

FAU Studien aus dem Maschinenbau 345

Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente

Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter
elektronischer Bauelemente

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 345

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Stefan Härter

**Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer
Bauelemente**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2020

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

Härter, Stefan. 2020. *Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente*. FAU Studien aus dem Maschinenbau 345. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-315-1.

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: 978-3-96147-314-4 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-315-1 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-315-1

**Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stefan Härter

aus Bad Neustadt an der Saale

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 19.12.2019

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Martin Schneider-Ramelow,
TU Berlin

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Franke für die Unterstützung meiner Forschungsarbeit, das entgegengebrachte Vertrauen sowie den mir gewährten wissenschaftlichen Freiraum. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, Gründer des Lehrstuhls FAPS, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Schneider-Ramelow, Professor im Fachgebiet Werkstoffe der Hetero-Systemintegration (TU Berlin) sowie stellvertretender Institutsleiter am Fraunhofer IZM, danke ich für die wertvollen Diskussionen und Impulse im Rahmen der Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Fey danke ich für sein Engagement als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums.

Diese Dissertation beruht in Teilen auf Ergebnissen aus Forschungsprojekten, die durch die Forschungsvereinigung des DVS sowie das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert wurden. Den beteiligten Industriepartnern danke ich für die äußerst gute Zusammenarbeit.

Großer Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl FAPS. Besonders hervorheben möchte ich alle ehemaligen Kollegen und Freunde aus dem Forschungsbereich Elektronikproduktion für das beispiellose Miteinander, insbesondere Michael Pfeffer, Johannes Hörber, Tobias Klier, Martin Müller, Thomas Reitberger, Alexander Hensel, Thomas M. Braun, Payam Daneschwar, Ping Xu, Alireza Esfandyari, Denis Kozic, Gerald Gion, Siegfried Maly, Leonard Maußner, Horst Schuster, Dr.-Ing. Andreas Reinhardt, Dr.-Ing. Thomas Kuhn, Dr.-Ing. Florian Schüßler, Dr.-Ing. Daniel Craiovan, Dr.-Ing. Christopher Kästle, Dr.-Ing. René Schramm, Dr.-Ing. Christian Goth, Dr.-Ing. Aarief Syed-Khaja und Dr.-Ing. Michael Rösch.

Mein herzlichster Dank gilt meinen Eltern und meiner Familie, die mich auf dem langen Weg der Ausbildung stets motiviert und gefördert haben. Mein größter Dank gebührt jedoch meiner Frau Julia, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit immerwährend unterstützte und mir mit größtem Verständnis den notwendigen Rückhalt während der Anfertigung dieser Dissertation gegeben hat.

Erlangen, im Dezember 2019

Stefan Härter

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1	Einleitung	1
2	Miniaturisierung als wesentlicher Treiber für hochintegrierte Systeme	5
2.1	Aktuelle Entwicklungen zur Steigerung der Systemintegration elektronischer Baugruppen	5
2.2	Herausforderungen bei der Fertigung und Zuverlässigkeitsbewertung elektronischer Baugruppen	10
2.3	Ableitung des Forschungsbedarfs	15
3	Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen	19
3.1	Grundlagen des Schablonendruckprozesses in der Oberflächenmontagetechnik	20
3.2	Analyse des Pastendruckprozesses für Bauelemente der Größe 01005	27
3.2.1	Entwicklung eines Demonstrators und Versuchsplanung	28
3.2.2	Evaluation des Prozessergebnisses	32
3.2.3	Bewertung der Prozessführungsgrößen zum Lotpastenauftrag	37
3.3	Betrachtung des Lotpastenauftrags für die Bauteilgröße 03015M	39
3.3.1	Auslegung der Druckschablone und Versuchsplanung	40
3.3.2	Evaluation des Schablonendruckprozesses	45
3.3.3	Bewertung von Einflussgrößen auf die Baugröße 03015M	57
3.4	Einfluss von Aperturform und Flächenverhältnis auf den Schablonendruckprozess	59
3.4.1	Auslegung der Druckschablonen und Vorgehensweise	59
3.4.2	Analyse der erfassten Prozessergebnisse	62
3.4.3	Zusammenfassende Bewertung der Aperturform bei der Gestaltung von Druckschablonen	67
3.5	Konzept zur Optimierung der Prozessparameter im Schablonendruck	70
3.5.1	Anwendung der statistischen Versuchsplanung	71
3.5.2	Analyse und Bewertung faktorieller Versuchspläne	75
3.5.3	Ableitung eines systematischen Vorgehens mittels DOE	81
3.6	Kriterien des Schablonendruckprozesses für hochminiaturisierte Komponenten	83

4	Prozessfenster für den Bestück- und Reflow-Lötprozess von Komponenten der Baugröße 01005	85
4.1	Anforderungen an den Bestückprozess miniaturisierter Komponenten	85
4.1.1	Bestimmung der Bestückgenauigkeit.....	90
4.1.2	Einfluss der Prozessführung auf die erzielbare Qualität	93
4.1.3	Empfehlungen für die Gestaltung des Bestückprozesses.....	100
4.2	Evaluation von Einflussparametern auf den Selbstzentriereffekt	101
4.2.1	Methodik und Versuchsbeschreibung	101
4.2.2	Bewertung des Auftretens von Tombstone-Effekten	106
4.2.3	Bestimmung des Selbstzentrierverhaltens.....	111
4.3	Einfluss von Lotpasten- und Bauelementversatz auf die Fehlerrate	117
4.3.1	Bewertung von Abweichungen im Schablonendruckprozess	120
4.3.2	Bewertung des Versatzes im Schablonendruck und der Bestückposition	121
4.3.3	Zusammenfassende Bewertung	124
4.4	Prozessführungsgrößen für eine erfolgreiche Kontaktierung	125
5	Prozessübergreifende Bewertung von Qualitätsmerkmalen mischbestückter Baugruppen	129
5.1	Einflussgrößen auf die Produktionsprozesse der SMT	130
5.2	Evaluation der Verarbeitung von Bauelementen der Größe 01005 auf einer Leiterplatte mit heterogenem Bauteilspektrum	136
5.3	Prozessintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion.....	146
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	151
7	Summary and outlook.....	155
	Anhang	159
	Literaturverzeichnis	171

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Beschreibung</i>
A_A	Aperturöffnungsfläche
A_W	Aperturwandungsfläche
b	Breite
c_m	Maschinenfähigkeit
c_{mk}	kritische Maschinenfähigkeit
c_p	Prozessfähigkeit
c_{pk}	kritische Prozessfähigkeit
Δx	translatorische Abweichung in x-Richtung
Δy	translatorische Abweichung in y-Richtung
$\Delta \phi$	rotatorische Abweichung (Drehfehler)
d	Abweichung
h	Höhe
l	Länge
μ	Mittelwert
n	Stichprobenumfang bzw. Replikationen
π	Kreiszahl Pi
P	Wahrscheinlichkeit
r	Radius
σ	Standardabweichung
σ^2	Varianz
t	Durchmesser des Lotpastenpulvers
x	stetige Zufallsgröße

<i>Abkürzung</i>	<i>Bezeichnung</i>
o	Zentralpunkt
-1 / +1	Würfelpunkt
$-\alpha / +\alpha$	Sternpunkt
AOI	Automatische optische Inspektion
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BGA	Ball Grid Array
BLE	Bluetooth Low Energy {Datenübertragung nach IEEE 802.15.1}
CSP	Chip Scale Package
DOE	Design of Experiments {statistische Versuchsplanung}
dpm	Defects per Million {Defekte pro einer Million Möglichkeiten}
FBG	Flächenbedruckungsgrad
FPY	First Pass Yield {Erstaussteute als Messgröße der Prozessqualität}
FR4	Leiterplattenmaterial aus Epoxidharz mit Glasfasergewebe
FV	Flächenverhältnis (Schablonenöffnungsfläche zu Schablonenwandungsfläche)
IPC	Association Connecting Electronics Industries {ehemals Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits}
MEMS	Mikro-elektro-mechanisches System
MFU	Maschinenfähigkeitsuntersuchung
MLCC	Multi-Layer Ceramic Capacitor {Kondensator mit keramischem Dielektrikum}
PFU	Prozessfähigkeitsuntersuchung
PoP	Package-on-Package
QFN	Quad Flat No Leads Package {Rechteckige Gehäuseform mit umlaufenden Anschlüssen auf der Unterseite}

QFP	Quad Flat Package {Rechteckige Gehäuseform mit umlaufenden seitlichen Anschlüssen}
RFID	Radio-Frequency Identification
SAC ₃₀₅	Bleifreie Zinn-Legierung mit 3 % Silber- und 0,5 % Kupferanteil
SiP	System-in-Package
SMD	Surface Mount Device {Bauelement für die Oberflächenmontage}
SMT	Surface Mount Technology {Oberflächenmontage-Technologie}
SoC	System-on-Chip
SoP	System-on-Package
SOT	Small Outline Transistor
SPI	Solder Paste Inspection {Lotpasteninspektion}
TE	Transfereffizienz
THT	Through Hole Technology {Durchsteckmontage-Technologie}
TSV	Through Silicon Via
WiFi	Wireless Local Area Network {Funknetzwerk nach IEEE-802.11}

1 Einleitung

Der Weltmarkt für Mikroelektronik erfährt nach Analysen des Zentralverbands Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. im Jahr 2017 die stärkste Wachstumsrate der letzten 15 Jahre [1]. Wesentliche Treiber sind Anwendungen aus dem Bereich Kommunikation und Drahtlosübertragung, wobei auch Elektronikprodukte der Automobil- und Industriebranche ein stetiges Wachstum aufweisen. Die Bauelementtechnologie zeigt dabei seit Jahren einen Trend der Miniaturisierung mit unterschiedlichen Entwicklungen an Aufbauvarianten. Wesentlichen Einfluss besitzen verschiedene Technologien der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik aus der Halbleiterindustrie [2, 3]. Ein signifikanter Anteil auf einer elektronischen Baugruppe ist zudem nach [4] von passiven Bauteilen bestimmt, die ebenfalls enorme Miniaturisierungsschritte erfahren. Die Verwendung dieser Bauformen für kleinstmögliche Produktabmessungen bietet neben dem reduzierten Platzbedarf auch weitere Vorteile bei der Leiterplattenentflechtung, bei erhöhten Anforderungen hinsichtlich Datenverarbeitungsgeschwindigkeiten durch niedrige parasitäre Effekte entsprechender Kondensatoren und Induktivitäten sowie in der Bereitstellung von Bauteilen am Bestückungsautomaten [5]. In Bild 1 sind ein Größenvergleich und Bezeichnungen von passiven Bauelementen der Oberflächenmontagetechnik (SMT) aufgeführt. [6, 7]

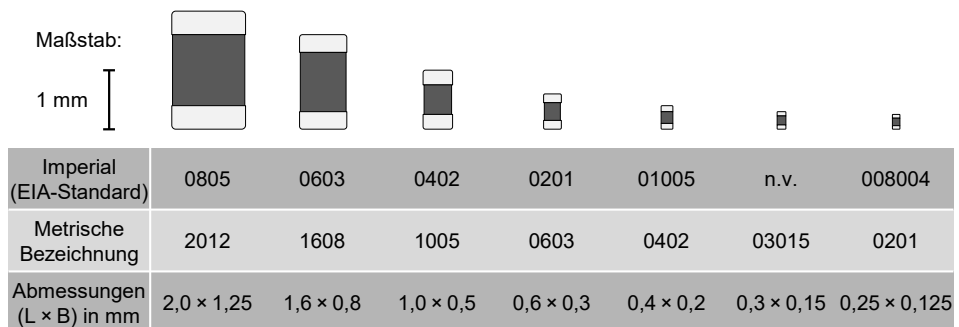


Bild 1: Abmessungen und Bezeichnungen für Widerstände und Kondensatoren der Oberflächenmontagetechnik

Die Einführung miniaturisierter Bauteile führt zu Elektronikbaugruppen mit einer hohen Integrationsdichte, was an die beteiligten Prozessschritte der gesamten Fertigungskette erhöhte Anforderungen stellt. Dies beeinflusst bereits die Auslegung der Baugruppen (z.B. die Gestaltung der Leiterplatte, das verwendete Lotpastenmaterial, die zulässigen Toleranzen

der Schablonen für den Druckprozess), weiterhin aber insbesondere die verwendete Prozess- und Anlagentechnik. In der klassischen Produktionskette der SMT sind der Auftrag des Verbindungsmediums, der Bestückprozess, der Reflow-Lötprozess, optische Inspektionssysteme sowie Technologien zur Nacharbeit von diesem Wandel betroffen. Die Wirkung von Abweichungen der Einzelprozesse führt durch herabgesetzte Toleranzgrenzen bei miniaturisierten Bauformen zu signifikant erhöhten Fertigungsfehlern. Die beschriebenen Entwicklungen und die Auswirkungen auf die Fertigungsprozesse bilden die Grundlage für den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Entlang der wesentlichen Produktionsprozesse in der Elektronik wird der Montageprozess am Beispiel hochminiaturisierter passiver SMT-Bauelemente qualifiziert. Zur Bauteildefinition wird der in der Literatur und im industriellen Umfeld weit verbreitete EIA-Standard verwendet. Metrische Bezeichnungen sind durch den Zusatz ‚M‘, wie z. B. 03015M, gekennzeichnet.

Nach einem Überblick zu aktuellen Entwicklungen der Systemintegration und deren Auswirkungen auf die Produktion wird in Kapitel 3 ein starker Fokus auf den Schablonendruckprozess gelegt. Der Auftrag des Verbindungsmediums stellt die wesentliche Basis für die folgenden Prozessschritte dar und ist von der Einführung miniaturisierter Bauelemente besonders beeinflusst. Neben Untersuchungen insbesondere zur Baugröße 01005 und weiteren Miniaturisierungsstufen erfolgen grundlegende Versuche, wie sich die Gestaltung der Schablonenöffnungen in technologischen Grenzbereichen auf das Prozessergebnis auswirkt. Darüber hinaus wird eine angepasste Methodik zur Anwendung der statistischen Versuchsplanung für den Druckprozess vorgestellt und beispielhaft für eine mischbestückte Baugruppe validiert.

Auf Basis eines gesicherten Lotpastenauftrags werden in Kapitel 4 die folgenden Prozessschritte des Bestückens und deren Auswirkungen im abschließenden Reflow-Lötprozess wissenschaftlich untersucht. Neben dem Nachweis der Prozessfähigkeit zur Bestückung miniaturisierter Bauformen wird ein systematischer Ansatz verfolgt, die Selbstzentrierung für Bauteile der Größe 01005 zu beschreiben. Darüber hinaus erfolgt die Bestimmung von Prozessgrenzen bei kombinierten Abweichungen im Schablonendruckprozess und dem Bestückvorgang zur Erreichung möglichst niedriger Fehlerraten. Damit können die wesentlichen Prozessführungsgrößen für eine erfolgreiche Kontaktierung abgeleitet werden.

Hochminiaturisierte Bauteile auf mischbestückten Baugruppen stellen eine besondere Herausforderung in der Produktion dar. Daher wird die Verarbeitung von Bauteilen der Größe 01005 in einem heterogenen Bauteilspektrum in Kapitel 5 fokussiert. Neben der Bewertung der Einzelprozesse wird die Beschreibung prozessübergreifender Effekte und Wechselwirkungen mit verschiedenen Randparametern thematisiert. Eine umfassende Kenntnis der Prozess- und Inspektionsdaten bietet großes Potenzial, prozessintegrierte Regelschleifen zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion einzuführen. Damit lassen sich zusätzliche Indikatoren präzisieren, miniaturisierte Bauteile über die gesamte Prozesskette hinweg umfassend bewerten zu können und damit die Einführung neuer Bauformen abzusichern.

2 Miniaturisierung als wesentlicher Treiber für hochintegrierte Systeme

Die Vielzahl an Entwicklungen im Halbleitermarkt prägt das Umfeld der Elektronikproduktion. Innovationen im Bereich der Bauelemente ermöglichen dabei neue Integrationsstufen von Flachbaugruppen. Die zunehmende Miniaturisierung und die Verarbeitung hochintegrierter Bauformen, insbesondere auf Produkten mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen zum Einsatz unter rauen Umgebungseinflüssen, stellen technologische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen für die beteiligte Aufbau- und Verbindungstechnik.

Im Folgenden werden zunächst wesentliche Trends der Mikroelektronik dargestellt und Herausforderungen für das Produktionsumfeld in Europa im globalisierten Elektronikmarkt aufgezeigt. Die Auswirkungen einer höheren Integrationsdichte elektronischer Baugruppen auf die beteiligten Produktionsprozesse der Oberflächenmontagetechnik sind ebenso Gegenstand der Diskussion, da miniaturisierte Bauformen erhöhte Ansprüche für die Fertigung in einer automatisierten Umgebung stellen. Auf Basis der dargestellten Entwicklungen und Herausforderungen für eine automatisierte Produktion wird der Forschungsbedarf abgeleitet und der Aufbau der Arbeit erläutert.

2.1 Aktuelle Entwicklungen zur Steigerung der Systemintegration elektronischer Baugruppen

Nach Analysen des Zentralverbands Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. wächst der Weltmarkt für Mikroelektronik im Jahr 2017 so stark wie seit über 15 Jahren nicht mehr [1]. Das Marktvolumen des Welthalbleitermarkts beträgt dabei 412 Mrd. US-Dollar, was einer Steigerung von 21,6 % gegenüber dem Vorjahr entspricht. Zwar sind als wesentlicher Treiber für diesen Umsatzzuwachs Speicherchips verantwortlich, aber auch ohne dieses Segment liegt das Wachstum des Weltmarkts bei ca. 10 % zum Vorjahr. Mit etwa 61 % Anteil wird der Markt von Asien bestimmt, wobei China mit 31,9 % das größte Abnehmerland darstellt. In den USA werden seit Jahren wieder vermehrt Elektronikprodukte hergestellt, was zu einem Marktanteil von 21,5 % im Jahr 2017 geführt hat. Der prozentuale Anteil des europäischen Markts verbleibt auf einem Niveau von knapp über 9 % des Weltmarkts.

Im Laufe des Betrachtungszeitraums der letzten 15 Jahre hat eine starke Verschiebung einzelner Marktsegmente stattgefunden. Die Fertigung von Computern dominierte im Jahr 2002 mit nahezu der Hälfte des Verbrauchs die Halbleiter-Marktsegmente. Mit 16,1 % bzw. 20,5 % kam der Unterhaltungs- bzw. Kommunikationselektronik ebenfalls eine hohe Bedeutung zu. Produkte mit höheren Anforderungen aus den Bereichen Automotive und Industrie nahmen Anteile von 8,1 % bzw. 7,1 % ein. Auf Basis der Daten aus dem Jahr 2017 ist deutlich ersichtlich, dass im Computermarkt ein starker Rückgang bis auf ca. 30 % Anteil zu verzeichnen ist. Ebenso ist die Produktion von Unterhaltungselektronik im Vergleich zum Jahr 2002 um 2,8 % zurückgegangen. Produkte aus den Bereichen Automotive und Industrie zeigen dagegen in den letzten 15 Jahren eine Steigerung von 2,9 % bzw. 5 % auf 11 bzw. 12,1 % Marktanteil. Der stärkste Zuwachs ist im Bereich Kommunikation zu sehen, welcher mit 32 % Anteilen als einer der Haupttreiber für Fertigungen mit hohem Produktionsvolumen anzusehen ist. [1]

Die verschiedenen Märkte der hierzu gehörenden Produkte sind derzeit von einer äußerst starken Dynamik geprägt. Es findet dabei ein Paradigmenwechsel des klassischen Marktwachstums und der Marktsättigung statt, wobei die Elektrifizierung bzw. Digitalisierung in vielschichtigen Bereichen starke Treiber sind. Dies beinhaltet Consumer-Produkte, Industrieanwendungen bis hin zur allgemeinen Infrastruktur mit beispielhaft genannten Applikationen aus den Bereichen ‚Internet der Dinge‘ (Internet of Things – IoT), Weiterentwicklung von Kommunikations- (beispielsweise WiFi, BLE) und Mobilfunkstandards (4G/5G-Technologie) für drahtlose Kommunikation. Der europäische Markt ist nach [1] mit Anteilen von 33 % bzw. 24 % stark fokussiert auf die Fertigung von Automobil- und Industrieelektronik. Der hauptsächliche Schwerpunkt in den USA liegt dagegen in den Segmenten Computer sowie Kommunikation. Der Fokus in Asien liegt neben dem Marktsegment Computer insbesondere in den Bereichen Kommunikations- und Unterhaltungselektronik sowie tragbarer Computersysteme (engl. wearables). [1, 6]

Die fortschreitende Miniaturisierung ist dabei stark getrieben von Produkten in hohen Stückzahlen mit verschiedenen enthaltenen Technologien zur drahtlosen Kommunikation. Der aufgezeigte Trend zum starken Wachstum in diesen Bereichen führt zu einer verstärkten Nachfrage nach Bauteilen mit miniaturisierten Abmessungen für hochintegrierte Systeme. Einen wesentlichen Anteil tragen hierzu verschiedene Entwicklungen der Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (engl. packaging) aus der Halbleiterindustrie bei [2].

Im Wesentlichen lassen sich drei Entwicklungsrichtungen ableiten: *Hochintegration von Single-Chip-Packages* ermöglicht die Funktionsintegration auf einem Chip mit einer gemeinsamen Technologie. Typische Anwendungen beispielsweise für Prozessoren sind Packages mit flächigen Anschlussstrukturen, ungehäuste Chips (engl. flip-chip – FC) sowie System-on-Chip (SoC). Die Kombination von mehreren Chips in teilweise unterschiedlichen Technologien wird nach [2] mit der Entwicklung *multi-technologie-integrierten Packages* verfolgt. Hierbei werden beispielsweise für Speicheranwendungen unterschiedliche Komponenten in einem gemeinsamen Package kombiniert, um eine flexible Funktionsintegration zu realisieren. Häufig kommt hier auch eine 3D-Aufbautechnologie zum Einsatz, womit dieser Package-Form verschiedene Varianten zugeordnet werden können.

