehe Tabelle 13 im Anhang.

Der Wärmeübergang von der simulierten Lötstelle an die Umgebung ist durch natürliche Konvektion mit einer Umgebungstemperatur von 30°C mit Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = 5 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ modelliert. Der Wärmeintrag durch den Lotstrom wird durch die Definition der Strömungsrandbedingungen am Düseneinlass mit der jeweiligen Lottemperatur festgelegt, siehe Bild 38 (4). Die Initialtemperatur des Modells bildet den vorgeheizten Zustand der Lötstelle ab. Die prozessseitigen Randbedingungen im Selektivwellenlötprozess werden über den Düseninnendurchmesser, die Lottemperatur sowie die Vorheiztemperatur als Initialtemperatur der Festkörper festgelegt. Die Lötkontaktzeit wird über die Anzahl der Zeitschritte und die Zeitschrittweite gesteuert. Der konvektive Wärmeübertrag vom Lotstrom auf die Lötstelle wird während der Simulation über das Strömungsfeld der Düse errechnet. Am Einlass der Düse wird dabei ein Rohrströmungsprofil angenommen, beschrieben durch Formel (28), wie in Bild 40 gezeigt. Dabei wird von einer laminaren Strömung ausgegangen.

$$u(y) = u_{max} \left[1 - \left(\frac{y}{r_D} \right)^2 \right] \quad (28)$$

Mit:

r_D Innenradius der Lotdüse $r_D = 0,0015 \text{ m}$

$u(y)$ Strömungsprofil des Geschwindigkeitszuflusses

u_{max} maximale Strömungsgeschwindigkeit des Lots aus Energie- und Masseerhaltungsgleichung mit Wellenhöhe h_{Welle} bestimmt nach

$$u_{max} = \sqrt{2 g h_{Welle}} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2} \cdot 0,004 \text{ m}} = 0,28 \text{ m s}^{-1}$$

Das Modell wird in zwei Berechnungsstufen berechnet, wie in Bild 40 skizziert. In der ersten Stufe wird das Strömungsfelds des Lotes um die Lötstelle vorberechnet. Mit dem Ergebnis wird in der zweiten Berechnungsstufe die transiente Position der Lotfließfront, der Lotdurchstieg, berechnet. Damit können alle wesentlichen Effekte des Lötprozesses und des Lötstellendesigns abgebildet werden. Im zweiten Berechnungsschritt wird je Zeitschritt der Lotdurchstieg berechnet. Die Zweiphasenströmung aus Luft und Lot im Lotspalt wird mit Hilfe einer expliziten Formulierung der Volume-of-Fluid (VoF) -Methode abgebildet. Dabei werden die Volumenanteile F der Fluide Lot und Luft im diskretisierten Netz berechnet. Die Lotfließfront

entspricht dann den Elementen, in denen gilt $F = 0,5$, also der Grenze, an der sowohl Lot als auch Luft vorhanden ist. Die z -Position der Fließfront ist der Lotdurchstieg. Zur Grenzflächenrekonstruktion wird das Piecewise Linear Interface Construction (PLIC)-Verfahren und eine druckbasierte, explizite Formulierung genutzt.

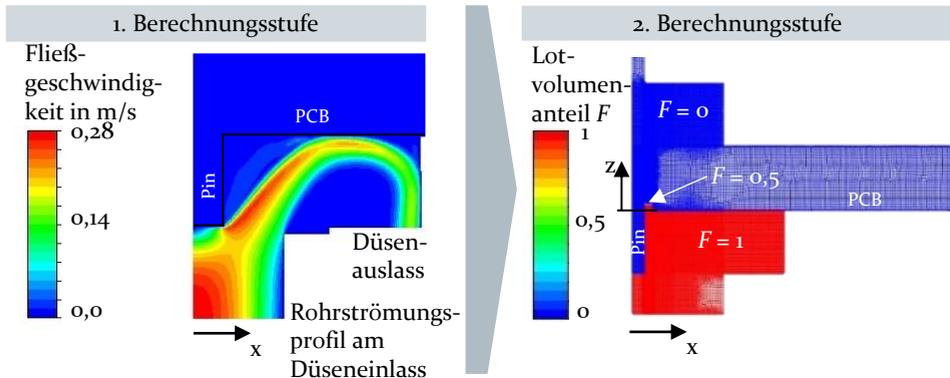


Bild 40: Zweistufige Berechnung des Simulationsmodells; 1. Vorberechnung des Strömungsfelds und 2. Berechnung des Lotdurchstiegs

In Abhängigkeit des Lotvolumenanteils F im Lotspalt wird die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen für die finiten Volumina mittels numerischer Verfahren approximiert. Die instationären Summanden der Erhaltungsgleichungen werden dabei durch Zeitschrittverfahren berechnet. Die Lösung der Erhaltungsgleichungen wird durch das Aufwind-Differenzen-Schema (ADS) 2. Ordnung realisiert. Da für den Druck keine unabhängige Gleichung vorhanden ist, muss dieser iterativ mit dem Druckkorrekturverfahren Pressure implicit with splitting operators (PISO) berechnet werden. Zur Berechnung des Lotdurchstiegs wird die zeitabhängige Verteilung des flüssigen, inkompressiblen Lotes und der Luft in der Fluiddomäne überwacht.

Zur Definition einer geeigneten Volumenelementgröße für die räumliche Diskretisierung werden in einer Netzstudie die Simulationsdauer, die Netzqualitätskriterien und die Abweichung der numerischen Ergebnisse mittels Vergleiches zu einem Referenzlötversuch untersucht, siehe Bild 41. Die Verformungsmaße zur Beschreibung der Qualität der Netzelemente Schiefe (Skewness) und Seitenverhältnis (Aspekt Ratio) sollen dabei unter 0,75 bzw. nahe an 1 liegen. Die Ergebnisse in Bild 41 zeigen eine geringe Abhängigkeit der Simulationsdauer von der Knotenzahl. Abweichung der numerischen Ergebnisse liegt unterhalb von 5% und damit unterhalb der Auflösung zerstörungsfreier Inspektionsmethoden sowie der anzunehmenden Prozessstreuung [33, P2]. Damit wird die ausreichende

Vernetzungseinheit Nr. 4 mit rund 19500 Elementen der Größe 0,1 mm für weitere Untersuchungen angewandt.

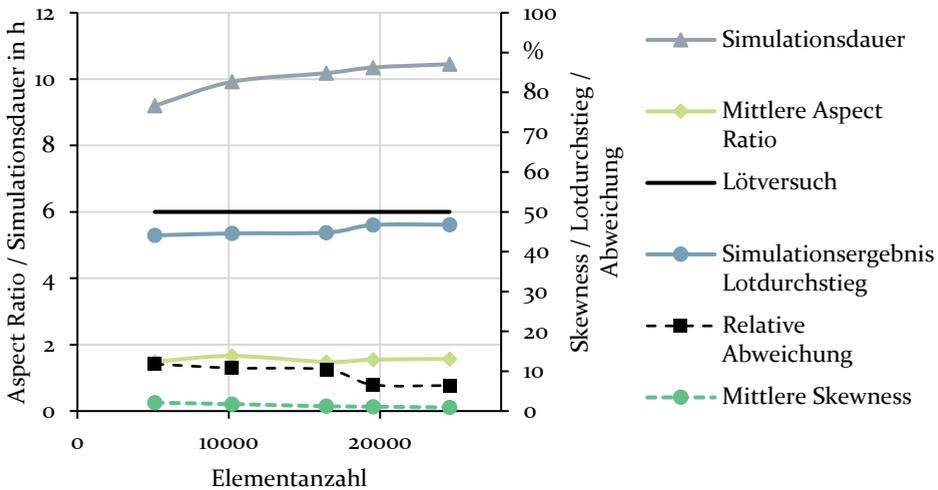


Bild 41: Netzstudie zur Ermittlung einer geeigneten Diskretisierung des Rechnernetzes (Daten aus [P11, S9])

Für eine stabile, explizite Berechnung wird die zeitliche Diskretisierung auf eine Zeitschrittweite von 0,1 ms mit 20 Iterationen pro Zeitschritt festgelegt. Damit liegt die Courant-Friedrichs-Levy-Zahl (CFL) unterhalb des kritischen Werts von 0,6.

4.1.2 Validierung des numerischen Modells anhand von Lötversuchen

Zur Validierung des numerischen Modells werden experimentelle Lötgergebnisse mit den Simulationsergebnissen verglichen. Dabei wird der Fokus insbesondere auf den Volumenanteil des Lotes im Lotspalt zum Ende der Lötkontaktzeit gelegt und mit Röntgenaufnahmen der Versuchslötungen verglichen. Für die in der Netzstudie eingesetzte Lötstelle zeigt Bild 42 die zeitabhängige Temperatur und Lotdurchstiegsentwicklung sowie den Volumenanteil F und das Röntgenergebnis des dazugehörigen Lötversuchs.

Der Vergleich der transienten Rechenergebnisse des 2D- und des 3D-Modells zeigt ebenfalls sehr gute Übereinstimmung der prozessrelevanten Abweichung mit dem Lötgergebnis (siehe Bild 43). Damit kann der Selektivwellenlötprozess numerisch mit sehr guter Genauigkeit abgebildet werden. Die Rechenzeit auf einem CPU-Kern für einzelne Lötstellen liegt bei ca. 1 h/Lötsekunde für 2D-Modelle. Für 3D-Modelle ist die Dauer mit ca.

24 h/Lötsekunde erheblich größer, bewegt sich jedoch in einer mit [10] vergleichbaren Größenordnung.

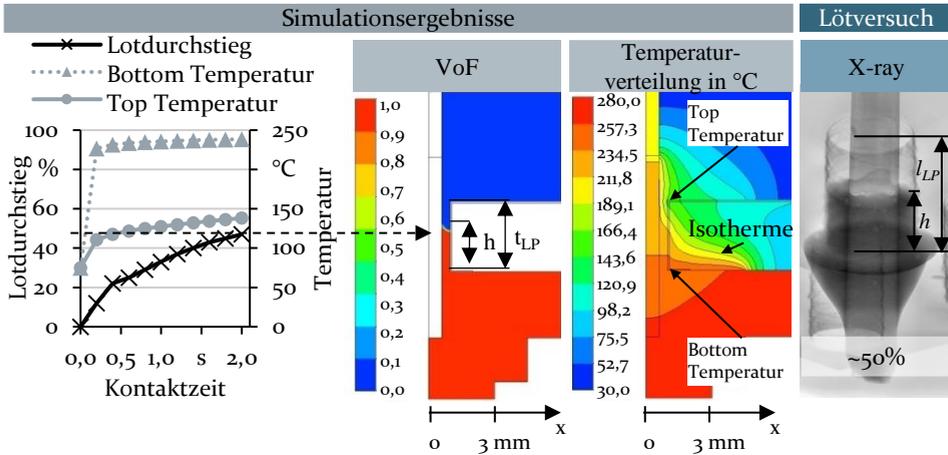


Bild 42: Vorgehen zur Auswertung der Simulationsergebnisse am Beispiel eines zweilagigen Kupferlagendesigns mit 35 μm , Foko-Pin, 75 °C Vorheizung und 260 °C Lottemperatur (Daten aus [P11, S9])

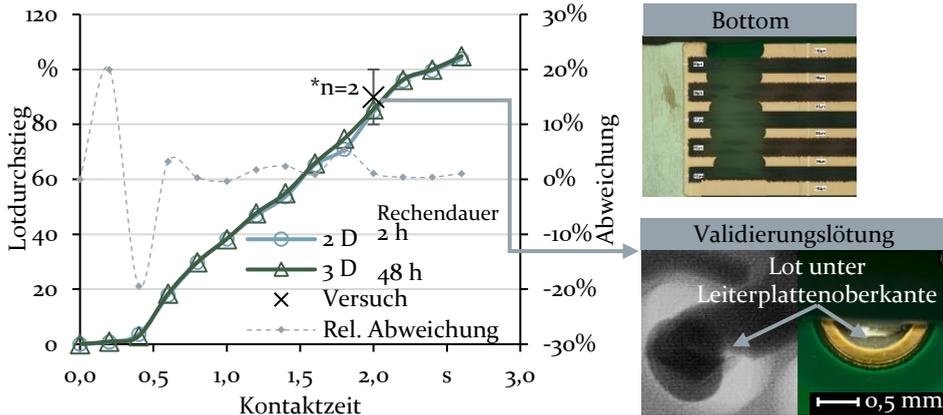


Bild 43: Abgleich des 2D- und 3D-Modells anhand einer Lötstelle mit Bottom-Lagenanbindung (rechts oben), Drain-Pin und dem experimentellen Lötresultat bei 100 °C Vorheizung und 280 °C Lottemperatur zur Validierung (rechts unten) (Daten aus [S8])

Der Vergleich von Lötversuchen mit Lötstellen unterschiedlichen Kupferlagendesigns sowie Bauteilpins und Prozessparametern (Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang) mit der simulativen Vorhersage des Lotdurchstiegs zeigt in Bild 44 eine sehr hohe Vorhersagegüte. Sowohl kritische Verhältnisse aus Lötwärmebedarf und Lötwärmeangebot, als auch sehr gut fertigbare Lötstellen werden treffsicher vom Simulationsmodell

beurteilt. Die Ausreißer der Lötexperimente 19 und 22, je gelötet mit einer 4/8er Düse, kann auf eine etwas zu geringe Sensitivität des Modells hinsichtlich des Lotdüsendurchmessers zurückgeführt werden. Der paarweise Vergleich der mit Ausnahme des Düsendurchmesser gleiche Lötexperimente 12 und 19 sowie 13 und 22 weisen jeweils ein nahezu gleiches Simulationsergebnis für die kleinere 3/6er Düse auf, wie in Bild 44 gezeigt.

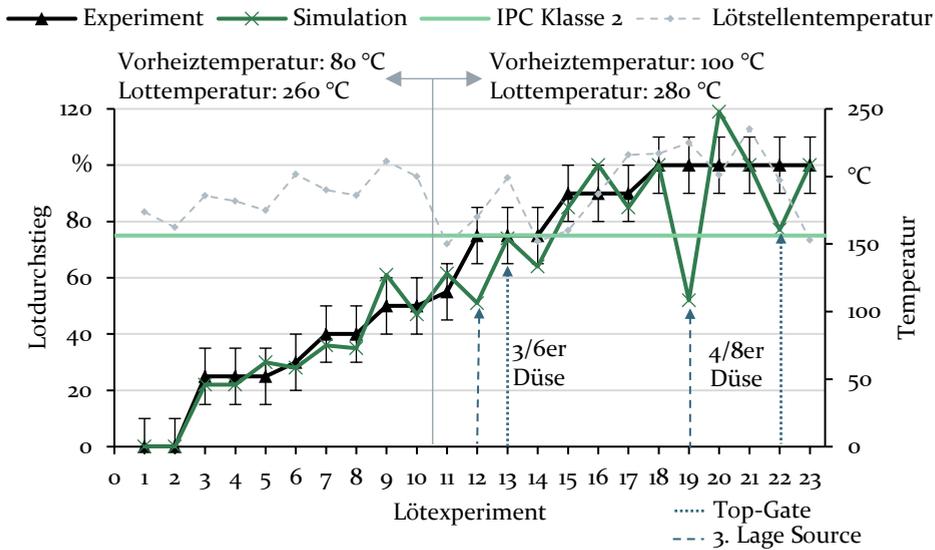


Bild 44: Validierung der Simulationsergebnisse durch Vergleich mit Lötgergebnissen, RMSE 10 %, Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang (Daten aus [P11, S8, S9])

Der Root Mean Squared Error (RMSE) und der Mean Absolute Percentage Error (MAPE) betragen 10 %. Diese Abweichung kann vor dem Hintergrund der eingeschränkten Inspektionsauflösung bei der manuellen Röntgeninspektion von etwa 10 % und der Lötprozessstreuung von bis zu 10 % als gering angesehen werden [P2]. Die Analyse der Simulationsergebnisse hinsichtlich der Lötstellentemperatur bescheinigt eine positive Korrelation von rund 0,85 zwischen Lotdurchstieg und Lötstellentemperatur, siehe Bild 44. Die Messung basiert dabei auf der maximal erreichten Temperatur auf dem Lötpad der Lotzielseite, wie in Bild 42 in der Temperaturverteilung eingezeichnet. [P11]

4.1.3 Numerische Untersuchung der Designparameter auf den Lotdurchstieg

Mit Hilfe des numerischen Modells können weitere Varianten des Leiterplattendesigns feingranular und kostengünstig untersucht werden. Die

Prozessparameter werden für diese Untersuchungen bei 100 °C Vorheizung und 280 °C Lottemperatur gehalten. Sofern keine Änderung angegeben wird, entspricht der Kupferlagenaufbau dem der drei MOSFET-Lötstellen aus Bild 14 in Kapitel 3.1. Zur Untersuchung der Einflüsse des Leiterplatten-designs werden folgende Parameter variiert:

- Lochdimensionierung
 - Leiterplattendicke
 - Lochdurchmesser
- Kupferlagenaufbau
 - Dicke der Kupferschicht
 - Lage der Kupferlagenanbindung
 - Art der Anbindung

Lochdimensionierung

Insbesondere die Dimensionierung des Lochdurchmessers im Verhältnis zur Leiterplattendicke wird analysiert. Die geometrischen Verhältnisse des Lochspalts werden von der Leiterplattendicke und dem Lochdurchmesser definiert, welche im Folgenden einzeln und zuletzt aggregiert untersucht werden. Die mechanische und elektrische Belastbarkeit kann durch größere Leiterplattendicke gesteigert werden. Dies führt jedoch zu einem größeren Lötwärmebedarf, was den Lotdurchstieg unabhängig von der Lage der Anbindung erheblich verzögert, wie Bild 45 zeigt.

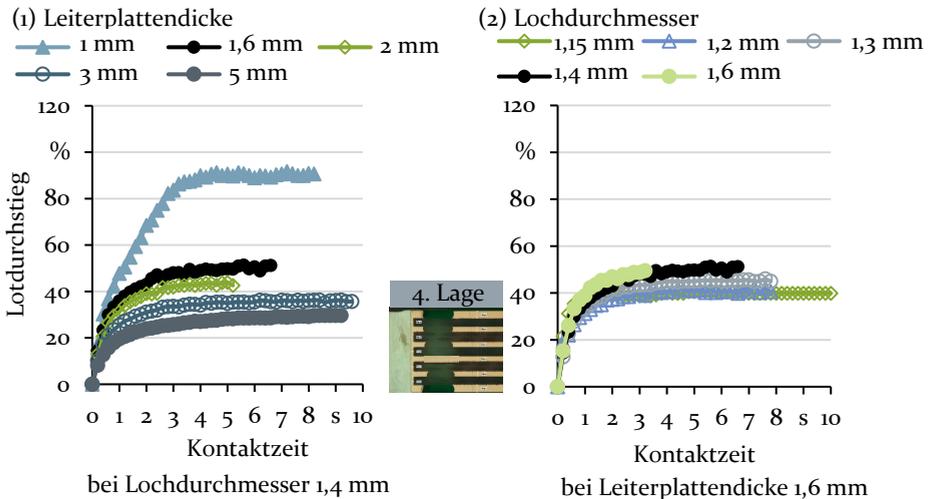


Bild 45: Einfluss der Variation der Leiterplattendicke (1) und des Lochdurchmessers (2) auf den Lotdurchstieg, am Beispiel Kupferlagenanbindung: 4. Lage, Bauteil: source (Daten aus [S8, S9])

Bild 68 und Bild 69 im Anhang beinhalten ergänzend die Ergebnisse der Untersuchung für Kupferanbindung in den Lagen Top und Bottom. Für die betrachteten Wertebereiche der Leiterplattendicke und des Lochdurchmessers zeigt die Variation der Leiterplattendicke bei gleichem Kupferlagendesign einen stärkeren Einfluss auf den Verlauf des Lotdurchstiegs als die Veränderung der Lochdurchmessers. Wie bereits experimentell in Kapitel 3.1.3 gezeigt, geht ein größerer Lochspalt mit verbessertem Lotdurchstieg einher. Da der Einfluss der Spaltbreite auf den Flussmittelauftrag in der Lötstelle numerisch nicht abgebildet wird, kann übereinstimmend mit Kapitel 3.1.3 geschlussfolgert werden, dass der größere Wärmeeintrag bei größerem Lotspalt stärker wirkt als die Verringerung der Kapillarkräfte. Für die Ermittlung des Einflusses der Lochdimensionierung werden Lochdurchmesser, Leiterplattendicke und Pindurchmesser aggregiert durch die bezogene Gap-Ratio-Kennzahl ausgedrückt. Dies erlaubt eine Beschreibung geometrisch äquivalenter Verhältnisse. Für nicht runde Pins wird der flächenäquivalente Pindurchmesser herangezogen. Für eine geeignete Ähnlichkeitsbeschreibung der Lochdimensionierung muss bei gleicher Kennzahl ein äquivalenter Lotdurchstieg erreicht werden. Dafür werden die Simulationsstudien aus Bild 45, Bild 68 und Bild 69 ausgewertet und über der jeweiligen Gap-Ratio aufgetragen. Die auf Grundlage dieser Überlegungen in Bild 46 zusammengefassten Simulationsergebnisse bestätigen die Gültigkeit der Gap-Ratio Kennzahl.

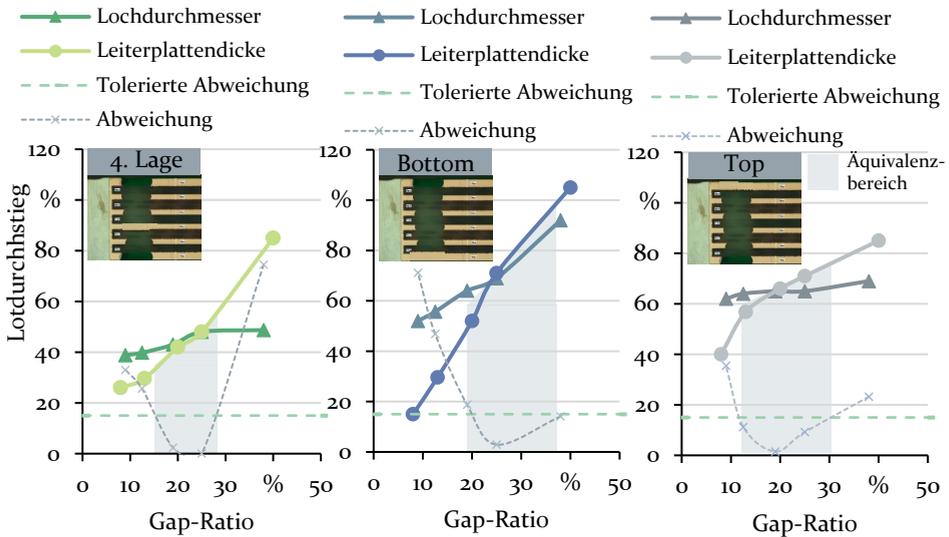


Bild 46: Bestimmung des Gültigkeitsbereichs der Gap-Ratio-Kennzahl zur Beschreibung äquivalenter Lochdimensionen, hier Variation der Leiterplattendicke (1 mm bis 5 mm) und des Lochdurchmessers (1,15 mm bis 1,6 mm) bei konstantem Pindurchmesser (1 mm) je Kupferanbindung (Daten aus [S8])

Im technisch relevanten Bereich von 15-35 % wird die Auswirkung der Lochdimensionierung auf den Lotdurchstieg durch veränderte Leiterplattendicke und Lochdurchmesser mit einer tolerierten Abweichung von 15 % äquivalent abgebildet. Damit entspricht die Gap-Ratio-Kennzahl zur Beschreibung der Lochdimensionierung einem geeigneten Äquivalenzkriterium und validiert die Arbeit von Chang et al. in [109] für die Anwendung als Designkennzahl. Diese kann somit einerseits als Designregel aufgenommen und andererseits bei der datenbasierten Modellierung in Kapitel 5 zur Dimensionsreduktion eingesetzt werden.

Kupferlagendesign

Weiterhin definiert das Kupferlagendesign den Wärmebedarf, wie in Kapitel 3.1.3 und 3.3 experimentell gezeigt. Wesentliche Parameter sind dabei die Lage der Kupferanbindung in Dickenrichtung der Leiterplatte sowie deren Dicke und Kupferlagendesign. Diese Faktoren werden in den folgenden Parameterstudien untersucht.

Lage der Anbindung

Dafür wird in Bild 47 die Lage der Anbindung für die Leiterplattendicke 2 mm und 5 mm variiert. Je dicker die Leiterplatte, desto geringer fällt der Lotdurchstieg aus. Besonders der Vergleich der Leiterplattendicken anhand einer Lötstelle ohne Lagenanbindung verdeutlicht zunächst den Einfluss der Leiterplattendicke auf den Lotdurchstieg. Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität und der geringen Wärmeleitfähigkeit des Basismaterials der Leiterplatte wird die Lötstelle in der begrenzten Lötzeit nicht ausreichend warm, was sich im reduzierten Lotdurchstieg niederschlägt.

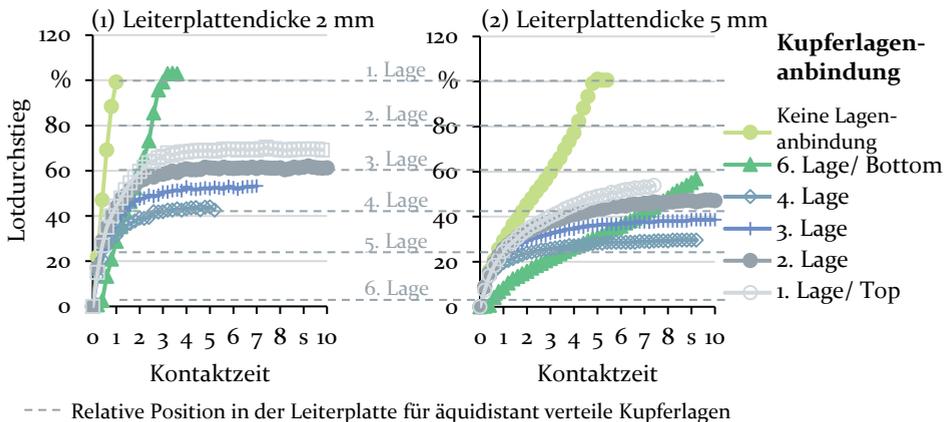


Bild 47: Einfluss der Lage der Anbindung; für Leiterplattendicken 2 mm (1) und 5 mm (2) (Daten aus [S8])

Die Lage der Anbindung in Dickenrichtung legt den Ort der Kupferlage als thermische Senke fest. Durch eine äquidistante Verteilung der Kupferlagen in den unterschiedlich dicken Leiterplattenmodellen ergibt sich eine auf die Leiterplattendicke normierte, relative Position der Lagen, siehe Bild 47. Dadurch ist ersichtlich, dass die Lotsäule nicht zwingend direkt an der Kupferanbindung als Wärmesenke erstarrt. Innenlagen sind besonders kritisch, da der Wärmeabfluss durch Konduktion zu beiden Seiten in das Basismaterial größer ist als bei einseitiger natürlicher Konvektion in Außenlagen. Der absolute Lotdurchstieg für die Bottom-Anbindung beträgt bezogen auf die Leiterplattendicke jeweils ca. 2 mm. Für die 2 mm Leiterplatte ist damit die Bottomlage die zu präferierende Lage der Anbindung, was auch experimentelle Untersuchungen bestätigen [P2]. Bei sehr dicken Leiterplatten wird laut dem Simulationsergebnis der quasithermische Gleichgewichtszustand innerhalb des verfügbaren Prozessfensters nicht zwingend erreicht.

Kupferlagendicke

Für die Untersuchung des Einflusses der Kupferlagendicke werden separat Außenlagendicken Bild 48 (1) und Innenlagendicken Bild 48 (2) schrittweise verändert.