Beispiele für Multi-Package-Konzepte sind System-in-Package (SiP), System-on-Package (SoP) oder Package-on-Package. Die letzte Entwicklungsrichtung stellen *hochminiaturisierte Packages* für mobile Anwendungen dar. In Bild 2 sind die damit einhergehenden erhöhten Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik anhand der Integrationstechnologien SoC und SiP schematisch dargestellt.

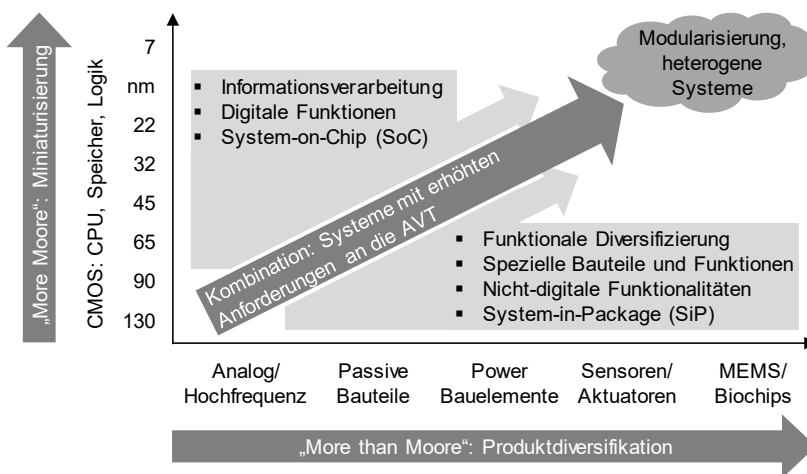


Bild 2: Eine heterogene Systemintegration zwischen SoC und SiP beeinflusst die Ausprägungen elektronischer Systeme [7, 8]

Die zunehmende Komplexität elektronischer Systeme beinhaltet häufig eine Kombination digitaler und nicht-digitaler Funktionen, wie beispielsweise die gleichzeitige Informationserfassung und -verarbeitung [8]. Aus den genannten Entwicklungsrichtungen ist abzuleiten, dass eine gesteigerte Funktionsintegration in gemeinsame Packages voranschreitet [9]. Dabei fließen auch neue Technologien aus dem Bereich Stapelung auf

Halbleiter- oder Chip-Ebene, 3D-Kontaktierung (engl. through silicon via – TSV) oder Einbettung von Komponenten (engl. embedding technology) ein [6, 10, 11]. Nach [2] lassen sich bei einer hochkomplexen Anwendung mit einer Vielzahl an Komponenten große Effekte am Einzelbauteil erzielen. Dies trifft insbesondere auf passive Bauteile wie beispielsweise Widerstände und Kondensatoren zu, die häufig in sehr großen Stückzahlen auf derartigen Schaltungen vorhanden sind.

Der Umsatz mit passiven Bauelementen liegt nach [12] im Jahr 2018 bei 24,3 Mrd. US-Dollar. Neben Widerständen und Kondensatoren können auch Spulen, Thermoelemente und Sicherungen den passiven Bauelementen zugeordnet werden [7]. Die aufgeführten Komponenten stellen die essenzielle Basis für ein intelligentes Energiemanagement, zur Signalverarbeitung und zum Schutz der aktiven Bauelemente auf einer Flachbaugruppe dar. Insbesondere die Verwendung von Keramik-Vielschichtkondensatoren (engl. multilayer ceramic chip capacitors – MLCCs) hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Nach [13] beläuft sich die Anzahl von verwendeten MLCCs in einem iPhone 6s aus dem Jahr 2015 auf etwa 500 Stück, in der Generation des iPhone X aus 2017 sind bereits über 1.000 MLCCs verbaut. Anhand dieser Verwendung lässt sich darstellen, wie sich der Bedarf an miniaturisierten MLCCs mit hohen Leistungsdichten ausweiten wird. Im Jahr 2013 wurde durch die Firma Murata die derzeit kleinste verfügbare Größe für die Oberflächenmontagetechnik mit Abmessungen von nur 250 µm Länge, 125 µm Breite und 125 µm Höhe vorgestellt [14]. [6, 7]

Die ansteigende Integrationsdichte elektronischer Produkte lässt sich anhand der Verwendung von Kondensatoren und Widerständen in elektronischen Produkten aufzeigen. Bei Keramik-Kondensatoren führt die gestiegene Nachfrage nach verkleinerten Bauformen zu einer Verschiebung der Anteile zu entsprechenden Bauteilgrößen. Dies gilt nach [15] ebenso für die Verwendung von Widerständen, wobei hier größere Einschränkungen bei der Verwendung hinsichtlich Leistungsklassen und thermischem Management auf der Baugruppe einwirken. In Bild 3 ist der Trend zur Verwendung kleinerer Bauformen deutlich ersichtlich, wonach die Bauformen 0402 und 0201 derzeit die am häufigsten verwendeten Bauteilgrößen darstellen.

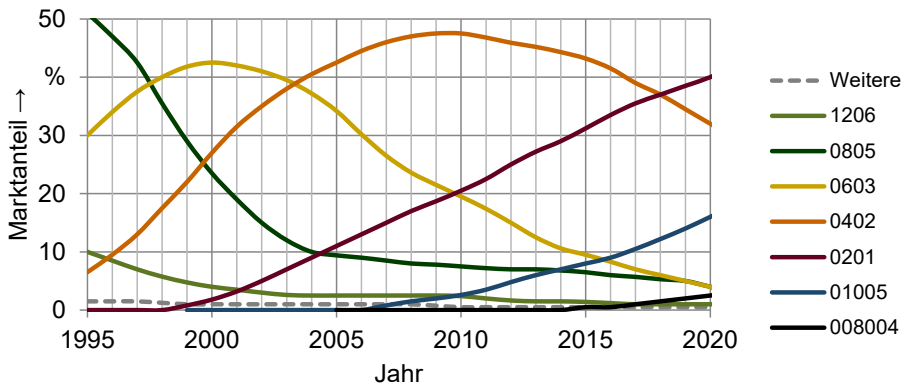


Bild 3: Anteil von MLCCs nach EIA-Bauteilgrößen [16]

Es existieren dabei spezielle Applikationen mit höchsten Anforderungen hinsichtlich eines möglichst geringen Platzbedarfs. Als Beispiel seien Produkte aus der Medizintechnik wie Hörgeräte oder weitere Applikationen aus dem Bereich der Mikro- und Nanointegration mit spezieller Sensorik genannt. In den Anwendungen mit Forderungen nach einer robusten und zuverlässigen Elektronik im Bereich Automotive- und Industrieelektronik ist die Verwendung miniaturisierter Bauelemente nach [17] dagegen bisher weniger verbreitet und es sind Bauformen der Größen 0603 und 0402 favorisiert (vgl. Bild 4). Dies liegt insbesondere in den höheren Zuverlässigkeitsanforderungen, welche für MLCCs je nach Einsatzort beispielsweise nach [18] definiert sind.

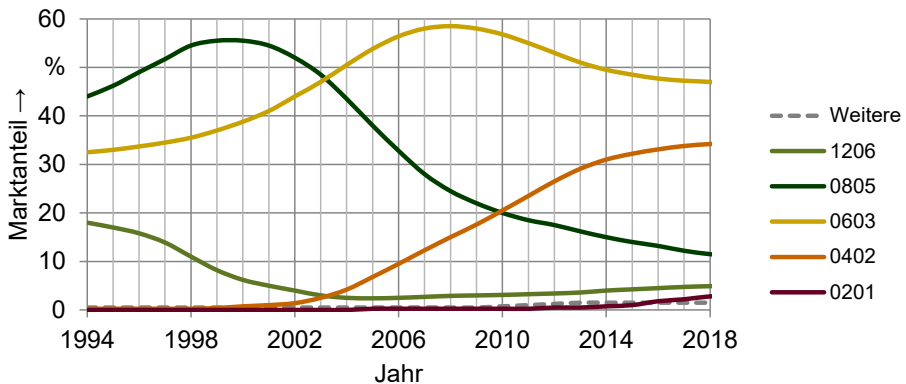


Bild 4: Anteil von MLCCs in Automotive-Qualität (AEC-Q200) nach EIA-Bauteilgrößen [19]

Es lassen sich in den Bereichen mit höheren Anforderungen zwei wesentliche Trends erkennen. Zum einen bedingt die Einführung von neuartiger Sensorik, MEMS oder Modulen zur drahtlosen Kommunikation häufig die Verwendung kleinster Bauformen wie beispielsweise der Baugröße 01005,

die unter Umständen nicht in der geforderten Qualität verfügbar sind und damit nur in nicht sicherheitsrelevanten Bereichen zum Einsatz kommen können. Zum anderen ist eine dramatische Verknappung bei der Verfügbarkeit von Bauteilen mit größeren Abmessungen zu verzeichnen [7, 20, 21]. Fertigungen zur Herstellung größerer Bauformen, wie beispielsweise 0402, 0603 und größer, sind für viele Produzenten bereits planmäßig abgeschrieben und werden nur weiterbetrieben, so lange es wirtschaftlich sinnvoll ist. Um- oder Neugestaltungen von Fertigungen finden dagegen oftmals nur für Produktionstechnologien kleinerer Bauformen statt, da die Fertigungskapazität und bauteilbezogene Kostensenkung durch den wesentlich geringeren Materialeinsatz bei höherem Produktionsvolumen maximiert werden können.

Im Herstellermarkt für passive Zweipoler hat in den letzten Jahren eine Konsolidierung stattgefunden. Gleichzeitig kann die signifikant angestiegene Nachfrage nach elektronischen Bauteilen mit bestehenden Kapazitäten kaum bedient werden. Bei der Ausweitung bzw. der Innovierung bestehender Fertigungen wird dabei ebenso dem wesentlichen Trend in den Segmenten mit den größten Marktanteilen gefolgt. Dies resultiert in dem Fokus auf miniaturisierte Bauformen der Größe 0201 und zunehmend kleineren Bauformen 01005 bis hin zu 008004. Die Verknappung bisher etablierter Bauteilgrößen zwingt daher auch zunehmend Entwicklungen in den Bereichen Automotive- und Industrieelektronik, kleiner werdende Bauformen zu verwenden. Für die Bauteilgröße 01005 sind nach [6] im Zeitraum der nächsten 5 Jahren Zuwächse von über 20 % Verwendungsanteil aufgeführt. In [7] wird angenommen, dass diese Bauform 2025 die am häufigsten verwendete Größe für passive Zweipoler darstellen wird. Neben den hier genannten Abschätzungen lässt sich durch die begrenzte Verfügbarkeit etablierter Bauformen ebenso ein steigender Anteil von kleiner werdenden Bauformen in Bereichen mit höheren Anforderungen erwarten.

2.2 Herausforderungen bei der Fertigung und Zuverlässigkeitsbewertung elektronischer Baugruppen

Die wesentlichen Prozesse der Oberflächenmontagetechnik (SMT) bestehen aus den drei Schritten Auftrag des Lotpastenmaterials, der Bestückung der Bauelemente sowie einem abschließenden Reflow-Lötprozess zur elektrischen und mechanischen Verbindung der Komponenten. In einer

automatisierten Fertigungsumgebung kommen zudem Systeme zum Beladen der Leiterplatten in die Produktionslinie, verknüpfende Transportbänder mit Lesestationen zur Barcode-Erfassung zwischen den jeweiligen Prozessschritten sowie Entladestationen der produzierten Flachbaugruppen zum Einsatz. Bild 5 stellt die Prozessschritte der SMT schematisch anhand einer typischen Fertigungslinie dar.

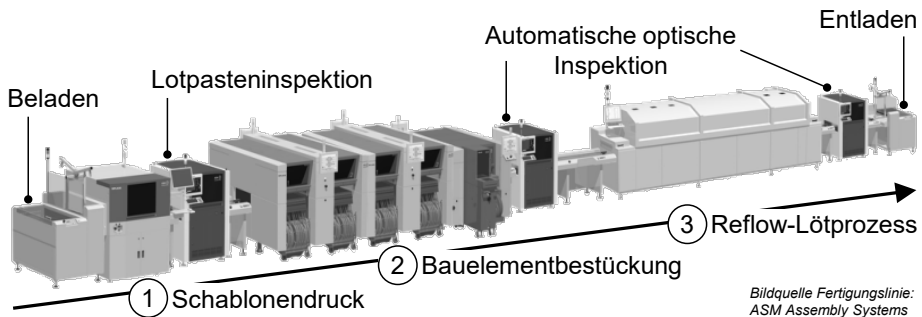


Bild 5: Wesentliche Prozessschritte einer automatisierten Fertigungslinie für die Oberflächenmontagetechnik

Zusätzliche Prüfschritte, welche als nicht direkt wertschöpfend eingeordnet werden, finden dabei nach den genannten Hauptprozessen zunehmend Verwendung. Die Inspektion nach dem Schablonendruck bietet die Möglichkeit, den Auftrag der Lotpaste direkt im Anschluss an den Druckprozess zu vermessen, um bereits zu Beginn der Prozesskette eine Überwachung dieses Prozessschrittes durchzuführen [22]. Neben der Möglichkeit der Implementierung einer Regelung des Druckprozesses bzw. des Mitarbeiteringriffs bei definierten Toleranzabweichungen können die Inspektionsergebnisse in der folgenden Prozesskette oder zur Abspeicherung von Qualitätsdaten des Druckprozesses verwendet werden.

Die automatische optische Inspektion wird überwiegend nach dem abschließenden Reflow-Lötprozess eingesetzt, wobei je nach spezifischen Eigenschaften der zu produzierenden Leiterplatte, wie beispielsweise einer hohen Bestückungsdichte oder der Verarbeitung von Schirmblechen, dieser Inspektionsschritt ebenso nach dem Bestückvorgang bevorzugt Verwendung finden kann. Für eine vollständige Erfassung der Inspektionsdaten ist eine optische Prüfung sowohl nach dem Bestückprozess als auch nach dem Lötvorgang erforderlich. Ergänzend kann auch eine Inspektion, insbesondere der verdeckten Lötstellen, mittels Röntgensystem hinzukommen. Damit stehen umfassende Daten für die Bewertung der Prozessqualität über die gesamte Prozesskette hinweg zur Verfügung.

Fertigungslinien für Produkte aus dem Consumer-Bereich, welche wie im letzten Abschnitt aufgezeigt einen hohen Marktanteil besitzen, sind häufig für spezielle Flachbaugruppen innerhalb eines beschränkten Fertigungszeitraums konzipiert. Dies können beispielsweise spezielle Varianten einer Smartphone-Generation sein, welche in immer kürzeren Produktlebenszyklen in großen Stückzahlen produziert werden. Anpassungen im Prozess sind hierbei üblicherweise nicht vorgesehen, da der Kunde den ausführenden Unternehmen starre Vorgaben über die Einzelschritte der Produktion gemeinsam mit den Herstellern der beteiligten Produktionsanlagen erarbeitet und den Fertigungsprozess damit fest vorgibt. Derartige Produkte werden nahezu ausnahmslos von Auftragsfertigern für elektronische Produkte in Asien produziert. Für eine bessere Einschätzung der Größenordnungen werden exemplarische Kennzahlen für eine jeweils neue Smartphone-Generation aufgeführt. Nach [23] werden im Rahmen der Vorbestellung von nur zwei Typen eines Smartphones im Jahr 2014 an etwa 100 Produktionslinien im Vollschichtbetrieb gearbeitet. Für die Fertigung von 540.000 Smartphones pro Tag werden darüber hinaus etwa 200.000 Personen beschäftigt. Ähnliche Größenordnungen sind in einem Bericht aus dem Jahr 2016 aufgeführt, wobei sogar für Spitzenzeiten 350.000 Beschäftigte für Produktion, Test und Verpackung der Produkte genannt sind [24].

Der verfügbaren Literatur sind keine genauen Qualitätszahlen über Fertigungen des beschriebenen Marktsegments zu entnehmen, da diese in der Regel nicht zur Veröffentlichung freigegeben sind. Aus verschiedenen Quellen lässt sich dennoch ableiten, dass derartige Produktionslinien aufgrund des starken Kostendrucks und der vergleichsweise hochintegrierten Baugruppen mit neuartigen Technologien, auch im Bereich Display oder Gehäusekörper, mit hohen Ausschussraten zu kämpfen haben. Dies wird gestützt durch die im Folgenden beispielhaft aufgeführten Artikel aus der Presse, wonach im Produktions- bzw. abschließenden Montageprozess Ausschussraten im Prozentbereich durchaus auch üblich sind.

In [23] sind in Abhängigkeit von der Displaygröße Defektraten beim Hersteller zwischen 15 % bis hin zu 40 % bis 50 % genannt. Eine weitere Quelle führt auf, dass der Kunde mit dem Auftragsfertiger eine Qualitätsrate von 90 % bei Auslieferung vereinbart hat [25]. In [26] werden Defekte ohne mechanische Einwirkungen während der ersten 12 Monate auf Basis von etwa 50.000 Geräten ausgewertet, wobei sich die aufgeführten Ausfallraten modellabhängig von etwa 2 % bis hin zu 7 % belaufen. Die Fehlerraten liegen damit zwar im Vergleich zu Laptops bzw. Ultrabooks um etwa 1 % bis 2 % geringer. Dennoch entspricht damit auch die Langzeitzuverlässigkeit dieser Produkte nicht den geforderten Standards anderer Branchen. Derartige

Defektraten in der Fertigung sind für Produkte aus dem industriellen oder automotiven Marktsegment nicht akzeptabel.

Auch die Anforderungen hinsichtlich der Rückverfolgbarkeit und die Wertigkeit der Produkte, welche häufig durch Mikroprozessoren und spezifische ASICs beeinflusst sind, weisen in diesen Bereichen starke Abweichungen auf. Für die erhöhte Zuverlässigkeit von Flachbaugruppen, welche beispielsweise über 10 oder 15 Jahre fehlerfrei funktionieren müssen, ist die Qualität im Prozess entscheidend, da Nacharbeit nicht erlaubt, nicht rentabel oder technologisch überhaupt nicht mehr möglich ist.

Die Verarbeitung von miniaturisierten Bauformen für hochintegrierte Systeme stellt damit die Fertigung hochwertiger Elektronikprodukte vor große Herausforderungen. Die Anforderungen an die beteiligten Produktionsprozesse steigen mit zukünftigen Entwicklungen innovativer Bauformen weiter an. Hinzu kommt, dass Produktionslinien aus Bereichen der Industrie, der Medizintechnik und teilweise auch Automotive eine deutlich höhere Varianz mit häufigeren Produktwechseln besitzen. Die Flachbaugruppe eines typischen Consumer-Produkts weist häufig ein vergleichsweise homogenes Bauteilspektrum auf. Im Gegensatz hierzu sind Mischbestückungen unterschiedlichster Bauformen, beispielsweise durch Kombination von Signal- und Leistungselektronik, für anspruchsvolle Anwendungen durchaus üblich. Ein heterogenes Bauteilspektrum hat über die Prozesskette hinweg große Auswirkungen auf die beteiligten Prozessschritte.

Im Schablonendruckprozess wird die Lotpaste auf große Leiterplatten, teilweise im Nutzenaufbau, mit unterschiedlichsten Öffnungen der Druckschablone auf vergleichsweise hohe Kupferaußenlagen aufgebracht. Dies bedingt häufig den Einsatz von Stufenschablonen, um die notwendigen Lotdepots bereitstellen zu können. Im Bestückprozess werden zur Beherrschung der Varianz bei möglichst hoher Leistungsfähigkeit hohe Anforderungen an das Rüstkonzept gestellt. Zudem gilt es niedrige Abwurfraten von kleinsten passiven Zweipolern bis hin zu bedrahteten Bauelementen für den Reflow-Lötprozess (engl. pin-in-paste oder through-hole-reflow) zu realisieren. Der abschließende Reflow-Lötprozess ist von einem kleiner werdenden Prozessfenster durch unterschiedliche thermische Massen auf den Baugruppen gekennzeichnet. Es ist entscheidend, bei hohem Durchsatz eine hochwertige Lötverbindung bei möglichst geringer Temperaturbelastung der Baugruppe zu erzielen. Der abschließende Inspektionsprozess hat das Ziel, eine gesicherte Erkennungsrate von Echtfehlern bei

gleichzeitig niedriger Anzahl an Pseudofehlern mit erforderlicher Verifikation durch das Linienpersonal zu erreichen.

Die Einführung neuartiger Bauformen bedingt dabei häufig eine genaue Analyse und eine kontinuierliche Optimierung der Einzelprozesse. Durch die steigenden Abhängigkeiten im Prozess aufgrund kleiner werdender Toleranzketten ist eine singuläre Betrachtung der Prozessschritte nicht mehr ausreichend. Anlagenhersteller bieten daher verschiedene Lösungen an, um Diagnose- bzw. Inspektionssysteme zur Einführung von prozessübergreifenden Regelschleifen einzusetzen. Die Entwicklungen der fortschreitenden Miniaturisierung stellen dabei erhöhte Anforderungen an diese Systeme, wie in Bild 6 visualisiert ist.