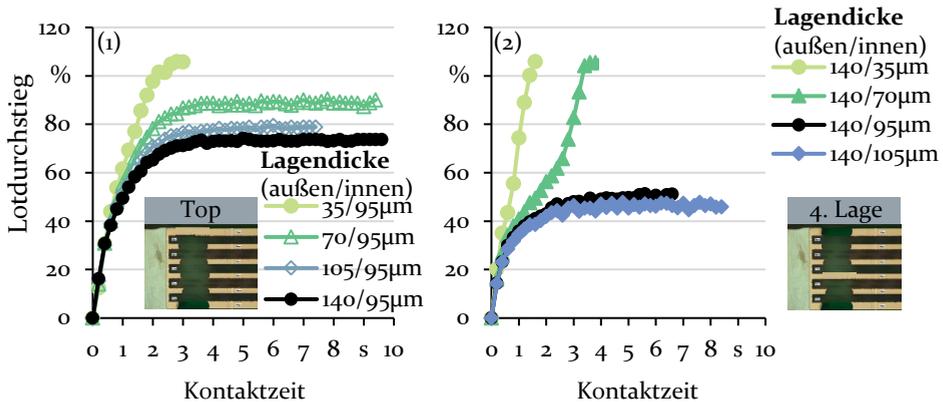


Bild 48: Einfluss der Kupferlagendicke (außen/innen) auf den Lotdurchstieg unter Variation der Außenlagendicke (1) und der Innenlagendicke (2) bei Leiterplattendicke 1,6 mm (Daten aus [S8])

Die Reduktion der Dicke der Außen- und Innenlagen erhöht den thermischen Widerstand in horizontaler Richtung, was die Wärmespreizung verringert und damit den Lotdurchstieg fördert. Dies gilt äquivalent für dickere Leiterplatten, wie Bild 70 im Anhang zeigt. Die Kritikalität von Innenlagenanbindungen wird dabei erneut unterstrichen. Qualitativ geht dieses Ergebnis mit den Lötversuchen in Kapitel 3.1.3 einher.

Art der Anbindung

Je nach Anforderung an die Stromtragfähigkeit sowie das Wärmemanagement im Betrieb der Leiterplatte ist die Reduktion der Kupferlagendicke keine Option. Zur Vergrößerung des horizontalen thermischen Widerstands in den Kupferlagen eignet sich dann die thermische Entkopplung mit Hilfe von WF. Zur Berechnung der Wärmefallendesigns dient ein geverteltes 3D Modell mit $4,8 \times 10^5$ Knoten mit den gleichen Elementgrößen wie die des 2D Modells. Die Dimensionierung der Wärmefallenparameter wird in Bild 49 und Tabelle 6 dargestellt. In Abhängigkeit der Steglänge und Stegbreite wird der resultierende thermische Widerstand der WF nach Formel (15) variiert.

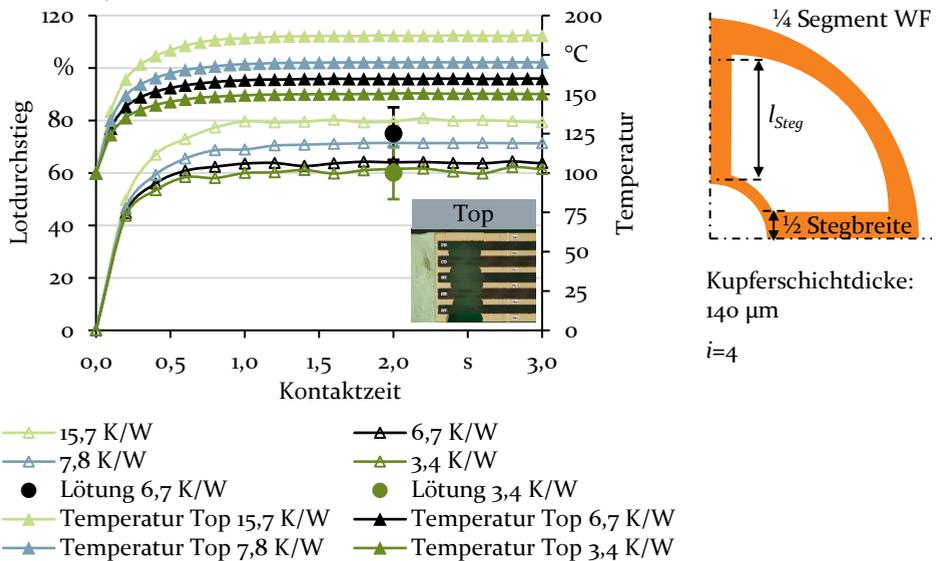


Bild 49: Einfluss des vergrößerten horizontalen thermischen Widerstands durch Reduktion des Anschlussquerschnitts zwischen Durchmetallisierung und Kupferlage auf den Lotdurchstieg und Temperaturentwicklung auf der Lotzielseite für WF in 1. Lage (Top-Lage) mit Foko-Pin (Daten aus [S8])

Wie Bild 49 zeigt, steigt mit dem thermischen Widerstand der WF die erreichte Temperatur der Lotzielseite und in der Folge auch der Lotdurchstieg. Die Analyse der Temperaturentwicklung aus der Simulation in Korrelation mit dem Lotdurchstieg zeigt übereinstimmend mit [P11, S10], dass die Temperatur auf dem Restring der Lotzielseite stark mit dem Lotdurchstieg korreliert. Die Dimensionierung hinsichtlich der Lagendicke und der Stegbreite wird im Design anhand der erforderlichen Stromtragfähigkeit der elektrischen Verbindung definiert. Die Steglänge bietet somit einen geeigneten Parameter zur Erhöhung des thermischen Widerstands der WF,

um den Wärmebedarf der Lötstelle zu kontrollieren. Die durchgeführten Lötversuche bestätigen die Relevanz dieses Faktors.

Tabelle 6: Designparameter der Wärmefallendesigns und des Simulationsmodells (Daten aus [S8])

	Stegbreite	Steglänge	Thermischer Widerstand	Anzahl Elemente	Lotdurchstieg
1	0,3 mm	0,5 mm	7,8 K/W	561.011	0,75 n = 1
2	0,7 mm	0,5 mm	3,4 K/W	527.156	0,6 n = 6
3	0,3 mm	1 mm	15,7 K/W	544.761	
4	0,7 mm	1 mm	6,7 K/W	539.687	0,75 n = 2

Zusammenfassung

Die Zusammenstellung dieser Designeinflüsse bestätigt in Ergänzung zu den experimentellen Ergebnissen in Kapitel 3.1 insbesondere den Einfluss der Lochdimensionierung unter Berücksichtigung der Leiterplattendicke. Die Gap-Ratio kann als geeignete Äquivalenzkennzahl zur Bewertung der Lochdimensionierung herangezogen werden. Zudem wird der Einfluss des thermischen Widerstands der Kupferlagen für den Wärmebedarf einer Lötstelle unterstrichen. Ergänzende Simulationsstudien im Anhang in Bild 71 und Bild 72 zeigen den dominanten Einfluss der Erstarrungstemperatur auf den Lotdurchstieg und bestätigen die Relevanz des Lotmaterialmodells.

4.2 Analytische Abschätzung des Lotdurchstiegs

Analytische Modelle zeichnen sich durch die hohe Transparenz und Erklärbarkeit der Ergebnisse bei gleichzeitig geringen Rechenkosten aus. Dem gegenüber steht ein Verlust des Detailgrads und damit der Aussagekraft aufgrund vorzunehmender Vereinfachungen. Wegen der guten Korrelation zwischen Lötstellentemperatur und Lotdurchstieg wird für das im folgenden eingeführte Modell die Wärmeentwicklung im Leiterplattendesign als entscheidendes Kriterium für die Berechnung des Lotdurchstiegs angenommen [P11]. Dafür ist eine ausreichende örtliche und zeitliche Auflösung notwendig.

Zur Bestimmung der Temperaturentwicklung in der Lötstelle wird das Leiterplattenlayout an jeder Lötstelle hinsichtlich des Kupferlagenaufbaus untersucht und jeweils thermisch charakterisiert. Aus dem thermischen Widerstand einer Kupferlage lässt sich durch die thermische Abklinglänge der erwärmte Bereich um die Lötstelle bestimmen. Aus den Abklinglängen

aller Kupferlagen um die Lötstelle kann so die thermische Kapazität der Kupferlage ermittelt werden. Durch die Zusammenstellung dieser Parameter für die Lötstelle und des Bauteilpins als thermische Ersatzschaltbilder kann der Lötwärmebedarf der Lötstelle beschrieben werden. Unter Berücksichtigung der thermischen Prozessrandbedingungen kann mit der thermischen Ersatzschaltungen die Temperaturentwicklung in der Lötstelle berechnet werden. Daraus kann dann der Lotdurchstieg bereits während der Designphase näherungsweise abgeschätzt werden.

Das Vorgehen ist im Rahmen des Projekts SiWOLAK entwickelt [135] und in promotionsbezogenen eigenen Veröffentlichungen [P3] der Fachwelt zugänglich gemacht worden.

4.2.1 Analytische Modellierung der Lötstelle

Im Folgenden werden die angewandten thermischen Ersatzschaltungen als Modelle zur Beschreibung des thermischen Verhaltens von Bauteilpin und Kupferlagendesign eingeführt. Bild 50 zeigt die Ansätze zur analytischen Modellierung von THT-Bauteilpins und Kupferlagendesigns auf. Mit den Ersatzschaltungen kann des Prozessergebnis abgeschätzt werden.

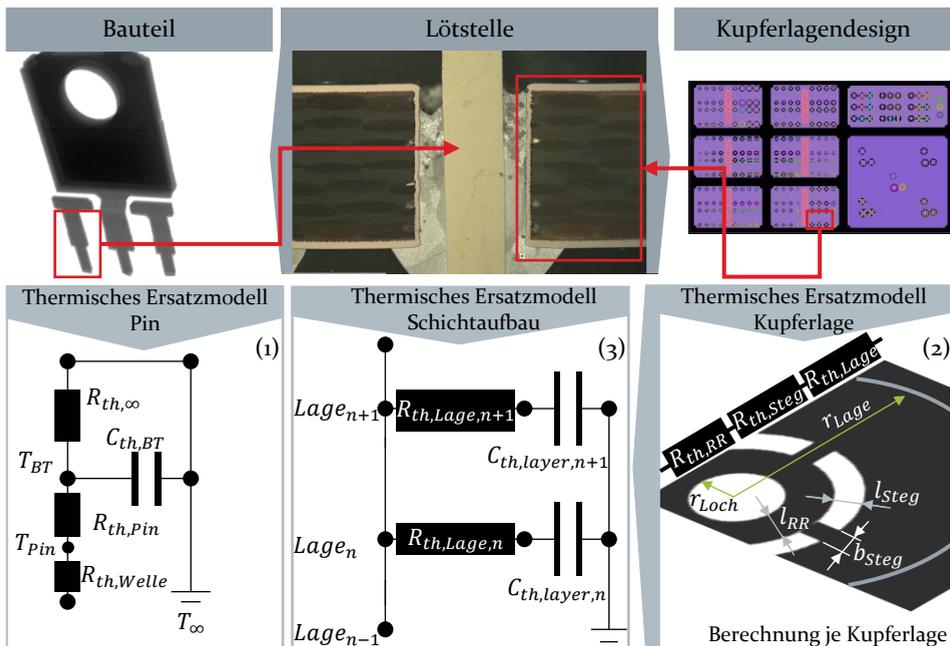


Bild 50: Analytischer Ansatz zur Beschreibung thermischer Eigenschaften von THT-Bauteilpins und Leiterplattendesigns [13, P3]

Analytische Modellierung des Bauteilpins

Wie in Kapitel 3.1 und 3.3 aufgezeigt, sind THT-Bauteile auf Pinlevel zu modellieren. Zu diesem Zweck wird der Pin mit der thermischen Ersatzschaltung (Bild 50 (1)) aus [13] eingesetzt. Die thermischen Widerstands- und Kapazitätswerte der Bauteile können geeignet geschätzt, oder wie in Kapitel 3.3 eingeführt, gemessen werden. Der thermische Widerstand im Bauteilkörper und die thermische Kapazität des Pins werden bei der anschließenden Berechnung, Klein-Wassink folgend, vernachlässigt [13]. Die Berechnung der Temperaturentwicklung basiert auf den Formeln (6) bis (11).

Analytische Modellierung der Kupferlagendesigns

Die Beschreibung der thermischen Eigenschaften des Schichtaufbaus von beliebigen Mehrlagenleiterplatten ist der Kern des Modells. Im Gegensatz zu dem in Kapitel 2.3.3 genannten Top-Down-Verfahren beruht die Bottom-Up-Beschreibung der thermischen Eigenschaften der Lötstelle auf der separaten Abschätzung der individuellen thermischen Widerstände und Kapazitäten der Kupferlagendesigns jeder Lage n . Aus dem Verhältnis aus Wärmeleitung entlang der Kupferlage und Wärmedissipation an die umgebende Substratlage kann mit den Formeln (5), (29) und (30) die thermische Abklinglänge $l_{thermal}$ für jede Lage n berechnet werden. [13, 133]. Diese entspricht dem tatsächlich erwärmten Anteil der jeweiligen Lage.

$$l_{thermal,n} = \sqrt{\frac{\lambda_n l_n l_s}{\lambda_s}} = \sqrt{\frac{R_{th,diss,n}^a}{R_{th,Lage,n}}} \quad (29)$$

$$R_{th,diss,n}^a = 1 / \left(\frac{1}{A_{k,Lage\ n+1} \cdot R_{th,vert,Lage\ n+1}} + \frac{1}{A_{k,Lage\ n-1} \cdot R_{th,vert,Lage\ n-1}} \right) \quad (30)$$

$$R_{th,vert,Lage\ n\pm 1} = \frac{l_{Lage\ n\pm 1}}{A_{k,Lage\ n\pm 1} \cdot \lambda_{Lage\ n\pm 1}}$$

Parameter	Unit	Beschreibung
$R_{th,diss,n}^a$	Wm^2K^{-1}	Flächenspezifischer thermischer Widerstand gegen Dissipation in Nachbarlagen
$\lambda_{Lage\ n\pm 1}$	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit der Lage
$A_{k,Lage\ n\pm 1}$	mm^2	Kontaktfläche zur Nachbarlage
l_s	mm	Dicke der benachbarten Diskretisierungsschicht
l_n	mm	Dicke der Diskretisierungsschicht n

Durch Rotation dieser Abklinglänge $l_{thermal}$ um den Lötstellenmittelpunkt kann dann das erwärmte Volumen V_n und die im Lötprozess erwärmte Wärmekapazität $C_{th,n}$ jeder Schicht n berechnet werden.

$$C_{th,n} = m_n \cdot c_{p,n} = V_n \cdot \rho_n \cdot c_{p,n} \quad (31)$$

$$\text{Mit: } V_n = l_n \cdot l_{thermal,n}^2 \cdot \pi$$

Weiterhin kann der effektive thermische Widerstand berechnet werden, mit dem die Lötstelle in der jeweiligen Lage entwärmt wird. Aus der thermischen Länge lässt sich mit den Formeln (32) und (33) nach [133] der Wärmewiderstand einer theoretisch geometrisch unendlichen Schicht $R_{th,\infty,n}$ bzw. der realen endlichen Schicht $R_{th,Lage\ n}$ berechnen.

$$R_{th,\infty,n} = \frac{1}{(2 r_{Loch} + l_{thermal,n})\pi} \sqrt{R_{th,diss,n}^a \cdot R_{th,Lage,n}} \quad (32)$$

$$R_{th,Lage\ n} = R_{th,\infty,n} \coth\left(\frac{r_{Lage}}{l_{thermal,n}}\right) \quad (33)$$

Die spezifischen thermischen Widerstände des Kupferlagendesigns $R_{th,layer,n}$ der Lage n lassen sich, wie in Bild 50 (2) skizziert, mit den folgenden Gleichungen (34) bis (38) bestimmen. Dabei wird die Wärmeeinflusszone r_{Lage} initial auf Grundlage der Kupferflächenabmessungen, die an die Durchkontaktierung angebunden sind, abgeschätzt. Auf diese Weise können VA, WF und Signalleitungen, als sehr langer Steg einer WF, in dem Rechenmodell berücksichtigt werden.

Dafür wird die Wärmefalle in drei Summanden zerlegt und mit der Gleichung für radiale thermische Widerstände (34) bis (37) einzeln berechnet. Für die effektive thermische Leitfähigkeit $\lambda_{Steg,eff}$ im Bereich einer thermischen Freistellung wird in Formel (38) der Anteil der FR4 und Kupferquerschnittsfläche in der Lage herangezogen. Somit können analytisch für jede Lage der designabhängige thermische Widerstand und die thermische Kapazität berechnet werden. Mit diesen Ergebnissen wird im Folgenden ein analytisches 1-D Modell zur Beschreibung des Prozesses entwickelt.

$$R_{th,Lage,n} = R_{th,RR} + R_{th,Steg} + R_{th,Lage} \quad (34)$$

$$R_{th,RR} = \frac{\ln\left(\frac{r_{Loch} + l_{RR}}{r_{Loch}}\right)}{2 \pi \cdot l_{Lage} \cdot \lambda_{Lage}} \quad (35)$$

$$R_{th,Lage} = \frac{\ln\left(\frac{r_{Lage}}{r_{Loch} + (l_{RR} + l_{Steg})}\right)}{2 \pi \cdot l_{Lage} \cdot \lambda_{Lage}} \quad (36)$$

$$R_{th,Steg} = \frac{\ln\left(\frac{r_{Loch} + l_{Steg}}{r_{Loch}}\right)}{2\pi \cdot l_{Lage} \cdot \lambda_{Steg,eff}} \quad (37)$$

$$\lambda_{Steg,eff} = \frac{A_{Q,cu}\lambda_{cu} + A_{Q,FR4}\lambda_{FR4}}{A_Q} \quad (38)$$

$$= \frac{(n_{Steg} b_{Steg} \lambda_{cu}) + \lambda_{fr4}(2 (r_{Loch} + l_{Steg})\pi - n_{Steg}b_{Steg})}{2 (r_{Loch} + l_{Steg}) \pi}$$

Mit:

Parameter	Unit	Beschreibung
r_{Lage}	mm	Kupferlagenabmessung um Lötstelle
$\lambda_{Steg,eff}$		Effektive Wärmeleitfähigkeit der Stege
A_Q, A_{cu}, A_{fr4}		Gesamte und anteilige Querschnittflächen
n_{Steg}		Anzahl der Stege der WF
$R_{th,RR}, R_{th,Steg}$		Thermische Widerstände des Reststrings, der Stege
$R_{th,Lage}$		Thermischer Widerstand der Kupferfläche

4.2.2 Prozesssynthese und Ergebnisbewertung

Die thermischen Eigenschaften des Bauteilpins und der lagenweise analytisierte Lötwärmebedarf in Bild 51 (1) führen in Kombination mit den Prozessrandbedingungen zum Prozessmodell, wie schematisch in Bild 51 (2) skizziert. Das Modell erlaubt die Berechnung der transienten horizontalen Lagentemperaturen und die sukzessive Aufheizung in vertikaler Richtung. Aus der transienten numerischen Simulation zeigt sich, dass der primäre Wärmetransport aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von den Kupferschichten in das Substrat stattfindet. Für das Modell wird angenommen, dass die Welle die Lotquellseite und damit die angebundene vertikale Kupferhülse aufheizt. Von der Kupferhülse ausgehend dissipiert die Wärme horizontal in die angeschlossenen Kupferlagen, welche die Wärme verteilen und das Basismaterial mit geringer Wärmeleitfähigkeit aufheizen. Strömungsmechanische Effekte und der Wärmewiderstand zwischen Kupferlagen und Basismaterial werden vernachlässigt.

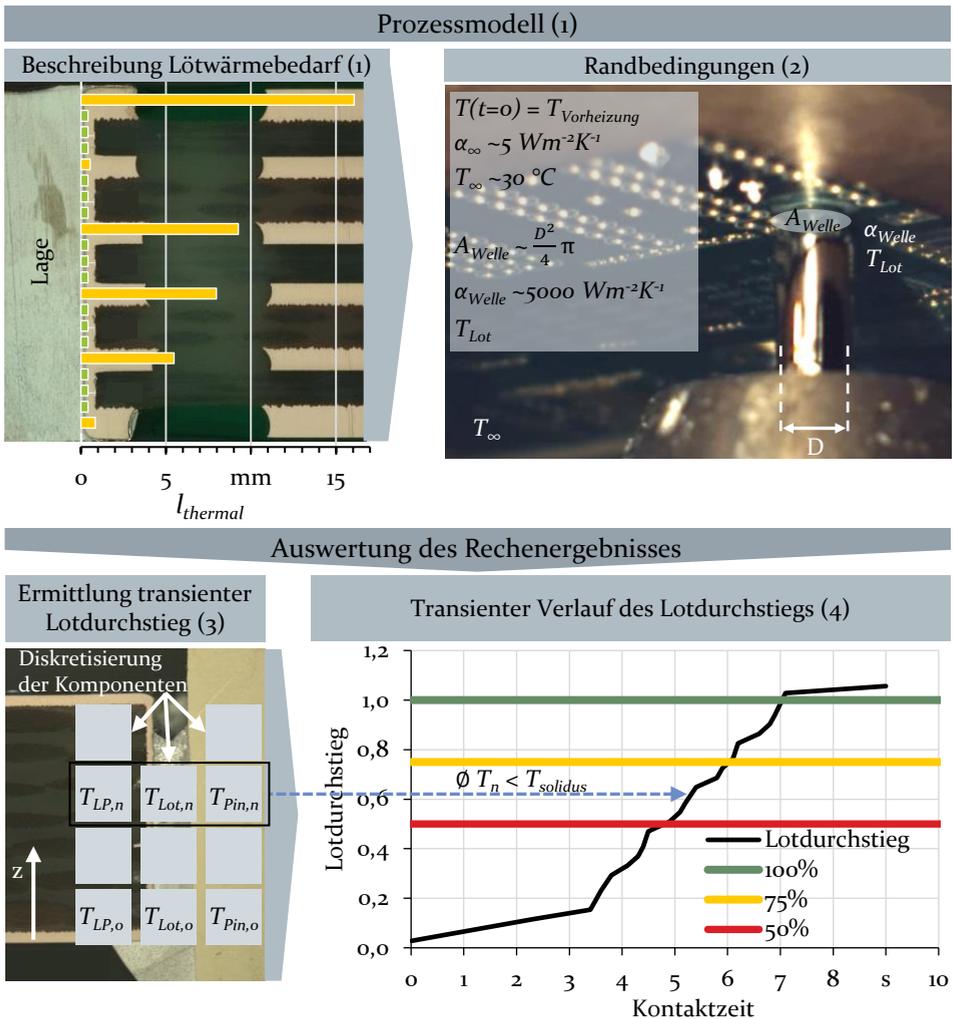


Bild 51: Beschreibung des THT-Selektivwellenlötprozesses mittels des Lötwärmebedarfs (1) einer Mehrlagenleiterplatte, Randbedingungen (2) und beispielhafte analytische Ergebnisbewertung des Lotdurchstiegs anhand der gemittelten Temperaturen der Elemente in der z-Position n (3) und (4) in Anlehnung an [P3]

Die **Randbedingungen** zur Beschreibung der Lötprozessparameter werden in Bild 51 (2) skizziert. Sie umfassen die Vorheizung $T_{\text{Vorheizung}} = T(t=0)$, die Lotbadtemperatur T_{Lot} , den Wärmeübergang zwischen Welle und Lötpartner α_{Welle} sowie die Wärmedissipation an die Umgebung α_{∞} . Es wird angenommen, dass das Erreichen der Liquidustemperatur der Kontaktpartner die notwendige Bedingung für die Benetzung der Oberflächen, Bildung der intermetallischen Phase und damit für die dauerhafte Lötverbindung ist. Damit kann die Lotsäule nur bis zu der Höhe in z-Richtung im

Lotspalt steigen, an der dessen Temperatur die Lotliquidustemperatur unterschreitet und das Lot erstarrt. Zur Berechnung des Lotdurchstiegs werden der Bauteilpin, die Lotsäule und der Lagenaufbau in z-Richtung, wie in Bild 51 (3) skizziert, diskretisiert.

FR4-Lagen werden in z-Richtung jeweils in drei Schichten unterteilt. Kupferlagen werden nicht zusätzlich diskretisiert, weil deren Wärmeprofil in vertikaler Richtung aufgrund deren guter Wärmeleitfähigkeit vernachlässigbar ist. Für jedes Element n werden die Gleichungen (39) bis (41) mit einem Zeitschritt von 0,1 s gelöst. Übersteigt die gemittelte Temperatur der drei Komponenten $T_{LP,n}$, $T_{Lot,n}$ und $T_{Pin,n}$ an z-Position n die Lotsolidustemperatur $T_{Solidus}$, so steigt das Lot weiter im Lotspalt. Der Lotdurchstieg entspricht je Zeitschritt t der niedrigsten z-Position, an der der Mittelwert aus Pin- und Leiterplattentemperatur ($T_{LP,n}$ und $T_{Pin,n}$) die Lotsolidustemperatur $T_{Solidus}$ unterschreitet, Bild 51 (3) und (4).

Aus den Temperaturen der untersten Elemente ($n = 0$) Pin, Lotsäule und Leiterplatte wird der Wärmeeintrag in das Bauteil Q_{BT} und die resultierende Lottemperatur an der Lotsäule $T_{Lot,0}$ wie folgt berechnet. Mit der Vorheizung des Pins und dessen thermischen Widerstand $R_{th,Pin}$ kann die Wärmedissipation in das Bauteil mit Formel (39) beschrieben werden.

$$\dot{Q}_{BT}(t) = \frac{T_{Pin}(t) - T_{BT}(t)}{R_{th,Pin}} \quad (39)$$

$A_{Welle,Pin}$ ist definiert als die Kontaktfläche der Lotwelle mit dem Pinüberstand und der Lotkontaktfläche am Pin im Lochspalt der Leiterplatte. Die mit $\Delta t = 0,1$ s zeitlich aufgelöste Wärmeentwicklung der Leiterplatte wird mit Gleichung (40) berechnet.

$$T_0(t) = T_0(t - \Delta t) + \left(\alpha_{Welle} \cdot A_{Welle} \left(T_{Lot,0}(t) - T_{LP,0}(t - \Delta t) \right) \cdot R_{th,vert,0} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_{th,Lage,0} \cdot C_{th,0}}} \right) \quad (40)$$

$$\text{Mit: } T_{Lot,0}(t) = T_{Lot} - \frac{\dot{Q}_{BT}(t)}{\alpha_{Welle} \cdot A_{Welle,Pin}}$$

Für die Elemente in z-Richtung $n > 0$ wird die zeitlich und räumlich aufgelöste Aufheizung mit Gleichung (41) beschrieben.

$$T_n(t) = T_n(t - \Delta t) + \left(T_{n-1}(t) - T_n(t - \Delta t) \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_{th,Lage,n} \cdot C_{th,n}}} \right) \quad (41)$$

Mit dem entsprechend berechneten transienten Verlauf des Lotdurchstiegs in Bild 51 (4) kann dann die Fertigbarkeit einer THT-Lötstelle für gegebene Prozessparameter beurteilt werden.

4.2.3 Validierung des analytischen Modells anhand verschiedener Lötstellen und Prozessparameter

Zur Validierung des analytischen Vorgehens werden Versuchslötungen mit 1-, 2- und 6-lagigen Leiterplattendesigns modelliert. Auf Grundlage der Lötstellen in Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang vergleicht Bild 52 die Vorhersage des analytischen Modells mit den Lötexperimenten an kritischen Lötstellen und stellt das Ergebnis mit der CFD-Simulation gegenüber. Die analytische Vorhersage weist dabei Fehlerkennwerte von MAPE 39 % und RMSE 29 % auf.

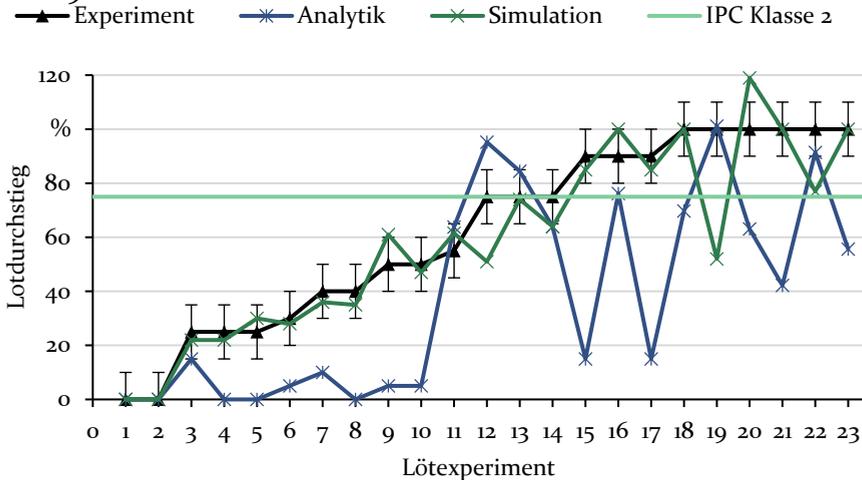


Bild 52: Validierung des analytischen Vorhersagemodells anhand kritischer Lötstellen und Prozessparameter, RMSE 29%; Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang

Durch die vereinfachenden Annahmen und der daraus resultierenden Vernachlässigung des Lochdurchmessers kann der Selektivwellenlötprozess nur unzureichend analytisch abgebildet werden. Die im Vergleich zu den Benchmarks von Versuchslötung und analytischer Vorhersage in den promotionsbezogenen, eigenen Veröffentlichungen [P₃, P₁₂] besseren Fehlermetriken können auf die erhöhte Kritikalität der Lötstellendesign- und Prozessparameter zurückgeführt werden (Bild 52). Es zeigt sich eine große Dominanz des Lötwärmebedarfs von Bauteil oder Lötstelle, da der transiente Austausch thermischer Energie wechselseitig zwischen Leiterplatte, Lot und Pin nicht ausreichend berücksichtigt werden kann. Die

Validierungsergebnisse bescheinigen daher ein generell zu wenig sensitives Modellverhalten hinsichtlich der Temperaturentwicklung in der Lötstelle. Insbesondere zeigen sich folgende Schwächen des Modells:

- Berücksichtigung von Düsen ab ca. >5 mm Lotkontaktdurchmesser, da durch die 1-D-Abstraktion im Modell Wärmedissipation größerer Wärmeeintragsflächen auf der LP-Unterseite nicht berücksichtigt werden kann (siehe Bild 52, Lötstelle 20, 21 und 23)
- Lötung mit relativ zum Lötwärmebedarf kurzen Lötkontaktzeiten (siehe Bild 52, Lötstelle 15 und 17)
- Lötung mit relativ zum Lötwärmebedarf geringen Löttemperaturen (siehe Bild 52, insbes. Lötstelle 7-10)

Zusammengefasst werden in diesem Kapitel die in Kapitel 3 induktiv ermittelten Prozesseinflussfaktoren und Wirkmechanismen in die Rechenmodelle integriert. Durch die ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen dem multiphysikalischen Simulationsmodell und den Lötergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass alle relevanten Einflussfaktoren valide numerisch modelliert werden können. Weiterhin zeigt sich, dass die Leiterplattendicke bei der Lochdimensionierung zwingend zu berücksichtigen ist. Das Gap-Ratio eignet sich als Kennzahl zur äquivalenten Beschreibung der geometrischen Lochdimensionierung im technologisch relevanten Bereich von 15-35 % in Abhängigkeit von der Leiterplattendicke, dem Lochdurchmesser und der Pindicke. Weiterhin bestätigt dieses Kapitel den erheblichen Einfluss des Lötstellendesigns auf den Lotdurchstieg. Durch die Transparenz der analytischen Modellierung kann deduktiv gefolgert werden, dass der Wärmebedarf einer Lötstelle ursächlich durch die Wärmedissipation in den Kupferlagenaufbau und das Bauteil definiert ist. Beide können aussagekräftig numerisch modelliert werden. Damit sind die aus Kapitel 3 induktiv hergeleiteten Annahmen als valide anzusehen.

Die bisher rein qualitative Abschätzung der Fertigbarkeit von Lötstellen kann durch das Vorgehen quantifiziert werden und als Basis für eine faktenbezogene Diskussion zwischen Design- und Fertigungsexperten dienen. Darauf basierend können dann Designoptimierungen frühzeitig im Entwicklungsprozess gemäß DfM einfließen.

5 Datenbasierte Prozessmodellierung zur Absicherung der Fertigbarkeit mit Hilfe lernender Algorithmen

Die experimentellen, numerischen und analytischen Modellierungsansätze in den Kapiteln 3 und 4 sind in der Genauigkeit und Übertragbarkeit aufgrund der getroffenen Annahmen zur Idealisierung und der berücksichtigten physikalischen Zusammenhänge vorab determiniert. Datengetriebene Modellierungsmethoden erlauben mit Hilfe lernender Algorithmen durch Hinzunahme weiterer historischer Lötdaten als Trainingsdaten eine Erweiterung der Aussagekraft ohne die Prognosedauer erheblich zu verlängern. Zudem können sowohl die kurzfristigen als auch die längerfristigen Potentiale der Modellbildung aus Kapitel 2.4 gehoben werden.

Als Grundlage für den ML-basierten Modellierungsansatz wird ein Softwareframework entwickelt, das die Nutzung der Design- und Lötprozessdaten ermöglicht. Für die Steigerung des Vertrauens und der Akzeptanz der ML-Modelle bei Anwendern wird bei der Entwicklung der Trainingspipeline ein Vorgehen zur Auditierung des ML-Modellverhaltens integriert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der physikalischen Plausibilität und Robustheit der Vorhersage. Aus den Ergebnissen der Kapitel 2, 3 und 4 wird das Prozessdatenmodell, also der Eingangsparameterraum X in Formel (3), definiert. Anschließend werden Training, Validierung und Auditierung für zwei Modellierungsansätze durchgeführt. Abschließend wird die Aussagekraft der ML-Modelle mit den experimentellen, analytischen und numerischen Modellen verglichen.

Teile der Erkenntnisse sind in eigenen promotionsbezogenen Veröffentlichungen [P3, P9, P12–P16] der Fachwelt zugänglich gemacht und mit Hilfe studentischer Arbeiten [S4, S11–S13] validiert worden.

5.1 Entwicklung eines datenbasierten Modellierungsvorgehens für elektronische Flachbaugruppen

Im folgenden Abschnitt wird das PCB-Softwareframework für Flachbaugruppen entwickelt. Durch die Implementierung in Python können Designdaten in der gleichen Sprache verarbeitet und ML-Modelle integriert werden. Darauf aufbauend können allgemein Design for X-Anwendungs-

fälle umgesetzt und Designvarianten auf das entsprechende Kriterium X digital untersucht werden. Anhand des DfM-Anwendungsfalls beim Selektivwellenlöten wird das Framework, das Datenmodell, das Modelltraining, sowie dessen Auditierung beschrieben, mit dem die datenbasierte Modellierung des Selektivwellenlötprozesses zuverlässig gelingt.

5.1.1 Beschreibung des SmartEP-Frameworks für die Modellierung und Optimierung des Selektivwellenlötprozesses

Die Umsetzung algorithmischer Ansätze zur Absicherung fertigungsge rechter elektronischer Baugruppen erfordert die modellbasierte Beschreibung der in den vorangegangenen Kapiteln als signifikant identifizierten Prozesseinflussgrößen. Das SmartEP-Framework stellt dafür grundlegende Funktionen zur Verfügung. Wesentliche Komponenten sind dabei:

1. Gerberdatenimport und -verarbeitung für die ML-Anwendung (siehe Kapitel 5.2)
2. ML-Modelltraining und Auditierung (siehe Kapitel 5.1.2)
3. ML-basierte Prozessoptimierung mit Hilfe des Traveling Salesman Problems (TSP) (siehe Kapitel 6.1)
4. Visualisierung und Operationalisierung des ML-Modells (siehe Kapitel 6.2)

Das Framework ist objektorientiert aufgebaut, wodurch die Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle ermöglicht wird. Die Struktur ist an das Konzept des Digital Twin Structure Model (DSTM) aus [153] in Bild 53 angelehnt. Dieses Modell unterteilt die physische, die beschreibende und die Anwendungsebene in die Bereiche Produkt, Prozess und Ressourcen. Das SmartEP-Framework ist überwiegend in der beschreibenden Ebene zu verorten. Die Hauptaufgabe des Softwareframeworks besteht im Handling der Engineering-Modelle (1.1), der Lötexperimentaldaten (1.2) sowie deren Aggregation und strukturierte Speicherung dieser Trainingsdaten im Digitalen Schatten (2). Die Basis für die datenbasierte Modellierung bilden Lötexperimente auf Pinlevel bestehend aus Leiterplatten, Bauteilen, Prozessparametern und dem Lötergebnis (1.1). Zudem stellt das Framework die Schnittstellen zwischen proprietären Engineering-Modellen (1.1) und dem ML-Modell der Anwendungsebene (4) zur Verfügung, welche bidirektional mit den heuristischen Prozessoptimierungsroutinen (3) verknüpft ist. Die ML-basierten Designbewertungen fließen dann für Verbesserungen der Engineering-Modelle in der Designphase zurück.

Genauso wie Experimentaldaten können diese virtuell erzeugten Daten im Digitalen Schatten hinterlegt werden.

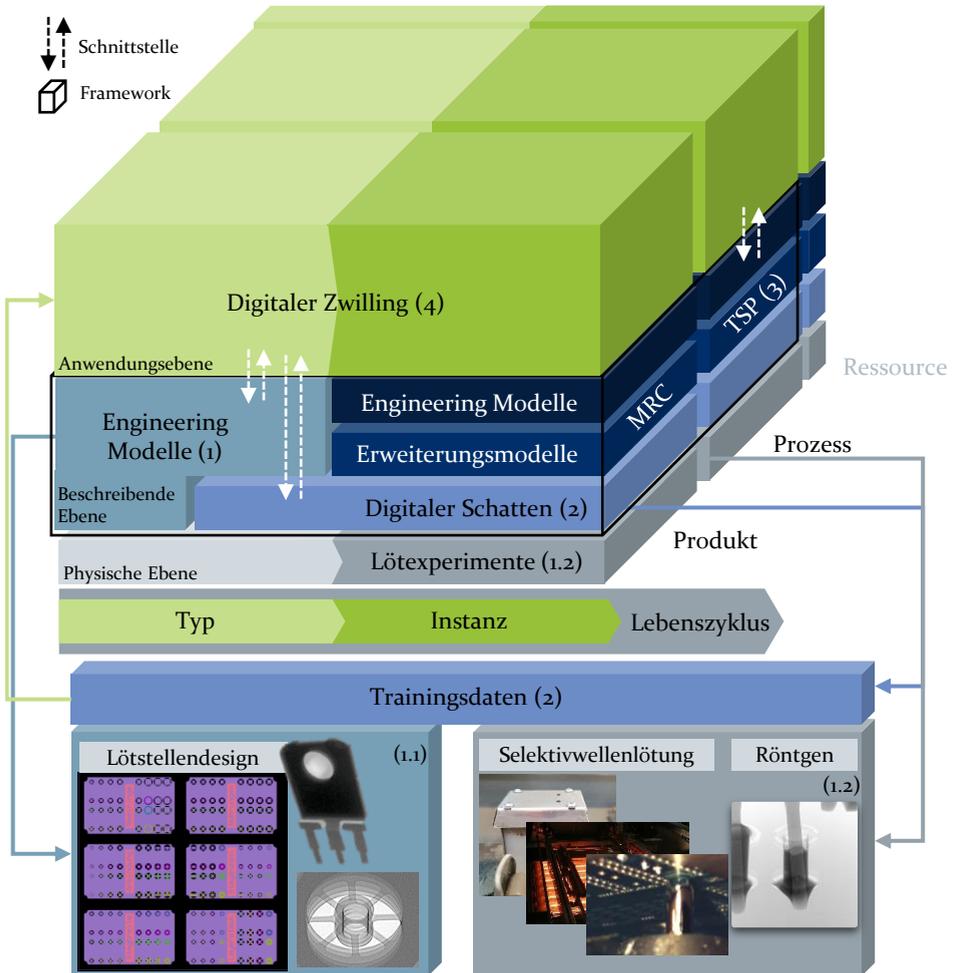


Bild 53: Aufbau des python basierten SmartEP-Frameworks in Anlehnung an die Struktur des DSTM [153] für die modellgestützte Umsetzung fertigungsgerechter Designs und optimierter Fertigungsprozesse am Beispiel der Absicherung der THT-Fertigbarkeit (in Anlehnung an [P9, P16, S4, S13, S14])

Der Ablauf der Optimierung des Selektivwellenlötprozesses wird in Bild 54 mit Hilfe der Business Process Model and Notation (BPMN) Methode auf Basis der Module in Bild 53 beschrieben. Dabei interagiert der PCB-Designer mit dem ML-Modell über das SmartEP-Framework. Auf Grundlage der zu bewertenden THT-Lötstellen auf der Leiterplatte und optionalen Standardlötparametern kann die Fertigbarkeit der Leiterplatte digital bewertet, iterativ optimiert und eine Empfehlung für die Prozessgestaltung

abgegeben werden. Diese explizite Empfehlung von Lötparametern bildet eine sachliche Diskussionsgrundlage unterstützt dadurch insbesondere die Kommunikation zwischen den Fachabteilungen Design und Fertigung (4).

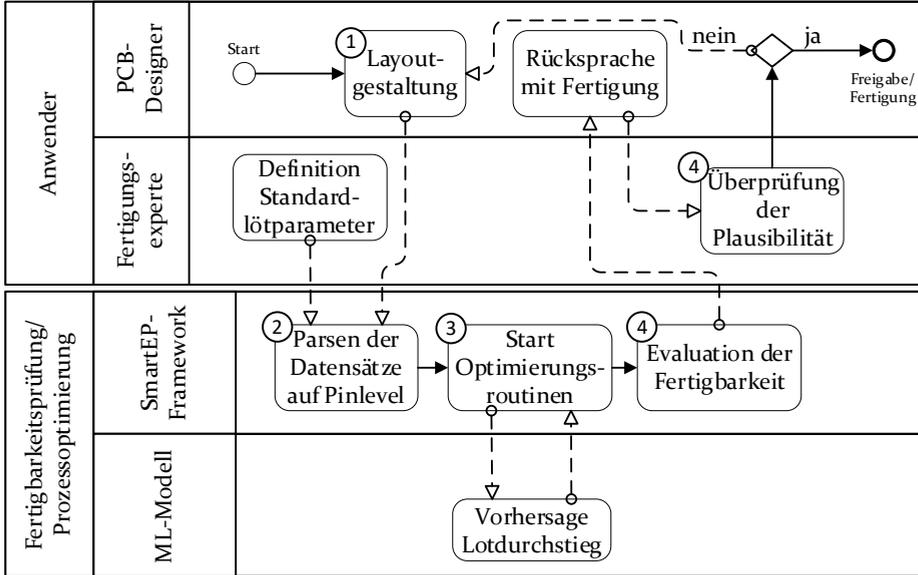


Bild 54: BPMN-Ablauf der Optimierung des Selektivwellenlötprozesses mit Hilfe des SmartEP-Softwareframeworks, Nummerierung nach den Modulen in Bild 53

In den folgenden Abschnitten von Kapitel 5 wird auf die Entwicklung des ML-Modells eingegangen. Die Optimierungsroutinen sowie die Integration der Vorhersagemodelle in die Entwicklungsumgebung werden in Kapitel 5.2 behandelt.

5.1.2 Definition eines Vorgehens zur Entwicklung vertrauenswürdiger ML-Prozessmodelle

Der Ansatz von ML-Verfahren kommt dem Reverse Engineering physikalischer Mechanismen im Prozess auf Grundlage eines ausgewählten Datensatzes gleich. Ob dieser Datensatz die Grundgesamtheit des Prozesses adäquat abbildet, kann dabei nicht zweifelsfrei angenommen werden. Dies führt unter Anwendern oft zu Vorbehalten. Um diese dem Blackbox-Ansatz inhärente Ungewissheit zu lindern und das Vertrauen in ein Modell im industriellen Einsatz zu stärken, wird im Folgenden ein Vorgehen zum systematischen Aufbau eines erfahrungsbasierten Vertrauens seitens des Anwenders in das datenbasierte Blackbox-Modell unterbreitet [120, 122].

Bild 55 skizziert den Ablauf zur Entwicklung des ML-Modells am Beispiel des Selektivwellenlötens. Demnach ist die Wahl der zu berücksichtigenden Prozesseinflussfaktoren und deren Vorverarbeitung methodisch zu begründen. Die Begründbarkeit der Auswahl schafft bei Anwendern Vertrauen, da auf diese Weise Expertenwissen einfließen kann. Der komplementäre Einsatz von Literaturrecherche, Experteninterviews und statistischen Versuchsplänen bildet hier die Grundlage für die Beschreibung des Lötprozesses.

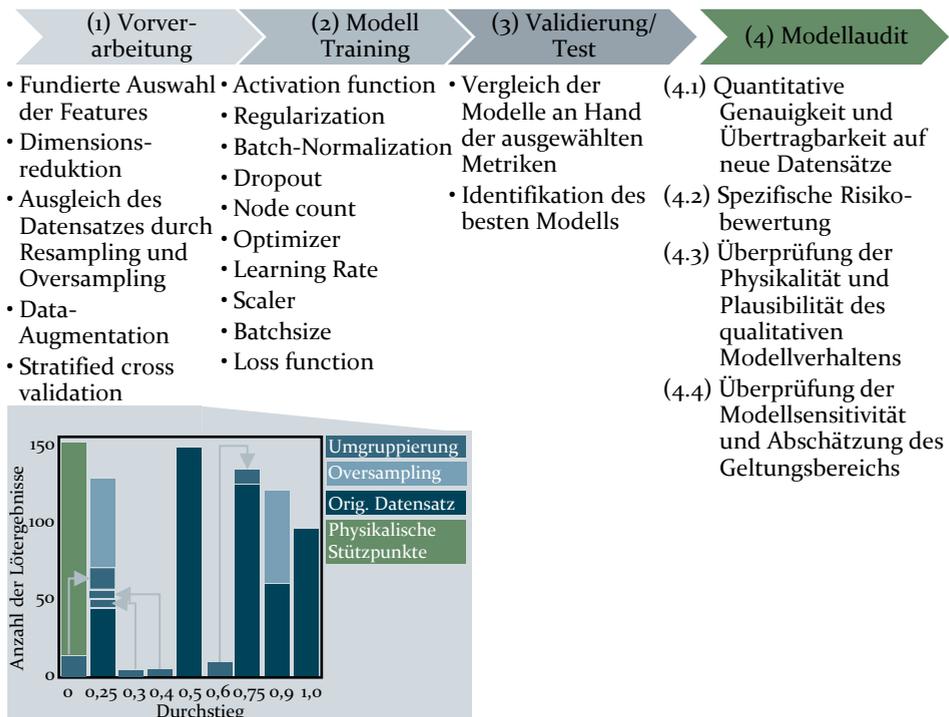


Bild 55: Vorgehen zur Entwicklung vertrauenswürdiger ML-Modelle durch anschließende Auditierung des Modellverhaltens

Experimentelle Versuche in Kombination mit Simulationsstudien können zudem valide Ansätze zur Dimensionsreduktion der Prozesseinflussparameter geben, wie in Kapitel 4.1.3 gezeigt. Das Prozessdatenmodell strukturiert die erzeugten Experimentaldaten mit allen signifikanten Einflussgrößen, wie in Bild 55 (1) dargestellt.

Die Erzeugung valider Datensätze zur Beschreibung von Fertigungsprozessen ist oft mit hohem experimentellem Aufwand und erheblichen Kosten verbunden. Daher wird der Prozess durch die begrenzte Anzahl der experimentellen Datenpunkte durch eine Teilmenge

der Grundgesamtheit modelliert. Lötstellendesignseitig kann die Grundgesamtheit aufgrund der hohen kombinatorischen Vielfalt nur teilfaktoriell durch die systematische Variation von Kupferlagendesigns genähert werden. Prozessseitig kann mit gezielter Versuchsplanung das gesamte Prozessfenster abgedeckt werden. Der für den Selektivwellenlötprozess generierte Datensatz umfasst 1500 Lötexperimente aus den Versuchsplänen in Kapitel 3.1 und umfasst damit das Prozessfenster. Die Aussagekraft der Daten kann durch synthetische Vergrößerung des Datensatzes durch zwei Ansätze noch erweitert werden. Einerseits können durch Oversampling synthetische Daten von unterrepräsentierten Bereichen erzeugt werden. Damit werden unausgewogene Datenverteilungen im Datensatz ausgeglichen. Andererseits vergrößert das Hinzufügen physikalisch korrekter Stützpunkte den Gültigkeitsbereich des Modells sowie die Verbesserung der Vorhersageplausibilität. Im Anwendungsfall des Selektivwellenlötens bedeutet das, dass für jedes Lötexperiment die Randbedingung gemäß Formel (42) gilt, dass der Anfangswert des Lotdurchstiegs null ist.

$$f(t = 0 \text{ s}) = 0\% \tag{42}$$

Auf die Datenaufbereitung folgt das Modelltraining und dessen Validierung anhand eines Teils des Datensatzes, wie in Bild 55 (2) dargestellt. Der Datensatz wird aufgeteilt in 90 % für Training/Validierung und die verbleibenden 10 % für den Test. Durch stratified cross validation mit 5 Folds, wird zudem sichergestellt, dass die Verteilung der Label in jedem Fold ähnlich ist. Für die Hyperparameteroptimierung werden die Schritte 1-3 aus Bild 55 für das Modelltraining des Tensorflow basierten Neuronalen Netzes iterativ auf einer Grafikkarte ausgeführt. Die veränderbaren Hyperparameter für die ML-Modelloptimierung sind in Anhang in Tabelle 19 und Tabelle 20 angegeben. Der Test gemäß Bild 55 (3) erfolgt auf dem neuen 10% Testdatensatz.

Zuletzt wird ein Modellaudit (4) eingeführt, um die Korrektheit und Verlässlichkeit des ML-Modells methodisch standardisiert über verschiedene ML-Modelle hinweg vergleichbar zu überprüfen. Der Ansatz besteht darin, das Modell durch ein Audit aus Prozessexperten bzw. Anwendersicht zu qualifizieren. Ziel ist es, sicherzustellen, dass der ML-Algorithmus aus dem Datensatz physikalische Zusammenhänge verallgemeinert, sich physikalisch korrekt und erwartungsgemäß verhält sowie auf unbekannte Daten übertragbar ist. Die quantitative Vorhersagegenauigkeit (4.1) hinsichtlich neuer Datensätze mit anderen Featureverteilungen bildet ein wichtiges

Element, um die erfolgreiche Verallgemeinerung der Zusammenhänge zu überprüfen.

Weiterhin muss das anwendungsspezifische Risiko fehlerhafter Vorhersagen quantifiziert werden. Das Risiko einer Überschätzung des Lot-durchstiegs (4.2) ist dabei insbesondere aus Sicht des Designers zu reduzieren, um die Fertigungsgerechtigkeit konservativ zu beurteilen. Das Risiko für Überschätzung (engl. Risk of over-/underestimation – ROE/RUE) ist nach Formel (43) das Produkt aus Wahrscheinlichkeit p und Auswirkung MAE auf einem unbekanntem Datensatz. [P14, P15]

$$ROE/RUE = p \cdot MAE \quad (43)$$

$$p_{\text{über/unter}} = \frac{\text{Anzahl über-/unterschätzter Datenpunkte}}{\text{Anzahl Datenpunkte}}: \text{Wahrscheinlichkeit für Falschschätzung}$$

$MAE_{\text{over/under}}$: Mean Absolute Error der über-/unterschätzten Datenpunkte

Die qualitative Korrektheit der Vorhersage gemäß Bild 55 (4.3) im Sinne der physikalischen Plausibilität ist insbesondere für die Akzeptanz bei Prozessexperten von hoher Relevanz. Diese kann bei geringer Parameteranzahl durch ML-Vorhersagen etwa durch faktorielle oder One-at-a-time Variation von Versuchspunkten virtuell überprüft werden. Für das Beispiel des Selektivwellenlötens gilt, dass mit höheren Temperaturen und Kontaktzeiten sowie größeren Lotdüsen größere Füllgrade zu erwarten sind, siehe Kapitel 3.1.1 und [P15].

Zuletzt ist die Sensitivität des ML-Modells hinsichtlich streuender Eingangsgrößen (4.4) zu überprüfen. Eine Monte-Carlo-Simulation eignet sich für die Analyse der Robustheit der ML-Modellreaktion auf Streuung in den Eingangswerten, etwa aufgrund von Prozesstemperaturschwankungen oder Messstreuung der Bauteilkennwerte. So kann die Streuung der Modellvorhersagen als Vertrauensbereich interpretiert werden, in dem der Lotdurchstieg am wahrscheinlichsten liegt. Zudem können so Unsicherheiten im Modell aufgedeckt und die Validität der Modellaussage für die Feature-Kombination abgeschätzt werden. Durch diese Maßnahmen kann das Verhalten des ML-Modells durch Dritte subjektiv besser beurteilt und die Plausibilität der Vorhersagen erfahren werden. Das hilft, die Intransparenz und Vorbehalte von Anwendern zu reduzieren [122, P15].

5.2 Entwicklung des Prozessdatenmodells und Training der ML-Modelle

In diesem Abschnitt wird das Prozessdatenmodell für die Modellierung des Selektivwellenlötprozesses abgeleitet. Dieses Datenmodell strukturiert die Versuchsdaten im Datensatz. Für das Modelltraining und das Modellaudit wird dieser an die in Bild 55 eingeführte Pipeline übergeben. Mit den Modellen kann anschließend die Absicherung der Fertigbarkeit und die Prozessentwicklung entwicklungsbegleitend virtuell durchgeführt werden.

5.2.1 Ableitung des Prozessdatenmodells zur Beschreibung des Selektivwellenlötprozesses

Voraussetzung für die datenbasierte Modellierung ist die aussagekräftige Beschreibung aller signifikanten Prozesseinflüsse in einem Prozessdatenmodell, wie in Bild 55 (1) genannt. Die relevanten Parameter zur Absicherung der Fertigbarkeit werden auf Grundlage der Ursache-Wirkungsanalyse in Kapitel 2.2.3, der Definition der Fertigbarkeit in Kapitel 2.3.1 in Zusammenhang mit den Ergebnissen der statistischen Versuchspläne aus Kapitel 3 und den numerischen Studien aus Kapitel 4 ausgewählt. Bild 56 unterteilt schematisch die Beschreibung der Einflussparameter (Features) und des Prozessergebnisses (Label). Ein aussagekräftiges und übertragbares Modell des Selektivwellenlötprozesses muss besonders der Wärmebedarf und Wärmeeintrag abgebildet werden.

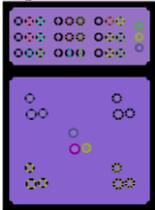
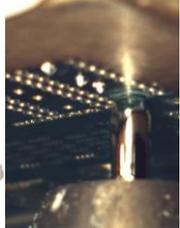
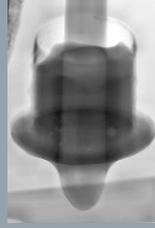
Features X			Label Y	
Wärmebedarf			Wärmeeintrag	Prozessergebnis
<ul style="list-style-type: none"> • Kupferlagendesign • Lagenaufbau • Gap-Ratio 	Thermische Eigenschaften Bauteilpin 	Material <ul style="list-style-type: none"> • Oberflächen • Lotlegierung • Flussmittel 	Lötparameter	Lotdurchstieg
				

Bild 56: Zusammenfassung des Prozessdatenmodells in Anlehnung an [P12–P14]

Die Beschreibung der Lötärmeeintrag durch die Maschinenparameter und des Lötärmeeintrags bestehend aus der thermischen

Bauteileigenschaften, der Lochdimensionierung sowie der Lotlegierungseigenschaften ist dabei über alle Modellierungsvarianten gleichbleibend definiert.