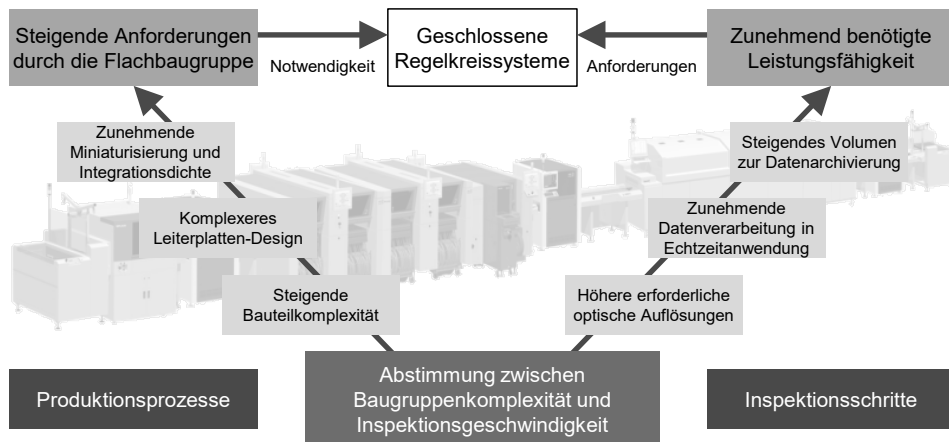


Bild 6: Herausforderungen für den Einsatz von geschlossenen Regelkreisen in der Oberflächenmontagetechnik

Wesentliche Basis zur Einführung von Regelkreisen stellen Inspektionssysteme dar, um Messwerte und Qualitätskennzahlen aus den Produktionsprozessen zu erfassen. Die zuverlässige Inspektion kleinerer Bauformen, wie beispielsweise Komponenten der Baugröße 01005, bedingt höhere erforderliche Auflösungen der Prüfsysteme. Dies führt zu einer erhöhten Datenakquisition sowie längeren Verarbeitungszeiten der Bildaufnahmen und kann hierdurch höhere Taktzeiten verursachen [27]. Ebenso kann eine höhere Baugruppenkomplexität den Einsatz zusätzlicher Kamerasysteme für eine ausreichende Bildinformation erforderlich machen, um seitliche oder teilweise verdeckte Strukturen optisch erfassen zu können [28].

Zur Charakterisierung des Schablonendruckprozesses findet die Lotpasteninspektion (engl. solder paste inspection – SPI) zunehmend Verwendung. Neben Einschränkungen aufgrund des Messprinzips, wie beispielsweise der

Erkennung und präzisen Unterscheidung von applizierter Lotpaste zu Leiterplatte, Lötstopplack und Metallisierung der SMD-Landeflächen, besteht die größte Herausforderung in der Definition von Toleranzgrenzen in diesem Inspektionsschritt. Hierzu ist eine Korrelation der SPI-Ergebnisse zur automatischen optischen Inspektion (AOI) notwendig, um Auswirkungen des tatsächlich aufgetragenen Lotpastenmaterials im Schablonendruckprozesses auf die Abnahmefähigkeit der Kontaktierung nach dem Lötprozess mittels AOI bewerten zu können [29]. Häufig werden Toleranzgrenzen aus Erfahrungswerten für eine Baugruppe global oder nur in Teilbereichen spezifisch festgelegt [30]. Dies liegt in dem hohen Aufwand begründet, der bei einer manuellen Analyse zur Festlegung der Toleranzgrenzen erforderlich ist. Hersteller von Inspektionssystemen bieten daher zunehmend verschiedene Lösungsansätze für geschlossene Regelkreise der Fertigungsprozesse (engl. closed loop manufacturing). Beispielhaft können Regelschleifen zwischen SPI und Schablonendrucker genannt werden, um einen möglichen Druckversatz zu korrigieren oder Reinigungsraten dynamisch anzupassen. Daneben existieren noch weitere Möglichkeiten, die erfassten Messdaten für folgende Prozessschritte einzusetzen. Demnach können erfasste Versatzwerte aus dem Schablonendruck durch eine angepasste Bestückposition kompensiert oder die Unterschreitung von gewissen Grenzwerten zu einer Schlecht-Kennzeichnung einer Leiterplatte im Nutzenaufbau verwendet werden. Eine große Herausforderung liegt hier jedoch in der Verknüpfung von SPI- und AOI-Daten, wobei die genauen Kenntnisse über Zusammenhänge zwischen diesen Inspektionsschritten wissenschaftlich noch nicht ausreichend untersucht sind. Insbesondere mischbestückte Baugruppen mit miniaturisiertem Bauteilspektrum bieten großes Potenzial, um Korrelationen abzuleiten und kurze Regelschleifen in einer automatisierten Produktionslinie einzuführen.

2.3 Ableitung des Forschungsbedarfs

Anhand der vorangegangenen Unterkapitel konnte aufgezeigt werden, welchen Einfluss neue Entwicklungen und Integrationsformen auf die Produktionsprozesse in der Elektronik haben. Insbesondere die in Europa starken Marktsegmente der Medizintechnik, Industrie- und Kfz-Elektronik stehen vor der Herausforderung, die steigende Komplexität neuer Bauformen in einem heterogenen Bauteilspektrum wirtschaftlich zu produzieren. Die Einführung passiver Bauteile der Größe 01005 bis hin zu 008004 (metrisch 0201M) stellen dabei hohe Anforderungen an zuverlässige Produktionsprozesse in der Serienfertigung, die bisher noch nicht vollständig durch prozessübergreifende Beschreibung von Effekten und Wechselwirkungen

analysiert sind [31]. In den folgenden Kapiteln wird daher der beschriebene Trend der Miniaturisierung auf Bauteilebene aufgegriffen und in verschiedene Teilaspekte unterteilt. Neben Analysen der Einzelprozesse erfolgt auch die Darstellung von Untersuchungen der Wirkzusammenhänge über die komplette Prozesskette bis hin zu Zuverlässigkeitsaspekten elektronischer Baugruppen. Die Ergebnisse liefern damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Elektronikproduktion vor dem Hintergrund eines fortschreitend miniaturisierten Bauteilspektrums für robuste Produktionsprozesse. In Bild 7 ist der Aufbau der einzelnen Kapitel dieser Arbeit visualisiert.

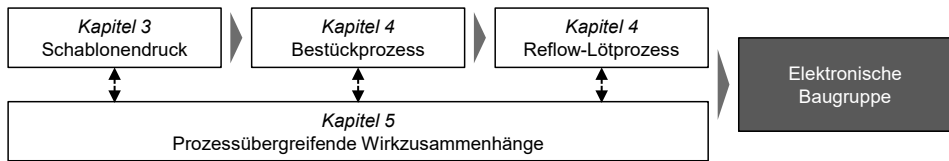


Bild 7: Strukturierung der Forschungsergebnisse der vorliegenden Arbeit

Für die Verarbeitung von Bauteilen der Größe 01005 und weiterer Miniaturisierungsstufen ist die genaue Kenntnis über die Prozessführung im Lotpastenauftrag erforderlich. Der Schablonendruckprozess ist darüber hinaus in hohem Maß von den verwendeten Komponenten und Materialien abhängig. Als Fertigungshilfsmittel wirken hier beispielsweise die Ausführung der Leiterplatte selbst, die Auslegung der Druckschablone oder das eingesetzte Lotpastenmaterial auf das Prozessergebnis ein. In Kapitel 3 erfolgt zunächst die Betrachtung der Verarbeitung von Bauteilen der Größe 01005 auf einem entwickelten Demonstrator. Insbesondere werden Auswirkungen verschiedener Ausführungen der Druckschablone mit unterschiedlichen Materialien diskutiert. Die Lotpasteninspektion bietet dabei durch hochgenaue Vermessung der Oberflächentopologie großes Potenzial zur Qualitätsdatenerfassung bedruckter Leiterplatten. Für noch kleiner werdende Strukturen erfolgt im Anschluss die Gestaltung einer weiteren Teststruktur, um Einflussparameter bei weiterer Miniaturisierung auf Qualitätsmerkmale des Druckprozesses zu beschreiben. Die Gestaltung der Druckschablone hat hierbei entscheidenden Einfluss auf die Bereitstellung der Lotpastendepots für miniaturisierte Bauelemente. Ein bisher unzureichend betrachteter Wirkzusammenhang ist die Form der Schablonenöffnung bei einem gleichbleibenden Flächenverhältnis, welche daher in weiteren Versuchsreihen systematisch unter Variation der entwickelten Druckschablonen evaluiert wird. Neue Integrationsstufen bedingen häufig die Einführung neuartiger Lotpastenmaterialien mit abweichenden Verarbeitungseigenschaften. Die effiziente Optimierung von Prozessparametern

für den Schablonendruckprozess mittels statistischer Versuchsplanung bildet daher den Abschluss dieses Kapitels.

Der Bestückprozess für Bauteile mit kleinsten Abmessungen erscheint durch die angegebenen Prozessfähigkeitskennwerte von leistungsfähigen Bestückautomaten mit entsprechender Präzision grundsätzlich ohne weitere Maßnahmen möglich. Den Beginn des Kapitels 4 bildet daher zunächst die Bestimmung der Bestückgenauigkeit unter Verwendung von Bauteilen der Größe 01005 im Vergleich zu Keramikbauteilen, welche häufig zur Kalibrierung von Bestückautomaten zum Einsatz kommen. Darüber hinaus werden weitere Einflussgrößen auf die Prozessführung beim Bestückvorgang analysiert. Ein wesentlicher Einfluss auf eine erfolgreiche Kontaktierung nach dem Reflow-Lötprozess besteht neben der Prozessführung in der Genauigkeit der Ausrichtung von Bauelement zur Kontaktfläche auf der Leiterplatte vor dem Umschmelzen. Der Effekt der so genannten Selbstzentrierung wird in verschiedenen Versuchsreihen unter Variation der Leiterplatte und der Versatzwerte aus Schablonendruck und Bestückprozess evaluiert. Damit wird eine wesentliche Basis für die Bestimmung eines optimierten Layouts und die Ermittlung von Grenzwerten für die Erreichung eines robusten Fertigungsprozesses abgeleitet.

Miniaturisierte Bauelemente auf einer Leiterplatte mit heterogenem Bauteilspektrum stellen erhöhte Ansprüche an die beteiligten Prozessschritte. In Kapitel 5 wird daher eine Leiterplatte konzipiert, um prozessübergreifende Zusammenhänge und Wechselwirkungen unter Variation der Fertigungsparameter bei der Verarbeitung von Bauteilen der Größe 01005 auf einem Demonstrator zu beschreiben. Neben dem Oberflächenfinish der Leiterplatte werden weitere Faktoren wie die verwendete Druckschablone, Hersteller und Typ der Lotpaste sowie verwendetes Reflow-Lötprofil bewertet. Die Nutzung von Prozess- und Inspektionsdaten bietet dabei großes Potenzial, die Prozessgestaltung zu optimieren und Wirkzusammenhänge zu analysieren. Die Korrelation der Daten aus der Lotpasteninspektion und der automatischen optischen Inspektion ist allerdings derzeit noch nicht derart gelöst, dass eine gesicherte Vorhersage potenzieller Fehlerbilder erfolgen kann. Den Abschluss des Kapitels bildet daher die mögliche Integration geschlossener Regelkreise in der Prozesskette der Elektronikproduktion. Wesentliche Zielstellung ist die Stabilisierung der beteiligten Prozesse für einen robusten Fertigungsprozess.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

Der erste Teilprozess in der Oberflächenmontagetechnik ist der Auftrag des Verbindungsmediums. Ein etabliertes Verfahren zum Auftrag von Lotpaste auf das Substratmaterial stellt dabei der Schablonendruckprozess dar. In einer Vielzahl von Veröffentlichungen, wie beispielsweise in [32–36], wird der Schablonendruck als Hauptursache für Verfahrensfehler bei der Produktion elektronischer Baugruppen angesehen. Durch die fortschreitende Miniaturisierung und damit einhergehende neue Materialien und Komponenten werden insbesondere an diesen Fertigungsschritt hohe Anforderungen gestellt [37, 38].

Für die gesicherte Verarbeitung von passiven Zweipolern der Baugröße 01005 und weiteren Miniaturisierungsstufen sind der Literatur trotz zahlreicher Veröffentlichungen noch keine grundlegenden Zusammenhänge der Effekte und Wechselwirkungen auf das Prozessergebnis im Schablonendruck zu entnehmen. Daher erfolgen zu Beginn dieses Kapitels unter Variation der wesentlichen Einflussfaktoren Druckversuche, um das Prozessverhalten systematisch zu analysieren und technologische Grenzen abzuleiten. Als Richtwert zur Auslegung der Druckschablone wird häufig das Flächenverhältnis FV (engl. area ratio – AR) herangezogen, um die Druckbarkeit von Strukturen abzuschätzen. Das FV einer Schablonenöffnung ist dabei definiert als der Quotient von Aperturöffnungsfläche zu -wandungsfläche. Ein bisher nicht näher untersuchter Effekt ist ein abweichendes Prozessverhalten bei verändertem Seitenverhältnis der Schablonenaperturen. Insbesondere in technologisch grenzwertigen Auslegungen der Druckschablone, die mit einer hohen Integrationsdichte einhergehen, stellt dies eine effektive Möglichkeit dar, die Prozessgrenzen detaillierter zu beschreiben.

Die Einführung neuartiger Materialien, wie z. B. Lotpasten mit feinerer Verteilung der Korngrößen [39] oder angepassten Flussmittelformulierungen [40, 41], erfordert die Anpassung der relevanten Druckparameter. Da wesentliche Haupteinflussfaktoren im Schablonendruckprozess grundsätzlich beispielsweise in [22] beschrieben sind, eignet sich die Verwendung eines systematischen Vorgehens zur Ermittlung der Prozessparameter in besonderem Maße [42]. Den Abschluss dieses Kapitels bildet daher der Einsatz der statistischen Versuchsplanung (engl. design of experiments

– DOE) für einen optimierten Schablonendruckprozess. Als weiterer Schritt gegenüber bereits verfügbarer Literatur zu dieser Anwendung werden hierbei verschiedene Arten von Versuchsplänen diskutiert und an einer Baugruppe mit einem heterogenen Bauteilspektrum beispielhaft angewendet. Die Heterogenität der Baugruppe ist gekennzeichnet durch Bauteile der Größe 01005, BGAs mit unterschiedlichen Rastermaßen bis hin zu Bauteilen mit vergleichsweise großen geometrischen Abmessungen. Damit soll eine angepasste Gewichtung möglicher Zielfaktoren bei miniaturisierten Bauelementen untersucht werden, um die Prozessgrenzen im Schablonendruck präziser beschreiben zu können.

3.1 Grundlagen des Schablonendruckprozesses in der Oberflächenmontagetechnik

Der Schablonendruck zum Auftrag der Lotpaste bestimmt in hohem Maß die Entstehung von Fertigungsfehlern in der Elektronikproduktion. In der womöglich ersten Publikationen zu dieser Betrachtung wurde die Ausbeute (engl. first-pass-yield – FPY) einer Flachbaugruppe, basierend auf angenommenen Werten für Einflussgrößen aus den Komponenten und Defektraten aus den Prozessen, mit etwa 43 % berechnet [32]. Nach einer Bewertung der Einflussfaktoren auf den FPY sind dem Schablonendruckprozess nach [32] etwa 64 % als Ursache zuzuordnen. Weitere Studien bewerten den Schablonendruck mit ähnlich hohen Fehlerraten, wobei die Angaben von 52 % bis 71 % [33], 49 % [34], 60 % [35] bis hin zu 80 % [36] variieren.

Seit der ersten beschriebenen Betrachtung in [32] hat parallel zur Miniaturisierung der Komponenten der damals am häufigsten verwendeten Baugröße 1206 hin zur Baugröße 0402 bzw. 0201 (vgl. auch Bild 3) eine signifikante Verbesserung der Qualität der Materialien und Fähigkeiten der Maschinen stattgefunden. Die genaue Bezifferung von Realfehlern, die sich auf einen ungenügenden Schablonendruckprozess zurückführen lassen, ist daher häufig nur für spezifische Anwendungsfälle möglich. In hohem Maß wirken sich die eingesetzten Materialien, Komponenten sowie die beteiligten Fertigungsprozesse in Abhängigkeit der Losgröße der betrachteten Fertigung auf die Defektraten aus. Unabhängig von dieser Fehlerzuordnung ist der Schablonendruck stark von der fortschreitenden Miniaturisierung beeinflusst. Verkleinerte Bauformen und die darauf angepasste Auslegung der Druckschablone führen zu ebenso kleineren Aperturen, die einen gesicherten Auftrag der Lotpaste stark beeinträchtigen können. Neben der Verwendung von Stufenschablonen mit dünneren Schablonenstärken in

Bereichen mit miniaturisierten Bauelementen bieten verschiedene Technologien zur Nachbehandlung der Schablonenoberflächen eine erhöhte Prozessleistung. Durch die Vielzahl an Einflussfaktoren auf den Prozess ist dem Schablonendruck eine vergleichsweise hohe Komplexität zuzuordnen.

Im Schablonendruckprozess wird unter Verwendung einer strukturierten Metallschablone das Verbindungsmedium auf das Substratmaterial aufgetragen. Da kein Absprung zwischen Schablone und dem Trägermaterial vorhanden ist, wird dies auch als Kontaktdruck bezeichnet [43]. Das Verfahren lässt sich in verschiedene Teilprozesse untergliedern. Nach dem Einfahren und der Klemmung der Leiterplatte verläuft die Lageerkennung mittels Kamerasystem und Positionierung der Schablone zur fixierten Leiterplatte. Das Anheben der Leiterplatte erfolgt auf eine definierte Kontakthöhe, das Rakelblatt setzt mit definierter Kraft über den Rakelhalter auf die Schablonenoberseite auf und verfährt über die Druckschablone. Beim Erreichen der Endposition wird zunächst die Leiterplatte von der Unterseite der Schablone getrennt und danach der Rakel angehoben. Nach Lösen der Klemmung werden die bedruckte Leiterplatte aus dem Prozessraum transportiert und optionale Prozessschritte durchgeführt, wie das zyklische maschineninterne Reinigen der Schablonenunterseite oder das automatische Spenden von Lotpaste bei der Verwendung offener Rakelsysteme. Für die erzielbare Qualität im Schablonendruck ist neben einer hochpräzisen Ausrichtung der Leiterplatte zur Schablone nach vertikaler, horizontaler und Drehlage insbesondere die Übertragung der Lotpaste durch die Öffnungen der Metallschablone von entscheidender Bedeutung. Die wesentlich beteiligten Schritte lassen sich nach [44] in die drei technologischen Subprozesse, nämlich das Rollen der Lotpaste, das Füllen der Aperturen und das Auslösen der Lotpaste aus den Schablonenaperturen unterteilen (vgl. Bild 8).

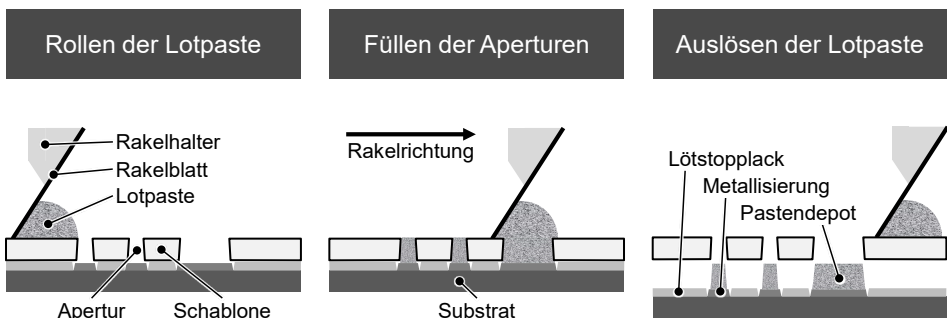


Bild 8: Wesentliche Prozessschritte im Schablonendruck nach [44]

Beim Verfahren der Rakel auf der Oberseite der Schablone bildet sich in der Lotpaste ein hydrodynamischer Druck aus, der an der Auflagefläche der Rakel zur Schablonenoberseite am höchsten ausgeprägt ist und mit zunehmendem Abstand abnimmt [45]. Durch diese Veränderung des hydrodynamischen Drucks und den vorherrschenden Reibungskoeffizienten der Rakel und der Oberfläche der Druckschablone entsteht durch die Rakelgeschwindigkeit während des Druckprozesses ein Rollen der Lotpaste, was das Füllen der Aperturen begünstigt [46]. Durch die Rollbewegung werden Aperturen zunächst gefüllt, was von dem Strömungsprofil der verwendeten Lotpaste und den Reibungsverhältnissen an den Aperturwänden abhängt [47]. Sobald der Rakel die Apertur erreicht, findet eine Verdichtung der Lotpaste innerhalb des Pastendepots statt. Durch das Überfahren der Schablonenöffnung wird dieser Vorgang mit einem Abscheren der Lotpaste beendet. Der Trennvorgang beginnt mit dem Absenken des Substratmaterials unter die Druckschablone, was eine Zugkraft durch Adhäsion an der Kontaktfläche zwischen Lotpaste und Leiterplatte bewirkt. Das Auslöseverhalten wird daneben im Wesentlichen durch die Adhäsionskräfte zwischen Schablonenwandung und appliziertem Lotpastendepot bestimmt [47].

Bei der Verarbeitung miniaturisierter Bauteile mit verkleinerten Abmessungen der Schablonenöffnungen führen bereits geringe Abweichungen vom Idealzustand zu erheblichen Einflüssen auf die erzielbare Qualität. Mögliche Fehlerbilder beim Füllen der Aperturen sind Pastenrückstände auf der Schablonenoberseite, ein überhöhtes Druckbild, eine ausgeschöpfte bzw. überdruckte Apertur oder eine partiell gefüllte Apertur [22]. Dem Trennvorgang der Paste sind beispielsweise Pastenrückstände innerhalb der Schablonenapertur oder an der Schablonenunterseite, ein herabgesetztes Auslösen der Paste, Überdruckung des Pastendepots oder Ausziehen von Depotenden zuzuordnen [22].