Die Parameter Lochdurchmesser, Leiterplattendicke und Pindurchmesser werden auf Grundlage der Validierung in Kapitel 4.1.3 in der Äquivalenzkennzahl Gap-Ratio zusammengefasst. Für die Beschreibung der Materialeigenschaften Lotlegierung ist insbesondere die Erstarrungstemperatur von Bedeutung, siehe im Anhang Bild 71 und Bild 72 [P2]. Die Grundgesamtheit beliebiger THT-Bauteile wird nach Kapitel 3.3 auf die gemessenen thermischen Widerstände und Kapazitäten dimensionsreduziert. Abgesehen von der Kupferverteilung des Lötstellendesigns sind die Datentypen der einzelnen Features sowie des Labels kontinuierlich oder attributiv beschreibbar. Für die Beschreibung des Einflusses des Lötstellendesigns muss wegen der großen Zahl kombinatorisch möglicher Designvarianten in mehrlagigen Leiterplatten eine geeignete, datenbasierte Methode zur Abbildung des Kupferlagendesigns oder eine Form der Dimensionsreduktion genutzt werden [128, P13, P14, S11]. Zwei grundlegend verschiedene Ansätze für die Beschreibung der Lötstellen werden einander untersucht.

- Analytische Featuregenerierung der thermischen Abklinglängen als Kennwerte des Wärmebedarfs einer Lötstelle aus Kapitel 4.2
- Modellierung der Lötstellen durch Gerberdaten

Durch den analytischen Ansatz, thermische Bauteilkenngrößen und Gap-Ratio kann gezielt a-priori Expertenwissen in die Modellierung einfließen und so die Dimensionalität geringgehalten werden. Die geeignete Dimensionsreduktion erlaubt eine schnellere Verallgemeinerung der Zusammenhänge basierend auf den Trainingsdaten, was den Trainingsvorgang beschleunigt. Die bildbasierte Modellierung bedient sich hingegen der detailgetreuen Rohdaten, wodurch keine Informationen durch Kompression verloren geht. Während des Trainingsvorgangs erlernt das ML-Modell dann eigenständig, wie mit den Eingangswerten zu verfahren ist. Auf der Grundlage des Gerberdaten basierten Modells werden die Analysen zur Plausibilität und Sensitivität der Vorhersagen sowie die Optimierungsroutinen in Kapitel 6 durchgeführt.

5.2.2 Vorhersage des Lotdurchstiegs mit Hilfe von ML-Modellen

In diesem Kapitel werden die beiden Modellierungsansätze für den Kupferlagenaufbau und deren Ergebnisse beschrieben und gegenübergestellt.

Beim analytischen Modellierungsansatz wird der Wärmebedarf jeder Lötstelle durch die in Kapitel 4.2.1 je Kupferlage berechneten thermischen Diffusionslängen $l_{thermal,n}$ des Kupferlagendesigns und des Lagenaufbaus beschrieben.

Alternativ kann der Lötwärmebedarf auf Grundlage des Lagenaufbaus und der Gerberdaten beschrieben werden. Diese enthalten die Kupferverteilung in den einzelnen Kupferlagen. Diese Datengrundlage wird als Austauschformat für die Fertigung der Leiterplatte genutzt und beinhaltet somit alle notwendigen Informationen des Lötwärmebedarfs. Das Drillfile beinhaltet die Lochkoordinaten der Durchkontaktierungen. Damit ist bekannt, wie das Kupfer um jede Lötstelle verteilt ist. Die hochdimensionalen Bildinformationen werden durch eine Principal Component Analysis auf 100 Features pro Lötstelle reduziert. Durch eindeutige Zuordnung der Bauteileigenschaften sowie das Löttemperaturprofil zu jeder Lötstelle über die Lochkoordinaten wird der Wärmebedarf und das Wärmeangebot an der Lötstelle beschrieben.

Die jeweilige Beschreibung der Leiterplatte bildet zusammen mit den Bauteileigenschaften, Materialparametern, den Lötparametern und dem dazugehörigen Lotdurchstieg den Datenpunkt eines Lötexperiments gemäß Bild 56. Ein Trainingsdatensatz besteht aus einer Vielzahl von Lötdateipunkten. Für das Modelltraining beider Ansätze wird die NN-Pipeline aus Bild 55 angewendet. Die Hyperparameterkonfigurationen sind jeweils in Bild 73 im Anhang angegeben. Für das auf dem Analytikdatensatz trainierte neuronale Netz mit 18 Features pro Lötstelle liegt das Bestimmtheitsmaß r^2 bei 0,8 auf dem ungesehenen Testdatensatz [P12, P15]. Das Bestimmtheitsmaß des gerberbasierten Modells mit 112 Features pro Lötstelle erreicht 0,62, was auf die erheblich größere Dimensionalität der Eingangsdaten zurückzuführen ist. Damit kann grundsätzlich eine hohe Korrelation zwischen Vorhersagemodell und Lötergebnis bescheinigt werden. Für die Überprüfung des Modellverhaltens, wird das ML-Audit durchlaufen. Die Ergebnisse des Modellaudits werden in Bild 57 und Bild 58 zusammengefasst.

Für den direkten Vergleich der Modellperformance des analytik- und gerberbasierten ML-Modells im Vergleich zur Simulation und Analytik wird in Bild 57 (4.1) die Modellqualität anhand der ausgewählten Lötstellen aus Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang überprüft. Es zeigt sich insbesondere, dass beide Modelle den experimentell ermittelten Lotdurchstieg an kritischen Punkten mit Lotdurchstieg unterhalb von 75% überwiegend korrekt einschätzen. Damit werden kritische Lötstellen, mit unzureichender Bilanz

aus Wärmebedarf und -zufuhr, nicht signifikant überschätzt. Im Gegenzug dazu werden Lötstellen mit vollständigem Lotdurchstieg eher unterschätzt. Damit liegt das Modell hinsichtlich der Absicherung der Fertigbarkeit auf der sicheren Seite. Eine Überschätzung ist prozesstechnisch problematischer, da im Designstadium dann fälschlicherweise von einem fertigungsgerechten Layout ausgegangen würde. Eine Überschätzung unterhalb von 50 % Lotdurchstieg, wie bei den Lötstellen 1 und 2, ist prozesstechnisch unzulänglich und damit nicht problematisch. Das gerberbasierte Modell unterschätzt nur ein Lötexperiment (Nr. 23) signifikant und stellt damit eine sehr robuste Vorhersagequalität dar. Die Prüfung anhand der kritischen Lötstellen hebt besonders die Übertragbarkeit des gerberbasierten Ansatzes hervor. Zudem ist das Risiko einer kritischen Überschätzung des Lotdurchstiegs sehr gering im Vergleich zum Ansatz mit der analytischen Featuregenerierung [P15].

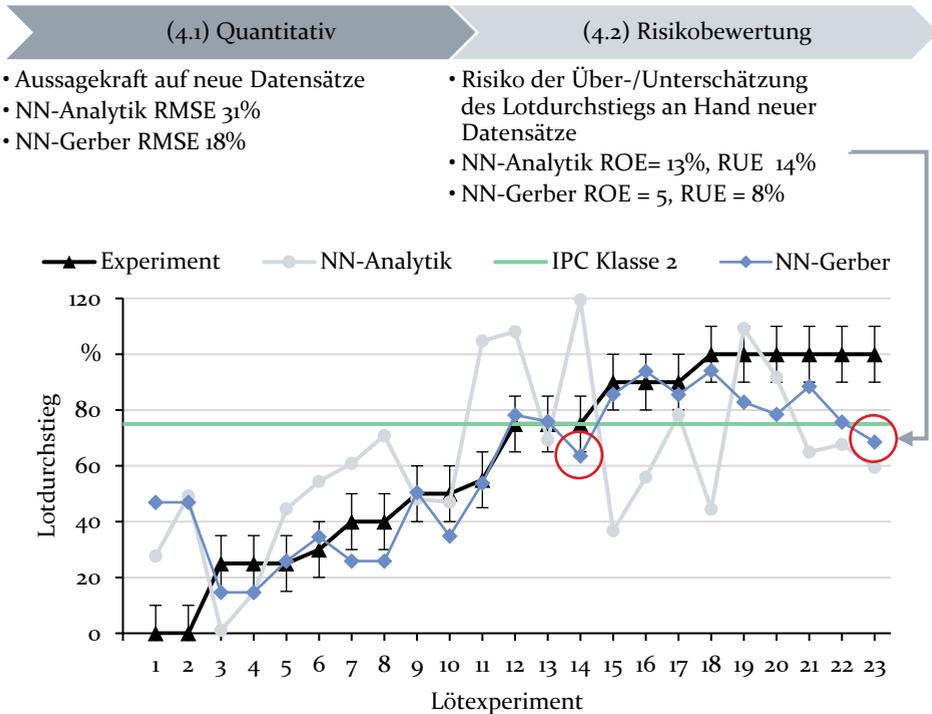


Bild 57: Quantitative Bewertung des Modellverhaltens anhand der kritischen Lötstellen aus Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang und Bewertung des anwendungsspezifischen Risikos für fehlerhafte Vorhersagen

Qualitativ kann gezeigt werden, dass das Modell Zusammenhänge physikalisch korrekt und entsprechend der Expertenerwartung verallgemeinert

[P15]. Im Bild 58 (4.3) wird gezeigt, dass der Lotdurchstieg über der Kontaktzeit und mit höheren Lottemperaturen steigt.

Zuletzt zeigt das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation mit 30 randomisierten Stichproben die geringe Sensitivität des Modells auf schwankende Eingangsgrößen. Die Lottemperatur, die Vorheiztemperatur sowie die gemessenen Bauteileigenschaften werden je mit einer Standardabweichung von 5 beaufschlagt. Der Ergebnisplot gibt für jede Kontaktzeit den durchschnittlichen, größten und kleinsten Lotdurchstieg an. Da die Standardabweichung der Vorhersageergebnisse im Mittel unter 5 % liegt, kann von sehr guter Robustheit des Modells gegenüber den Unsicherheiten in der Featurebestimmung ausgegangen werden, wie Bild 58 (4.4) zeigt.

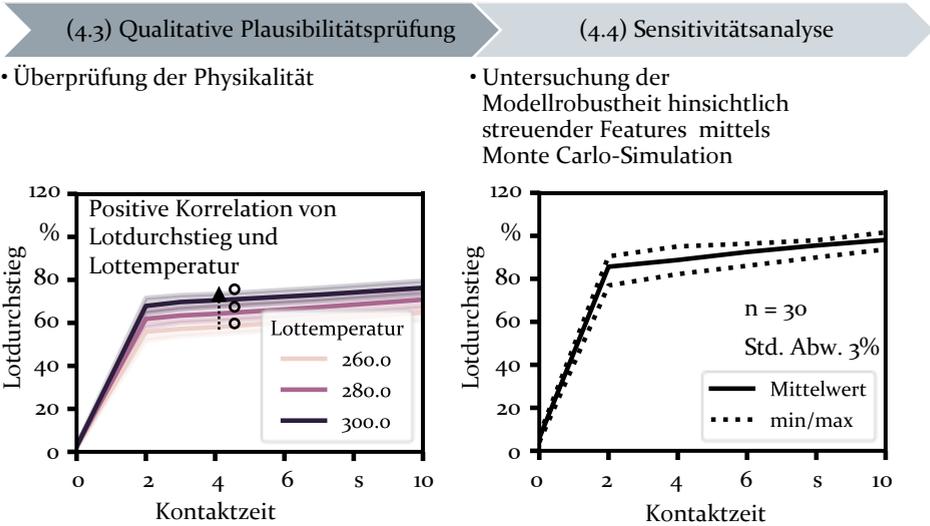


Bild 58: Modellaudit des ML-Modells mit gerberbasierter Featuregenerierung auf der Lötstelle 4 der kritischen Lötstellen Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang zur Validierung des Modellverhaltens in Anlehnung an [P12, P15]

Mit den vorgelegten datenbasierten Modellierungsansätzen kann die Beurteilung der Fertigungsgerechtigkeit im Flachbaugruppendesign erwie-
 senermaßen umgesetzt werden. Durch die analytische Featuregenerierung
 kann das ML-Modell bereits für Studien in der Konzeptphase eingesetzt
 werden, da für die Prognose kein vollständiges Leiterplattendesign voraus-
 gesetzt wird. Mit Hilfe des gerberbasierten Modells können vollständige
 Leiterplattendesigns zuverlässig ohne manuelle Zwischenschritte detail-
 liert beurteilt werden. Die Vorhersage der Lötqualität einer neuen Leiter-
 platte kann mit dem ML-Modell dann im SmartEP-Framework auf Grund-
 lage der Gerberdaten und der Lochkoordinaten aus den Drillfiles automa-
 tisiert durchgeführt werden.

5.3 Vergleich der Modellierungsstrategien

In den Kapiteln 3.3, 4 und 5 wurden experimentelle, numerische, analytische und datenbasierte Modellierungsstrategien untersucht und eingehend getestet. Jedem der Ansätze liegen in den jeweiligen Kapiteln beschriebene Annahmen zu Grunde. Der Gültigkeitsbereich der Annahmen beeinflusst einerseits die Vorhersagegenauigkeit und andererseits die Übertragbarkeit des Modells. Im Folgenden werden die jeweils entwickelten Modelle verglichen sowie Vor- und Nachteile diskutiert. Dazu werden die folgenden Vergleichskriterien herangezogen:

- Zeitaufwand
 - Modellbildungszeit
 - Vorhersagedauer/Rechenaufwand
- Modellkosten (Umfang Anwenderschulung, Toolkosten durch Lizenzgebühren)
- Modellqualität
 - Zuverlässigkeit der Vorhersage mittels statistischer Kenngrößen
 - Detailgrad des Designs

Bild 59 fasst die Ergebnisse des Modellvergleichs zusammen. Das experimentelle Vorgehen zur Abschätzung des Lotdurchstiegs aus Kapitel 3.3 kann zur Definition von Prozessparametern eingesetzt werden, wenn physische Prototypen aber keine Designdaten vorhanden sind.

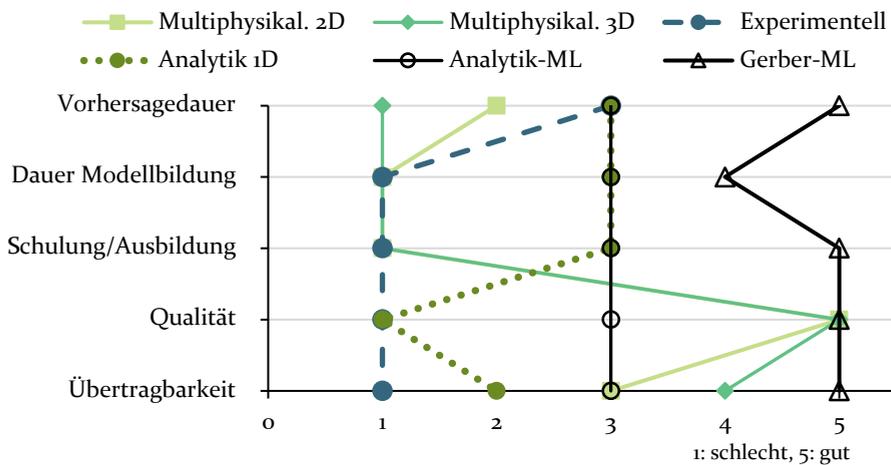


Bild 59: Quantitativer Vergleich der Modellfehler und Vorhersagedauer der entwickelten Vorhersagemodelle anhand der Vorhersageergebnisse für die Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22 und der Bewertung aus Tabelle 23 im Anhang

Auf den Testlötstellen zeigt sich, dass der Großteil der Prozessstreuung durch das Modell erklärt werden kann. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Modellierung des Wärmebedarfs von Lötstellen durch resultierende thermische Widerstände und Kapazitäten valide ist. Der strukturelle Nachteil des Ansatzes liegt neben dem zeitlichen Aufwand für die Charakterisierung auch in der Vernachlässigung des Einflusses des Lochdurchmessers und der Unschärfe des Modellergebnisses aufgrund des binären Ergebnisraums.

Das multiphysikalische Simulationsmodell aus Kapitel 4.1 weist im Vergleich die präziseste Vorhersagequalität auf. Insbesondere der hohe Aufwand und Investitionsbedarf für Lizenzgebühren und die Notwendigkeit von Simulation-Knowhow sowie lange Rechenzeiten überwiegen jedoch den Nutzen der hohen Vorhersagequalität.

Ähnliches gilt in abgeschwächter Form für den analytischen Ansatz aus Kapitel 4.2. Das Modellergebnis hängt dabei besonders von der Parametrisierung des vereinfachten Lötstellendesigns ab. Dies erfordert auch Kenntnis über die Mechanismen des Rechenmodells. Äquivalent zum experimentellen Modell bestätigt die Vorhersagequalität des Ansatzes erneut die Relevanz des Zusammenhangs zwischen dem Lotdurchstieg und der Modellierung des Wärmebedarfs einer Lötstelle durch die thermischen Widerstände und Kapazitäten des Kupferlagenaufbaus.

Im Analytik-ML-Modell aus Kapitel 5.2 wird dieser Zusammenhang zur Dimensionsreduktion des Lötstellendesigns herangezogen. Dadurch und durch Einbezug der Lochdimensionierung in den Featureraum wird die Übertragbarkeit erheblich und die Vorhersagequalität gesteigert. Die Nachteile aus der analytischen Modellbildung bleiben aufgrund der analytischen Featuregenerierung für die Lötstellenbeschreibung bestehen.

Die Beschreibung des Lötstellendesigns durch die Gerberdaten in Kapitel 5.2 zeigt demgegenüber eine deutliche Verbesserung der Vorhersagequalität und nähert sich deutlich der numerischen Simulation. Zudem beträgt die Vorhersagedauer nur ein Bruchteil und erlaubt eine schnelle, automatisierte Identifikation von Prozessparametern. Durch den Detailgrad der Beschreibung des Lötstellendesigns bietet dieser gerberbasierte Ansatz erhebliche Vorteile für die industrielle Anwendung. Diese sind insbesondere die Übertragbarkeit, die Erweiterbarkeit der Aussagekraft und der Vorhersagezuverlässigkeit des Modells.

6 Optimierung der Produkt- und Prozessentwicklung

Für die Vermeidung physischer Prototypen in der Musterbauphase muss die Prozessentwicklung digital durchgeführt werden. So können die Fertigungsgerechtigkeit ganzer Leiterplatten frühzeitig, kostengünstig und schnell abgesichert sowie Fertigungsprobleme digital antizipiert und geeignete Prozessparameter für Produktionsprozesse ermittelt werden.

Durch die Integration des ML-Modellierungsansatzes in den Produktentwicklungsprozess trägt die automatisierte, entwicklungsbegleitende Absicherung der Fertigbarkeit sowie die Empfehlung optimierter Prozessparameter zu einer Produktivitätssteigerung und einer Verkürzung der Entwicklungszeit bis zur Markteinführung bei. Auf Basis des SmartEP-Frameworks werden dafür Strategien zur automatisierten Optimierung der Lötparameterempfehlung entwickelt. Das ML-Modell wird zur besseren Integration in den Entwicklungsprozess beispielhaft in einer Web-Anwendung umgesetzt. Teile der Erkenntnisse sind mit Hilfe studentischer Arbeiten [S4, S14, S15] validiert worden.

6.1 Automatisierte Prozessentwicklung und -optimierung

Das in Kapitel 5 entwickelte gerberbasierte Modell kann den Lotdurchstieg einzelner Lötstellen aufgrund gegebener Prozessrandbedingungen vorhersagen. Da Selektivlötanlagen die Baugruppen sequenziell bearbeiten, addieren sich Zykluszeiten von Flussmittelauftrag, Vorheizung und Lötung auf und bilden somit häufig den Engpass in der Prozesskette der Flachbaugruppenbestückung. Die ganzheitliche Optimierung des Selektivwellenlötprozesses beinhaltet folglich neben der Optimierung der Lötprozessparameter auch die Wegoptimierung des Selektivfluxers und die reihenfolgeabhängige Lötkontaktzeitoptimierung des Lötvorgangs. Mit Hilfe des ML-Modells wird auf Grundlage des Engineering-Modells das Lötprogramm digital und automatisch hinsichtlich der Zykluszeit und des erreichbaren Lotdurchstiegs aller THT-Lötstellen auf einer Leiterplatte optimiert. Daraus kann dann das zykluszeitoptimierte Lötprogramm generiert werden. Im Folgenden wird die Anpassung vorhandener Optimierungsalgorithmen und deren Orchestrierung für die Prozessoptimierungsroutine beschrieben.

6.1.1 TSP-Zykluszeitoptimierung beim Selektivfluxen

Alternativ zur manuellen Definition des Flussmittelauftrags, können die Fluxpunkte und -linien auf Grundlage der Bohrungsdaten automatisiert generiert werden. Aufgrund der Komplexität durch $(n-1)!/2$ möglichen Routen bei n Lötstellen ist die direkte Berechnung des globalen Optimums im Allgemeinen aufgrund der hohen Rechenzeiten nicht möglich. Für die Suche der optimalen Reihenfolge, die alle Punkte im Raum verbindet, werden daher heuristische Algorithmen zur Lösung des NP-harten Traveling Salesman Problems (TSP) genutzt. Zentral ist dabei die Formulierung der Kostenfunktion, welche alle Kosten zwischen den Punkten eines Pfades beschreibt.

Beim selektiven Flussmittelauftrag entsprechen die Kosten dem euklidischen Abstand zwischen den Punkten, was zu einer symmetrischen Kostenmatrix führt. Beim selektiven Auftrag werden benachbarte Löcher eines Bauteils meist mit durchgehenden Fluxlinien verbunden. Dabei ist die Fluxrichtung entlang der Fluxlinie frei wählbar. Feste Fluxlinien sind Fluxlinien, die durch zusammenhängend zu fluxende, unmittelbar benachbarte Lötstellen definiert und daher unveränderlich sind, wie in Bild 60 veranschaulicht.

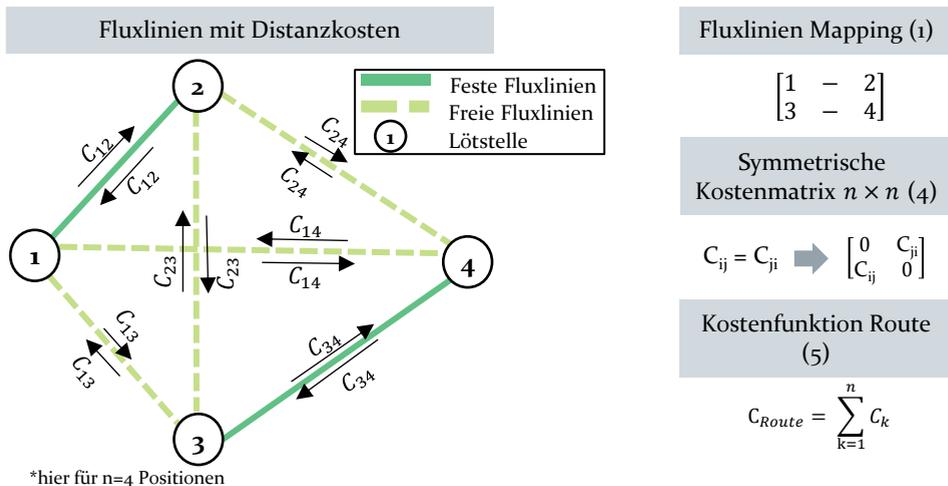


Bild 60: Problembeschreibung des TSP beim Selektivwellenlöten mit festen Liniensegmenten [S14]

Für die TSP-Optimierung dieses speziellen Anwendungsfalls werden nachfolgend Regeln, die die Randbedingungen der Optimierung festlegen, definiert. Damit ergibt sich ein vollständiger, ungerichteter, symmetrischer Graph.

1. Wenn eine Fluxlinie angefahren wird, muss zwingend bis zum anderen Ende gefahren werden.
2. Jeder Start- und Endpunkt eines Liniensegments darf nur genau einmal besucht werden.
3. Start- und Endpunkt der Fluxlinie sind nicht festgelegt.
4. Die Kosten zwischen den Punkten sind ungerichtet $C_{ij} = C_{ji}$
5. Die Kostenfunktion des Fluxprozesses entspricht der Summe der euklidischen Abstände zwischen den Punkten einer Route.

Für die Wahl der initialen Route steht entweder ein bereits vorhandenes Maschinenprogramm oder der Greedy-Algorithmus zur Verfügung. Bei beiden Initialisierungsmethoden ist davon auszugehen, dass im Allgemeinen nur ein lokales Optimum erreicht wird. Für die Optimierung stehen verschiedene in Python implementierte heuristische Algorithmen zur Verfügung. Für den Gebrauch dieser etablierten Algorithmen werden diese auf den vorliegenden Anwendungsfall mit den oben beschriebenen Randbedingungen angepasst. Die TSP-Algorithmen generieren dann iterativ Routen aus den permutierten Punktereihenfolgen und berechnen deren Routenkosten. Aus den berechneten Routen wird die kürzeste ermittelt und auf dieser Basis weitere Routen zum Vergleich in der nächsten Iteration gewählt. Die Performanz eines Algorithmus hinsichtlich der Kostenreduktion sowie die Konvergenzzeit ist dabei abhängig von der Problemstellung und der Parametrisierung.

Für den vorliegenden Anwendungsfall wurden daher Parameterstudien für Simulated Annealing (SA), Ant Colony Optimization (ACO), Particle Swarm Optimization (PSO), K-OPT, Genetic Algorithm (GA) Algorithmen durchgeführt, um mit minimalem Zeitaufwand möglichst gute Fluxrouten zu finden [S14]. In der Studie zeigt sich die Kombination aus Greedy, SA und 2-OPT als geeignete Kombination für die Fluxprogrammoptimierung (siehe Bild 61). Zudem ist die Streuung der Ergebnisse von Routenlänge und der Optimierungszeit bei mehrfachem Durchlaufen der heuristischen Näherungsalgorithmen nicht signifikant. Die Optimierung eines Beispielprogramms für eine industrielle Flachbaugruppe zeigt eine Verkürzung der Routenlänge um knapp 30% (siehe Bild 61 und Bild 62). [154, S14]

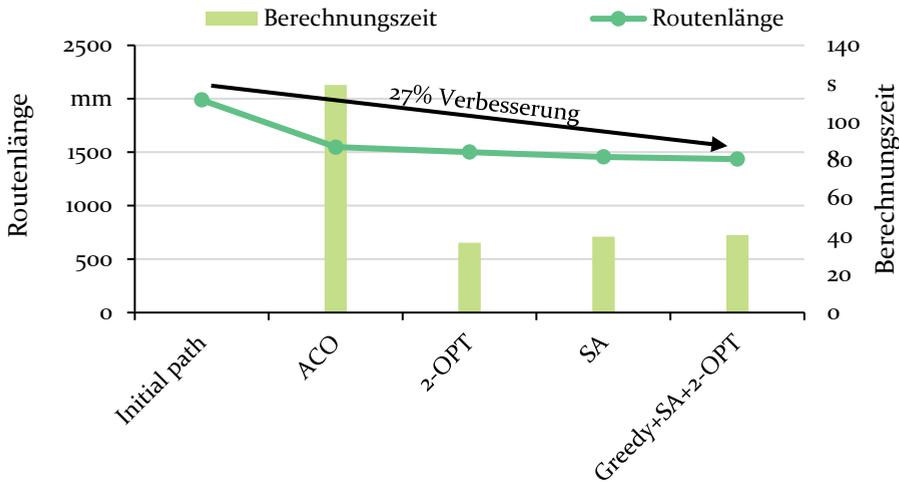


Bild 61: Benchmark der Algorithmen auf Grundlage der besten Parameterkonfiguration der TSP-Algorithmen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit für das vorliegende Optimierungsproblem (Daten aus [S14])

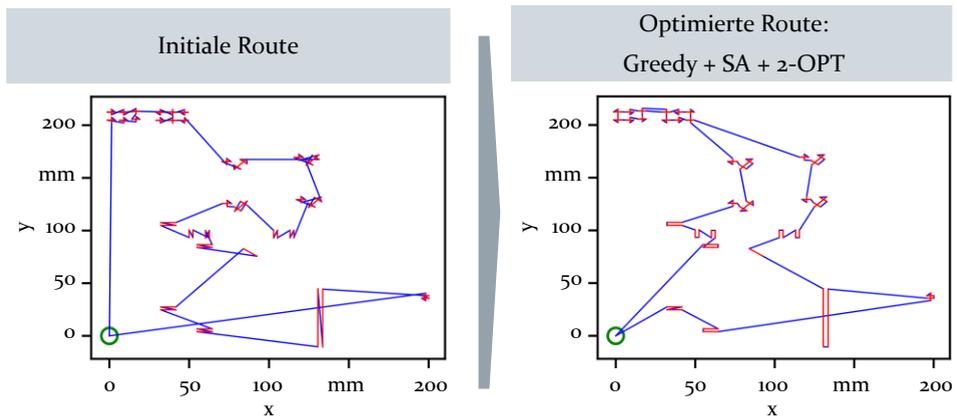


Bild 62: Vergleich der initialen Fluxroute und der TSP-optimierten Route mit Hilfe der kombinierten Algorithmen Greedy, Simulated Annealing (SA) und 2-Opt (Daten aus [S14])

6.1.2 Automatisierte Lötprogrammdefinition und -optimierung

Ziel der Prozessentwicklung besteht darin, für alle Lötstellen den erforderlichen Lotdurchstieg bei minimaler Prozesszeit zu erreichen. Die numerische Simulation mehrerer Reihenfolgen ist mit großen Rechenzeiten verbunden. Die Optimierung des Lötvorgangs bietet mit der Vorheiztemperatur, der Lottemperatur, der Kontaktzeit und der Lötreihenfolge vier

Freiheitsgrade. Diese beeinflussen sich wechselseitig. Zudem steht der Aufheizung durch die Lotwelle die Abkühlung der Leiterplatte in der Löt kammer entlang des Lötprozesses gegenüber (siehe Bild 22). Die Ermittlung des Optimums durch die erfahrungsbasierte Prozessentwicklung ist daher wegen der großen kombinatorischen Komplexität unwahrscheinlich. Besonders, weil das thermische Verhalten der Lötstellentemperatur in Abhängigkeit der Lötkontaktzeit und das zwischenzeitliche Abkühlen nichtlinear einfließt. Auf Grundlage des ML-Modells können diese Prozessparameter systematisch optimiert werden. Dafür werden folgende in Bild 63 skizzierte Optimierungsroutinen miteinander verkettet.