Wesentlichen Einfluss auf die erzielbare Prozessqualität im Druckprozess haben die verwendeten Komponenten und Materialien, wobei im Folgenden insbesondere Anforderungen an die Leiterplatte, die verwendete Lotpaste sowie die Schablonentechnologie erläutert werden sollen. Das Substratmaterial besitzt dabei eine Vielzahl an fertigungstechnisch bedingten Toleranzen, wie den Lagenaufbau, Kupferdicken in den Innen- und Außenlagen, die Registrierung der Ausrichtungen sowie die Auslegung der Referenzmarken. Zudem beeinflussen die Steifigkeit des Basismaterials, eine mögliche Verwindung bzw. Verwölbung der Leiterplatte und die Auslegung der zu bedruckenden Pads zusammen mit der Ausführung des Lötstopplacks das Prozessergebnis. Die üblicherweise vorliegende Erhöhung des Lötstopplacks zur bedruckenden SMD-Landefläche bedingt hier einen

erhöhten Auftrag der Lotpaste, die hinsichtlich zugelassener Toleranzen für einen robusten Fertigungsprozess abgestimmt sein muss.

Weiteren signifikanten Einfluss hat die verwendete Lotpaste, die eine Mischung aus Metallpulver einer spezifischen Legierung und Flussmittel darstellt. Bei der Verarbeitung miniaturisierter Bauelemente sind zunehmend feinere Körnungen erforderlich, um die Druckbarkeit der kleiner werdenden Aperturen im Schablonendruckprozess gewährleisten zu können. Für Zweipoler der EIA-Größe 0603 ist beispielsweise ein Lotpastentyp 3 noch ausreichend, wohingegen die IPC-7525B [48] bereits feinere Körnungen vom Typ 4 bzw. 5 für Bauteile der Größe 0201 und kleiner empfiehlt. In Tabelle 1 ist die Einteilung der Standardlotpulver anhand der Korngrößenverteilung aufgeführt.

Tabelle 1: Klassifizierung von Standardlotpulver anhand des Korngrößendurchmessers nach [49, 50]

Typ	Weniger als 0,5 % größer als	Höchstens 10 % zwischen	Mindestens 80 % zwischen	Höchstens 10 % kleiner als
1	160 µm	150 - 160 µm	75 - 150 µm	75 µm
2	80 µm	75 - 80 µm	45 - 75 µm	45 µm
3	60 µm	45 - 60 µm	25 - 45 µm	25 µm
4	50 µm	38 - 50 µm	20 - 38 µm	20 µm
5	40 µm	25 - 40 µm	15 - 25 µm	15 µm
6	25 µm	15 - 25 µm	5 - 15 µm	5 µm
7	15 µm	11 - 15 µm	2 - 11 µm	2 µm

Als weitere Kernkomponente ist die verwendete Schablone anzusehen. Neben dem Material entscheidet insbesondere die Fertigungstechnologie über die Form der Aperturwandung, welche das Auslöseverhalten im Druckprozess maßgeblich bestimmt. Das Laserschneiden stellt die häufigste Herstellungstechnologie dar, wobei die Aperturen subtraktiv in einem sequenziellen Schneidverfahren hergestellt werden. Der technologisch gut beherrschbare Schneidprozess ist gekennzeichnet durch die Flexibilität in der Herstellung, da die Fertigungsdaten direkt aus den Leiterplatten- bzw. Schablonendaten abgeleitet werden können. Die Wandungsrauheit der mittels Laser erzeugten Öffnungen kann durch die Prozessführung beeinflusst werden, abschließend ist eine Nachbearbeitung der Schablone erforderlich. Als ebenso subtraktives Verfahren nimmt das Ätzen aufgrund der eingeschränkten Fähigkeit zur Herstellung miniaturisierter Strukturen einen kleiner werdenden Marktanteil ein. Mittels

Galvanoformen besteht in einem additiven Verfahren die Möglichkeit, Aperturen in einem Fertigungsschritt parallel zu realisieren. Eine galvanisch aufgebaute Schablone erfordert keine abschließende Nachbehandlung und zeichnet sich durch geringe Wandungsrauheiten aus. Die vergleichsweise komplexe Prozessführung im Auftragsprozess und längere Lieferzeiten führen allerdings zu einem relativ geringen Marktanteil. Typischerweise finden Edelmöetalle bei der Herstellung von Schablonen mittels Laserschneiden Verwendung, aber auch Nickel als Blechmaterial ist eine mögliche Alternative. Galvanoschablonen werden üblicherweise aus Nickel oder Nickellegierungen hergestellt. Nickel weist grundsätzlich eine höhere Härte im Vergleich zu Edelmöetahl auf. Damit sind Nickelschablonen in der Regel empfindlicher gegenüber mechanischen Beschädigungen der Schablone. Dennoch erweist sich Nickel für einige Anwendungen als geeignetes Schablonenmaterial, da neben möglichen höheren Standzeiten insbesondere bei geringen Blechdicken auch ein besseres Auslöseverhalten aufgrund der geringeren freien Oberflächenenergie zu erwarten ist. [22]

Zur weiteren Optimierung der Druckschablone werden verschiedene Strategien verfolgt. Neben der Nachbehandlung durch Bürsten oder Elektropolieren erfolgen weitere Prozesse zur Funktionalisierung der Schablonenoberfläche im Druckbild. Häufige Anwendung finden Nanobeschichtungen im Sol-Gel-Prozess [51], Beschichtungen mit Teflon (Polytetrafluorethylen – PFTE) [52] oder auch Verfahren mit Plasmabeschichtung [53]. Ziele dieser Behandlungen sind, die Abstände der notwendigen maschineninternen Reinigungsvorgänge zu vergrößern sowie ein verbessertes Auslöseverhalten durch optimierte Schablonenqualität und damit eine Erweiterung des Prozessfensters zu erlangen.

Für die Gestaltung von Schablonen existiert die Richtlinie IPC-7525B [48], aus der sich die Beschreibungen der Schablonenöffnungen für einen robusten Prozess ableiten lassen. Die bestimmenden Kenngrößen zur Auslegung von Druckschablonen sind in Bild 9 aufgezeigt.

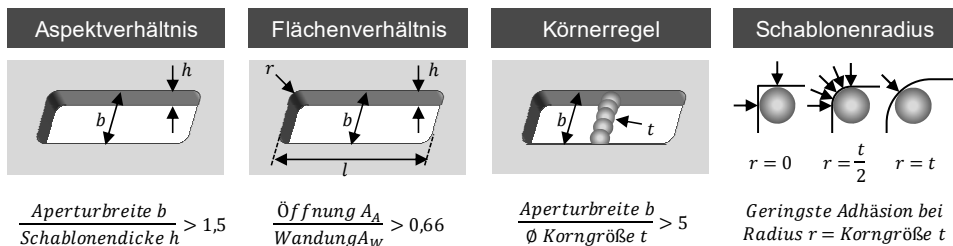


Bild 9: Designrichtlinien für Druckschablonen nach IPC-7525B [48]

Wesentliche Merkmale sind zum einen das Aspektverhältnis (engl. aspect ratio), welches das Verhältnis der minimalen Aperturbreite zur Schablonendicke beschreibt. Zum anderen wird als zentrales Element häufig das Flächenverhältnis FV herangezogen, um Grenzwerte für das Auslöseverhalten abzuleiten. Das FV ist definiert als das Verhältnis von Aperturöffnungsfläche A_A zu Aperturwandungsfläche A_W und sollte nach [48] mindestens 0,66 betragen. Verschiedene Veröffentlichungen wie beispielsweise [51, 54] weisen nach, dass mit angepassten Lotpastenmaterialien und optimierter Prozessführung auch kleinere Werte des FV verarbeitet werden können. Die Körnerregel berücksichtigt den verwendeten Lotpastentyp, wobei mindestens 4 bis 5 durchschnittliche Korngrößen von Metallpulver an der geringsten Breite der Apertur beachtet werden sollten. Darüber hinaus ermöglicht ein angepasster Schablonenradius ein besseres Auslöseverhalten durch geringere Adhäsionskräfte in den Ecken, sofern der Eckenradius dem Korngrößendurchmesser der Lotpaste entspricht [55].

Die in der Richtlinie aufgeführten Grenzwerte werden bei der Verarbeitung miniaturisierter Strukturen zunehmend erreicht, was verschiedene Optimierungsmaßnahmen mit sich bringt. Zum einen ermöglichen Lotpasten mit feineren Körnungen eine Erweiterung des Prozessfensters. Zum anderen sind mit entsprechend nachbearbeiteten und funktionalisierten Schablonen sowie einer optimierten Prozessführung mit aktiven Rakelsystemen auch Flächenverhältnisse kleiner als 0,66 druckbar, was Gegenstand verschiedener Veröffentlichungen ist [51, 54, 56].

Ein bisher unzureichend betrachteter Einflussfaktor ist der Radius der Druckschablone, der durch Änderung des Flächenverhältnisses und abweichende Adhäsionskräfte erheblichen Einfluss auf das Auslöseverhalten hat. Es gilt dabei, den Radius entsprechend der Verteilung der Metallpartikel in der eingesetzten Lotpaste derart anzupassen, dass ein optimales Auslöseverhalten durch herabgesetzte Adhäsionskräfte an den Aperturwandungen erreicht wird. In den Formeln (3.1) und (3.2) sind die Berechnungen des Flächenverhältnisses aufgeführt, die insbesondere bei miniaturisierten rechteckigen Schablonenöffnungen durch den Eckenradius beeinflusst sind.

$$FV_{Kreis} = \frac{\text{Aperturöffnung } A_A}{\text{Aperturwandung } A_W} = \frac{r^2\pi}{2hr\pi} \quad (3.1)$$

$$FV_{Rechteck} = \frac{\text{Aperturöffnung } A_A}{\text{Aperturwandung } A_W} = \frac{lb - r^2(4 - \pi)}{2h(l + b + r\pi - 4r)} \quad (3.2)$$

Bei Betrachtung der Formel (3.2) ist ersichtlich, dass trotz Formunterschieden durch unterschiedliche Längen und Breiten der Apertur identische Werte des Flächenverhältnisses erreicht werden können. Als Beispiel sei hier eine quadratische Apertur mit 240 μm Seitenlänge aufgeführt, die bei einer Schablonendicke von 100 μm ein FV von 0,6 aufweist. Ein unverändertes FV von 0,6 besitzt bei identischer Schablonendicke ebenso eine Apertur mit Abmessungen von 190 \times 326 μm . Für eine optimierte Bestimmung technologischer Grenzen ist daher eine reine Beachtung des FV unzureichend. Die Kenntnis über das Seitenverhältnis der Aperturform ist damit ein zusätzlicher Indikator zur Beschreibung des Prozessverhaltens und wird in spätere Untersuchungen mit einbezogen. Eine ergänzende Diskussion der Einflussfaktoren auf den Schablonendruckprozess ist in Kapitel 5.1 dieser Arbeit aufgeführt.

Die Verwendung automatischer Inspektionssysteme (engl. solder paste inspection – SPI) zur Bewertung des Schablonendrucks wurde beispielsweise bereits in [57] vorgeschlagen. Im industriellen Umfeld erfolgt dies von der manuellen optischen Inspektion über eine 2D-, 2,5D- [58] bis hin zur 3D-Pastendruckinspektion [59]. In den letzten Jahren hat eine Vielzahl an Weiterentwicklungen verfügbarer Inspektionssysteme die Ablösung der 2D-Prüfung bewirkt und eine 3D-Prüfung als Standard etabliert. Insbesondere bei miniaturisierten Strukturen muss die Prüf- und Messmittelfähigkeit des eingesetzten Systems beachtet werden, die beispielsweise in [22] beschrieben ist. Neben der Inspektionsgeschwindigkeit gilt es dabei Systemauflösungen, Messbereiche, systematische Abweichungen sowie die Wiederholpräzision zu bestimmen [60]. Es sei hierbei insbesondere auf den Grenzwert zur Messsystemstreuung in [61] verwiesen, wobei die firmenspezifischen Festlegungen von Toleranzgrenzen erheblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis zur Bewertung der Messsysteme haben.

Allen SPI-Systemen gemein ist die Erfassung qualitätsrelevanter Kenngrößen. Üblicherweise sind dies erfasste Werte der einzelnen Lotpastendepots, wie das Volumen, die Fläche, die Höhe sowie ein Versatz in Bezug zur Sollposition der Depotlage. Zur Nutzung als Prüfmittel wird darüber hinaus in [22] eine erweiterte Ableitung bezogener Qualitätsmerkmale vorgeschlagen, das schablonen- und aperturspezifische Randbedingungen einbezieht. Damit steht eine Vielzahl an Kenngrößen zur Beschreibung des Schablonendrucks zur Verfügung. Es sei an dieser Stelle auf die ergänzende Diskussion der Nutzung der Qualitätsmerkmale als Zielgrößen der Optimierung in Kapitel 3.5 in dieser Arbeit verwiesen.

3.2 Analyse des Pastendruckprozesses für Bauelemente der Größe 01005

Die Auslegung von SMD-Landeflächen für elektronische Bauteile ist in der IPC-Richtlinie 7351B beschrieben [62]. Die darin enthaltenen Vorgaben zur Gestaltung der Kontaktflächen auf der Leiterplatte lassen sich bis zur Baugröße 0201 anwenden. Die konsequente Anwendung für darüber hinaus miniaturisierte Bauformen passiver Bauelemente, wie beispielsweise der Baugröße 01005, resultiert dabei in übermäßig großen Abmessungen der Metallisierung, da Mindest- bzw. Maximalwerte der Toleranzkette sowie die Berücksichtigung von Lötspitzen zur Nacharbeit in die Berechnung mit eingehen. Für ein beispielhaftes Bauelement der Baugröße 01005 mit typischen Abmessungen¹ ergeben sich dabei SMD-Landeflächen von jeweils 360 µm Länge und 330 µm Breite. Dies steht der Anwendung kleinster Bauformen insbesondere bei elektronischen Baugruppen mit hohen Packungsdichten gegenüber. Die Spezifikationen aus [62] sind damit beispielsweise auf die Baugröße 01005 nicht direkt übertragbar. Daneben sind ebenso Angaben in der IPC-Richtlinie 7525B aufgeführt [48]. Auch die Angaben in [48] weisen mit Abmessungen von 200 µm Länge bzw. 300 µm Breite vergleichsweise große Abmessungen auf. In verschiedenen Veröffentlichungen zur Verarbeitung dieser Bauform werden unterschiedlichste Auslegungen der Landeflächen vorgeschlagen, welche in Tabelle 2 zusammengefasst sind und dabei deutlich von den Richtlinien der IPC abweichen.

Tabelle 2: Beispielhafte Veröffentlichungen mit verschiedenen Ausprägungen der SMD-Landeflächen für Bauteile der Größe 01005

Quelle	Abmessungen der SMD-Landeflächen in µm			Untersuchtes Layout
	Länge x	Breite y	Abstand d	
[63]	200	180	140	Rechteck
[64]	175	175	150	Rechteck
[65]	170	250	150	Rechteck
[66]	178 bis 229	229 bis 280	102	Rechteck
[67]	198 bis 287	183 bis 264	178	Rechteck, Homeplate
[68]	178 bis 279	178 bis 279	152 bis 203	Rechteck
[69]	150 bis 350	200 bis 280	120 bis 180	Rechteck
[70]	180	200	200	Rechteck

¹ Annahmen in µm: Länge = 400, Breite = 200, Höhe = 150, Anschluss = 100 (mit je ±20 % Toleranz)

Die aufgeführten Publikationen betrachten eine Vielzahl an möglichen Auslegungen der SMD-Landeflächen. Die Variationen sind häufig auf spezifische Untersuchungen zurückzuführen, welche einen allgemeinen Zusammenhang der Parameter auf das Prozessergebnis im Schablonendruck nur unzureichend beschreiben. Eine eindeutige Empfehlung für die Gestaltung eines robusten Verarbeitungsprozesses ist aus der Literatur hingegen nicht zu entnehmen. In den Untersuchungen zum Schablonendruck werden daher grundlegende Variationen möglicher Auslegungen der Druckschablone untersucht, um eindeutige Grenzwerte für die Beschreibung des Prozessverhaltens ableiten zu können. Insbesondere die Form des Layouts in der Ausführung Rechteck, Oblong und Homeplate sollen in Abhängigkeit ihrer Ausrichtung für einen robusten Druckprozess bewertet werden.

3.2.1 Entwicklung eines Demonstrators und Versuchsplanung

Für die Untersuchungen wird ein Layout einer zweilagigen FR4-Leiterplatte mit den Abmessungen von 100 mm in der Breite und 160 mm in der Länge entwickelt [71]. Die Dicke des Versuchsträgers beträgt 0,8 mm und besitzt eine Nickel-Gold-Oberfläche als Metallisierung. Für die Schablonendruckversuche sind insgesamt 12.000 Positionen für zweipolige Bauelemente der Größe 01005 und damit insgesamt 24.000 SMD-Anschlussflächen vorgesehen. Bild 10 veranschaulicht das entwickelte Layout der Leiterplatte in der Übersicht. Um Effekte zu vermeiden, die aus einer Randlage der gedruckten Strukturen resultieren, ist das Layout umlaufend mindestens 15 mm vom Leiterplattenrand entfernt vorgesehen.

Eine schachbrettartige Anordnung der insgesamt 60 Felder ermöglicht bei der späteren Auswertung eine gesicherte Zuordnung bei Variationen in den jeweils 400 gedruckten Pads je Feld. Die Spalten A bis K dienen lediglich der Indexierung und besitzen leiterplattenseitig keine Variation in den Ausprägungen. Die Positionen für die Bauelemente in den Zeilen 1 und 2 sind dabei quer (Orientierung ,0 Grad'), in Zeile 3 und 4 längs (Orientierung ,90 Grad') sowie in Zeile 5 und 6 in einem Winkel von 45° bezüglich der Druckrichtung ausgerichtet. Damit soll zusätzlich der Einfluss der Rakelrichtung auf das Prozessergebnis evaluiert werden.

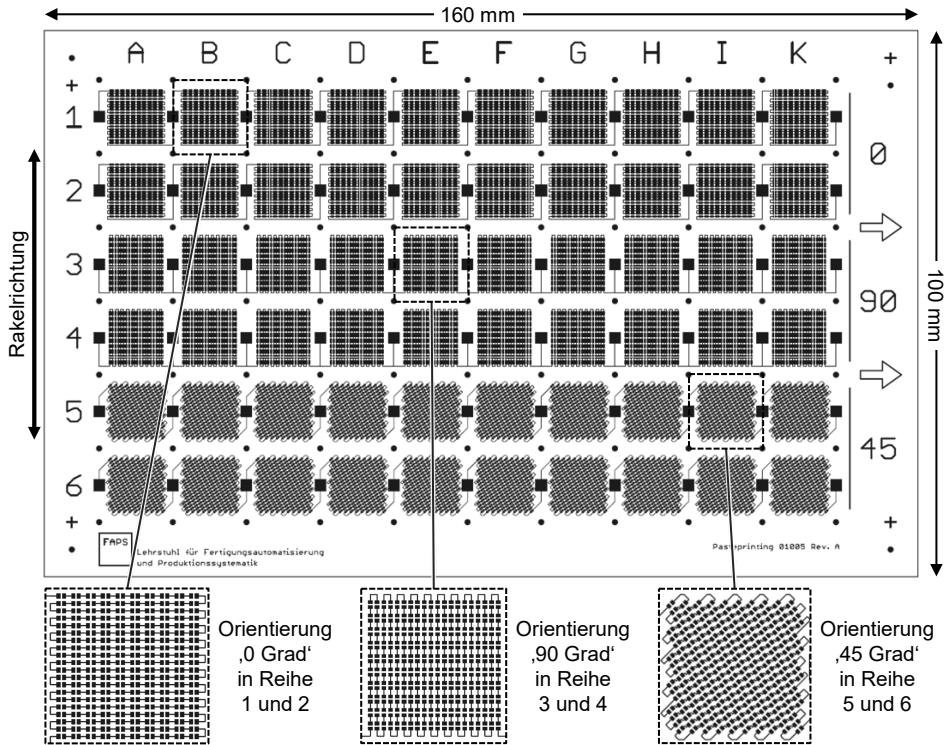


Bild 10: Entwickeltes Leiterplattenlayout für die Schablonendruckversuche mit 12.000 Einbauplätzen für Bauteile der Größe 01005

Die Realisierung der Landeflächen erfolgt mit umlaufend geöffnetem Lötstopplack (engl. non solder mask defined pads). In Anlehnung an [62] wurde mit einem 240 μm breiten und 320 μm langen Layout der Metallisierung für eine Seite eines Bauelementanschlusses ein verhältnismäßig großes Layout gewählt. Diese große Auslegung der Metallisierung ist für die Druckversuche als vorteilhaft anzusehen, da hiermit durch die vorgesehenen kleiner werdenden Abmessungen der Aperturen ein Überdrucken der Landeflächen mit damit einhergehendem Einfluss auf das Prozessergebnis, wie beispielsweise Verschmierungen oder das Auftreten von Lotperlen, vermieden wird. Für die Analyse des Schablonendruckprozesses werden Schablonen mit unterschiedlichen Aperturen gestaltet, die mit A bis K bezeichnet werden und in Bild 11 schematisch dargestellt sind.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

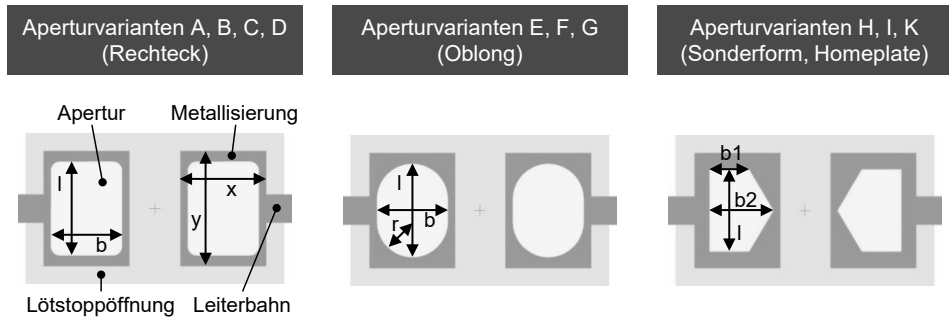


Bild 11: Gestaltung der Aperturen der eingesetzten Druckschablonen

Varianten A bis D sind Rechteckformen mit einem Eckenradius von $25\ \mu\text{m}$, Typ E bis Typ G Oblongformen sowie 3 Sonderformen im so genannten Homeplate-Design, die im Typ H bis Typ K berücksichtigt sind. Der Radius in den Ecken des Homeplate-Designs ist in der Auslegung nicht näher vorgegeben und besitzt damit lediglich den herstellungsbedingten Eckenradius aus dem Laserprozess. Die Angaben der gewählten Aperturöffnungen sind in Tabelle 3 aufgelistet. Eine Übersicht der Layout-Varianten im CAD-Format und Lichtmikroskopie-Aufnahmen ist zudem detailliert im Anhang aufgeführt (vgl. Bild 91).