1. Rastersuche über das gesamte Prozessfenster zur Empfehlung der initialen Vorheiztemperatur sowie der Lottemperatur,
2. Bestimmung der Löt Reihenfolge durch löt kontaktzeitabhängige Optimierung mit Hilfe einer TSP-Formulierung
3. Überprüfung der Sensitivität der Lötparameter mit Hilfe einer Monte Carlo-Simulation

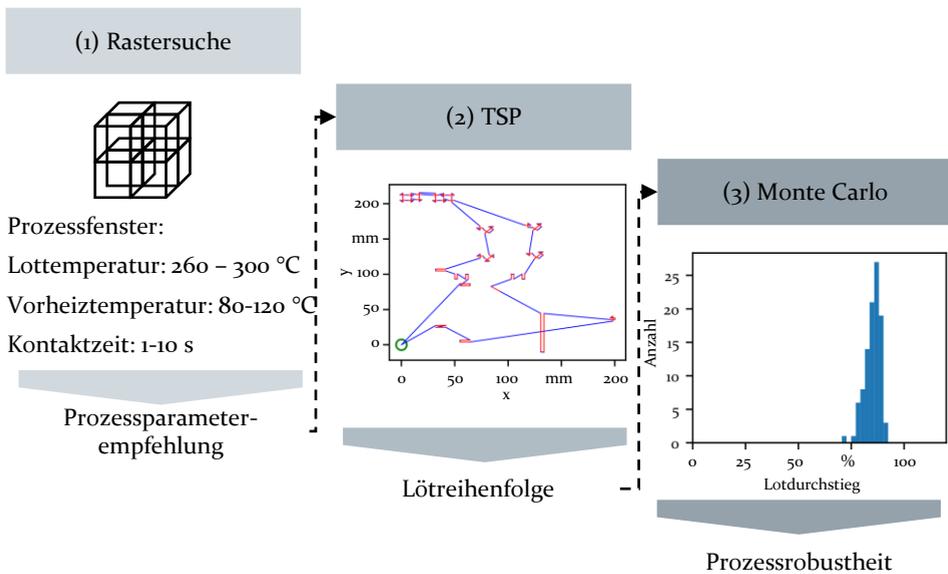


Bild 63: Ablauf zur Optimierung des Lötprogramms

Die Rastersuche überprüft vollfaktoriell diskrete Versuchspunkte innerhalb der gegebenen Prozessgrenzen. Für eine ausreichende Abbildung nicht-linearer Zusammenhänge in den Prozessparametern sollte dabei das Prozessfenster mindestens in 3, besser 5 Faktorstufen aufgeteilt werden. Darauf basierend wird dann ein initialer, globaler Parametersatz empfohlen, der bei möglichst geringen Kontaktzeiten und Temperaturen das

bestmögliche Lötresultat verspricht. Die empfohlene Vorheiztemperatur entspricht dann der globalen Temperatur der Leiterplatte nach dem Vorheizprozess (siehe Bild 6). Da die globale Leiterplattentemperatur über die Gesamtzeit des Lötvorgangs abnimmt, muss die Temperatur der Lötstelle unmittelbar vor der Lötung bestimmt werden.

Die Vorheiztemperatur einer Lötstelle ist damit abhängig von der gewählten Löt Reihenfolge der THT-Lötstellen auf einer Leiterplatte. Daher kann sie bei der Lötprogrammierung zur Optimierung des Lotdurchstiegs eingesetzt werden [33, P11]. Die Löt Reihenfolge kann so durch TSP-Algorithmen optimiert werden. Die Kostenfunktion beim Löten ist transient und asymmetrisch, da die Löt Reihenfolge und die Kontaktzeit die Lötstellentemperatur unmittelbar vor deren Lötung beeinflussen und damit das Lötresultat bestimmen. Die Optimierung der Löt Reihenfolge bedarf folglich einer Berücksichtigung dieses Abkühlverhaltens bei der Optimierung der Reihenfolge auf Grundlage der TSP-Algorithmen. Das beste Resultat ist die Löt Reihenfolge, die den höchsten Lotdurchstieg ermöglicht. Daraus kann angenommen werden, dass so der bestmögliche Lotdurchstieg zu minimalen Lötzeitkosten erzielt wird. Die Kostenfunktion $C(Route)$ beschreibt die Zykluszeit und setzt sich aus der Summe der Fahrzeiten der Lotdüse $C_{Distanz}$ und der Lötzeiten $C_{Lötung}$ für alle Lötunkte p zusammen.

$$C(Route) = \sum_{p=0}^n C_{Distanz}(p) + C_{Lötung}(p) \quad (44)$$

Mit Hilfe des SA-Algorithmus wird dann die Reihenfolge hinsichtlich der Zykluszeit bei möglichst hohem Lotdurchstieg bestimmt. Die notwendige Lötkontaktzeit für den zu erreichenden Lotdurchstieg wird auf Basis des ML-Modells unter Berücksichtigung der Vorheiztemperatur der Lötstelle bestimmt. Während der Lötung wird die Abkühlung der anderen Lötstellen durch natürliche Konvektion mit Formel (45) berücksichtigt.

$$T_{Vorheizung}(t) = T_{Vorheizung}(t = t - 1) - t_k \cdot e \quad (45)$$

Mit e : Kühlrate K/s

Die Sensitivität des Lötprozesses auf Schwankungen der Lötparameter wird zuletzt mit der Monte Carlo-Simulation an jeder Lötstelle überprüft. Auf dieser Grundlage können dann optimierte Lötparameter mit Hilfe des SmartEP-Frameworks empfohlen werden. Das sich ergebende Lötprofil gibt auf Basis hinsichtlich der notwendigen Zykluszeit und der einzusetzenden Temperaturen Aufschluss über die Fertigbarkeit der Leiterplatte. Die Fertigbarkeit steigt somit mit sinkenden Kontaktzeiten, Vorheizungs-

und Lottemperaturen. Auf Basis des eingeführten Vorgehens können folglich Layoutvarianten digital überprüft und optimiert werden.

Bild 64 zeigt die Ergebnisse der Modellvorhersage vor und nach einer TSP-Optimierung auf Basis des Gerber-ML-Modells. In diesem Beispiel kann gezeigt werden, dass die Optimierungsroutine sowohl den Lotdurchstieg etwas verbessern als auch die Lötprozesszeit reduzieren um 10 % kann. Bei der Optimierung spielt besonders die entlang der Prozessdauer global sinkende Leiterplattentemperatur, und damit die Vorheizung der Lötstellen, eine wichtige Rolle. Da diese Kühlrate in der Designphase nicht genau bekannt ist, kann dieser Unsicherheit mit der Durchführung einer Monte Carlo-Simulation Rechnung getragen werden. Dabei wird die Sensitivität der Vorheiztemperatur auf das Optimierungsergebnis analysiert.

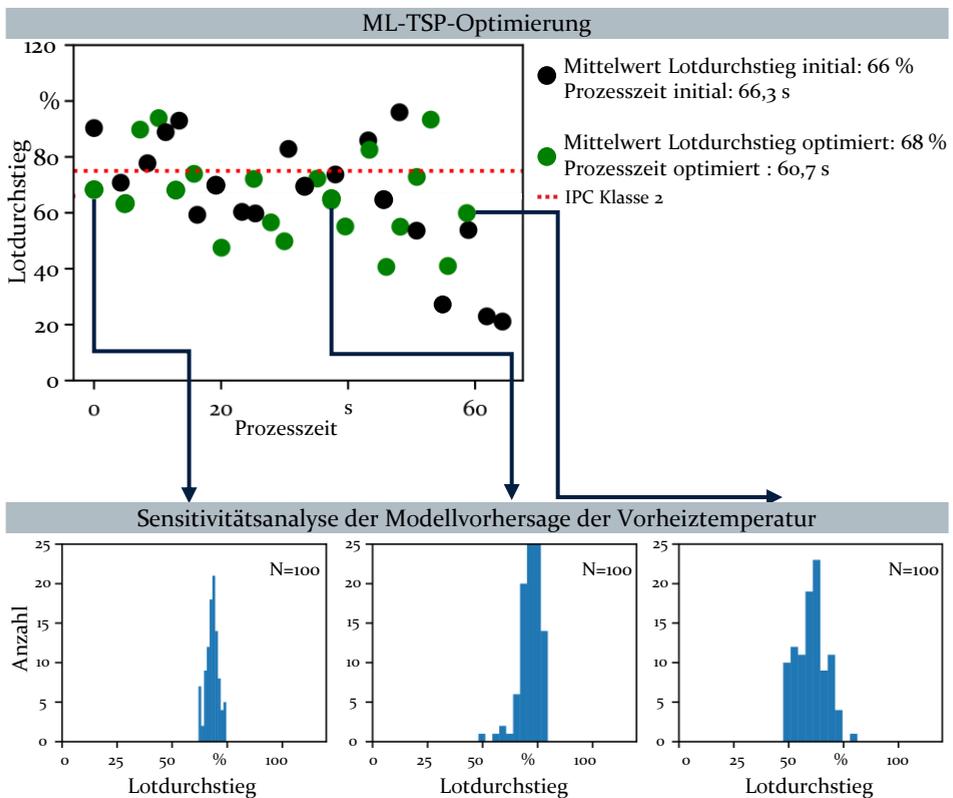


Bild 64: Ergebnis der Modellvorhersage vor und nach der ML-TSP-Optimierung für 20 Lötstellen bei 280 °C Lottemperatur und 120 °C initialer Vorheiztemperatur sowie Analyse der Sensitivität des Lötergebnisses auf die Modellvorhersage mit Hilfe der Monte Carlo-Simulation mit N=100 mit einer Standardabweichung der Vorheiztemperatur von 10 %

6.2 Integration eines Manufacturability-Checks in die Produkt- und Prozessentwicklung

Um die entwickelten Modelle und Vorgehen in den Entwicklungsprozess zu integrieren, wird im Folgenden ein Web-Anwendung entwickelt. Die Implementierung als anwenderfreundliche und wartungsarme Applikation ist die Grundlage zur produktiven Nutzung in der Industrie. Die Absicherung der Fertigbarkeit durch Designregeln kann durch die Prozessmodellierung ersetzt werden. Die Fertigbarkeit kann während der Produktentwicklung durch datenbasierte Prozessmodellierung mit dem gerberbasierten ML-Modell aus Kapitel 5.2 überprüft und optimiert werden, wie Bild 65 verdeutlicht.

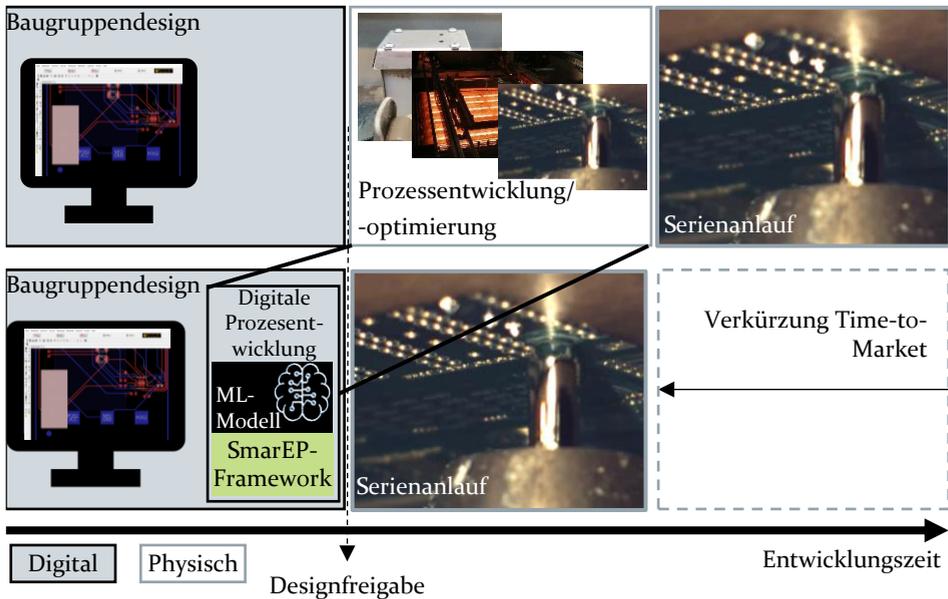
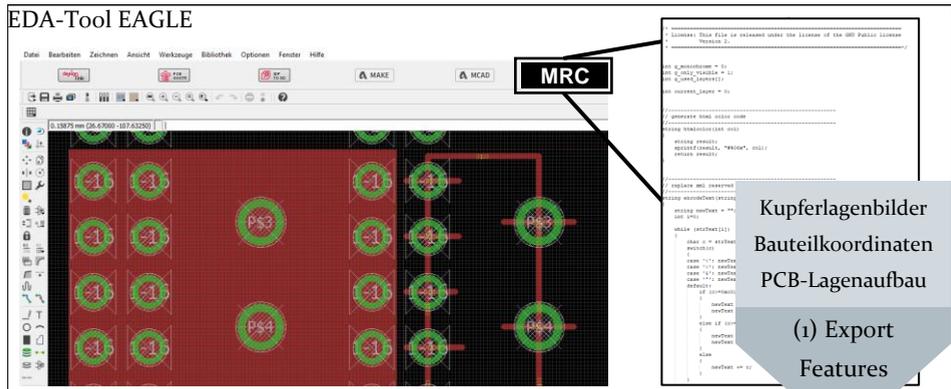


Bild 65: Reduktion der Time-to-Market durch modellbasierte Prozessentwicklung auf Grundlage digitaler Prozessmodellierung

Ergänzend zu dem Stand der Technik „Design-Rule-Check“ (DRC) wird diese Überprüfung als „Manufacturing-Rule-Check“ (MRC) bezeichnet. Dadurch entfällt der Prozessentwicklungsanteil in der iterativen Produktentwicklung, der sonst ohne geeignete Modelle auf Basis physischer Prototypen durchgeführt werden muss, wie in Bild 65 verdeutlicht wird. Im Ergebnis kann dann die Time-to-Market für neue Produkte reduziert werden. Durch die verbesserte Fertigbarkeit wird die Produktivität und folglich die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen gesteigert.

Die Umsetzung der Web-Anwendung basiert auf dem SmartEP-Framework. Die Übergabe der notwendigen Designdaten an das Framework kann direkt als Gerberdaten bzw. Bilddateien stattfinden. Alternativ dazu eignen sich Schnittstellen zu EDA-Programmen für die Integration des ML-Modells in die Entwicklung. Genannt sei das Beispiel für der EDA-Software EAGLE, deren PCB-Projektdatei eingelesen und die Features für ML-Vorhersage automatisiert exportiert werden, siehe Bild 66 (1).



Python SmartEP-Framework (2) Gerberimport

(3) Python Flask-Server mit ML-Modell

(4) Visualisierung der Vorhersage als Web-Anwendung



Bild 66: Ablauf der Abschätzung des Lotdurchstiegs in der Web-Anwendung im industriellen Umfeld

Alternativ dazu kann die Fertigbarkeit auf Grundlage der Gerberdaten und zusätzlichen Bauteilinformationen überprüft werden (2). Die Daten werden auf einem Flask Server mit den Prozessparametern aus dem User-Interface aggregiert und eine Vorhersage für jede Lötstelle herausgegeben (3). Damit ist dann die Fertigbarkeit abgesichert bzw. die Nicht-Fertigbarkeit eines vorliegenden Leiterplattendesigns nachgewiesen. Die Visualisierung (4) der Lotdurchstiege kann dann als Diskussionsgrundlage zwischen Design- und Fertigungsabteilung dienen. Dieser Nachweis kann weiterhin für eine aufwandsgerechte Angebotserstellung für Auftragsfertigung, die Prozessentwicklung und die Fertigungsplanung eingesetzt werden. Zudem können auf dieser Grundlage Designs freigegeben werden und kostspielige Qualifizierungen wie EMV- und Zuverlässigkeitstests durchgeführt werden, ohne das Risiko einer notwendigen Designüberarbeitung wegen später auftretender Fertigungsprobleme.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Elektronische Flachbaugruppen sind die physische Grundlage großer technologischer Trends. Dazu zählen insbesondere die Elektrifizierung der Mobilität, Automatisierung in Industrie und Privathaushalten und regenerative Energien. Aufgrund des Ausmaßes dieser globalen Entwicklungen ist besonders aus Gründen der Nachhaltigkeit eine ressourcenschonende Fertigung dieser Flachbaugruppen geboten. Gleichzeitig fordert der große Wettbewerbsdruck zwischen Fertigungsstandorten eine stetige Produktivitätssteigerung und Innovierung der eingesetzten Prozesse und Methoden. Dies gilt besonders für die Fertigung in Hochlohnländern. Kurzfristig sind die Fertigungskosten trotz hoher Lohnkosten möglichst gering zu halten. Langfristig muss die Design- und Fertigungserfahrung trotz der Veränderungen durch den demographisch bedingten Fachkräftemangel in den Unternehmen verbleiben. Ausgehend von der „Rule-of-10“ ist besonders die Designphase einer Flachbaugruppe entscheidend für deren Fertigbarkeit und damit die erreichbare Kosteneffizienz.

In der Elektronikfertigung besteht hier großes Potential beim THT-Lötprozess. Unternehmensumfragen und die Analyse veröffentlichter Forschungsarbeiten zeigen, dass SMT/THT-Mischbestückung speziell in leistungselektronischen Anwendungen eingesetzt werden und den größten Teil der elektronischen Baugruppen ausmachen. Dem Selektivwellenlötprozess für die Lötung der THT-Lötstellen kommt dabei große Bedeutung zu. In diesem Verfahren wird die Lötqualität, gemessen als Füllgrad des THT-Lochs, also der Lotdurchstieg, maßgebend durch das Lötstellendesign und nachrangig durch die Lötprozessparameter bestimmt. Die fertigungsgerechte Konstruktion von THT-Lötstellen ist somit maßgebend für den Löterfolg. Vorhandene Ansätze zur Absicherung der Fertigungsgerechtigkeit von THT-Lötstellen bestehen in erster Linie in der Befolgung empirisch ermittelter Designregeln. Dieser Ansatz ist jedoch in seiner Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit bei steigender Komplexität der Leiterplattendesigns begrenzt und trifft teils unzulässige Annahmen. Zudem kann die Wechselwirkung von Leiterplattenlayout und Prozessparametern nur durch Hinzunahme von Lötexpertenerfahrung abgeschätzt werden.

Die Verbesserung etablierter Entwicklungsmethoden durch lernende Modelle in der Designphase bietet dabei großes Potential zur Lösung der kurz- und langfristig auftretenden technischen und wirtschaftlichen Problemstellungen. In der Designphase ist dafür ein zuverlässiges Prozessmodell zur Vorhersage des Lotdurchstiegs erforderlich. Damit ist eine

automatische und skalierbare Beurteilung der Fertigungsgerechtigkeit von THT-Lötstellen möglich.

Für die Entwicklung eines aussagekräftigen Modells werden in der vorliegenden Arbeit signifikante Prozesseinflussfaktoren experimentell mit Hilfe statistischer Versuchsplanung ermittelt. Die Analyse der Prozesseinflussfaktoren zeigt, dass der Lotdurchstieg durch das Lötstellendesign und Bauteil dominierend beeinflusst wird. Unzulänglichkeiten hinsichtlich der Fertigbarkeit von THT-Lötstellen können wegen der limitierten Wärmebeständigkeit der Leiterplatte und der THT-Bauteile nur bedingt durch Prozessparameteranpassungen ausgeglichen werden.

Auf Basis der experimentell ermittelten Einflussfaktoren werden Annahmen getroffen und ein aussagekräftiges multiphysikalisches Simulationsmodell und ein analytisches Rechenmodell entwickelt. Die numerische Vorhersage des Lotdurchstiegs erlaubt insbesondere eine weitergehende detaillierte Analyse des Prozesses sowie der Designeinflussfaktoren anhand einzelner Lötstellen. Die Simulation zeichnet sich durch sehr gute Übereinstimmung mit Lötexperimenten aus. Jedoch sind für die Berechnung der numerischen Lösung für jeden Parametersatz hohe zeitliche Aufwände im Bereich mehrerer Stunden bis Tage notwendig. Für das analytische Modell werden insbesondere durch die Modellierung des Lötstellendesigns als thermische Ersatzschaltung mit thermischen Widerständen und Kapazitäten der Kupferlagen idealisierte Annahmen getroffen. Der Prozess wird darauf aufbauend mit Hilfe eines Wärmeleitungsmodells berechnet. Der Lotdurchstieg wird dann auf Basis der transienten Temperaturentwicklung abgeschätzt. Der Abgleich mit Lötexperimenten bestätigt grundlegend die Funktionalität und Tauglichkeit des Ansatzes und erlaubt eine Abschätzung des Lotdurchstiegs ohne relevanten Rechenaufwand. Die analytische Rechenmethode bestätigt transparent die Validität der Annahmen hinsichtlich des Prozesseinflusses des Kupferlagendesigns.

Mit diesen Erkenntnissen wird ein datenbasiertes Modell in einem python basiertes Softwareframework für Leiterplattendesigndaten entwickelt. Die Modellierung des Leiterplattenlayouts auf Grundlage des defacto Standards für Leiterplattendesigndaten, den Gerberdaten, zeichnet sich durch eine mit der multiphysikalischen Simulation vergleichbare Vorhersagequalität aus. Die Rechendauer liegt dabei im Bereich von Sekunden. Der Vergleich der analytischen, numerischen und datenbasierten Vorhersagemodelle zeigt die besondere Eignung des gerberdatenbasierten ML-Modells für die Implementierung in den industriellen Produkt- und Prozessentwicklungsprozess. Auf Grundlage des Softwareframeworks und des

validierten ML-Modells wird weiterhin die automatisierte Prozessentwicklung und -optimierung umgesetzt. Dies beinhaltet die Optimierung des Fluxvorgangs mit Hilfe von heuristischen Algorithmen zur Näherung der problemspezifischen Formulierung als Traveling Salesman-Problem. Zudem wird der Lötvorgang auf Basis des ML-Modells durch eine vollfaktorielle Rastersuche für die Prozessparameter, einen TSP-Algorithmus zur Bestimmung der Reihenfolge und eine Monte Carlo-Simulation zur Überprüfung der Prozessrobustheit optimiert. Für die Integration des ML-Modells in die industrielle Produkt- und Prozessentwicklung wird exemplarisch eine Web-Anwendung entwickelt.

Die entwickelten Ansätze eignen sich für den Einsatz zur algorithmischen Überprüfung der Fertigungsgerechtigkeit von Produkten durch Prozessmodellierung. Damit können die Nachteile der ungenauen axiomatischen Designregeln zur Absicherung der Fertigbarkeit überwunden werden. Zudem bieten besonders lernende Verfahren die Möglichkeit, Lötexpertenerfahrung auf Grundlage im Unternehmen vorhandener Produkte mitarbeiterunabhängig zu speichern und nutzbar zu machen.

Nachdem die Grundlegende Nachweis und die Methodik zur technischen Umsetzbarkeit von ML gestützter Qualifizierung der Fertigungsgerechtigkeit erbracht ist, können weitere Funktionen erweitert werden. Die Untersuchung weiterer überwachter Lernalgorithmen sowie die Vergrößerung der Datenbasis kann die Aussagekraft der ML-Modelle erweitern. Bei der Entwicklung von Leiterplatten Designs kann eine historische Datenbasis in der vorgestellten Struktur als Grundlage für die Identifikation von Ähnlichkeiten genutzt werden. Auf diese Weise können kritische Lötstellen mittels unüberwachten Lernverfahren in einer Neuentwicklung erkannt werden, die in ähnlicher Form bereits in früheren Entwicklungsprojekten aufgetreten sind. Durch den Bezug zu historischen Entwicklungsprojekten fördert kann damit das Vertrauen der Anwender fördern. Weiterhin können bestärkende Lernverfahren (engl. Reinforcement Learning) eingesetzt werden, um anlagenspezifisch Prozessparameter zu empfehlen.

Auf diese Weise kann einerseits kurzfristig die Wettbewerbsfähigkeit und Produktivität gesteigert werden und andererseits der sich langfristig weiter verschärfende Fachkräftemangel in der Fertigung gemildert werden. Die Übertragung des in dieser Arbeit entwickelten Vorgehens zur prozessmodellbasierten Überprüfung der Fertigungsgerechtigkeit bietet somit großes Potential für die Lösung drängender gesamtgesellschaftlicher Fragestellungen.

8 Summary and outlook

Electronic modules are the enabling technology of today's technological trends. This includes e-mobility, industrial and domestic automation and regenerative energies. Due to the large extent of these global developments, sustainable and resource efficient manufacturing of electronics modules is urgently needed. Also, the severe competition between manufacturing sites requires steady improvement in productivity of processes and methodology, especially in high-wage countries. In the short term, manufacturing costs have to be kept low. In the long term, the design- and manufacturing experience has to be secured and maintained inside the companies despite the shortage of specialists due to demographic changes. Following the "rule-of-ten" during the design phase of an electronic module the manufacturability as well as its cost efficiency is predefined to a large extent.

In electronics manufacturing THT-soldering offers great potential for improvement. According to a business survey and the analysis of published research, SMT/THT-mixed assembled printed circuit boards (PCBs) account for the highest percentage among power electronic modules. Selective wave soldering is an industry standard for soldering THT-solder joints on such mixed assembled PCBs. The primary process quality criterion is the degree of filling of the plated through hole. The soldering hole filling level is defined by the balance of the soldering heat supply and the soldering heat demand. The former is limited by the material's heat resistance. The latter is defined by the solder joint design. As a consequence, it is the primary leverage to manufacturable THT-solder joints and responsible for sufficient hole fill. To ensure manufacturability, empirically determined design rules are followed by the designers. Yet, the reliability of this approach is unsatisfactory for highly complex PCB designs as inadmissibly simplifying assumptions are made. Additionally, non-linear interactions between PCB design and soldering process cannot be captured and only be estimated by consulting expert knowledge.