Tabelle 3: Auslegung der Aperturen für die Bauelementgröße 01005

Form	Variante	Aperturöffnung			Radius r in μm	Metallisierung	
		b1 in μm	b2 in μm	l in μm		x in μm	y in μm
Rechteck	A	220	-	290	25	240	320
	B	198	-	261			
	C	178	-	235			
	D	160	-	211			
Oblong	E	220	-	290	110		
	F	198	-	260	99		
	G	178	-	234	89		
Sonderform	H	135	178	135	n/a		
	I	110	178	203	n/a		
	K	110	178	228	n/a		

Die jeweilige Aperturvariante ist derart ausgelegt, dass innerhalb eines gleichen Formtyps die Öffnungen der Druckschablone kleiner werden und damit ebenfalls das Flächenverhältnis kleiner wird. Damit können die Grenzen im Pastendruckprozess in Abhängigkeit von Schablonendicke und Lotpastentyp identifiziert werden. Bei den Untersuchungen werden ausschließlich nano-beschichtete Druckschablonen mit den beiden Dicken 80 µm sowie 100 µm eingesetzt. Durch die Schablonendicken ergeben sich für die vorgesehenen kleiner werdenden Aperturen abweichende Werte des FV der jeweiligen Formvarianten. Zur Identifikation von Prozessgrenzen unterschreiten diese bewusst den seitens des Verbands IPC empfohlenen Wert von 0,66 [48]. In vorangegangenen Untersuchungen konnte bereits gezeigt werden, dass auch Strukturen mit einem FV kleiner als 0,66 durch die Nanobeschichtung der Druckschablone prozesssicher verarbeitet werden können [72]. Die sich ergebenden FV der jeweiligen Aperturvarianten für die Versuchsreihen sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Flächenverhältnisse der untersuchten Formvarianten

Dicke der Schablone	Rechteck				Oblong			Sonderform		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K
80 µm	0,81	0,73	0,66	0,59	0,80	0,72	0,65	0,60	0,54	0,57
100 µm	0,65	0,58	0,53	0,47	0,64	0,58	0,52	0,48	0,43	0,46

Die Versuchsreihen werden an einem Schablonendrucker vom Typ DEK Horizon durchgeführt. Vor Beginn der Versuche erfolgt eine Überprüfung der Maschine in Form einer Kalibrierung, um die druckerseitigen Einflussfaktoren möglichst gering zu halten. Die verwendete Lotpaste basiert auf einer bleifreien Zinn-Silber-Kupfer-Legierung (SAC305) und wird in den beiden Korngrößen vom Typ 4 sowie Typ 5 untersucht. Um die Vergleichbarkeit der Druckergebnisse zu gewährleisten, werden alle Versuchsreihen zum Schablonendruck nach einem konsistenten Vorgehen durchgeführt. Dabei ist die Menge der applizierten Lotpaste zu Versuchsbeginn auf 125 g bei einer Raketbreite von 200 mm definiert und vor jeder Versuchsreihe durch 10 Walkvorgänge weitestgehend homogen verteilt. Nach dem Walken der Paste werden die Unterseite der Schablone maschinenintern im Modus Nass-Vakuum-Trocken gereinigt und im Anschluss die eigentlichen Druckversuche begonnen.

Pro Versuchsreihe werden 2 Druckserien mit jeweils einem Initialdruck und darauffolgend 10 Druckvorgängen durchgeführt. Zwischen den beiden Serien erfolgt eine erneute Reinigung der Schablone. Jede Leiterplatte wird durch eine Raketbewegung in eine Richtung genau einmal bedruckt. Nach

dem Drucken einer Leiterplatte findet die automatische Inspektion durch ein Pasteninspektionsgerät der Firma KohYoung statt. Die anschließende Verifikation und Auswertung der Messdaten wird mit der Statistik-Software ‚Minitab‘ ausgearbeitet. Die Transfereffizienz (TE) bezeichnet dabei das Verhältnis zwischen dem applizierten Lotpastenvolumen in Relation zum theoretisch möglichen Volumen, das durch die Apertur und die Druckschablone bestimmt ist. Wesentlicher Fokus der erfassten Qualitätsmerkmale liegt auf der TE, wobei zusätzlich der Flächenbedruckungsgrad (FBG) zur Verifikation in die Auswertung mit einbezogen wird, um Fehlerdrucke besser identifizieren und bewerten zu können. Zur Beurteilung der Prozessleistung anhand der erzielten Transfereffizienzen wird als untere Grenze 70 % TE aus der Empfehlung in [48] herangezogen. Der Bereich zwischen 40 % und 70 % TE wird als zulässiger Prozessindikator definiert, wobei in der weiteren Verarbeitung der Bauform 01005 kein resultierendes Fehlerbild durch unzureichende Lotpastenmenge aus dem Schablonendruck angenommen wird.

3.2.2 Evaluation des Prozessergebnisses

Als Ergebnis der Versuchsreihen kann keine eindeutige Empfehlung zwischen den Grundformen Rechteck und Oblong abgeleitet werden, da der Haupteffekt zwischen den Varianten nicht signifikant für eine Aperturform ist. Die untersuchte Sonderform im Homeplate-Design weist unter lichtmikroskopischen Aufnahmen aufgrund fehlender Konturschärfe im Druckbild keine Ausprägung der gewählten spitz zulaufenden Form im inneren Bereich auf. Damit werden keine möglichen Vorteile mit dieser Aperturform erzielt, wie beispielsweise eine geringere Neigung zu Lotperlen bei der weiteren Verarbeitung. Die Sonderform kann bei der Auswertung der TE selbst bei günstigeren Flächenverhältnissen als Hauptursache für aufgetretene Ausreißer und zugesetzte Aperturen identifiziert werden und wird daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Zunächst lässt sich nachweisen, dass der als kritisch anzusehende Initialdruck nach einem Reinigungsvorgang positiv auffällt, wobei teilweise sogar der höchste Medianwert der TE einer Druckserie gemessen wurde. Eine Betrachtung des Flächenbedruckungsgrades zeigt hier allerdings auch teilweise eine leicht erhöhte Streuung des ersten Drucks nach einem Reinigungsvorgang, die bei weiteren Druckvorgängen deutlich abnimmt. Obwohl im Randbereich von mindestens 15 mm keine gedruckten Strukturen auf der Leiterplatte platziert sind, lässt sich aufgrund der Druckrichtung ein alternierender Verlauf der TE bezüglich der Rakelrichtung bei Feldern

im Randbereich feststellen. Bild 12 zeigt beispielhaft den Verlauf der TE der rechteckig ausgeführten Apertur C in Zeile 1 mit einem FV von 0,53, die mit einer 100 µm Druckschablone und einer Paste vom Typ 4 verarbeitet wurde.

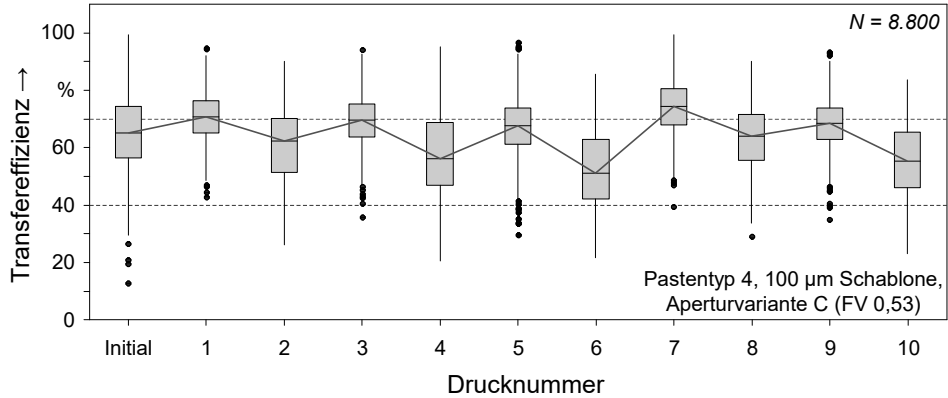


Bild 12: Transfereffizienzen mit alternierendem Verlauf bei Lotpastendepots im Randbereich

Der Verlauf der Transfereffizienzen im mittleren Bereich der Leiterplatte ist deutlich gleichmäßiger ausgeprägt, wie in Bild 13 bei identischen Aperturöffnungen ersichtlich ist. Hier werden bereits die Grenzen des Lotpastendrucks aufgezeigt, wobei in den Druckserien für ein FV von 0,53 keine durchgängige TE über 70 % erzielt werden kann. In dieser Faktorkombination sind vermehrt Werte und Ausreißer unterhalb von 50 % appliziertem Volumen festzustellen.

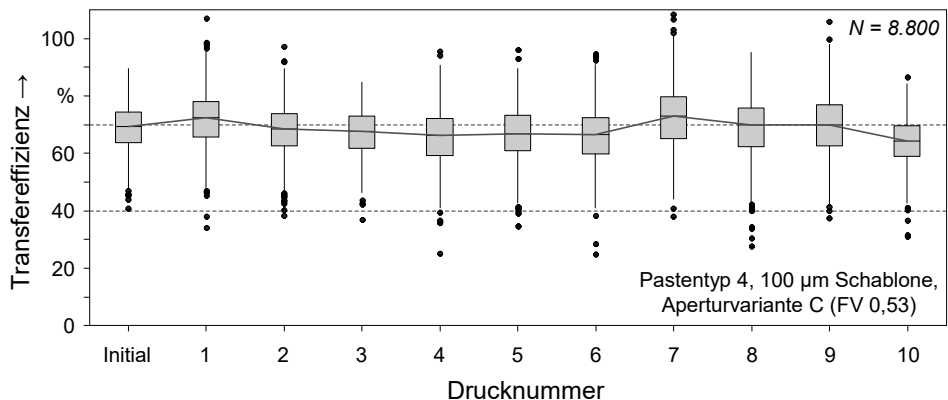


Bild 13: Transfereffizienzen bei Lotpastendepots in der Leiterplattenmitte

Für die detaillierte Betrachtung erfolgt die Auswertung nach den gewählten Aperturvarianten. In Bild 14 sind exemplarisch 6 aufeinanderfolgende Drucke für die rechteckigen Aperturen A bis D zusammengefasst. Mit

Abnahme des FV werden ebenso die erzielbaren Transfereffizienzen herabgesetzt. Ergänzend hierzu treten höhere Streuungen in den Druckergebnissen auf. Während Apertur A (FV 0,65) und B (FV 0,58) noch vergleichsweise gute Druckergebnisse aufweisen, ist der Abfall der TE für Apertur C (FV 0,53) und insbesondere D (0,47) deutlich erkennbar und es können keine ausreichenden Ergebnisse bezüglich des Pastenvolumens erzielt werden. Auch bei der Aperturform Oblong werden vergleichbare Ergebnisse erzielt, wobei hier als Grenze das Layout G (FV 0,52) als unzureichend bewertet wird.

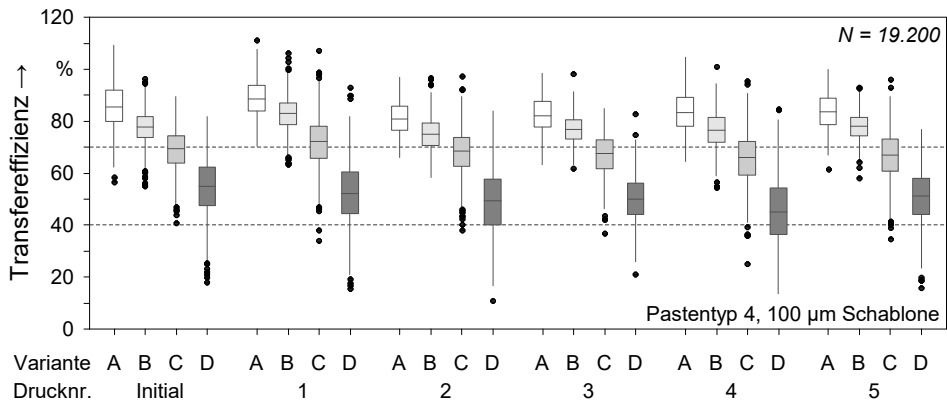


Bild 14: Transfereffizienzen der rechteckigen Aperturvarianten unter Verwendung einer 100 µm Druckschablone und einem Lotpastentyp 4

Die Verwendung des identischen Lotpastentyps 4 mit einer 80 µm dicken Druckschablone bedingt bei gleichbleibendem Layout ein günstigeres FV (vgl. Tabelle 4). Mit dieser Schablone wird ein signifikant besseres Auslöseverhalten durch insgesamt höhere Werte der TE nachgewiesen. Allerdings sind häufige Ausreißer durch Überdrucken der Pads feststellbar. Pads mit 45°-Ausrichtung weisen dabei einen signifikant höheren Wert der TE auf. Dieser Effekt tritt mit abnehmendem FV deutlich geringer auf. Am stärksten ausgeprägt ist dieses Verhalten bei rechteckigen Strukturen, wie in Bild 15 dargestellt ist.

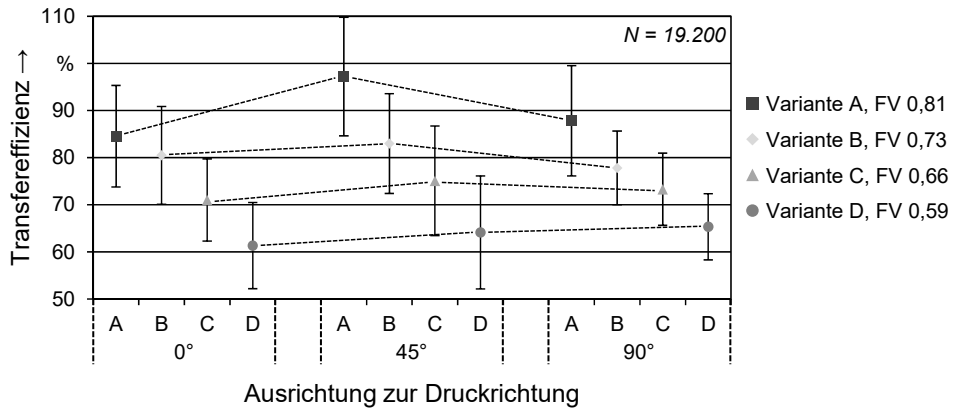


Bild 15: Auswirkung der Aperturausrichtung auf die Transfereffizienz unter Verwendung einer 80 µm Druckschablone und einem Lotpastentyp 4

Eine Lotpaste vom Typ 5 bei einer Schablone mit 100 µm Dicke zeigt eine deutliche Steigerung der TE bei identischer Schablone im Vergleich zur Lotpaste vom Typ 4. Teilweise lassen sich aber auch hier nach unten gerichtete Ausreißer beobachten, was sich auf ein Zusetzen der Aperturen in der Schablone zurückführen lässt. Mit der Kombination einer 100 µm Schablone und dem Pastentyp 5 können in den Versuchsreihen Aperturen in Rechteckform von Variante A bis C (FV 0,65 bis 0,53) zuverlässig gedruckt werden, wobei lediglich Variante D (FV 0,47) mit Werten der TE unter 70 % nicht zufriedenstellend aufgetragen werden kann. Für die Oblong-Varianten E bis G können trotz des niedrigsten FV von 0,52 alle Strukturen prozesssicher gedruckt werden. Unter Verwendung der Lotpaste vom Typ 5 und der 80 µm dicken Schablone liegen die Mittelwerte aller Aperturen der Rechteck-Varianten über 70 % TE, wie in Bild 16 visualisiert ist.

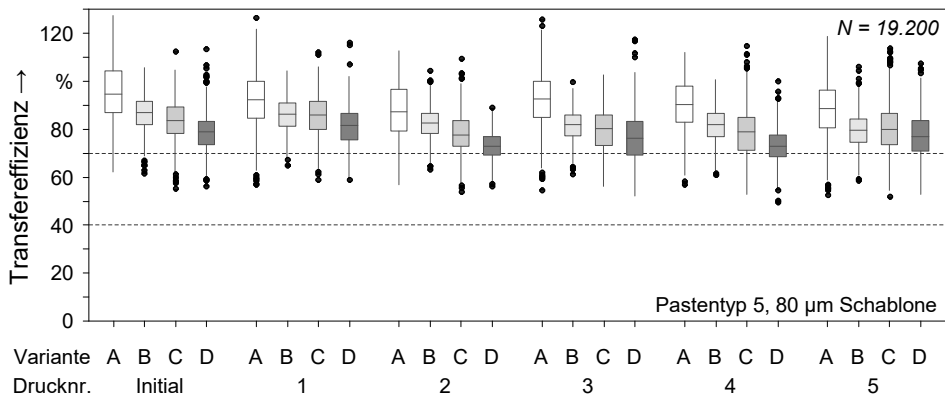


Bild 16: Transfereffizienzen der rechteckigen Aperturvarianten unter Verwendung einer 80 µm Druckschablone und einem Lotpastentyp 5

Auch bei den Oblong-Varianten wird im Mittel eine durchgehende TE über 70 % erzielt. Bei der Kombination eines Lotpastentyps 5 und einer 80 µm dicken Druckschablone treten damit für alle Formvarianten keine Werte der TE von unter 40 % Volumen auf.

In Bild 17 ist die Gesamtübersicht für die Form Rechteck aufgezeigt. Die Darstellung ist sowohl nach den beiden untersuchten Lotpastentypen als auch nach den beiden Schablonendicken unterteilt. Es ist ersichtlich, dass alle Versuchsreihen, bei denen ein Pastentyp 5 zum Einsatz kommt, bessere Ergebnisse aufweisen als unter Verwendung einer Typ 4 Lotpaste. Lediglich bis zu einem FV von 0,73 in Variante B kann unter Verwendung der 80 µm Schablone ein ausreichender Pastenauftrag realisiert werden. Ab einem FV von 0,66 unterschreitet unter gleichen Versuchsbedingungen die Standardabweichung die gesetzte Grenze von 70 % TE.

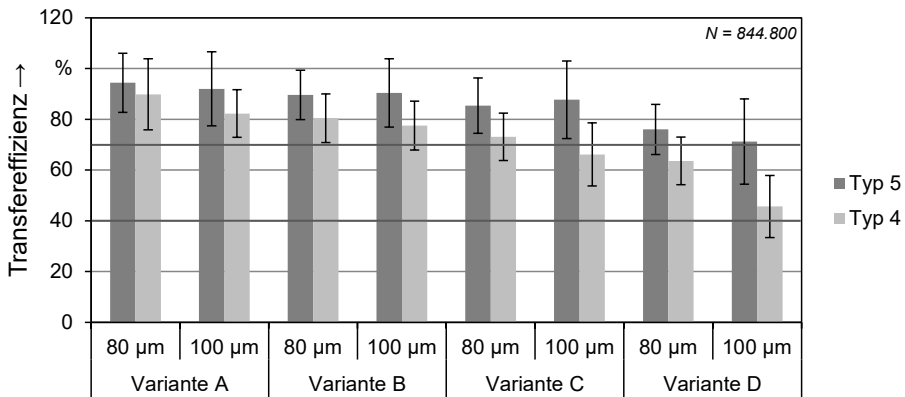


Bild 17: Verlauf der Transfereffizienzen für die verschiedenen Varianten der Form Rechteck nach Schablonendicke für Pastentyp 4 und 5

Dagegen kann mit einem Lotpastentyp 5 und einer 100 µm Schablone selbst für ein FV von 0,53 in Variante C ein sehr gutes Druckergebnis erzielt werden. Zudem zeigt sich, dass mit einem kleiner werdenden FV die Differenz der Ergebnisse für die Transfereffizienzen zwischen den Druckschablonen stark zunimmt. Für die Variante C und insbesondere für Variante D ermöglicht der Lotpastentyp 5 bei der Verwendung der 100 µm Schablone deutlich bessere Druckergebnisse, wohingegen es beim Lotpastentyp 4 zu einem starken Abfall der erzielten Transfereffizienzen kommt.

Bild 18 stellt in einer Gesamtbetrachtung den Zusammenhang der gewählten Parameter für die Form Oblong dar. Analog zu den rechteckigen Strukturen ermöglicht auch bei der oblongförmigen Apertur der Lotpastentyp 5 eine signifikante Steigerung des Lotpastenauftrags bei der Verwendung einer 100 µm Druckschablone.