The improvement of established development methods by machine learning models during design phase shows promising potential to solve named short and long term technological and economic questions. Therefore, a robust hole fill prediction model for the selective wave soldering process is required. Such model enables an automated and scalable evaluation of the manufacturability of THT-solder joints.

In preparation for the development of a meaningful model, in this work the significant process impact factors are identified by means of the design of experiments method. The analysis of these factors proves that hole fill is dominated by the thermal characteristics of the solder joint design and the THT-component. Improper design can hardly be compensated by process parameter adjustments due to limitations of the material's heat resistance.

On the basis of these experimentally analyzed factors, assumptions are made to build a multi-physics simulation model and an analytical calculation procedure. Due to its excellent congruence with soldering experiments, the numerical simulation allows detailed process analysis and prediction as well as investigation of further design impacts. However, this precision comes at high computational cost for the numerical solution in the range of hours and days for each set of parameters of a solder joint. The analytical approach is based on an idealized thermal equivalent network that models the solder joint design by means of the thermal resistance and capacitances of the individual copper layers. The process is then calculated with this thermal equivalent circuit model. The hole fill is then estimated based on the transient temperature distribution. The modelling results prove good congruence with hole fill in soldering experiments at no computational cost. The capability of this transparent calculation approach confirms the validity of the assumptions made with respect to the representation of the solder joint with a thermal equivalent network.

With this background, the development of a data driven modelling approach is implemented within a python-based software framework for PCBs. The modelling of the PCB design is based on gerber data as defacto standard in PCB manufacturing. Once trained, the model shows excellent robustness and high prediction accuracy at minimum computing time in the scale of seconds. The comparison of the analytical, numerical and data-based prediction models emphasizes the perfect suitability of the gerber data-based ML-model for the implementation in industrial product and process development applications. With the properties of the ML-model, automated process development and optimization routines are implemented. This comprises optimization of fluxing sequences by means of heuristic algorithms to approximate the solution to the customized formulations as a traveling salesman problem. Furthermore, process parameter recommendation is performed on the basis of grid search, the TSP approach to determine the soldering sequence. Finally, the process robustness is doublechecked with a Monte Carlo simulation. For the model integration into industrial product and process development processes, a web application is developed.

The developed model is shown to be suitable for the algorithmically supported digital audit of manufacturability of products by process modelling. With this approach the disadvantages of the inaccurate state of the art design rule approach can be overcome. Additionally, machine learning approaches come along with the opportunity to learn from existent industrial products, secure it and make process knowledge available inside the company.

After the proof of concept of the methodology and the technical feasibility of ML-based qualification of the manufacturability, further functions can be developed. The investigation of further supervised ML algorithms as well as the increase of the training database can significantly improve the validity of the models. Additionally, with the introduced structure of feature sets, historical project data can be the base for the identification of similarities during the layout of a new PCB. By this means, critical solder joints can be detected based on unsupervised learning, which have already occurred in previous PCBs. Especially the link to previous developed PCBs can help the user to trust the application. Furthermore, reinforcement learning methods can be applied to recommend process parameters for a specific machine configuration.

In this way, in the short-term competitiveness and productivity can be improved. In the long term the shortage of specialists in manufacturing can be addressed. Ultimately, the transfer of this procedure of auditing manufacturability by means of process modelling has great potential to contribute to the solution of urgent macrosocial challenges.

Anhang

Marktrecherche zu Einsatzbereichen von SMT- und THT-Bauteilen

Grundlage für die Studie zu den Einsatzbereichen von SMT- und THT-Bauteilen sind Spezifikationsdaten von „Industrial-grade“ und „Commercial grade“ gekennzeichneten Bauteilserien. Die Studie umfasst 2853 Kondensatoren von KEMET und TDK, 324 Induktivitäten von AVX, Murata und TDK sowie 1187 MOSFETs von Infineon. [S1]

Eigenschaften und Einflüsse von THT-Lötverfahren

Tabelle 7: Qualitative Gegenüberstellung von THT-Lötverfahren und Gewichtungen für High-mix Low-Volume Fertigungsumgebungen [S1, S2]

	Quelle	Selektive Anpassbarkeit	Wärmeleistung	Prozessstabilität	Produktivität	Prozessentwicklung	Rüstaufwand	Gewichtete Summe	Eignung
Gewicht	-	0,3	0,1	0,15	0,05	0,2	0,2	-	-
Multiwelle/Diptigel	[35]	2	4	4	5	4	1	2,9	0,6
Reflow THT/ PiP	[27]	1	3	3	5	4	4	2,9	0,6
Kolbenlöten	[30]	5	1	1	1	1	5	3,0	0,6
Welle mit Maske	[33, 34]	2	4	5	4	5	3	3,6	0,8
Wellenlöten		2	5	5	4	5	5	4,1	0,9
Laserlöten	[36, 37]	5	5	3	3	3	5	4,2	0,9
Selektiv-/Miniwelle	[26, 30, 35, 46, P2]	5	4	5	4	5	4	4,7	1,0

Tabelle 8: Versuchsparameter für Tauchtests nach IPC TM650 zur Qualifizierung der Wärmebeständigkeit von Basismaterial

	Lotbadtemperatur in °C	Tauchzeit in s
T260	260	60
T288	288	10

Tabelle 9: Übersicht über Lebensdauerstudien von THT-Lötstellen

	Legierung	Temp. Min/Max	Dwell time; Rampe	Beschreibung	Time to Failure
[68]	SAC305	0 °C/ 100 °C	15 min; 15°C/min	Lotteildurchstieg, Experimentell, ohne Pinüberstand	500-2500 Zyklen
[75]	63Sn37Pb	-32 °C/ 60 °C	8 h; 12 °C/min	Lotteildurchstieg, Simulativ, mit/ohne Verguss	Kein Versagen absehbar
[76]	63Sn37Pb	-40 °C/ 125 °C	10 min; 16,5 °C/min	Lotteildurchstieg, Simulation/Experimentell, 1-Lagen Leiterplatte, ohne Metallisierung der THT Löcher	1300-1600 Zyklen
[77]	SAC305	-40 °C/ 135 °C	30 min Zykluszeit	Simulation der Kriechdehnung	Versagen nicht Vorhergesagegenstand
[74]	63Sn37Pb / SAC305			Vibration	

THT-Leiterplattendesign und Prozessentwicklung

Tabelle 10: Designempfehlungen für die Anordnung von THT-Bauteilen auf der Leiterplatte aus der Literatur für bleifreie und bleihaltige Wellenlötprozesse

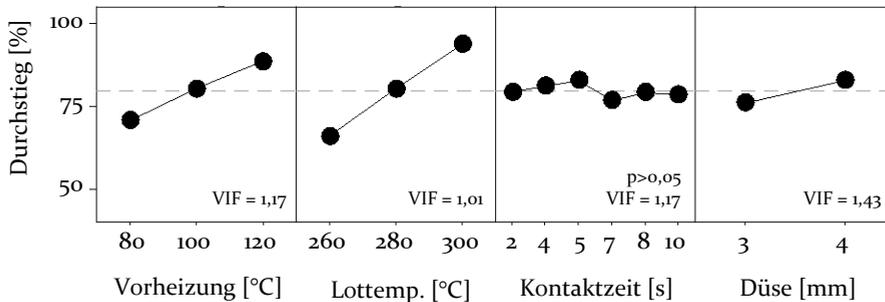
	Wert	Lot	Prozess	Quelle
Fine pitch zw. Pins	1,27 mm	○	Selektiv	[35, 63]
Abstand zu SMT Bauteilen	6,35 mm	●○	Selektiv	[34]
Bauteil-orientierung	Pinreihen Parallel zur Transportrichtung	○	Welle	[33, 42, 55]
Pinüberstand	> 0 mm	○○	Welle	[31, 68]
	>0,8 mm & 1-facher Pindurchmesser; Klasse 3 max. 1,5 mm; Klasse 2 max. 2,5 mm	-	-	[57, 58]
	>0,5 mm	-	-	[2, 54, 57]
Mindestabstand SMT-Bauteilen	1,6 mm	○	Selektiv	[54]
	$D_{Freistellung} > D + 2 \cdot 1 \text{ mm}$	○	Selektiv	[143]
	Pb-frei ○ Pb ●			

Tabelle 11: Empfehlungen für die Prozessparametrisierung aus der Literatur für bleifreie und bleihaltige Wellenlötprozesse

	Wert	Lot	Prozess	Quelle
Lot-temperatur	40-80 °C über T_{Solidus}	○	Selektiv	[26]
	Temperaturgradient klein => ~100 °C	○	Welle	[31]
z-Abstand/ Eintauchtiefe	50 % der Boarddicke	○	Selektiv	[35]
Masken- öffnung	7,62 mm (0,300")	○	Selektiv	[33]
Lochspalt	0,125 mm < Lochspalt ≤ 0,35 mm	-	-	[115]
	Pb-frei ○ Pb ●			

Ergänzende Experimentalergebnisse

Die zusammengefasste Auswertung der Foko-, Elko- und MOSFET-Versuchspläne aus Tabelle 4, Kapitel 3.1.1 über alle Design-Bauteilkombinationen hinweg.



$p > 0,05$: statistisch nicht signifikant

Variation inflation factor (VIF) = 1: unabhängige Koeffizientenwahl

Bild 67: Haupteffektdiagramm gemeinsam ausgewertete Versuchspläne aus Tabelle 4, N = 160, erklärte Streuung: 62 %

Materialdaten

Tabelle 12: Angenommene Materialparameter für Festkörper Epoxidharz, Kupfer (Daten wie in [P11, S8, S9])

	Lotbadtemperatur in °C	Kupfer	FR4/ Löt- stopplack
Dichte ρ in kg/m^3	30 °C bis 300 °C	8979	1850
Spezifische Wärmekapazität c in $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	30 °C bis 300 °C	381	930
Thermische Leitfähigkeit λ in $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	30 °C bis 300 °C	387,6	0,25

Tabelle 13: Materialeigenschaften für den erstarrten Zustand und im Erstarrungsbereich (*fiktive Lotlegierung) (Daten wie in [P11, S8, S9])

	Temperatur	SAC305	SAC305- low*	Sn100	Sn63Pb 37
Oberflächen- spannung [N/m]	$T < T_{\text{solid}}$	0,026	0,026	0,026	0,026
	$T_{\text{solid}} < T < T_{\text{liquid}}$	0,1	0,1	0,1	0,1
Viskosität [Pa s]	$T < T_{\text{solid}}$	0,05	0,05	0,05	0,05
	$T_{\text{solid}} < T < T_{\text{liquid}}$	0,01	0,01	0,01	0,01
Dichte [kg/m^3]	$T < T_{\text{solid}}$	7300	7300	7300	8400

Tabelle 14: Koeffizienten zur Bestimmung der temperaturabhängigen Loteigenschaften (Daten aus [P11, S8, S9]); (*fiktive Lotlegierung)

	Einheit	SAC305	SAC305 -low*	Sn100	Sn63 Pb37	SnBi
Quelle		[152, 155]		[156, 157]	[103, 158- 160]	[156, 161, 162]
A	$\frac{N}{m}$	0,586	0,586	0,5425	0,498	0,459
B	$10^{-4} \frac{N}{m K}$	0,89	0,89	0,89	0,45	0,5
C	$\frac{kg}{m^3}$	7479,4	7479,4	7467,4	8590	9068,4
D	$\frac{kg}{m^3 K}$	0,731	0,731	0,799	0,72	0,92
E	$10^{-3} Pa s$	9,681	9,681	9,681	2,24	
F	$10^{-8} \frac{Pa s}{K^2}$	2,321	2,321	2,321	0	
G	$10^{-8} \frac{Pa s}{K^2}$	1,657	1,657	1,657	0	
Kontakt- winkel	°	32,5	32,5	40	17	55
Wärme- leitfähig- keit	$\frac{W}{m K}$	58	58	64	53	20
Wärme- kapazität	$\frac{J}{kg K}$	219	219	220	183	167
Schmelz- bereich	°C	217-223	200-205	227-232	183-188	137-139

Simulationsparameter

Tabelle 15: Parameter des Lötstellendesigns für die Netzstudie des Simulationsmodells (Daten aus [S9])

Designparameter	Wert
Dicke der Leiterplatte	1,6 mm
Anzahl der Kupferschichten	2
Dicke der Kupferschichten	35 μm
Dicke der Hülse	25 μm
Bauteilpin	Folienkondensator
Pinüberstand auf der Leiterplattenunterseite	1,5 mm
Lötspaltbreite	0,2 mm

Tabelle 16: Prozessparameter der Netzstudie des Simulationsmodells (Daten aus [S9])

Prozessparameter	Wert
Lötzeit	2 s
Lottemperatur	260 °C
Vorheiztemperatur	75 °C
Umgebungstemperatur	30 °C
Innendurchmesser der Lotdüse	3 mm
Abstand zw. Düse und Leiterplattenunterseite	2,5 mm
Wellenhöhe	3 mm
Durchmesser der Lotwelle/Kontaktdurchmesser	4,5 mm

Tabelle 17 zeigt die Rechenergebnisse der Netzstudie, die zudem in Bild 41 grafisch gezeigt werden. In Tabelle 15 werden die Design- bzw. Lötparameter beschrieben.

Tabelle 17: Parameter der Diskretisierungsnetze und Ergebnisse der Netzstudie (Daten aus [P11, S9])

Netznummer	1	2	3	4	5
Knotenzahl	5317	10513	16826	19934	25047
Elementzahl	5114	10225	16454	19530	24591
Elementgröße in m	0,000175	0,00015	0,0001	0,0001	0,0001
Mittlere Aspect Ratio	1,49	1,66	1,48	1,55	1,57
Max. Aspect Ratio	4,287	5,68	4,53	6,428	6,309
Mittlere Skewness	0,021	0,0175	0,012	0,011	0,009
Max. Skewness	0,482	0,54	0,557	0,51	0,497
Lotdurchstieg	44,1 %	44,6 %	44,8 %	46,7 %	46,8 %
Abweichung zum Experiment	11,8 %	10,8 %	10,4 %	6,6 %	6,4 %
Simulationsdauer	9,2 h	9,92 h	10,18 h	10,35 h	10,45 h

Ergänzende Simulationsstudien

Prozessparameter für Simulationsstudien:

- Vorheiztemperatur: 100 °C
- Lottemperatur: 280 °C

Leiterplattendicke

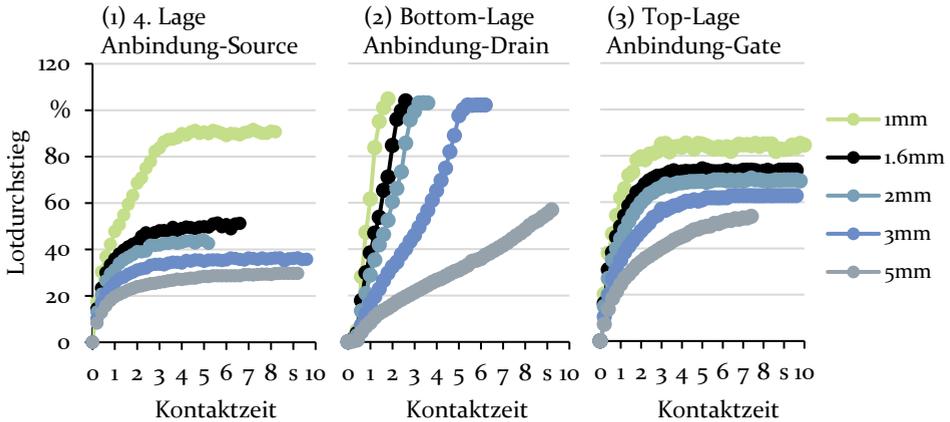


Bild 68: Einfluss der Leiterplattendicke auf den Lotdurchstieg, Lochdurchmesser 1,4mm, Innenlagendicke 95 μm , Außenlagendicke 140 μm , Lötstellendesign-Bauteil: (1) 4. Layer-Source, (2) Bottom-Layer-Drain, (3) Top-Layer-Gate

Lochdurchmessers

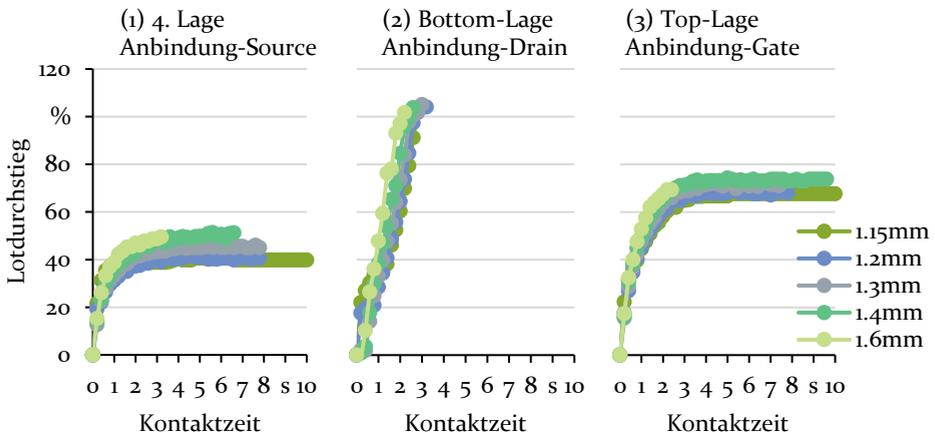


Bild 69: Simulationsstudie zum Lochdurchmesser, Leiterplattendicke 1,6 mm, Lötstellendesign-Bauteil: (1) 4. Layer-Source, (2) Bottom-Layer-Drain, (3) Top-Layer-Gate

Innenlagendicke

Mit kleiner werdender Kupferlagendicke, verringert sich die Wärmespreizung wegen des vergrößerten horizontalen thermischen Widerstands in der Kupferlage. Ist die Kupferlage dann genügend erwärmt, steigt das Lot weiter durch (siehe 18 μm in Bild 70).

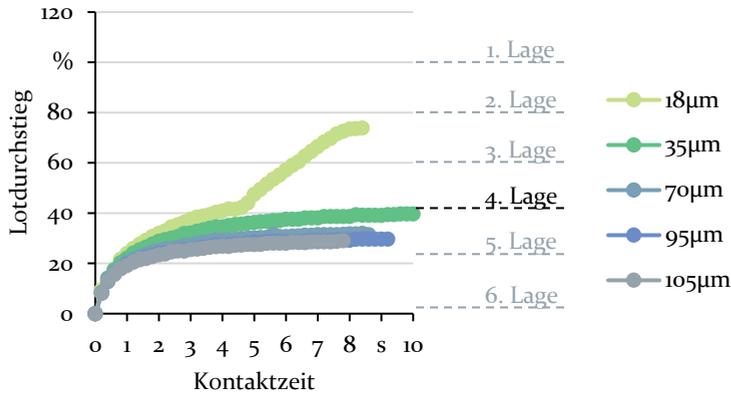


Bild 70: Abschätzung der maximalen Lagendicke für Prozessparameter im Zentralpunkt für verschiedene Innenlagendicken, Bauteilpin Source, Leiterplattendicke 5 mm

Einfluss der Lotlegierung

Der Lotdurchstieg wird maßgeblich von den Erstarrungseigenschaften der Lotlegierung beeinflusst. Der Vergleich der Lotlegierung SAC305 und SAC305-low zeigt den wesentlichen Einfluss der Erstarrungstemperatur, bei sonst identischen Materialparametern, siehe Tabelle 13, Tabelle 14. Der Wärmebedarf einer Lötstelle steigt mit höherer Erstarrungstemperatur.

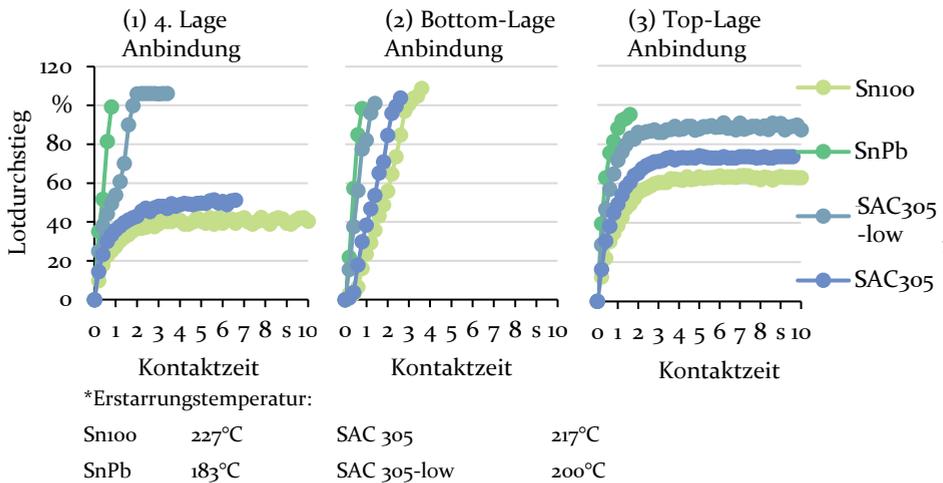


Bild 71: Einfluss der Schmelztemperatur auf den Lotdurchstieg anhand typischer bleihaltiger und bleifreier Lotlegierungen; Lötstellendesign-Bauteil: (1) 4. Layer-Source, (2) Bottom-Layer-Drain, (3) Top-Layer-Gate

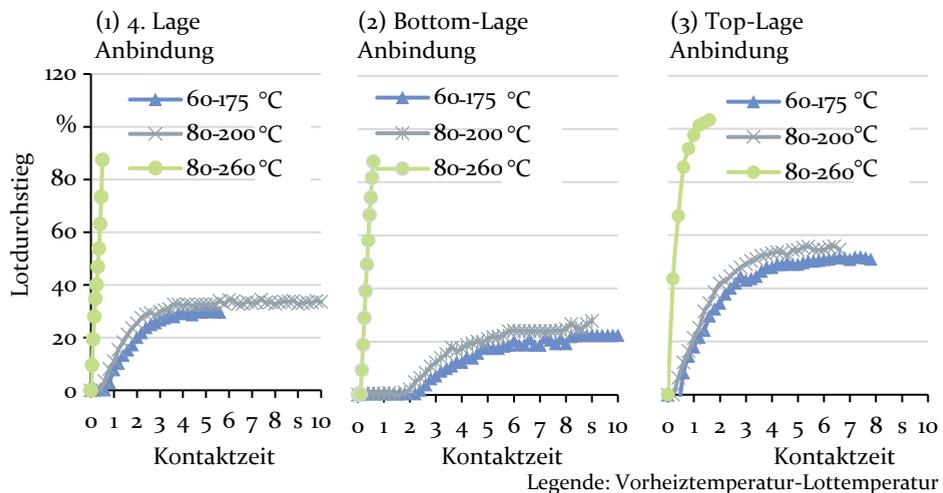


Bild 72: Einfluss der Prozessparameter Vorheiztemperatur und Lottemperatur auf den Lotdurchstieg für niedrigschmelzendes Zinn-Bismut Lot; Lötstellendesign-Bauteil: (1) 4. Layer-Source, (2) Bottom-Layer-Drain, (3) Top-Layer-Gate

Mit äquivalenten homologen Vorheizungs- und Lottemperaturen von etwa 0,75 und 1,1 für die verschiedene Legierungen, wie in Tabelle 18 zusammengefasst, können näherungsweise vergleichbare Lotdurchstiege mit, siehe im Vergleich besonders Bild 71 (1) und Bild 72 (1).

Tabelle 18: Bestimmung äquivalenter Lötparameter über die homologe Temperatur der Lotlegierung

Lotlegierung	Solidustemperatur in °C	Vorheizung in °C	Lotbadtemperatur in °C	Homologe Vorheizung	Homologe Lotbadtemperatur
SAC305	217	100	280	0,76	1,13
SnBi	138	60	175	0,81	1,09
SnPb	183	80	235	0,77	1,11
Sn100	227	100	290	0,75	1,13

ML-Hyperparameterraum

Tabelle 19: Hyperparameterraum für ML-Modell Training je Layer

Aktivierungsfunktion	Batch normalization	Activity, Bias & Kernel Regularizer	Drop out	Kernel Initialisierung	Anzahl Knoten/Layer
relu	false	l1_0.001	max: 0.2	Glorot normal	max: 2048
selu	true	l1_0.0001	min: 0	Glorot uniform	min: 3
tanh		l2_0.01		He normal	
elu		l2_0.001		He uniform	
swish		l2_0.0001		Lecun normal	
linear		l1l2_0.01		Lecun uniform	
gelu		l1l2_0.001	Random normal		
lrelu		l1l2_0.0001	random uniform		
prelu					

Tabelle 20:Allgemeine Modell Hyperparameter

Parameter								
Data Augmentation	false	true						
Augmentation percentage	0.2	0.4	0.5	0.6				
Lernrate	Max: 0.01	min: 1e06						
Batch size	Max: 256	min: 8						
CRL step size	Max: 10	min: 2						
Decay factor	max: 0.9	min: 0.1						
Dropout type	normal	gaussian	alpha					
Epochen	100000							
Loss function	MSE	MAE	MSLE					
Höchste Lernrate	max: 0.01	min: 0.0001						
Modus	triangular	triangular2	Exp-range					
Optimierer	Adam	Nadam	Ada-grad	Ada-max	Rec-tified Adam	RMS-prop	Ftrl	Yogi
Patience decay	max: 70	min: 5						
Early stopping	1000	1500	2000					
Scaler input/ output	Standard Scaler	Max AbsScaler	Robust Scaler	Power-Transformer	Quantile Transformer	Min-Max Scaler		
Weights aug	max: 10	min: 1						
Weights train	max: 10	min: 1.2						

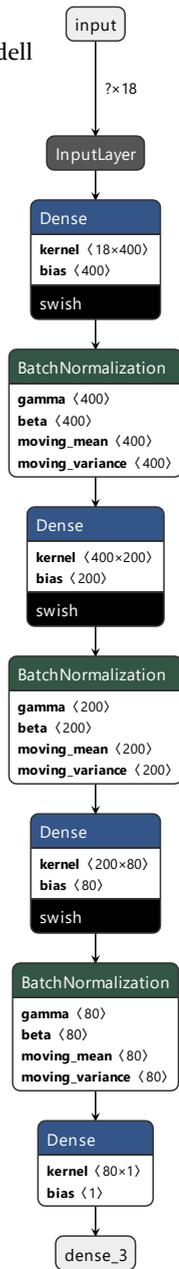
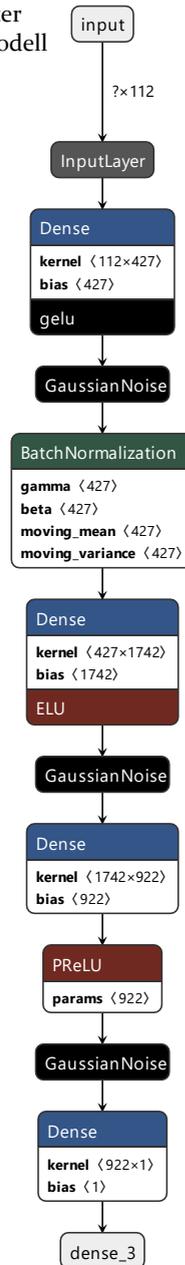
Hyperparameter
Analytik-ML-ModellHyperparameter
Gerber-ML-Modell

Bild 73: NN-Architektur für das Analytische und das Gerberbasierte Neuronale Netz

Modellbenchmark

Tabelle 21: Variation des Lötwärmebedarfs durch Veränderung der Lötstellendesigns (Daten aus [S8, S9])

Lötexperiment	Lage der Anbindung	Kupferanbindungsstärke	Pin	Vorheizung in °C	Löttemperatur in °C	Kontaktzeit in s	Düseninnendurchmesser in	Lötung
1	Bottom	140	Gate	75	260	2	3	0%
2	Bottom	140	Drain	75	260	2	3	0%
3	3. Layer	95	Source	75	260	2	3	25%
4	3. Layer	95	Gate	75	260	2	3	25%
5	Top	140	Drain	75	260	2	3	25%
6	Top/ Bottom	70	Foko	75	260	2	3	30%
7	Top	140	Source	75	260	2	3	40%
8	Top	140	Gate	75	260	2	3	40%
9	Top	35	Foko	75	260	2	3	50%
10	Top/ Bottom	35	Foko	75	260	2	3	50%