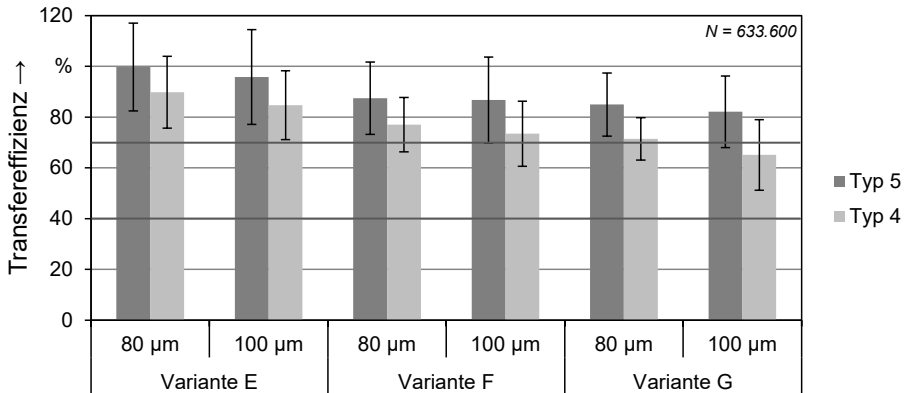


Bild 18: Verlauf der Transfereffizienzen für die verschiedenen Varianten der Form Oblong nach Schablonendicke für Lotpastentyp 4 und 5

Im Vergleich zur 80 µm Druckschablone können ähnliche Transfereffizienzen realisiert werden. Erst bei einem FV von 0,52 unterschreitet die Standardabweichung die gesetzte Grenze von 70 % TE. Die Verwendung des Lotpastentyps 4 bedingt dabei insbesondere für die Varianten F und G ein deutlich schlechter ausgeprägtes Prozessergebnis, wobei dieses wiederum mit abnehmendem FV stärker ausgeprägt ist.

3.2.3 Bewertung der Prozessführungsgrößen zum Lotpastenauftrag

Die Gesamtbetrachtung der Druckergebnisse erfolgt mittels der Bildung eines Regressionsmodells mit den berücksichtigten Einflussparametern über alle erfassten Messwerte des aufgebrauchten Volumens. In der Residuenanalyse kann keine eindeutige Erklärung für die erkannten Abweichungen identifiziert werden. Es deutet sich dabei an, dass insbesondere die Kombination der 80 µm dicken Schablone und dem Lotpastentyp 4 sowie eine 100 µm dicke Druckschablone mit dem Lotpastentyp 5 vermehrt zu Abweichungen führen. Dies ist anhand übermäßig bedruckter Depots sowie teilweise unzureichend bedruckter Lotpastendepots bei großen Schwankungen des Prozessergebnisses nachweisbar.

Unter Berücksichtigung der größeren Korngrößenverteilung des Pastentyps 4 und der herabgesetzten Flächenverhältnisse bei der Verwendung der 100 µm Schablone ist dies dem prozessbedingten Verhalten zuzuordnen. Eine systematische Abhängigkeit in der zeitlichen Abfolge der Druckversuche ist dabei nicht feststellbar. Der Unterschied zwischen den Formen Rechteck und Oblong beträgt in der Modellbildung weniger als 1 % bei minimal höheren Streuungen für die Form Oblong. Das unterschiedliche

Verhalten ist anhand der Beobachtungen als nicht signifikant einzustufen. In Bild 19 können daher in einer Gesamtbetrachtung die berechneten Haupteffekte aus den Versuchsreihen für beide Formen zusammengefasst dargestellt werden, welche die Transfereffizienz im Wesentlichen bestimmen.

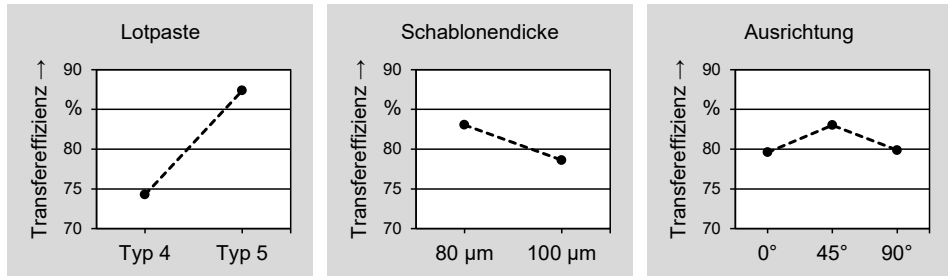


Bild 19: Zusammenhänge für die Optimierung der Transfereffizienz

In der Faktoranalyse beeinflusst der Lotpastentyp das Prozessergebnis entscheidend. Ein Lotpastentyp 5 zeigt aufgrund der feinkörnigeren Verteilung der Metallpulver im Vergleich zum Pastentyp 4 ein besseres Auslöseverhalten in den Druckversuchen. Die Stärke des Einflusses der Schablonendicke variiert mit dem jeweiligen Padlayout. Mit einer 80 µm Schablone werden dabei aufgrund des günstigeren Flächenverhältnisses höhere Mittelwerte für die Transfereffizienz erzielt. Zudem ist die Ausrichtung der Padgeometrien nicht zu vernachlässigen. Eine Ausrichtung der Aperturen um 45° bezüglich der Druckrichtung weist einen positiven Effekt auf, wobei dieser Effekt mit abnehmendem Flächenverhältnis geringer ausgeprägt ist. Die identifizierte Wechselwirkung zwischen dem verwendeten Lotpastentyp und der Schablonendicke zeigt sich derart, dass Lotpaste vom Typ 5 ein deutlich robusteres Auslöseverhalten nahezu unabhängig von den beiden untersuchten Schablonendicken zeigt. Der untersuchte Lotpastentyp 4 weist dagegen bei der Verwendung der 100 µm Druckschablone ein deutlich herabgesetztes Auslöseverhalten auf.

Die Analysen zum Schablonendruck von Strukturen der Bauteilgröße 01005 weisen nach, dass eine 80 µm Schablone in Kombination mit einer Lotpaste vom Typ 5 die besten Ergebnisse bezüglich der Transfereffizienz erzielt. Dies ist durch einen robusten Prozess bei geringer zu erwartender Standardabweichung gekennzeichnet. Darüber hinaus können Grenzen für die Verwendung einer 100 µm Schablone sowie einem Lotpastentyp 4 aufgezeigt werden.

In [73] werden die Prozessgrenzen des Schablonendrucks für eine spezifische Layoutkombination anhand der Berechnung der theoretischen Prozessfähigkeit bewertet. Sind die zulässigen Toleranzen anhand der Anforderungen an den Druckprozess bekannt, stellt dies grundsätzlich eine Möglichkeit dar, verschiedene Variationen miteinander objektiv vergleichbar zu machen. Als nachteilig ist hierbei anzumerken, dass die Verteilung der Druckergebnisse gerade in kritischen Bereichen nicht zwangsläufig einer Normalverteilung folgt und damit die reine Betrachtung der berechneten Werte falsche Rückschlüsse auf die reale Prozessgrenze beinhalten könnte. Für die Anwendung im industriellen Umfeld ist es daher unumgänglich, zulässige Toleranzen für den Druckprozess für den spezifischen Anwendungsfall zu definieren. Für die Gestaltung eines optimierten Auftrags der Lotpaste für Strukturen der Größe 01005 gilt es dabei, die entsprechenden Parameter und Randbedingungen optimal aufeinander abzustimmen, um dies bereits in der Entwicklung einer idealen Prozessführung zu berücksichtigen.

3.3 Betrachtung des Lotpastenauftrags für die Bauteilgröße 03015M

Ein weiterer Miniaturisierungsschritt bei passiven Zweipolern wird mit neuen Bauelementformen wie der Größe 03015M [74] sowie 008004 (entspricht 0201M) [14] erzielt, wobei letztere nur noch Abmessungen von $250\ \mu\text{m} \times 125\ \mu\text{m} \times 125\ \mu\text{m}$ aufweisen. Bisherige Untersuchungen thematisieren insbesondere den Bestückprozess dieser Bauelementgrößen [75–77] oder die optische Inspektion [78]. Der Schablonendruckprozess für die genannten Bauelementformen ist auf Basis verfügbarer Literatur bisher nicht ausreichend beschrieben. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Schablonendruckprozess für die erforderlichen kleinen Strukturgrößen fokussiert, um Effekte aus den erforderlichen feinkörnigen Lotpastenmaterialien und den verschiedenen Schablonentechnologien zu evaluieren [79, 80].

Im Rahmen der Untersuchungen liegt der Schwerpunkt zunächst auf den Schablonendruckprozess für passive Bauelemente der Größe 03015M, wobei zusätzlich auch weitere kleinere Strukturen berücksichtigt sind. Neben der Gestaltung und Ausrichtung der Aperturen der Schablone bezüglich der Druckrichtung werden auch verschiedene Schablonendicken sowie Oberflächenbehandlungen betrachtet. Kleiner werdende Abstände zwischen gedruckten Strukturen geben Aufschluss über die erzielbare Dichte hinsichtlich auftretender Brückenbildung. Zusätzlich werden Aperturen mit Öffnungen bis zu 1 mm Durchmesser verarbeitet, um den Aspekt der

Druckleistung bei größeren Pads neben kleineren Strukturen auf einer mischbestückten Baugruppe mit einzubeziehen. Weitere Druckserien ermöglichen die Bewertung der maschineninternen Schablonenreinigung auf das Prozessergebnis. Tabelle 5 gibt eine Übersicht der durchgeführten Analysen der jeweiligen Faktoren.

Tabelle 5: Art der Einflussfaktorenanalyse

Variationen auf der Versuchsleiterplatte	Variationen durch die Versuchsplanung
Geometrien der Schablonenöffnungen	Schablonentechnologie und Beschichtung
Ausrichtung der Pad-Geometrien	Schablonendicke
Kleinster Abstand zwischen gedruckten Strukturen	Lotpastenhersteller und Pastentyp
03015M-Strukturen in Mischbestückung	Einfluss der Reinigung auf das Pastendruckergebnis

Die Analyse der Einflussfaktoren kann auf 2 verschiedene Arten erfolgen. Zum einen können Variationen auf der Leiterplatte bzw. der Schablone berücksichtigt werden. Zum anderen unterstützt die Versuchsplanung die Betrachtung weiterer Effekte. Alle bedruckten Substrate werden mit einem SPI-System direkt nach dem Druckprozess vermessen. Die untersuchten Strukturgrößen stellen aufgrund der kleinen Menge an gedruckter Lotpaste hohe Anforderungen an diesen Inspektionsschritt. Die durchgeführten Druckversuche sollen Effekte und Grenzen eines gesicherten Pastendruckprozesses für miniaturisierte Strukturen der Größe 03015M aufzeigen.

3.3.1 Auslegung der Druckschablone und Versuchsplanung

Mit der Verarbeitung miniaturisierter passiver Bauelemente geht die Verwendung von Lotpasten mit feinerer Körnung einher. Für die Versuchsreihen werden hierfür bleifreie Legierungen aus Zinn-Silber-Kupfer (SAC305) von 2 verschiedenen Herstellern eingesetzt. Als Lotpastentyp kommen Typ 5,5 sowie Typ 6 zum Einsatz. Der verwendete Lotpastentyp 5,5 ist eine herstellereigenspezifische Ausführung und durch eine Verteilung von mindestens 90 % der Partikel zwischen 5 µm und 20 µm beschrieben. Die Paste von Typ 6 besitzt dagegen eine Partikelverteilung zwischen 5 µm und 15 µm im Durchmesser. Durch die kleinere Verteilung der Korngrößen werden ein verbessertes Auslöseverhalten und damit eine Erhöhung der Transfereffizienz erwartet. Alle Versuche werden an einem Schablonendrucker vom

Typ DEK Horizon durchgeführt. Vor der eigentlichen Durchführung der Druckversuche erfolgen Vorversuche, in denen optimale Parameter für die jeweiligen Lotpasten ermittelt werden. Ziel dieser Parameterbestimmung ist die Erreichung einer möglichst hohen Transfereffizienz bei geringer Streuung der Messwerte. Die Inspektion der gedruckten Depots erfolgt mittels einer Inline-Anlage zur Lotpasteninspektion vom Typ KohYoung KY-3030. Diese ist um eine Optik mit 10 µm Auflösung in x/y-Richtung erweitert und daher besonders zur Vermessung der avisierten kleinen Strukturen geeignet.

Für die Analyse des Pastendruckprozesses ist die Minimierung der Vielzahl an potenziellen Einflussgrößen auf das Prozessergebnis von großer Bedeutung. Übliche FR4-Leiterplatten beeinflussen hierbei oftmals den Druckprozess durch beispielsweise den eingesetzten Lötstopplack oder Verwindung bzw. Verwölbung des Substratmaterials. In verschiedenen Versuchen vor den eigentlichen Testreihen werden hierzu Druckversuche auf verschiedenen Substratmaterialien durchgeführt, wobei Lotpasten vom Typ 6 von zwei Herstellern auf Substrate aus FR4, mit Kupferoberflächen sowie auf schwarz eloxierte Aluminiumplatten aufgebracht werden. Die Vorteile bei der Verwendung eines Substratmaterials aus schwarz eloxiertem Aluminium liegen neben einer hohen Steifigkeit des Substrats insbesondere in den sehr niedrigen Reflexionseigenschaften für die anschließende optische Inspektion im SPI-Prozess. Durch den hohen Kontrast zwischen Substratmaterial und Lotpaste kann der Schwellenwert für die Vermessung sehr präzise in Richtung der Oberfläche reduziert werden, so dass annähernd ideal die tatsächlich gedruckte Lotpaste erfasst wird. Die Analyse dieser Drucktests zeigt mit weniger als 5 % Unterschied auf die mittlere Transfereffizienz bei vergleichbarer Streuung einen vergleichsweise geringen Einfluss der untersuchten Substratmaterialien auf das Prozessergebnis.

Aufgrund der genannten Ergebnisse werden in den Hauptversuchen schwarz eloxierte Aluminiumleiterplatten mit Abmessungen von 160 mm × 100 mm und einer Dicke von 1,5 mm für die Druckversuche verwendet. Da die Substrate keine für den SPI-Prozess erforderlichen Referenzmarken aufweisen, werden diese innerhalb des Schablonenlayouts mit Aperturöffnungen von 1 mm Durchmesser vorgesehen. Die Ausrichtung bei der SPI-Vermessung an diesen gedruckten Strukturen erlaubt zudem eine exakte Auslegung und Positionierung der jeweiligen Messfenster an die zu messenden Strukturen der Zweipoler mit der Baugröße 03015M.

Die Gestaltung der Druckschablone ist maßgeblich durch die aufgezeigten Variationen in der linken Spalte in Tabelle 5 beeinflusst. Für die Druckversuche werden die beiden Stärken 60 µm sowie 80 µm berücksichtigt. Eine Übersicht des Layouts der Druckschablone ist in Bild 20 dargestellt.

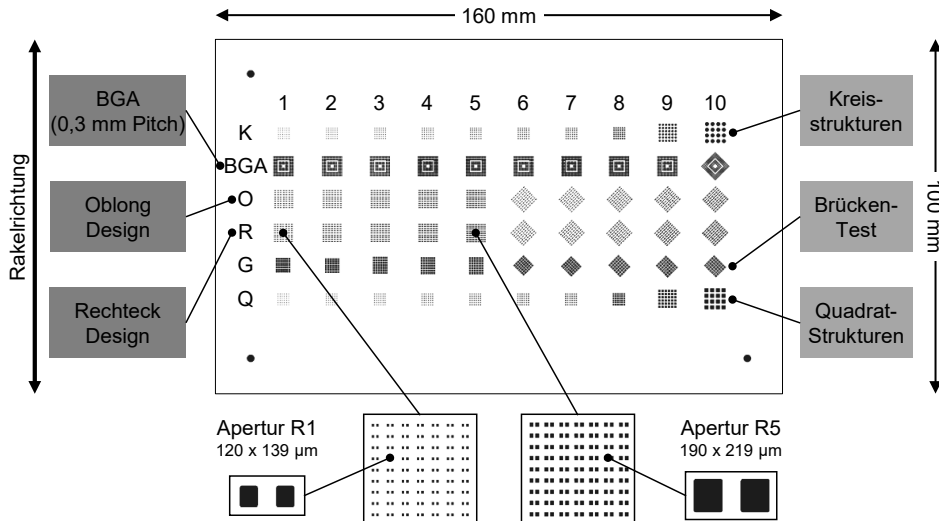


Bild 20: Aufbau des entwickelten Drucklayouts mit 8.000 Aperturen

Um mögliche Effekte durch einen zu geringen Abstand vom Rand der Leiterplatte auf das Druckergebnis zu minimieren, sind alle Aperturen in Richtung der Mitte des Substratmaterials platziert. Der Hauptfokus der Untersuchungen liegt in der Betrachtung der beiden berücksichtigten Strukturen O und R, welche sich nahezu im Zentrum der Leiterplatte befinden und potenzielle Aperturgrößen für Bauelemente der Größe 03015M darstellen. Die Reihe ‚O‘ beinhaltet verschiedene Variationen der Größe von Strukturen der Form Oblong (vgl. Tabelle 6). Die Reihe ‚R‘ berücksichtigt verschiedene Größen für die rechteckige Auslegung der Padform und ist in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 6: Abmessungen und resultierende Flächenverhältnisse (FV) der Oblongstrukturen

	O ₁ /O ₆	O ₂ /O ₇	O ₃ /O ₈	O ₄ /O ₉	O ₅ /O ₁₀
x in μm	120	130	150	170	190
y in μm	139	150	173	196	219
Radius in μm	60	65	75	85	95
Ausrichtung in $^\circ$	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45
FV bei 80 μm	0,409	0,442	0,510	0,578	0,646
FV bei 60 μm	0,546	0,589	0,680	0,771	0,862

Tabelle 7: Abmessungen und resultierende Flächenverhältnisse (FV) der Rechteckstrukturen

	R ₁ /R ₆	R ₂ /R ₇	R ₃ /R ₈	R ₄ /R ₉	R ₅ /R ₁₀
x in μm	120	130	150	170	190
y in μm	139	150	173	196	219
Radius in μm	15	15	15	15	15
Ausrichtung in $^\circ$	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45
FV bei 80 μm	0,419	0,451	0,518	0,586	0,653
FV bei 60 μm	0,558	0,601	0,691	0,781	0,871

Die jeweiligen Spalten 1 bis 5 auf der Leiterplatte sind mit 0° bezüglich der Druckrichtung ausgerichtet, wobei die Spalten 6 bis 10 einen Winkel von 45° bezüglich der Druckrichtung besitzen. Die Abmessungen der berücksichtigten Strukturen basieren auf Vorarbeiten zur Bauelementgröße 01005 [81]. Die Nano-Beschichtung der verwendeten Schablone begünstigt das Auslöseverhalten der Lotpaste aus den Aperturen. Daher werden auch gezielt kritische Werte für das FV berücksichtigt, die auf bis zu 0,41 bei der Verwendung einer Schablone mit 80 μm Dicke abfallen.

Mit einer unveränderten Größe von $170\ \mu\text{m} \times 196\ \mu\text{m}$ in Reihe ‚G‘ können die gedruckten Strukturen hinsichtlich der erzielbaren Abstände untersucht werden. Auswirkungen zu geringer Abstände von Aperturen sind das Zusammenlaufen gedruckter Lotpastendepots und die Ausprägung von Brücken nach dem Schablonendruckprozess. Innerhalb der Layouts sind Abstände zwischen 20 und $100\ \mu\text{m}$ zwischen benachbarten Strukturen vorgesehen (vgl. Tabelle 8). Für die Erkennung der Brückenbildung kommt der in der SPI-Anlage integrierte Bridging-Algorithmus zum Einsatz.

Tabelle 8: Berücksichtigte Abmessungen der Gap-Tests

	Pad-Größe R4 mit $170\ \mu\text{m} \times 196\ \mu\text{m}$				
	G1/G6	G2/G7	G3/G8	G4/G9	G5/G10
Abstand in μm	20	40	60	80	100
Ausrichtung in $^\circ$	0/45	0/45	0/45	0/45	0/45

Die Einführung miniaturisierter Bauelementformen wie der Größe 03015M induziert oftmals Herausforderungen bei der Verarbeitung in einem heterogenen Bauelementspektrum. Um dies im Layout zu berücksichtigen, sind in den Reihen ‚Q‘ quadratische und in ‚K‘ kreisförmige Aperturen von $80\ \mu\text{m}$ (in Reihe 1) bis hin zu 1 mm (in Reihe 10) vorgesehen.

Die Versuchsplanung adressiert die rechte Spalte der aufgeführten Tabelle 5. Innerhalb der Untersuchungen werden insgesamt 5 Faktoren mit 2 Faktorstufen berücksichtigt (vgl. Tabelle 9). Die Evaluation des Lotpastentyps, der Beschichtung und der Dicke der Druckschablone erfolgt vollfaktoriell, indem der Lotpastenhersteller A und lasergeschnittene Edelstahlschablonen mit jeweils 5 konsekutiven Drucken einbezogen werden. Die Analyse der Brückenbildung der gedruckten Strukturen wird ebenfalls in den Versuchsreihen 1 bis 8 betrachtet. Der Einfluss des Herstellers wird anhand der gezielt durchgeführten Versuchsreihe 9 untersucht. Die verwendete Lotpaste vom Typ 5,5 besitzt eine spezielle Körngrößenverteilung des Herstellers A und ist damit nicht vergleichbar zu einer verfügbaren Paste von Hersteller B. Daher erfolgt ein Vergleich der beiden Hersteller unter Verwendung der Lotpaste vom Typ 6. Um den Einfluss der Schablonenunterseitenreinigung zu bewerten, wird mit 15 Druckvorgängen eine höhere Anzahl an Substraten gedruckt mit jeweils einem Reinigungsprozess nach 5 durchgeführten Drucken. Der durchgeführte Versuchsplan ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Versuchsplan der Hauptversuche

Versuchsreihe	Lotpaste		Druckschablone			Anzahl Drucke
	Hersteller	Typ	Dicke	Nano-beschichtet	Material/Technologie	
1	A	5,5	60 µm	-	Edelstahl	5
2				+		5
3			80 µm	-		15
4				+		5
5		6	60 µm	-		5
6				+		15
7			80 µm	-		5
8				+		5
9	B	6	60 µm	+	Edelstahl	15

3.3.2 Evaluation des Schablonendruckprozesses

Vor Beginn der Versuchsreihen erfolgt eine Optimierung der Druckparameter. Für die beiden Lotpastenhersteller wird jeweils ein separater Versuchsplan verfolgt, wobei die Druckgeschwindigkeit, der Rakeldruck und die Trenngeschwindigkeit variiert werden. Ziel ist die Maximierung der Transfereffizienz bei einer hohen Konsistenz der Druckergebnisse. Diese Vorversuche werden mit einer 60 µm dicken nanobeschichteten Druckschablone durchgeführt. Die Ergebnisse werden auf eine 80 µm Druckschablone ohne Beschichtung übertragen. Ergebnis der Vorversuche sind angepasste Druckparameter für die beiden untersuchten Hersteller der Lotpastenmaterialien.

Zur Sicherstellung einer möglichst hohen Vergleichbarkeit der Druckversuche werden alle Versuchsreihen konsistent umgesetzt. Die Menge an Lotpaste, die zu Beginn zugeführt wird, wird konstant gehalten und mit Durchführung von 10 Walkvorgängen homogen verteilt. Im Anschluss erfolgt eine maschinenseitige Schablonenunterseitenreinigung im Modus Nass-Vakuum-Trocken. Innerhalb jeder Druckserie findet nach 5 Drucken eine interne Schablonenreinigung statt. Direkt nach dem Druckprozess erfolgt die Vermessung in dem Inline-System zur Lotpasteninspektion. Nach Aufbereitung der erfassten Daten wird die Software ‚Minitab‘ zur statistischen Auswertung verwendet. Hauptsächlicher Fokus hierbei liegt erneut in der Transfereffizienz (TE) als Zielgröße, welche durch das Verhältnis der

applizierten Lotpaste zum theoretisch möglichen Volumen charakterisiert ist. Zusätzlich sind insbesondere die Werte für den Flächenbedruckungsgrad und die maximale Lotdepothöhe von Relevanz.

Ermittlung der Wirkzusammenhänge aus Lotpastentyp, Dicke und Beschichtung der Druckschablone

Innerhalb der Versuchsreihen 1 bis 8 (vgl. Tabelle 9) variieren die Parameter für den Lotpastentyp, die Schablonendicke sowie die Beschichtung der Druckschablone. Die Versuche werden mit unbehandelten und nanobeschichteten Schablonen von jeweils 60 µm und 80 µm Dicke unter Verwendung einer Lotpaste vom Typ 5,5 und Typ 6 von Hersteller A durchgeführt. Da insbesondere die passiven Bauteile der berücksichtigten Strukturen für die Bauteilgröße 03015M evaluiert werden sollen, liegt der Fokus der folgenden Auswertungen in den Rechteck- sowie Oblongstrukturen.

Den größten Effekt ruft die Variation der Schablonendicke hervor. Während etwa 93 % TE mit einer 60 µm dicken Schablone erzielt werden können, werden nur noch 74 % TE unter Verwendung einer 80 µm dicken Schablone erreicht. Die zugehörige Boxplot-Darstellung und das Histogramm der Messwerte sind in Bild 21 dargestellt, wobei beide Lotpastentypen und Schablonenbeschichtungen enthalten sind.

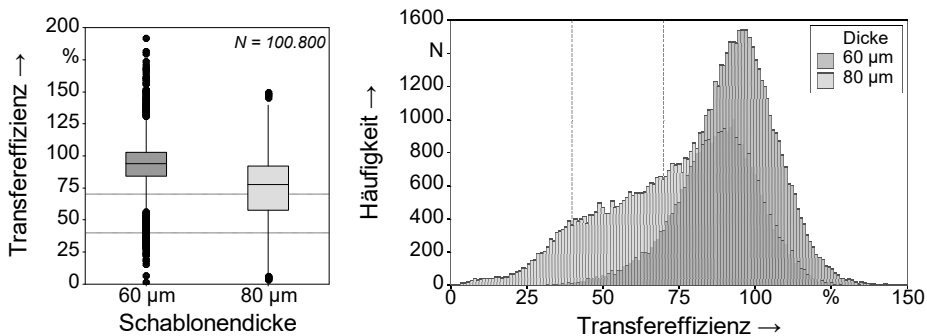


Bild 21: Boxplot-Darstellung und Histogramm der Transfereffizienz für die verwendeten Schablonendicken von 60 µm und 80 µm

Das schlechtere Auslöseverhalten ist auf die unveränderten Abmessungen in der Gestaltung der Aperturen zurückzuführen, welche in kritischeren Werten für die Flächenverhältnisse bei der 80 µm Schablone resultieren. Die Schablone mit 60 µm Dicke ermöglicht eine engere Verteilung und insgesamt höhere Werte für die erreichbare TE. Aufgrund des ermittelten Plateaus zwischen 30 % und 50 % TE für die 80 µm Schablone fällt der Interquartilbereich unter die Grenze von 70 % TE. Diese Unregelmäßigkeit

deutet erneut auf die kritischeren Werte des FV hin, welche ein derartig reduziertes Auslöseverhalten induzieren.

Die visualisierten Boxplots in Bild 22 zeigen eine Detailansicht der ermittelten Werte der TE für die beiden Schablonendicken mit den zugehörigen Flächenverhältnissen. Der direkte Vergleich verdeutlicht, dass die Verwendung einer 80 µm Schablone oftmals zu einer niedrigeren Verteilung unterhalb der 70 % Grenze führt.

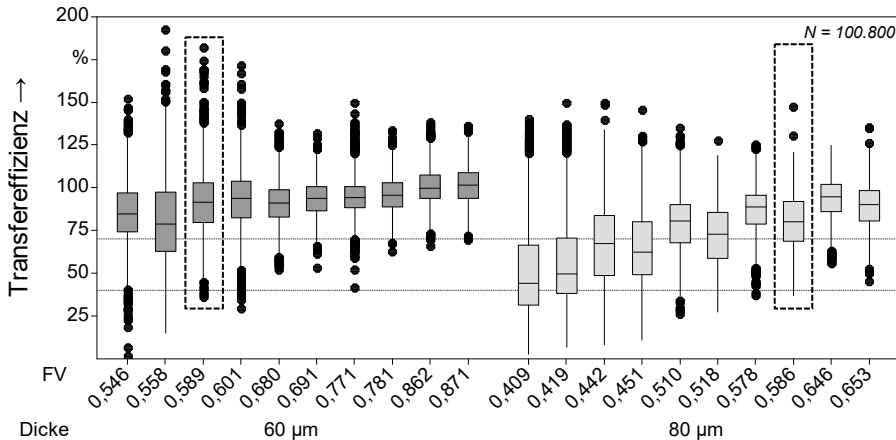


Bild 22: Vergleich zwischen den beiden Schablonendicken 60 µm und 80 µm mit den resultierenden Werten für das Flächenverhältnis

Bei vergleichbaren Werten des FV zwischen den beiden Schablonendicken (vgl. Hervorhebung in Bild 22) weist eine Dicke von 60 µm ein besseres Druckergebnis auf. Die dünnere Druckschablone führt dabei zu einem besseren Auslöseverhalten, was nach [82] auf die günstigeren vorherrschenden Adhäsionskräfte in den Aperturwandungen zurückzuführen ist.

Der zweitgrößte Effekt wird durch den Lotpastentyp beeinflusst. Entgegen den Erwartungen begünstigt der Pastentyp 5,5 im Vergleich zum Pastentyp 6 ein verbessertes Druckverhalten, was zu einer engeren Verteilung sowie einer höheren mittleren TE von etwa 88 % im Vergleich zu etwa 79 % führt. In Bild 23 sind die Unterschiede der beiden Lotpasten für die untersuchten Schablonendicken und Beschichtungen zusammengefasst dargestellt.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

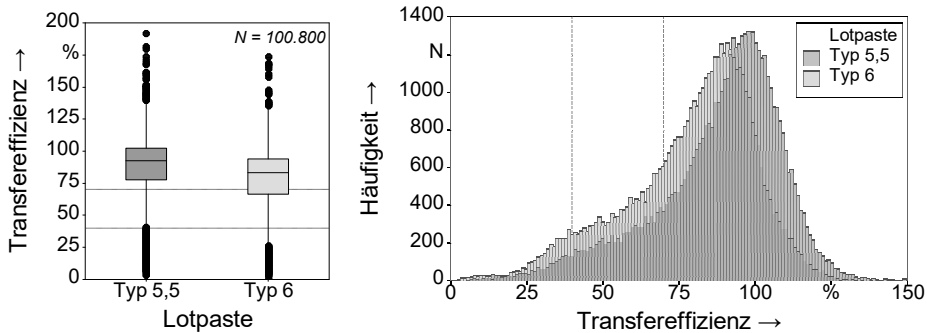


Bild 23: Auswirkungen des Lotpastentyps auf die Transfereffizienz

Eine weiterführende Analyse mit Betrachtung der FV, der mittleren Lotpastenhöhe und des Flächenbedruckungsgrades bestätigt diesen Effekt. Das schlechtere Auslöseverhalten der Lotpaste vom Typ 6 könnte durch Nebeneffekte induziert sein, wie beispielsweise Chargenschwankungen (Oxidationseffekte, Partikelverteilung etc.) oder einem abweichenden Anteil von Metallpulver und Flussmittel durch das veränderte Verhältnis von Oberfläche zu Volumen zwischen den beiden Pastentypen. Ein ähnliches Phänomen ist in [83] beschrieben, wobei in dieser Untersuchung der Lotpastentyp 6 im Vergleich zu einer Lotpaste vom Typ 5 schlechtere Druckergebnisse erzielt. Auch hier führt die feinere Verteilung zu keiner geringeren Streuung und verursacht sogar Brückenbildungen durch zusammengelaufene Lotpastendepots. Es bleibt anzumerken, dass es sich bei Lotpaste vom Typ 6 häufig um Sonderanfertigungen und keine im Markt weit verbreitete Lotpaste handelt. Daher können auch Abweichungen in der gewünschten Chargenkonstanz und der generellen Lotpastenformulierung mit Verwendung feinerer Korngrößen nicht ausgeschlossen werden.

Die Beschichtung der Druckschablonen kann als weiterer Effekt nachgewiesen werden. Bei Betrachtung aller Strukturen der Form Rechteck und Oblong kann aufgrund der Beschichtung der mittlere Wert der TE um knapp 4 Prozentpunkte auf etwa 85 % Volumen angehoben werden. Aus Bild 24 ist zu entnehmen, dass dies mit einer gleichmäßigeren Verteilung bei geringerer Streuung einhergeht. In der Darstellung sind beide Lotpastentypen sowie beide Schablonendicken enthalten.

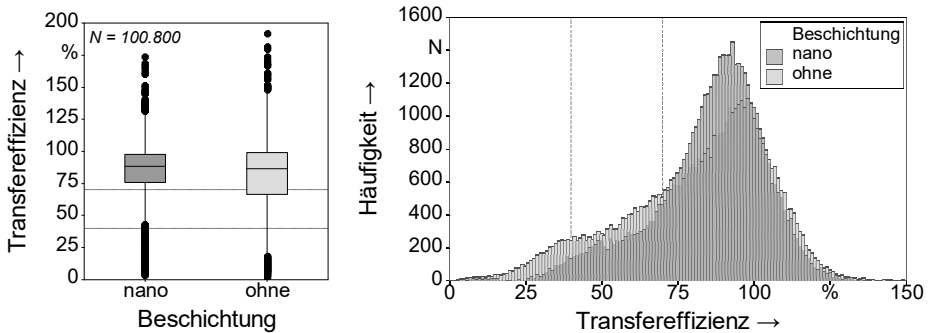


Bild 24: Boxplot-Darstellung und Histogramm für die mittlere Transfereffizienz beschichteter und unbeschichteter Druckschablonen

Eine weiterführende Auswertung der ermittelten Messdaten ergibt eine Wechselwirkung zwischen der Dicke der Druckschablone und einer Nano-beschichtung. Während der Effekt der Beschichtung für eine Dicke von 60 μm nicht signifikant ist, kann bei Verwendung einer 80 μm Schablone und damit einhergehenden kritischeren Werten für das Flächenverhältnis ein deutlicher Vorteil der Beschichtung nachgewiesen werden. In Bild 25 sind die erzielten Transfereffizienzen zusammengefasst für beide Lotpastentypen mit und ohne Nanobeschichtung dargestellt.

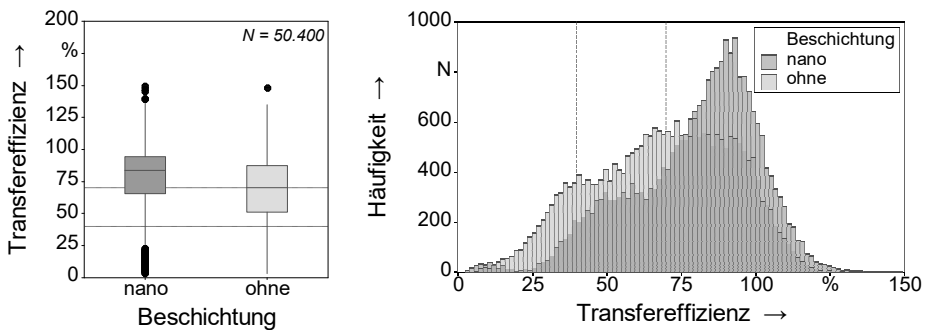


Bild 25: Positiver Effekt der Nanobeschichtung unter Verwendung von Druckschablonen mit 80 μm Dicke

Die Betrachtung der Versuchsreihen mit Beschränkung auf eine Schablondicke von 80 μm zeigt ein leichtes Plateau unterhalb der 70 % Grenze der TE, was durch die teilweise sehr kritischen Werte für die TE induziert ist. Ein vermehrtes Zusetzen der Aperturen ist mit gehäuften Werten um 40 % bis 50 % Druckvolumen angedeutet. Mit dieser Darstellung kann der positive Effekt einer Nanobeschichtung herausgestellt werden. Die Messwerte zeigen eine geringere Streuung und eine bessere Verteilung mit einer Verschiebung in Richtung der erwünschten 100 % TE.

Neben den beschriebenen Haupteffekten bietet eine optimierte Auslegung der Formgestaltung der Aperturen die Möglichkeit, die Prozessleistung im Schablonendruck zu beeinflussen. Die Gestaltung des Schablonenlayouts ermöglicht die Bewertung, wie stark der Effekt einer üblicherweise rechteckigen oder oblongförmigen Öffnung der Schablone ausgeprägt ist. Die Vermessung von über 100.000 gedruckten Strukturen ergibt mit etwa 84 % Druckvolumen einen nur um etwa einen Prozentpunkt erhöhten Wert für die TE für die Form Oblong. Ein etwas größerer Unterschied lässt sich für die Ausrichtung bezüglich der Druckrichtung nachweisen, wobei die mit 45° angeordneten Pads im Mittel um 3 Prozentpunkte höhere Werte der TE aufweisen. Basierend auf diesen zusammengefassten Betrachtungen kann kein signifikanter Effekt für die Form und Ausrichtung der Aperturen festgestellt werden. Die Berechnung der Wechselwirkungen zeigt allerdings eine starke Abhängigkeit zwischen der Geometrie und der Orientierung der Pads, was zu höheren Werten der TE um etwa 10 Prozentpunkte für die Form Oblong bei 0°-Ausrichtung führt. Eine Erhöhung um 5 Prozentpunkte für die mittlere TE kann auf die Form Rechteck bei 45°-Ausrichtung bezüglich der Druckrichtung zurückgeführt werden. In Bild 26 sind die Ergebnisse für rechteckige Strukturen bei einer 45°-Ausrichtung gezeigt.

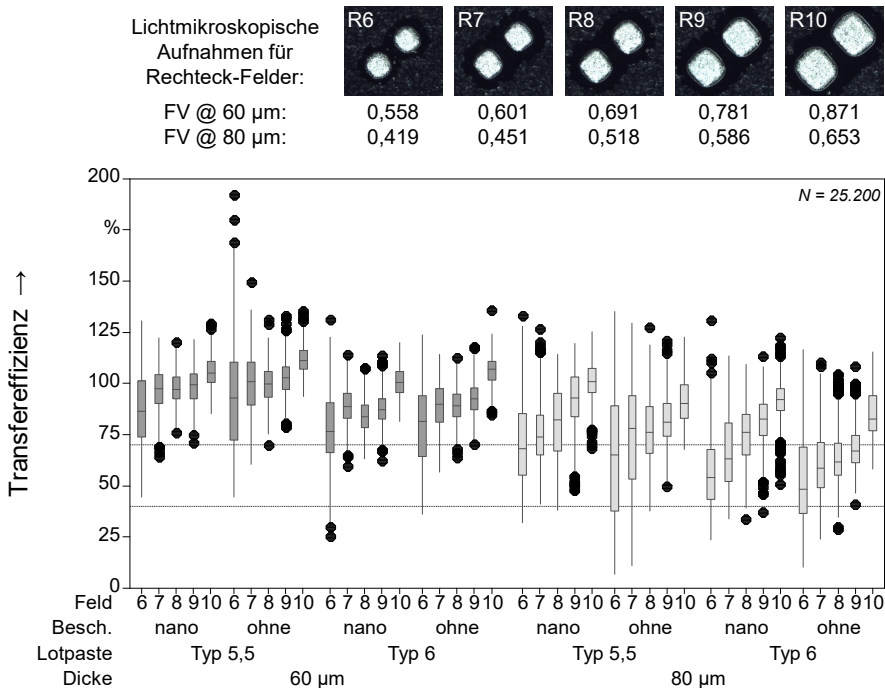


Bild 26: Boxplot der Transfereffizienz für rechteckige Aperturen der Felder 6 bis 10 mit 45°-Ausrichtung bezüglich der Druckrichtung

Es zeigen sich hierbei wiederum das bessere Druckverhalten der Lotpaste vom Typ 5,5 und der positive Effekt der Nanobeschichtung. Das beste Auslöseverhalten kann mit einer nanobeschichteten 60 µm dicken Schablone und einer Paste vom Typ 5,5 erzielt werden. Die gemessene TE für diese Parameterkombination weist durchgängig Werte über der 70 % Grenze für FV über 0,6 auf. Das Druckergebnis der Schablone mit 80 µm Dicke ist aufgrund der kritischeren Werte der FV deutlich reduziert. Hierbei können unter Verwendung einer Nano-Beschichtung und der Lotpaste vom Typ 5,5 nur FV über 0,65 sicher über der Grenze von 70 % TE gedruckt werden. Bei einem angenommenen Kriterium von mindestens 40 % TE kann mit dieser Parameterkombination ein FV bis zu 0,58 gedruckt werden.

Die Prozessleistung für die oblongförmigen Aperturen ist in Bild 27 visualisiert. Analog zu den rechteckigen Strukturen können hier die besten Ergebnisse unter Verwendung einer nanobeschichteten Druckschablone mit 60 µm Dicke und dem Lotpastentyp 5,5 erreicht werden.

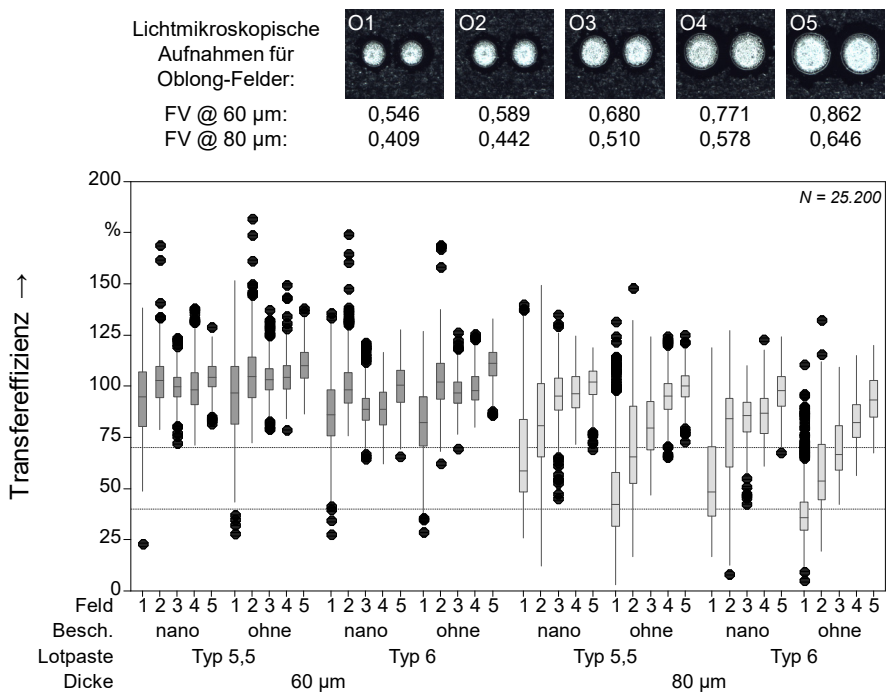


Bild 27: Boxplot der Transfereffizienz für Aperturen der Form Oblong der Felder 1 bis 5 mit 0°-Ausrichtung bezüglich der Druckrichtung

Insbesondere die 80 µm Schablonendicke erzielt aufgrund der geringeren FV des Schablonenlayouts niedrigere Werte der TE für das Oblong Layout. Die gedruckten Strukturen für diese Faktorkombination weisen für ein FV

größer als 0,58 durchgängig Werte über der 70 % Grenze für die TE auf. Die Analyse der nanobeschichteten 80 µm Druckschablone ermöglicht es hier, mit dem Lotpastentyp 5,5 ein FV bis zu 0,58 über der 70 % Grenze zu drucken.