Tabelle 22: Variation des Lötwärmebedarfs und des Wärmeangebots durch Lötstellendesign, Kontaktzeit und Düsendurchmesser (Daten aus [S8, S9]), *3D-Modell mit WF

Lötexperiment	Lage der Anbindung	Kupferanbindungsstärke	Pin	Vorheizung in °C	Löttemperatur in °C	Kontaktzeit in s	Düseninnendurchmesser in	Lötung
11*	Top-WF	140	Foko	100	280	2	3	55%
12	3. Layer	95	Source	100	280	7	3	75%
13	Top	140	Gate	100	280	7	3	75%
14*	Top-WF	140	Foko	100	280	2	3	75%
15	Bottom	140	Drain	100	280	2	3	90%
16	Bottom	140	Drain	100	280	7	4	90%
17	Bottom	140	Foko	100	280	2	3	90%
18	Bottom	140	Drain	100	280	7	3	100%
19	3. Layer	95	Source	100	280	7	4	100%
20	3. Layer	95	Source	100	280	4	12	100%
21	Bottom	140	Drain	100	280	4	12	100%
22	Top	140	Gate	100	280	7	4	100%
23	Top	140	Gate	100	280	4	12	100%

Tabelle 23: Quantitativer Vergleich der Modellfehler und Vorhersagedauer der entwickelten Vorhersagemodelle anhand der Vorhersageergebnisse für die Parameter in Tabelle 21 und Tabelle 22

Modell	Zeit		Kosten	Qualität				
	Vorhersage- dauer in h	Modellbildung in h		Schulung	RMSE	Bestimmtheit r^2	ROE	Avg. Recall
Experimentell	0,5	0,5	0	-	-	-	70 %	-
Multiphysikal. 2D	10	1	-	10 %	-	0,05		+
Multiphysikal. 3D	70	1	-	10 %	-	0,05		+
Analytik 1D	0,5*	0,5	+	30 %	-	0,02		-
Analytik-ML	0,5*	0,5	+	31 %	0,78	0,13		0
Gerber-ML	0,01	0,1	+	18 %	0,62	0		+

*Modellbildungszeiten unter der Annahme, dass die thermischen Bauteileigenschaften bekannt sind und aufgrund manueller Lötstellenkonfiguration

Literaturverzeichnis

- [1] FRANKE, J., L. WANG, K. BOCK und J. WILDE. Electronic module assembly [online]. *CIRP Annals*, 2021, 70(2), S. 471-493. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2021.05.005
- [2] IPC - Association Connecting Electronics Industries. IPC-A-610F, *Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen*. Bannockburn/USA
- [3] NICOLAE, D. Comparative Study of Through-Hole Soldering Processes [online]. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2021, (14), S. 40-43. Verfügbar unter: <https://search.proquest.com/open-view/9528e02da460ceb21073149326f4979a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=54417>
- [4] LIUKKONEN, M., E. HAVIA, H. LEINONEN und Y. HILTUNEN. Application of self-organizing maps in analysis of wave soldering process [online]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3), S. 4604-4609. ISSN 09574174. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eswa.2008.05.016
- [5] SUH, N.P. Keynote Papers: Basic Concepts in Design for Producibility [online]. *CIRP Annals*, 1988, 37(2), S. 559-567. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0007-8506(07)60753-7
- [6] GLEASON, J., C. REYNOLDS, J. BATH, Q. CHU, M. KELLY, K. LYJAK und P. ROUBAUD. Pb-free Assembly, Rework, and Reliability Analysis of IPC Class 2 Assemblies. In: *2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference*, 2013, S. 959-969. ISBN 2377-5726
- [7] SCHIMANSKI, H. *Lötwärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit neuer Konstruktionen im manuellen Reparaturprozess bleifreier elektronischer Baugruppen*. Abschlussbericht. Itzehoe, 2010
- [8] MÜLLER, E., Hg. *Qualitätsmanagement für Unternehmer und Führungskräfte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-41001-7
- [9] FELDMANN, K., Hg. *Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte. Design, Konzepte, Strategien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-87970-5

- [10] ABDUL AZIZ, M.S., M.Z. ABDULLAH, C.Y. KHOR, I.A. AZID, A. JALAR und F.C. ANI. Influence of printed circuit board thickness in wave soldering [online]. *Scientia Iranica*, 2017, 0(0), S. o. Verfügbar unter: doi:10.24200/sci.2017.4311
- [11] ABDUL AZIZ, M.S., M.Z. ABDULLAH, C.Y. KHOR, A. JALAR, M.A. BAKAR, W.Y.W. YUSOFF, F.C. ANI, N. YAN, M. ZHOU und C. CHEOK. Effects of PCB thickness on adjustable fountain wave soldering [online]. *Sadhana*, 2015, 40(7), S. 2197-2220. ISSN 0256-2499. Verfügbar unter: doi:10.1007/s12046-015-0409-z
- [12] COIT, D.W., B.T. JACKSON und A.E. SMITH. Neural network open loop control system for wave soldering [online]. *Journal of Electronics Manufacturing*, 2002, 11(01), S. 95-105. ISSN 0960-3131. Verfügbar unter: doi:10.1142/S0960313102000217
- [13] KLEIN-WASSINK, R.J. *Soldering in Electronics*. 2. Aufl. Saugau/Württ.: Leuze, 1991. ISBN 3-87480-066-0
- [14] HERING, E. und K. BRESSLER. Passive Bauelemente. In: E. HERING, K. BRESSLER und J. GUTEKUNST, Hg. *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 91-162. ISBN 978-3-642-05498-3
- [15] EISENBARTH, M. *Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen*. Dissertation. Bamberg: Meisenbach, 2003. Fertigungstechnik - Erlangen. 139. ISBN 3-87525-190-3
- [16] BIGL, T. *Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen*. Dissertation. Bamberg: Meisenbach, 2008. Fertigungstechnik - Erlangen. 197. ISBN 978-3-87525-280-4
- [17] UNTERNEHMENSUMFRAGE. Unternehmensumfrage zur Quantifizierung des Anteils mischbestückter Flachbaugruppen in elektronik fertigenden Unternehmen. mündliche Umfrage, 2021/2022
- [18] DIN. DIN EN 61192-1: 2003, *Anforderungen an die Ausführungsqualität von Lötbaugruppen*
- [19] SUTHERLIN, W., Y. POLSKY und I.C. UME. A relative comparison of PWB warpage due to simulated infrared and wave soldering processes. In: *1998 Proceedings. 48th Electronic Components*

- and Technology Conference (Cat. No.98CH36206): IEEE, 25. Mai 1998, S. 807-815. ISBN 0-7803-4526-6
- [20] WABLE, G., Q. CHU, P. DAMODARAN und K. SRIHARI. Wave Soldering Using Sn/3.0Ag/0.5Cu Solder and Water Soluble VOC-Free Flux [online]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2006, 29(3), S. 202-210. Verfügbar unter: doi:10.1109/TEPM.2006.882500
- [21] BERNTSON, R.B., R. LASKY und K.P. PFLUKE. *Through-Hole Assembly Options for Mixed Technology Boards* [online], 2004. Verfügbar unter: https://assets.testequity.com/te1/Documents/ARTICLE_LIBRARY/Indium%20-%20Through-Hole_Assembly.pdf
- [22] DIN. 8593-7: 2003-09, *Fertigungsverfahren Fügen*: Beuth Verlag GmbH
- [23] DIN. DIN ISO 857-2:2007-03: März 2007, *Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe – Teil 2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe*
- [24] DIN. DIN EN ISO 4063 (2011-03-00): März 2011, *Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern*
- [25] NIEMEIER, J. und G. SELIGER. Simulation of the soldering process [online]. *CIRP Annals*, 1998, 47(1), S. 27-30. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0007-8506(07)62778-4
- [26] OLAH, Z., M. RUSZINKO, R. BATORFI und Z. ILLYEFALVI-VITTEZ. Process parameter optimization of selective soldering. In: *International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging*, 2012
- [27] LIMA, R.B., V.F. CARDOSO und A.N. DA SILVA. Analysis of Pin in Paste Soldering on Printed Circuits Boards Assembly Using Lead Free Solder Paste [online]. *ECS Transactions*, 2011, 39(1), S. 417-422. Verfügbar unter: doi:10.1149/1.3615221
- [28] VOIGT, C., A. HAGAG, M. KIRCHBERGER und J. FRANKE. Evaluation of Influences on Accuracy of Radiographic Measurements of Solder Joint Volume. In: *2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*: IEEE, 552021, S. 1-6. ISBN 978-1-6654-1477-7
- [29] DING, Y., C.Q. WANG und Y.H. TIAN. Experimental research on reliability of reflowed through-hole solder joints. In: *Fifth*

- International Conference on Electronic Packaging Technology Proceedings, 2003. ICEPT2003: IEEE, 28. Oktober 2003 - 30. Oktober 2003, S. 377-380. ISBN 0-7803-8168-8*
- [30] CHEN, C., M. HUANG und T. LEWIS. Novel method for PTH soldering driven by the thermal restrictions of a PTH LCD device. In: *International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, 2011, S. 222-229
- [31] ISAACS, P., K.L. CHIA, H.I. POH und T. TRUMAN. Process considerations for lead free assemblies. In: *2017 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*, 2017, S. 1-8
- [32] TOCHEV, E., H. PFIFER und S. RATCHEV. Indirect System Condition Monitoring Using Online Bayesian Change-point Detection. In: S. RATCHEV, Hg. *Smart Technologies for Precision Assembly*. Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 81-92. ISBN 978-3-030-72631-7
- [33] MENDEZ, R., H. LOWE, I. MARIN und C. MONTERREY. Pb-Free Selective Wave Solder Guidelines for Thermally Challenging PCBs. In: *IPC APEX EXPO Proceedings 2012*
- [34] BOULOS, M., C. HAMILTON, M. MORENO, R. MENDEZ, G. SOTO und J. HERRERA. Selective wave soldering DoE to develop DfM guidelines for lead and Pb-free assemblies [online]. *Circuits Assembly*, 2009, 20(1), S. 26-34. Verfügbar unter: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-59549095964&partnerID=40&md5=36b06248793eod258ebab2e934f27b04>
- [35] DIEPSTRATEN, G. Position Accuracy Machines for Selective Soldering Fine Pitch Components. In: *IPC APEX EXPO Proceedings*
- [36] ZSOLT ILLYEFALVI-VITEZ, BA'LINT BALOGH, ZSOLT BARANYAY und GRAHAM FARMER. Laser Soldering for Lead-free Assembly. In: *30th International Spring Seminar on Electronics Technology*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2007, S. 471-476. ISBN 1-4244-1218-8
- [37] GILBERT, J.M. Closed loop control of laser soldering through optical and thermal imaging. In: *2008 2nd Electronics System Integration Technology Conference: IEEE*, 2008, S. 1333-1338. ISBN 978-1-4244-2813-7

- [38] CHENG, W.M. und H.Y. WU. Lessons learnt from lead-free soldering implementation - real example. In: *Proceedings of 2005 International Conference on Asian Green Electronics, 2005. AGEC*: IEEE, 15. März 2005, S. 42-50. ISBN 0-7803-8806-2
- [39] LIU, J., O. SALMELA, J. SÄRKKÄ, J.E. MORRIS, P.-E. TEGEHALL und C. ANDERSSON. Solder Joint Reliability. In: J. LIU, O. SALMELA, J. SARKKA, J.E. MORRIS, P.-E. TEGEHALL und C. ANDERSSON, Hg. *Reliability of Microtechnology*. New York, NY: Springer New York, 2011, S. 49-69. ISBN 978-1-4419-5759-7
- [40] NOVAK, T., T. HUJER und F. STEINER. Long-term behavior of IMCs in lead-free solder joints. In: *34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*: IEEE, 2011, S. 176-181. ISBN 978-1-4577-2111-3
- [41] YANG, E., R. QIAN, A. YAO und Y. LIU. The Process Parameter Simulation of Press-fit Pin in a Power Module. In: *2019 20th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*: IEEE, 2019, S. 1-4. ISBN 978-1-7281-5064-2
- [42] IPC - Association Connecting Electronics Industries. IPC-2221: 2012, *Basisrichtlinie für das Design von Leiterplatten*
- [43] WÖLFLICK, P. *Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen*. Dissertation. Bamberg: Meisenbach, 2006. Fertigungstechnik - Erlangen. 175. ISBN 978-3-87525-246-0
- [44] GERHARD, M. *Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen*. Dissertation. Bamberg: Meisenbach, 1997. Fertigungstechnik - Erlangen. 78. ISBN 3-87525-103-2
- [45] SCALZO, M. und T. O'NEIL. Down-selecting low solids fluxes for Pb-free selective soldering [online]. *IPC APEX EXPO Technical Conference 2011*, 2011, 1. Verfügbar unter: <https://www.scoopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84865968405&partnerID=40&md5=6edof5feb782735e3ed86dcbo4c58998>
- [46] TSENEV, V. Exploration of the Possibilities of Low Temperature Soldering Alloy LMPA at Selective Wave Soldering (SWS). In: *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*: IEEE, 2018, S. 1-4. ISBN 978-1-5386-5731-7

- [47] BATH, J. *Lead-free Soldering Process Development and Reliability*: Wiley, 2020. ISBN 9781119482031
- [48] MACH, P., P. ZEMAN, E. KOTRKOVA und S. BARTO. Optimization of lead-free wave soldering process using taguchi orthogonal arrays [online]. *3rd Electronics System Integration Technology Conference ESTC*, 2010. Verfügbar unter: doi:10.1109/ESTC.2010.5642946
- [49] PIOTROWSKA, K., M.S. JELLESEN und R. AMBAT. Thermal decomposition of solder flux activators under simulated wave soldering conditions [online]. *Soldering and Surface Mount Technology*, 2017, S. 133-143. ISSN 09540911. Verfügbar unter: doi:10.1108/SSMT-01-2017-0003
- [50] XU, D.-X., Y.-P. LEI, Z.-D. XIA, F. GUO und Y.-W. SHI. Experimental Wettability Study of Lead-Free Solder on Cu Substrates Using Varying Flux and Temperature [online]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(1), S. 125-133. ISSN 0361-5235. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11664-007-0304-4
- [51] HOE, S.L., K.C. TOH und W.K. CHAN. A thermal model of the preheat section in wave soldering. In: *Proceedings of 2nd Electronics Packaging Technology Conference (Cat. No. 98EX235)*: IEEE, 8. Dezember 1998, S. 240-245. ISBN 0-7803-5141-X
- [52] LAWRENCE, T., I. WILDING und B. CHOWDHARY. The solvent of choice [online]. *Soldering and Surface Mount Technology*, 2001, 13(1), S. 19-24. ISSN 09540911. Verfügbar unter: doi:10.1108/09540910110361677
- [53] WANG, W.G., Y. PENG und X.P. WANG. Key Parameter Optimization in Wave Soldering [online]. *Advanced Materials Research*, 2011, 323, S. 84-88. ISSN 1662-8985. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.323.84
- [54] SATHEESH, A., M. KATTISSERI und V. VIJAYAN. Numerical estimation of localized transient temperature and strain fields in soldering process. In: *2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). Proceedings : 18th to 21st Sept. 2018, Dresden, Germany*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 1-5. ISBN 978-1-5386-6814-6
- [55] ARRA, M., D. SHANGGUAN, S. YI, R. THALHAMMER und H. FOCKENBERGER. Development of lead-free wave soldering

- process [online]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2002, 25(4), S. 289-299. Verfügbar unter: doi:10.1109/TEPM.2002.807731
- [56] SUNAPPAN, V. und P. COLLIER. Lead-free wave soldering development for pcb assembly. In: *53rd Electronic Components and Technology Conference, 2003. Proceedings: IEEE*, 27. Mai 2003, S. 1829-1838. ISBN 0-7803-7791-5
- [57] DIN. DIN EN 61192-3: 2003, *Anforderungen an die Ausführungsqualität von Lötbaugruppen*
- [58] IPC - Association Connecting Electronics Industries. IPC J-STD-001: 2005, *Requirements for soldered electrical and electronic assemblies*. Bannockburn, Ill.: IPC - Association Connecting Electronics Industries
- [59] PLATEK, B.T. und S.J. TESARSKI. Susceptibility of solder masks on solderballing and webbing in wave soldering. In: *2008 International Students and Young Scientists Workshop - Photonics and Microsystems: IEEE*, 20. Juni 2008 - 22. Juni 2008, S. 59-63. ISBN 978-1-4244-2554-9
- [60] KENNEDY, J., D. HILLMAN und R. WILCOXON. NASA DOD PHASE 2: SAC₃₀₅ AND SN₁₀₀COPPER DISSOLUTION TESTING. In: *SMTA Proceedings*
- [61] HAVIA, E., H. MONTONEN, E. BERNHARDT und M. ALATALO. Comparing SAC and SnCuNi solders in lead-free wave soldering process. In: *NEXT Symposium, Finland, 2005*
- [62] LU, Y., Z. MING, M. LIANG und C. ZHANG. Failure Case Analysis for Abnormal Delamination of Printed Circuit Board. In: *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, 2019, S. 1-6
- [63] DIEPSTRATEN, G. *Selective solder fine pitch components on high thermal mass assembly* [online]. Verfügbar unter: <https://it-weae.com/sites/default/files/technical-papers/SELECTIVE%20SOLDER%20FINE%20PITCH%20COMPO-NENTS%20ON.pdf>
- [64] HASNINE, M., B. TOLLA und M. KARASAWA. Effect of Ge addition on wettability, copper dissolution, microstructural and mechanical behavior of SnCu-Ge solder alloy [online]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28(21), S. 16106-

16119. ISSN 0957-4522. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10854-017-7511-4
- [65] MIYAZAKI, M., S. OGATA, A. YOSHIDA, Y. NISHIYAMA, H. TANAKA, M. AKANUMA und N. KATAYAMA. Influences of Impurities on wave soldering properties for Sn-9Zn solders. In: *4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 2005, S. 561-566
- [66] TAKEMOTO, T., Y.J. JOO, S. MAWATARI und R. KATO. Reduction of dross formation during wave soldering using lead-free solders. In: *Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*: IEEE Comput. Soc, 11. Dezember 2001, S. 1131-1136. ISBN 0-7695-1266-6
- [67] LIU, X. und L. WANG. Optimization of lead-free wave soldering process for inverter air-conditioner motherboard by DOE. In: *2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology*: IEEE, 2014, S. 917-922. ISBN 978-1-4799-4707-2
- [68] NGUYEN, J., D. GEIGER, D. ROONEY und D. SHANGGUAN. A study of thermo-mechanical reliability of lead-free PTH solder joints [online]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2009, 21(2), S. 39-47. ISSN 0954-0911. Verfügbar unter: doi:10.1108/09540910910947462
- [69] BIGLARI, M., H., F. KOX, M. HERMANS und KODENTSOV A. Reliability Aspects of Lead-Free Soldering in Industrial Applications. In: *Electronic Systemintegration Technology Conference*, 2006, S. 481-484
- [70] MORRIS, J. und O'KEEFE, M., J. Equipment Impacts of Lead Free Wave Soldering. In: *Proceedings APEX 2003*, 2003
- [71] TAKEMOTO, T., T. TAKAHASHI und H. NISHIKAWA. Reduction of copper content from dip-type lead-free soldering bath. In: *2003 EcoDesign 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*: IEEE, 12. August 2003 - 12. November 2003, S. 838-842
- [72] SNUGOVSKY, P., Z. BAGHERI und C. HAMILTON. Microstructure and Reliability Comparison of Different Pb-Free Alloys Used for Wave Soldering and Rework [online]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(12), S. 2628-2646. ISSN 0361-5235. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11664-009-0923-z

- [73] CZAPLICKI, B. Advanced Through-Hole Rework of Thermally Challenging Components/Assemblies: An Evolutionary Process. In: *IPC APEX EXPO Proceedings*
- [74] QI, H., G. PLAZA, S. GANESAN, M. OSTERMAN und M. PECHT. Reliability Assessment on Insertion Mount Assembly under Vibration Conditions. In: *2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference: IEEE*, 29. Mai 2007 - 1. Juni 2007, S. 407-414. ISBN 1-4244-0984-5
- [75] VIANCO, P.T. und M.K. NEILSEN. *Reliability Analysis of Pin-in-Hole Solder Joints by Computational Modeling* [online]. Verfügbar unter: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1247091>
- [76] XIAO, H., X. LI, N. LIU und Y. YAN. Failure behavior and life prediction of through-hole solder joints under thermal cycling. In: *2010 11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging: IEEE*, 16. August 2010 - 19. August 2010, S. 1007-1012. ISBN 978-1-4244-8140-8
- [77] BERGER, R., J. OLFE, S. ROGOWSKI, M. RÖLLIG, S. MÜNCH, R. SCHWERZ und H. HEUER. Simulationsgestützte Analyse von Through-hole Technology Verbindungsstellen der Elektronik im Automobilbereich. In: M. NOWOTNICK, Hg. *EBL 2020 - Elektronische Baugruppen und Leiterplatten. Technologische Plattform für die digitale Transformation : Vorträge der 10. DVS/GMM-Tagung, 18.-19. Februar 2020 in Fellbach*. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2020. ISBN 978-3-8007-5185-3
- [78] SHUJUAN, W., S. XUEJIN, X. SHENGJUN und Z. GUOFU. The numerical simulation and reliability analysis of through-hole solder joints. In: *26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012): IET*, 14. Mai 2012, S. 443-448. ISBN 978-1-84919-508-9
- [79] AKBARI, S., A. LÖVBERG, P.-E. TEGEHALL, K. BRINKFELDT und D. ANDERSSON. Effect of PCB cracks on thermal cycling reliability of passive microelectronic components with single-grained solder joints [online]. *Microelectronics Reliability*, 2019, 93, S. 61-71. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.microrel.2019.01.006
- [80] SATTIRAJU, S.V., B. DANG, R.W. JOHNSON, Y. LI, J.S. SMITH und M.J. BOZACK. Wetting characteristics of Pb-free solder alloys and PWB finishes [online]. *IEEE Transactions on Electronics*

- Packaging Manufacturing*, 2002, 25(3), S. 168-184. Verfügbar unter: doi:10.1109/TEPM.2002.801651
- [81] MAO, J., B. LIU, M. LI, Y. WANG und D. MAO. IMC formation between electroless Ni/Pd/Au surface finish and SnAgCu solder. In: *2008 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*: IEEE, 72008, S. 1-4. ISBN 978-1-4244-2739-0
- [82] IPC International. ANSI/J-STD-004: 1995, *Requirements for Soldering Fluxes*
- [83] DIN. DIN EN 61190-1-1:2003-01: 2003, *Verbindungsmaterialien für Baugruppen der Elektronik*
- [84] DIN. DIN EN ISO 9454-1:2016-07, *Flussmittel zum Weichlöten – Einteilung und Anforderungen*
- [85] PIOTROWSKA, K., R.U. DIN, F.B. GRUMSEN, M.S. JELLESEN und R. AMBAT. Parametric Study of Solder Flux Hygroscopicity: Impact of Weak Organic Acids on Water Layer Formation and Corrosion of Electronics [online]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, S. 4190-4207. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11664-018-6311-9
- [86] GUÉNÉ, E. Solderability and reliability evolution of no clean solder fluxes for selective soldering. In: *21st European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition*, S. 1-10
- [87] HANSEN, K.S., M.S. JELLESEN, P. MOLLER, P.J.S. WESTERMANN und R. AMBAT. Effect of solder flux residues on corrosion of electronics [online]. *Annual Reliability and Maintainability 2009*, 2009, S. 502-508. Verfügbar unter: doi:10.1109/RAMS.2009.4914727
- [88] CONSEIL, H., M.S. JELLESEN und R. AMBAT. Contamination profile on typical printed circuit board assemblies vs soldering process [online]. *Soldering and Surface Mount Technology*, 2014, 26(4), S. 194-202. ISSN 09540911. Verfügbar unter: doi:10.1108/SSMT-03-2014-0007
- [89] HAVIA, E., E. BERNHARDT, T. MIKKONEN, H. MONTONEN und M. ALATALO. Implementation of lead-free wave soldering process. In: *Proceedings of the electronics production and packaging technology, ELTUPAK*

- [90] WAYNE, N.C.W. und K. SWEATMAN. Study of Pb-free HASL PCB surface appearance impact on 2nd level interconnect solderability. In: *2012 IEEE 14th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*: IEEE, 12. Mai 2012 - 12. Juli 2012, S. 676-680. ISBN 978-1-4673-4552-1
- [91] LI, K.C., J.C.Y. HUANG, J.L. KU und S. LEE. Investigate the Performance of SnCuNi (SCN) Alloy for Wave Soldering. In: *2008 3rd International Microsystems, Packaging, Assembly & Circuits Technology Conference*: IEEE, 22. Oktober 2008 - 24. Oktober 2008, S. 114-117. ISBN 978-1-4244-3622-4
- [92] PAPE, U. und J. SCHULZ. Characteristics of Lead-Free Solders During Flow Soldering (Selective and Wave Soldering). In: *2006 1st Electronic Systemintegration Technology Conference*: IEEE, 9. Mai 2006 - 9. Juli 2006, S. 139-144. ISBN 1-4244-0552-1
- [93] HUANG, C.-Y. und H.-H. HUANG. Process optimization of SnCuNi soldering material using artificial parametric design [online]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2014, 25(4), S. 813-823. ISSN 0956-5515. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10845-012-0720-z
- [94] BARBINI, D., P. WANG, P. BIOCCA, C. QUYEN, T. DICK, D. JEAN, S. LONGGOOD, C. SHEA, K.W. SWEATMAN und M. YUEN. Lead Free Wave Soldering: Process Optimization for Simple to Highly Complex Boards. Wave solder: process optimization for simple to complex boards, 7 (9) (2007) . In: *Global SMT & Packaging*, S. 10-17
- [95] DI MAIO, D., B. WILLIS und C. HUNT. *Measurements of Copper Dissolution in Lead-Free Solder Alloys. NPL Report MAT 26*
- [96] IZUTA, G., T. TANABE und K. SUGANUMA. Dissolution of copper on Sn-Ag-Cu system lead free solder [online]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2007, 19(2), S. 4-11. ISSN 0954-0911. Verfügbar unter: doi:10.1108/09540910810836484
- [97] YEN, Y.-W., W.-T. CHOU, Y. TSENG, C. LEE und C.-L. HSU. Investigation of Dissolution Behavior of Metallic Substrates and Intermetallic Compound in Molten Lead-free Solders [online]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(1), S. 73-83. ISSN 0361-5235. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11664-007-0266-6

- [98] FORSTÉN, A., H. STEEN, I. WILDING und J. FRIEDRICH. Development and validation of lead-free wave soldering process [online]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2000, 12(3), S. 29-34. ISSN 0954-0911. Verfügbar unter: doi:10.1108/09540910010347872
- [99] HILLMAN, D., R. WILCOXON, T. PEARSON und P. MCKENNA. Dissolution Rate of Electronics Packaging Surface Finish Elements in Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu Solder [online]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(8), S. 5241-5256. ISSN 0361-5235. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11664-019-07316-1
- [100] MORRIS, J. und R. SZYMANOWSKI. Effect of contact time on lead-free wave soldering. In: *IPC Printed Circuits Expo, APEX and the Designers Summit 2008. April 1- 3, 2008, Las Vegas, Nevada, USA*. Red Hook, NY: Curran, 2008, S. 2298-2304. ISBN 978-160560290-5
- [101] YUILE, A. und S. WIESE. CFD analysis of wave soldering interpin behaviour. In: *2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE): IEEE*, 2016, S. 1-6. ISBN 978-1-5090-2106-2
- [102] ABDUL AZIZ, M.S., M.Z. ABDULLAH, C.Y. KHOR und M.S.A. AZIZ. Effects of solder temperature on pin through-hole during wave soldering: thermal-fluid structure interaction analysis [online]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014, S. 482363. Verfügbar unter: doi:10.1155/2014/482363
- [103] ABDUL AZIZ, M.S., M.Z. ABDULLAH, C.Y. KHOR, F. CHE ANI und N.H. ADAM. Effects of Temperature on the Wave Soldering of Printed Circuit Boards: CFD Modeling Approach [online]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2016, 9(6), S. 2053-2062. Verfügbar unter: doi:10.18869/acadpub.jafm.68.235.23709
- [104] ABDUL AZIZ, M.S., M.Z. ABDULLAH, C.Y. KHOR, A. JALAR, F. CHE ANI, N. YAN und C. CHEOK. Finite volume-based simulation of the wave soldering process: Influence of the conveyor angle on pin-through-hole capillary flow [online]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2016, 69(3), S. 295-310. ISSN 1040-7782. Verfügbar unter: doi:10.1080/10407782.2015.1069675
- [105] SITEK, J. und K. BUKAT. Influence of flux activity on process parameters and solder joints in lead-free wave soldering. In: *28th*

- International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress, 2005, 2005, S. 100-105. ISBN 2161-2064*
- [106] BAYLAKOGLU, I., S. HAMARAT, H. GOKMEN und E. MERIC. Case study for high volume lead-free wave soldering process with environmental benefits. In: , S. 102-106
- [107] ABDUL AZIZ, M.S., M.Z. ABDULLAH, C.Y. KHOR und F.C. ANI. Influence of pin offset in PCB through-hole during wave soldering process: CFD modeling approach [online]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 48, S. 116-123. ISSN 07351933. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.003
- [108] INAGAKI, K., S. NAKAGAWA, K. ISHIKURA und K. KOIZUMI. Jo12034 CFD simulation of flow soldering : Case of narrow opening between mask [online]. *The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan, 2013, 2013(o)*, S. _Jo12034-1-_Jo12034-4. Verfügbar unter: doi:10.1299/jsmemecj.2013._Jo12034-1
- [109] CHANG, S., R. WANG, Y. XIANG, P. WANG und W. SHI. Design for manufacturability of PTH solder fill in thick board with OSP finish. In: *2011 12th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging: IEEE*, 8. August 2011 - 11. August 2011, S. 1-8. ISBN 978-1-4577-1770-3
- [110] Normenausschuss Schweißtechnik (NAS) im DIN. DIN 8514:2006-05: 05.2006, *Lötbarkeit*
- [111] IPC International. J-STD-002A: OCTOBER 1998, *Solderability Tests for Component Leads, Terminations, Lugs, Terminals and Wires*
- [112] DIN. DIN EN 60068-2-20: 2009, *Umgebungseinflüsse – Teil 2-20: Prüfungen – Prüfung T: Prüfverfahren für die Lötbarkeit und Lötwärmebeständigkeit von Bauelementen mit herausgeführten Anschlüssen*
- [113] NIEMEIER, J., G. SELIGER und J. SEUTEMANN. Selective Soldering with Precise Amounts of Liquid Solder. In: *1st Electronics Systemintegration Technology Conference, 2006. Sept. 2006, [Dresden, Germany]*. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, 2006, S. 612-616. ISBN 1-4244-0552-1

- [114] ABDUL AZIZ, M.S., M.Z. ABDULLAH, C.Y. KHOR, Z.M. FAIRUZ, A.M. IQBAL, M. MAZLAN und M.S.M. RASAT. Thermal Fluid-Structure Interaction in the Effects of Pin-Through-Hole Diameter during Wave Soldering [online]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 6, S. 275735. ISSN 1687-8140. Verfügbar unter: doi:10.1155/2014/275735
- [115] IPC - Association Connecting Electronics Industries. IPC-2222: 2011, *Designrichtlinien für starre, organische Leiterplatten*
- [116] LIUKKONEN, M., E. HAVIA, H. LEINONEN und Y. HILTUNEN. Expert system for analysis of quality in production of electronics [online]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(7), S. 8724-8729. ISSN 09574174. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eswa.2011.01.081
- [117] LIUKKONEN, M., T. HILTUNEN, E. HAVIA, H. LEINONEN und Y. HILTUNEN. Modeling of Soldering Quality by Using Artificial Neural Networks [online]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2009, 32(2), S. 89-96. Verfügbar unter: doi:10.1109/TEPM.2008.2011813
- [118] CHUKKA, R.N., S. TELU, B. NRMR und L. CHEN. A novel method of reducing melting temperatures in SnAg and SnCu solder alloys [online]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2011, 22(3), S. 281-285. ISSN 0957-4522. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10854-010-0128-5
- [119] SCHRAMOWSKI, P., W. STAMMER, S. TESO, A. BRUGGER, F. HERBERT, X. SHAO, H.-G. LUIGS, A.-K. MAHLEIN und K. KERSTING. Making deep neural networks right for the right scientific reasons by interacting with their explanations [online]. *Nature Machine Intelligence*, 2020, 2(8), S. 476-486. Verfügbar unter: doi:10.1038/s42256-020-0212-3
- [120] RIBEIRO, M.T., S. SINGH und C. GUESTRIN. "Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier. In: B. KRISHNAPURAM, M. SHAH, A. SMOLA, C. AGGARWAL, D. SHEN und R. RASTOGI, Hg. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, NY, USA: ACM, 08132016, S. 1135-1144. ISBN 9781450342322
- [121] GILLATH, O., T. AI, M.S. BRANICKY, S. KESHMIRI, R.B. DAVISON und R. SPAULDING. Attachment and trust in artificial

- intelligence [online]. *Computers in Human Behavior*, 2021, 115, S. 106607. ISSN 07475632. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.chb.2020.106607
- [122] THIEBES, S., S. LINS und A. SUNYAEV. Trustworthy artificial intelligence [online]. *Electronic Markets*, 2021, 31(2), S. 447-464. ISSN 1019-6781. Verfügbar unter: doi:10.1007/s12525-020-00441-4
- [123] LIUKKONEN, M., E. HAVIA, H. LEINONEN und Y. HILTUNEN. Quality-oriented optimization of wave soldering process by using self-organizing maps [online]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(1), S. 214-220. ISSN 15684946. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.asoc.2009.11.011
- [124] ESMailPOUR, M. Do you really know the thermal conductivity of your boards? In: *2009 25th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*: IEEE, 15. März 2009 - 19. März 2009, S. 55-64. ISBN 978-1-4244-3664-4
- [125] SOFIA, J., W. *Component Thermal Characterization: Transient to Steady State* [online], 2018. Verfügbar unter: <https://analy-sistech.com/wp-content/uploads/2019/03/ComponentChar-2018.pdf>
- [126] RENCZ, M., A. POPPE, E. KOLLAR, S. RESS, V. SZEKELY und B. COURTOIS. Increasing the accuracy of structure function based evaluation of thermal transient measurements. In: K. RAMAKRISHNA, Hg. *ITherm 2004. The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems : Mirage Hotel & Casino, Las Vegas, NV, June 1-June 4, 2004*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2004, S. 85-90. ISBN 0-7803-8357-5
- [127] ANDONOVA, A., N. KAFADAROVA, V. VIDEKOV und S. ANDREEV. Investigation of thermal conductivity of PCB. In: *2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology*: IEEE, 13. Mai 2009 - 17. Mai 2009, S. 1-5. ISBN 978-1-4244-4260-7
- [128] ALVAREZ, C. *Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2008. Bamberg: Meisenbach, 2008. Fertigungstechnik - Erlangen. 194. ISBN 9783875252774
- [129] AZAR, K. und J.E. GRAEBNER. Experimental determination of thermal conductivity of printed wiring boards. In: *Twelfth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and*

- Management Symposium. Proceedings: IEEE*, 1996, S. 169-182. ISBN 0-7803-3139-7
- [130] SHABANY, Y. Component size and effective thermal conductivity of printed circuit boards. In: *ITherm 2002. Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Cat. No.02CH37258)*: IEEE, 30. Mai 2002, S. 489-494. ISBN 0-7803-7152-6
- [131] VAN STEENBERGE, N., P. LIMAYE, G. WILLEMS, B. VANDELVELDE und I. SCHILDERMANS. Analytical and finite element models of the thermal behavior for lead-free soldering processes in electronic assembly [online]. *Microelectronics Reliability*, 2007, 47(2-3), S. 215-222. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.micro-rel.2006.09.010
- [132] WEGE, S. und H. SCHIMANSKI. *Prozessoptimierung beim Selektivlöten für Anwendungen in der Leistungselektronik*. Abschlussbericht. Wessling
- [133] MÄRZ, M. *Thermisches Management in der Leistungselektronik* [online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/324227497_Thermisches_Management_in_der_Leistungselektronik
- [134] SAVCHENKO, I.V., S.V. STANKUS und A.S. AGADJANOV. Measurement of liquid tin heat transfer coefficients within the temperature range of 506–1170 K [online]. *High Temperature*, 2011, 49(4), S. 506-511. ISSN 0018-151X. Verfügbar unter: doi:10.1134/S0018151X11040171
- [135] HENSEL, A. und J. FRANKE. *Thermische Simulation von Wellen- und Selektivlötprozessen zur Optimierung des Leiterplattendesigns und der Anlagenparameter für IPC-konforme Kontaktierung von THT-Bauelementen (SiWOLAK)*. Abschlussbericht AIF-IGF 19539 N, 2021
- [136] VOLLAND, J. *Experimentelle Untersuchung von verschiedenen Kontaktierungsarten für Thermoelemente zur Temperaturmessung auf Leiterplatten*. Projektarbeit. Erlangen, 31. März 2020
- [137] KLEPPMANN, W. *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. 7., aktualisierte und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser, 2011. Praxisreihe Qualitätswissen. ISBN 978-3-446-42774-7

- [138] TDK. *Film Capacitors EMI Suppression Capacitors (MKP)* [online]. *B32021A3332K000*. Technisches Datenblatt, 2020 [Zugriff am: 18. Juli 2022]. Verfügbar unter: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/capacitor/film/emi/data_sheet/20/20/db/fc_2009/y2_b32021_o26.pdf
- [139] INFINEON. *IPW65Ro8oCFDA* [online]. *650V CoolMOS CFDA Power Transistor*. Technisches Datenblatt, 2012 [Zugriff am: 18. Juli 2022]. Verfügbar unter: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPW65Ro8oCFDA-DS-v02_01-en.pdf?fileId=db3a304336797ff90136ba619f7a2584
- [140] TDK. *Aluminum electrolytic capacitors - Snap-in capacitors* [online]. *B43504C5157M000*. Technisches Datenblatt, 2013 [Zugriff am: 18. Juli 2022]. Verfügbar unter: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Epcos%20PDFs/B43504_Rev_Jun_2015.pdf
- [141] EMIL OTTO FLUX- UND OBERFLÄCHENTECHNIK GMBH. *EO-B-002B* [online]. *No Clean-Flussmittel auf Alkoholbasis, Di-Carbonsäuren, sehr geringer Harzanteil, halogenfrei*. Technisches Datenblatt, 2021 [Zugriff am: 13. Juli 2022]. Verfügbar unter: https://emilotto.de/wp-content/uploads/2022/06/EO-DB_2021_Elektronikfertigung_EO-B-002B_DE.pdf
- [142] STANNOL GMBH&CO. KG. *LÖTZINN FLOWTIN TSC305* [online]. *Bleifreie Legierung für die Elektronik*. Technisches Datenblatt, 2020 [Zugriff am: 13. Juli 2022]. Verfügbar unter: https://www.stannol.de/fileadmin/Service/Dokumente/Dokumente_rsync/SYNNAS_1/Daten/Datenblaetter___Data%20Sheets/Technische%20Datenblaetter___Technical%20Data%20Sheets/Metalle%20FLOWTIN___Metals%20FLOWTIN/TDS_FLOWTIN_TSC305_DE.pdf
- [143] DIEPSTRATEN, G. *Design rules for selective soldering assemblies* [online]. *Recommendations for a robust selective soldering process*, 2015. 2018 [Zugriff am: 1. September 2019]. Verfügbar unter: <https://smtnet.com/library/files/upload/Design-Rules-Selective-Soldering.pdf>
- [144] SU, F., R. MAO, J. XIONG, K. ZHOU, Z. ZHANG, J. SHAO und C. XIE. On thermo-mechanical reliability of plated-through-hole (PTH) [online]. *Microelectronics Reliability*, 2012, 52(6), S. 1189-1196. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.microrel.2011.11.021

- [145] REDDY, A.V. und C. BECKERMANN. *Measurements of Metal-Mold interfacial heat transfer coefficient during solidification of Sn and Sn-Pb Alloys* [online], 2007
- [146] SCHABEL, W. und H. MARTIN. Wärmeübertragung bei erzwungener Konvektion: Prallströmungen. In: K. JOUSTEN, Hg. *Handbuch Vakuumtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 1-9. ISBN 978-3-658-13403-7
- [147] SCHLÜNDER, E.U. und V. GNIELINSKI. Wärme- und Stoffübertragung zwischen Gut und aufprallendem Düsenstrahl [online]. *Chemie Ingenieur Technik*, 1967, 39(9-10), S. 578-584. ISSN 0009286X. Verfügbar unter: doi:10.1002/cite.330390915
- [148] HOFMANN, H., H. MARTIN und M. KIND. Numerische Simulation des Wärmeübergangs vom stationären Prallstrahl an eine Wand [online]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2002, 74(9), S. 1245-1248. ISSN 0009286X. Verfügbar unter: doi:10.1002/1522-2640(20020915)74:9<1245::AID-CITE1245>3.0.CO;2-1
- [149] MAREK, R. und K. NITSCHKE. *Praxis der Wärmeübertragung. Grundlagen; Anwendungen; Übungsaufgaben*. 2. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011. ISBN 3446425101
- [150] LEMOUBOU, E.L. und H.T.T. KAMDEM. A quasi-analytical solution of homogeneous extended surfaces heat diffusion equation [online]. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2017, 12(1). ISSN 1823-0334. Verfügbar unter: doi:10.1186/s40712-017-0084-4
- [151] FERNANDES, A.P., M.B. DOS SANTOS und G. GUIMARÃES. An analytical transfer function method to solve inverse heat conduction problems [online]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(22), S. 6897-6914. ISSN 0307904X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apm.2015.02.012
- [152] FIMA, P. Surface tension and density of liquid Sn-Ag alloys [online]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(8), S. 3265-3268. ISSN 01694332. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apsusc.2010.11.002
- [153] LECHLER, T., J. FUCHS, M. SJAROV, M. BROSSOG, A. SELMAIER, F. FALTUS, T. DONHAUSER und J. FRANKE. Introduction of a comprehensive Structure Model for the Digital Twin in Manufacturing. In: *2020 25th IEEE International Conference on*

- Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: IEEE, 92020, S. 1773-1780. ISBN 978-1-7281-8956-7
- [154] ROTHHAUPT, A. *Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung*. Dissertation. München, 1995. Fertigungstechnik - Erlangen. 44. ISBN 3-446-18307-8
- [155] FIMA, P., T. GANCARZ, J. PSTRUS, K. BUKAT und J. SITEK. Thermophysical properties and wetting behavior on Cu of selected SAC alloys [online]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2012, 24(2), S. 71-76. ISSN 0954-0911. Verfügbar unter: doi:10.1108/09540911211214640
- [156] DOBOSZ, A. und T. GANCARZ. Reference Data for the Density, Viscosity, and Surface Tension of Liquid Al-Zn, Ag-Sn, Bi-Sn, Cu-Sn, and Sn-Zn Eutectic Alloys [online]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2018, 47(1), S. 13102. ISSN 0047-2689. Verfügbar unter: doi:10.1063/1.5010151
- [157] SAID, R.M., N. SAUD, M.A.A. MOHD SALLEH, M.N. DERMAN, M.I. IZWAN RAMLI und N.M. NASIR. The Influence of Activated Carbon (AC) on Melting Temperature, Wettability and Intermetallic Compound Formation of Sn-Cu-Ni (SN100C) Solder Paste [online]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 754-755, S. 551-555. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755-551
- [158] DIETZEL, M., S. HAFERL, Y. VENTIKOS und D. POULIKAKOS. Marangoni and Variable Viscosity Phenomena in Picoliter Size Solder Droplet Deposition [online]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, 125(2), S. 365-376. ISSN 0022-1481. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.1532014
- [159] NOOR, E.E.M., N.F.M. NASIR und S.R.A. IDRIS. A review: lead free solder and its wettability properties [online]. *Soldering & Surface Mount Technology*, 2016, 28(3), S. 125-132. ISSN 0954-0911. Verfügbar unter: doi:10.1108/SSMT-08-2015-0022
- [160] SCHWANEKE, A.E., W.L. FALKE und V.R. MILLER. Surface tension and density of liquid tin-lead solder alloys [online]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1978, 23(4), S. 298-301. ISSN 0021-9568. Verfügbar unter: doi:10.1021/jc60079a009
- [161] ZHANG, R., J. CAI, Q. WANG, J. LI, Y. HU, H. DU und L. LI. Thermal Resistance Analysis of Sn-Bi Solder Paste Used as

- Thermal Interface Material for Power Electronics Applications [online]. *Journal of Electronic Packaging*, 2014, 136(1). Verfügbar unter: doi:10.1115/1.4026616
- [162] CHEN, Y.-Y., J.-G. DUH und B.-S. CHIOU. The effect of substrate surface roughness on the wettability of Sn-Bi solders [online]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2000, 11(4), S. 279-283. ISSN 0957-4522. Verfügbar unter: doi:10.1023/A:1008917530144

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] SEIDEL, R., C. KÄSTLE, M. OCKEL und J. FRANKE. Impact of THT-hole dimensioning on manufacturability in selective wave soldering [online]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 137, S. 114773. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.microrel.2022.114773
- [P2] SEIDEL, R., T. AHRENS, J. FRIEDRICH, A. REINHARDT und J. FRANKE. Experimental identification and prioritization of design and process parameters on hole fill in mini wave soldering [online]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 131, S. 114497. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.microrel.2022.114497
- [P3] SEIDEL, R., M. SIPPEL und J. FRANKE. An Analytical Approach to Thermal Design for Manufacturing in Mini Wave Soldering. In: *2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*: IEEE, 2021, S. 1427-1434. ISBN 978-1-6654-4097-4
- [P4] SEIDEL, R., N. THIELEN, C. VOIGT und J. FRANKE. Thermische Beurteilung von THT-Lötstellendesigns für die IPC-konforme Kontaktierung durch Selektivwellenlöten. In: M. NOWOTTNICK, Hg. *EBL 2020 - Elektronische Baugruppen und Leiterplatten. Technologische Plattform für die digitale Transformation : Vorträge der 10. DVS/GMM-Tagung, 18.-19. Februar 2020 in Fellbach*. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2020. ISBN 978-3-8007-5185-3
- [P5] THIELEN, N., Z. JIANG, K. SCHMIDT, R. SEIDEL, C. VOIGT, A. REINHARDT und J. FRANKE. Clustering of Image Data to Enhance Machine Learning Based Quality Control in THT Manufacturing. In: *2021 IEEE 27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*: IEEE, 10272021, S. 287-291. ISBN 978-1-6654-2110-2
- [P6] SIPPEL, M., R. SCHMIDT, F. RAU, D. BRETSCHER, R. SEIDEL und J. FRANKE. Improved Thermal Impedance Measurement for Power Modules based on Thermal Imaging of the Baseplate. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS 2022)*, 2022, S. 186-191
- [P7] SEIDEL, R., A. MAYR, F. SCHÄFER, D. KIRKALT und J. FRANKE. Towards a Smart Electronics Production Using Machine Learning Techniques. In: *International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2019 – 2019 42th International Spring Seminar*, 2019, S. 1-6

- [P8] MAYR, A., D. KIßKALT, M. MEINERS, B. LUTZ, F. SCHÄFER, R. SEIDEL, A. SELMAIER, J. FUCHS, M. METZNER, A. BLANK und J. FRANKE. Machine Learning in Production – Potentials, Challenges and Exemplary Applications [online]. *Procedia CIRP*, 2019, 86, S. 49-54. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2020.01.035
- [P9] SEIDEL, R., B. RACHINGER, N. THIELEN, K. SCHMIDT, S. MEIER und J. FRANKE. Development and validation of a digital twin framework for SMT manufacturing. in *Review Computers in Industry*, 2022
- [P10] SEIDEL, R., J. VOLLAND, N. THIELEN, C. VOIGT und J. FRANKE. Experimental Investigation on Thermocouple Attachment Methods for Reliable Temperature Measurement. In: *2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*: IEEE, S. 1-6. ISBN 978-1-7281-6773-2
- [P11] SEIDEL, R., M. SIPPEL und J. FRANKE. 2-D Fluid Simulation Approach for Miniwave Soldering. In: *IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2022, S. 1785-1790
- [P12] SEIDEL, R., C. KÄSTLE und J. FRANKE. Vorhersage des Lotdurchstiegs beim Miniwellenlöten im industriellen Umfeld mit Hilfe von maschinellen Lernverfahren. In: *EBL 2022*
- [P13] SEIDEL, R., N. THIELEN, K. SCHMIDT, C. VOIGT und J. FRANKE. Development and Test of a Data Framework for Prediction of Soldering Quality in Selective Wave Soldering Applying K-Nearest Neighbors. In: *IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2020, S. 250-255
- [P14] SEIDEL, R., F. LEIBOLD, N. THIELEN und J. FRANKE. Prediction of the Solder Rise in Selective Wave Soldering Comparing Decision Tree and Logistic Regression. In: *43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2020, S. 1-7
- [P15] SEIDEL, R., K. SCHMIDT, N. THIELEN und J. FRANKE. Trustworthiness of machine learning models in manufacturing applications using the example of electronics manufacturing processes [online]. *Procedia CIRP*, 2022, 107, S. 487-492. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2022.05.013

- [P16] SEIDEL, R., H. AMADA, J. FUCHS, N. THIELEN, K. SCHMIDT, C. VOIGT und J. FRANKE. Data Mining System Architecture for Industrial Internet of Things in Electronics Production. In: *International Symposium for Design and Technology in Electronic packaging*

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] PFEFFER, A. *Anwendungsbereiche von selektiv- und wellengelöteten THT-Bauteilen in der Elektronikproduktion mischbestückter Flachbaugruppen*. Projektarbeit. Erlangen, 20. Mai 2021
- [S2] BOTAN, D. *Literaturrecherche zu Materialeinflüssen auf Lötverfahren von THT-Bauteilen*. Bachelorarbeit. Erlangen, 21. Juni 2021
- [S3] STOINSKI, R.T. *Modellierungsansätze in der SMT- und THT-Fertigung - Ein Review*. Projektarbeit. Erlangen, 31. Oktober 2019
- [S4] RACHINGER, B. *Development of a digital shadow from SMD manufacturing process data as basis for cross-process machine learning use-cases*. Projektarbeit. Erlangen, 1. Dezember 2021
- [S5] POUR ABDOLLAHYAN, F. *Simulative und experimentelle Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei Wellen- und Selektivlötverfahren*. Masterarbeit. Erlangen, 26. November 2019
- [S6] REUTHER, L. *Validierung eines Messverfahrens zur thermischen Charakterisierung von THT-Lötstellen*. Masterarbeit. Erlangen, 2. November 2020
- [S7] VOLLAND, J. *Validierung eines Messverfahrens zur thermischen Charakterisierung von THT-Bauteilen*. Masterarbeit. Erlangen, 30. November 2020
- [S8] DAI, W. *PCB design studies of through hole solder joints by multiphysics simulation*. Masterarbeit. Erlangen, 15. Dezember 2021
- [S9] SCHENDEL, M. *Entwicklung einer Multiphysics-Simulation zur Vorhersage der Lötqualität beim Selektivwellenlöten*. Masterarbeit. Erlangen, 11. Mai 2021
- [S10] SHOKOUHI, S. *Thermische Beurteilung von THT- Lötstellendesigns mittels FEM-Simulation*. Masterarbeit. Erlangen, 30. November 2019
- [S11] LEIBOLD, F. *Entwicklung und Validierung von Machine Learning Algorithmen für die Anwendung beim Selektivwellenlöten*. Projektarbeit. Erlangen, 30. März 2020
- [S12] DIESNER, F. *Marktanalyse und Entwicklung eines Tools zur automatisierten und intelligenten Verarbeitung von Prozessdaten in*

der Elektronikproduktion. Bachelorarbeit. Erlangen, 3. Februar 2020

- [S13] HASSAN AMADA, M. *Konzeption und Umsetzung eines Systems zur vollständigen Erfassung von Produktionsdaten in der Leiterplattenfertigung*. Masterarbeit. Erlangen, 6. Juli 2020
- [S14] TAN, Y. *Path Optimization for Selective Wave Soldering based on Heuristic Algorithms*. Masterarbeit. Erlangen, 8. März 2022
- [S15] KAYA, S. *Konzeption, Entwicklung und Umsetzung einer Web-Applikation für maschinelle Lernmodelle in der Elektronikproduktion*. Masterarbeit. Erlangen, 26. Mai 2021

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2023):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Heibel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgeossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißerimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäfer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein
Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf
Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl
Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen
Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian
Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß
Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann
Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß
Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel
Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen
Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider
Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel
Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner
Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling
Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb
Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt
Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer
Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler
Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann
Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Abstract

Through hole mounted components are important electronic devices to enable global technological trends especially in automation, e-mobility and digitalization. As the mixed SMT- and THT-component placement accounts for the major portion of power electronic modules, selective wave soldering of the THT-components is industry standard procedure. The process quality is measured by means of solder hole fill which is primarily affected by the solder joint design. The soldering process incorporates complex physical interrelations involving thermal and material flow with multivariant impact parameters between design and hole fill. Therefore, neither a design dependent hole fill prediction is available nor do the state-of-the-art design rules reliably guarantee manufacturability. Hence, to ensure manufacturability a process model is required that accounts for all relevant process impact factors and can predict the selective wave soldering process result in terms of hole fill.

The objective of this work is to predict and optimize the hole fill as the criterion of manufacturability based on a data driven modeling approach. Therefore, the impact factors are investigated by means of design of experiments, multi-physics simulation and analytical calculation procedures. A machine learning model is used to model the soldering process by means of historical experimental data. To optimize all aspects of the soldering process and recommend suitable process parameters, the fluxing and soldering process is optimized using a grid search, heuristical traveling salesman algorithms and a Monte Carlo simulation.

THT-Bauteile sind entscheidende Komponenten zur Realisierung globaler technologischer Trends speziell im Bereich Automatisierung, E-Mobilität und Digitalisierung. Ein Großteil der leistungselektronischen Flachbaugruppen wird dabei mit SMT- und THT-Bauteilen bestückt. Der industrielle Standard zur Lötung der THT-Bauteile ist der Selektivwellenlötprozess. Der Lotdurchstieg als Maß für die Prozessqualität wird dabei besonders durch das Design der THT-Lötstelle beeinflusst. Auf Grund der multivarianten Einflussparameter des physikalisch komplexen Prozesses mit Material- und Wärmetransport ist weder die Vorhersage noch die zuverlässige Absicherung der Lötqualität mit aktuellen Designrichtlinien möglich. Die Absicherung der Fertigbarkeit verlangt daher einen Modellierungsansatz, der alle Einflussparameter und den Selektivwellenlötprozess vollständig abbildet.

Ziel dieser Arbeit ist es, den THT-Lotdurchstieg als Kriterium der Fertigbarkeit mit einem datenbasierten Prozessmodell vorherzusagen und zu optimieren. Dafür werden die Einflussparameter des Lötprozesses mit Hilfe statistischer Versuchsplanung, multiphysikalischer Simulationsmodelle sowie einem analytischen Berechnungsansatz eingehend untersucht. Auf dieser Grundlage werden maschinelle Lernalgorithmen eingesetzt, um den Prozess mit Lötexperimentdaten zu modellieren. Mit Hilfe des ML-Modells und heuristischen Optimierungsroutinen wird zudem ein Vorgehen entwickelt, mit dem der Flussmittelauftrag und der Lötprozessablauf optimiert und geeignete Lötparameter empfohlen werden können.