Die Übertragbarkeit auf alternative Pastenmaterialien wird anhand einer ausgewählten Versuchsreihe mit Hersteller B unter Verwendung einer nanobeschichteten Schablone mit 60 µm und dem Lotpastentyp 6 durchgeführt (vgl. Tabelle 9). Das Histogramm in Bild 28 zeigt eine leichte Verschiebung der Verteilung, die in höheren Werten der TE bei rechnerisch vergleichbarer Streuung resultiert.

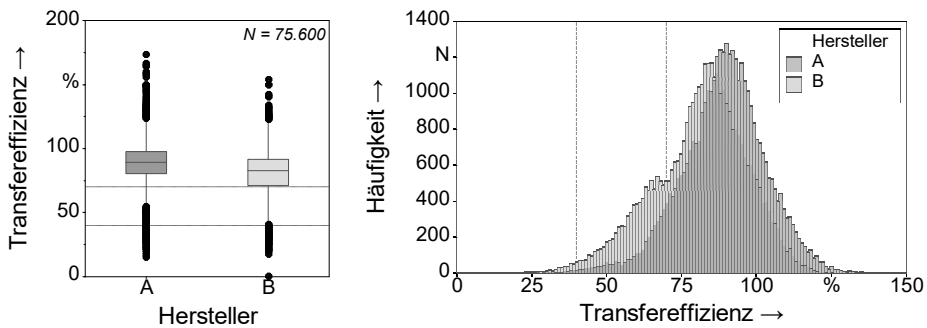


Bild 28: Histogramm der Transfereffizienz einer Lotpaste vom Typ 6 für zwei verschiedene Hersteller

Die Berechnung der Haupteffekte weist einen höheren Median der TE mit ca. 90 % bei Hersteller A im Vergleich zu 83 % bei Hersteller B auf. Zusätzlich ist bei Hersteller B ein leichtes Plateau zwischen 50 % und 70 % im aufgetragenen Volumen erkennbar, was erneut auf ein vermehrtes Zusetzen der Aperturen und ein herabgesetztes Auslöseverhalten hindeutet.

Eine detailliertere Evaluation der beiden Materialien in Bezug auf die berücksichtigten Flächenverhältnisse der Druckschablone zeigt für Hersteller A eine höhere Streuung für FV unterhalb von 0,68. Hersteller B weist ähnliche Streuungen aber geringere Mittelwerte der TE und einige Ausreißer auf, die überwiegend auf ein herabgesetztes Auslöseverhalten bei kritischen FV zurückgeführt werden können. Bei kleiner werdenden FV weist Hersteller A ein robusteres Verhalten auf, welches in einem besseren Auslösen der gedruckten Strukturen im Vergleich zu Hersteller B resultiert. Dies ist ebenfalls in Bild 28 ersichtlich, wobei Hersteller A eine engere Verteilung mit weniger ungenügend bedruckten Aperturen zukommt. Die Auswahl des Lotpastenherstellers kann daher als statistisch signifikanter

Einflussfaktor bewertet werden, der das Auslöseverhalten insbesondere bei kritischen Strukturen stark beeinflusst.

Aspekte zu Fehldrucken aufgrund Verschmierungen und Brückenbildung

Bei der Verarbeitung von Strukturen der Größe 03015M wirken sich Schwankungen in der Prozessführung des Schablonendrucks stark auf die erzielbare Verarbeitungsqualität aus. Neben einer sauberen Fertigungsumgebung und optimierten Druckparametern gilt es deshalb, insbesondere die Schablonenunterseitenreinigung für eine optimierte Reinigungsrate zu analysieren und die erreichbaren geringsten Abstände der gedruckten Strukturen zu bestimmen. Zu Beginn der Druckversuche für Strukturen der Größe 03015M sind ungewollte Auswirkungen nach dem Walkvorgang und der Durchführung einer maschineninternen Reinigung im Modus Nass-Vakuum-Trocken festgestellt worden. Sporadisch sind dabei Lotpastenrückstände zwischen den gedruckten Strukturen aufgetreten, die auf eine ungenügende Reinigungsleistung bei der Verarbeitung feinkörniger Pasten hinweisen. Die Durchführung eines doppelten Reinigungsvorgangs kann diese Verunreinigung verhindern. Auch die Integration eines oszillierenden Reinigungssystems und eines alternativen Reinigungsvlies mit taschenartigen Vertiefungen in der Oberfläche erweiterte maßgeblich die Reinigungsleistung des eingesetzten Schablonendruckers. Demnach sollte die Reinigung besonders betrachtet werden, was eine Überprüfung der verwendeten Materialien (eingesetztes Reinigungsmedium, Reinigungstücher etc.) und den Reinigungsprozess selbst umfasst. Die maschineninterne Reinigung nach einer bestimmten Anzahl an Drucken ist in der laufenden Produktion ein wichtiger Faktor für die erzielbare Taktzeit und die laufenden Kosten für Verbrauchsmedien. Insbesondere bei der Verarbeitung von kritischen Strukturen mit niedrigen FV ist der Effekt eines Reinigungsvorgangs von besonderem Interesse.

Für die Analysen der Auswirkungen der maschineninternen Reinigung werden für die entsprechenden Versuchsreihen (vgl. Tabelle 9) in einer Druckserie 15 Substrate bedruckt, wobei nach jeweils 5 Drucken ein automatischer Reinigungsvorgang ausgelöst wird. In Bild 29 sind beispielsweise die zusammengefassten Druckergebnisse der Versuchsreihe 6 dargestellt, welche Aperturen der Formen Rechteck und Oblong beinhaltet.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

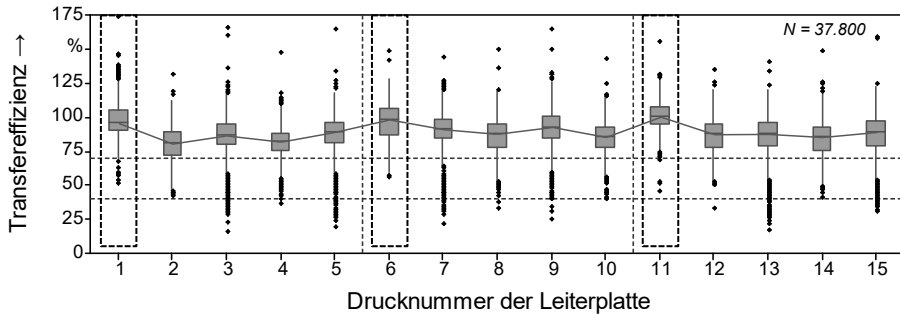


Bild 29: Darstellung von 15 konsekutiven Drucken mit einem markierten Reinigungsvorgang nach 5 Drucken

Der Initialdruck nach einem Reinigungsvorgang weist leicht erhöhte Werte zwischen etwa 97 % und 100 % für die erzielte TE auf. Weitere Abweichungen in Bezug auf die Streuung der folgenden Drucke können nicht festgestellt werden. In Bild 29 ist zudem der Einfluss der Druckrichtung ersichtlich, was sich in einem alternierenden Verlauf der Mediane auswirkt. Die bessere Druckbarkeit der Strukturen nach durchgeführter Reinigung ist dabei unabhängig von der Druckrichtung, was sich insbesondere anhand der erhöhten Werte bei Drucknummer 6 zeigen lässt, welche entgegen Drucknummer 1 oder 11 gerichtet ist. Eine Detailanalyse der weiteren Versuchsreihen bestätigt eine höhere TE nach einem maschineninternen Reinigungsprozess. Eine gereinigte Schablonenunterseite bzw. Aperturöffnung (im Idealfall ohne Rückstände) kann auf Basis der Untersuchungen als vorteilhaft angesehen werden. Für eine spezifische Bewertung des Verhaltens nach einem Reinigungsprozess sollte in einem Serienprozess die Anzahl an Drucken zwischen Reinigungsvorgängen schrittweise erhöht werden, um die zu erwartende herabgesetzte Prozessleistung über einen längeren Zeitraum zu erfassen. Hierbei sind gezielte Versuche mit dem realen Layout erforderlich, um Randbedingungen aus der Leiterplatte und dem Lötstopplack in Kombination mit dem spezifischen Layout in größeren Stückzahlen und Variationen zu berücksichtigen.

Der Einsatz von miniaturisierten Bauelementen geht meist mit einer hohen Integrationsstufe auf der Leiterplatte einher. Um daher die möglichen geringsten Abstände zwischen gedruckten Strukturen zu analysieren, werden die so genannten ‚Gap-Tests‘ mit der Aperturgröße R4 mit $170\ \mu\text{m} \times 196\ \mu\text{m}$ durchgeführt. Die Erfassung der auftretenden Brücken erfolgt unter Verwendung des maschineninternen Bridging-Algorithmus des Lotpastenspektionssystems. Innerhalb der Auswertungen wird eine Brückenbildung durch Lotdepots definiert, die mindestens $20\ \mu\text{m}$ voneinander entfernt

sind und durch einen Steg ab $20\ \mu\text{m}$ Höhe verbunden sind. Es gilt hierbei zu beachten, dass das verwendete Messprinzip der Moiré-Phasenmodulation die Anforderung besitzt, eine möglichst korrekte Referenzhöhe auf dem Substratmaterial festzulegen. Der Einsatz der Substrate aus schwarz eloxiertem Aluminium in den Versuchsreihen ermöglicht dabei eine sehr genaue Bestimmung des Schwellenwerts, um diesen Einfluss zu minimieren. Bild 30 visualisiert die berechneten Haupteffekte auf die Brückenbildung, wobei Lotpastentyp, Schablonendicke, Beschichtung, Ausrichtung der Aperturen und der Abstand zwischen den gedruckten Strukturen selbst berücksichtigt sind.

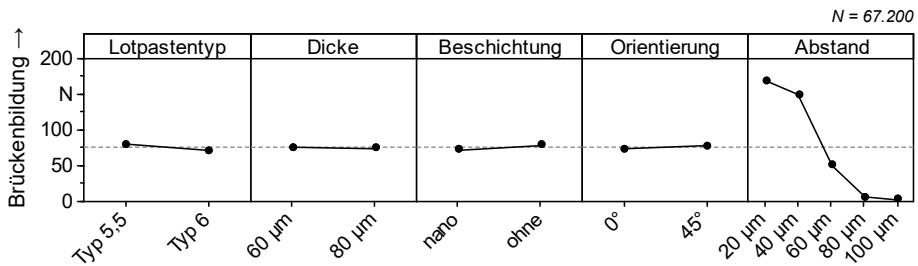


Bild 30: Haupteffektendiagramm für das Auftreten von Brücken benachbarter Strukturen im Schablonendruckprozess

Erwartungsgemäß weist der Abstand zwischen benachbarten Pads den größten Effekt auf, da durch das Layout bereits gezielt Grenzbereiche adressiert werden. Der zweitgrößte signifikante Effekt ist durch den Lotpastentyp bestimmt, wobei mit dem Lotpastentyp 6 und einer $60\ \mu\text{m}$ dicken Schablone bessere Druckergebnisse erreicht werden. Der drittgrößte Effekt, welcher sich ebenfalls signifikant auswirkt, lässt sich auf die Nano-Beschichtung zurückführen. Dabei sind insbesondere bei kritischen Abständen wie $60\ \mu\text{m}$ und $40\ \mu\text{m}$ deutlich weniger Brückenfehler aufgetreten. Die Orientierung der Aperturen bezüglich der Druckrichtung weist eine leichte Verbesserung der Fehlerbildung für 0° ausgerichtete Strukturen auf, wobei dies nicht signifikant auf die Fehlerentstehung einwirkt. Ebenso ist die eingesetzte Dicke der Druckschablone hinsichtlich des Auftretens von Brückenbildung vernachlässigbar. Die besten Druckergebnisse hinsichtlich niedriger Neigung zu Brückenbildung können in den Druckserien 1-8 unter Verwendung einer Lotpaste vom Typ 6 und einer nanobeschichteten $60\ \mu\text{m}$ Schablonendicke erzielt werden. Beispielhafte Defekte durch verbundene Lotpastendepots sind in Bild 31 mit Brücken zwischen den Aperturen G2 und G7 innerhalb der Versuchsreihe 6 dargestellt.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

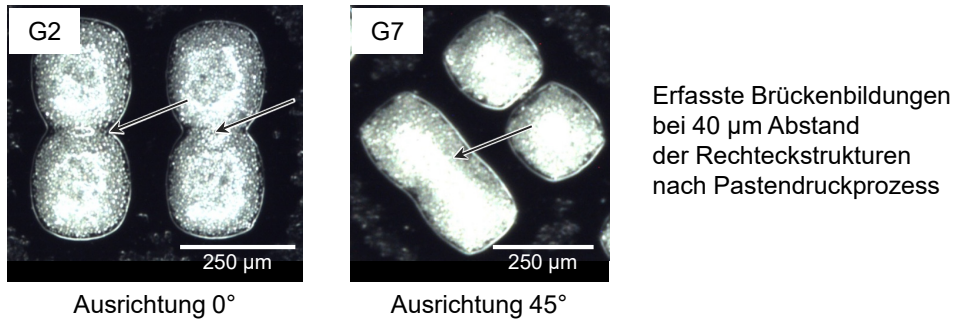


Bild 31: Vermehrte Neigung zu Brückenbildung bei einem Abstand von 40 µm zwischen benachbarten Strukturen

Eine weiterführende Analyse erfolgt unter Verwendung der Druckergebnisse der Druckserie 6. Zunächst kann eine Abhängigkeit der auftretenden Brücken festgestellt werden, welche sich auf den Einfluss der Druckrichtung zurückführen lässt. Je nach Druckrichtung treten sporadische Effekte der Rakel bzw. im Abziehverhalten auf, welche sich negativ auf die Brückenbildung auswirken. Dabei können höhere Werte der TE das Auftreten von Brückenbildungen begünstigen. Darüber hinaus kann mit den gewählten Randbedingungen kein Abstand von 20 µm zwischen benachbarten Strukturen erzielt werden. Die Verwendung von 40 µm und 60 µm Abständen führt zu einem herabgesetzten Auftreten von Brückenfehlern. In einigen Druckversuchen können völlig fehlerfreie Substrate vermessen werden mit Abstand zwischen den Strukturen ab 60 µm.

Auf Basis der Versuchsreihen erfolgt die Berechnung eines Regressionsmodells. Innerhalb des Modells treten ungewöhnlich hohe Residuen auf, welche sich auf Aperturen mit 40 µm sowie 60 µm zurückführen lassen. In der Modellanpassung der erwarteten Brückenfehler sinkt die Fehlerwahrscheinlichkeit mit Abständen über 40 µm stark ab. Ein weiterer starker Abfall der erwarteten Fehler ist bei einem Abstand über 60 µm erkennbar. Die Nanobeschichtung wirkt sich im Modell in jeder Variation der Abstände positiv mit geringerer Neigung zu Brückenbildung aus. Die Einhaltung eines Mindestabstands von 80 µm lässt sich bei idealer Prozessführung auf Basis der Versuchsreihen prozesssicher ohne Brückenbildung der gedruckten benachbarten Strukturen realisieren. Unter optimierten Druckbedingungen aus den Prozessparametern und den gewählten Materialien erscheint ein Mindestabstand von 60 µm für das Druckbild realisierbar. Es gilt hier für den konkreten Anwendungsfall, die gewählten Materialien, wie beispielsweise das Substratmaterial, die Lotpaste, das verwendete Flussmittelsystem sowie angepasste Prozessparameter im Schablonendruck, für

einen gesicherten Auftrag der Lotpastendepots optimal aufeinander abzustimmen.

3.3.3 Bewertung von Einflussgrößen auf die Baugröße 03015M

Bisherige Veröffentlichungen zu Bauformen passiver Bauelemente wie der Größe 03015M thematisieren im Wesentlichen den Bestückprozess [75, 84]. Der Prozess des Lotpastenauftrags für diese Bauelementformen ist noch nicht vollständig beschrieben. Daher liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf dem Schablonendruckprozess für die erforderlichen kleinen Strukturgrößen, um zum Verständnis des Prozessverhaltens dieser miniaturisierten Bauformen beizutragen. Insbesondere die Effekte aus den häufig feinkörnigen Lotpastenmaterialien und den verschiedenen Schablonentechnologien müssen hierbei evaluiert werden.

Ein großer Effekt auf das Druckergebnis kann auf die Schablonendicke zurückgeführt werden. Die Verwendung einer Schablone mit einer Dicke von 60 μm ermöglicht ein besseres Druckverhalten mit gesteigerten Transfereffizienzen. Auch wenn bei einer geringeren TE einer 80 μm Schablone unter Umständen mehr Lotpaste als mit höheren TE einer 60 μm aufgetragen werden kann, geht dies mit einer deutlich erhöhten Varianz der Messwerte und damit einer eingeschränkten Fähigkeit des Prozesses einher. Der Einsatz einer 80 μm Schablone führt oftmals zu kritischeren Werten für das Flächenverhältnis der notwendigen kleinen Strukturgrößen, was in der Gestaltung des Schablonenlayouts berücksichtigt werden muss. Die Bewertung des Lotpastentyps zeigt einige unerwartete Ergebnisse, wobei die verwendete Lotpaste mit einer gröberen Partikelverteilung ein besseres Druckverhalten aufweist. Der Schablonendruck von miniaturisierten Strukturen benötigt oftmals Lotpastentypen, die feiner als die üblich verwendeten Pasten vom Typ 3 oder Typ 4 sind. Um einen robusten Schablonendruckprozess unter Verwendung neuer Lotpastenmaterialien erzielen zu können, ist es daher erforderlich, eine spezifische Bewertung des Druckergebnisses mit den jeweiligen Randbedingungen durchzuführen. Auf Basis der gewonnenen Daten kann nachgewiesen werden, dass der Einsatz einer Nanobeschichtung ein besseres Auslöseverhalten ermöglicht. Bei den ausgewerteten Versuchsreihen führt eine Nanobeschichtung zu einer höheren Verteilung der mittleren Transfereffizienz und einer geringeren Streuung der Messwerte. Eine zusammenfassende Darstellung der nachgewiesenen Haupteffekte über alle Versuchsreihen ist in Bild 32 visualisiert.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

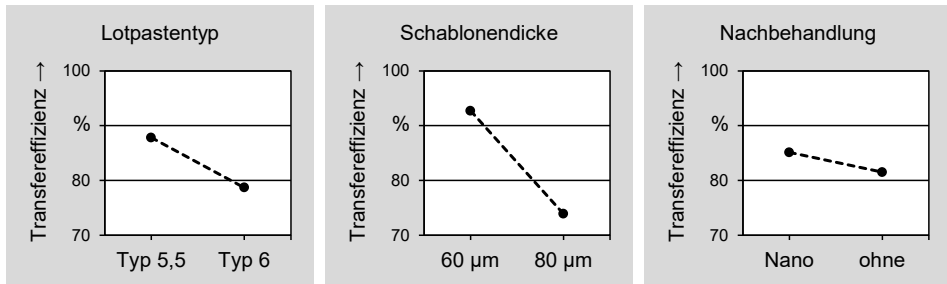


Bild 32: Zusammenhänge im Schablonendruckprozess für die Optimierung der Transfereffizienz bei Strukturen der Bauform 03015M

Der Effekt der Nanobeschichtung ist insbesondere unter Verwendung einer 80 µm dicken Druckschablone stärker ausgeprägt, wobei deutlich kritischere Werte für das Flächenverhältnis aufgrund der Schablonengestaltung auftreten. Die Betrachtung der Wechselwirkungen in Bild 33 verdeutlicht dies, wobei nanobeschichtete Schablonen bei kritischeren Flächenverhältnissen unter 0,66 signifikante Vorteile aufweisen.

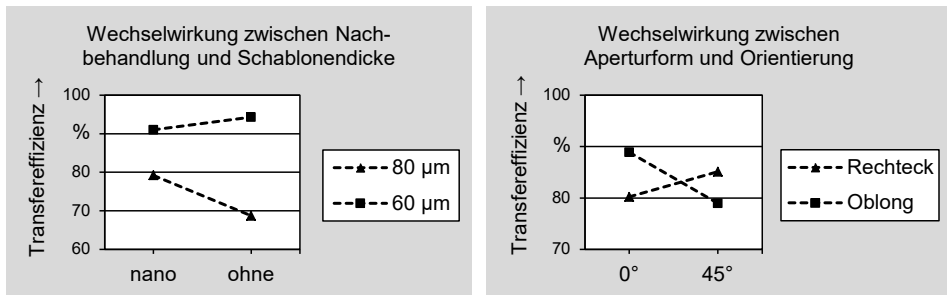


Bild 33: Erfasste Wechselwirkungen zur Optimierung der Transfereffizienz

Bei der Auswertung der Orientierung bezüglich der Druckrichtung lassen sich ebenfalls Wechselwirkungen nachweisen, weshalb keine eindeutige Empfehlung für die Gestaltung der Aperturen gegeben werden kann. Durch die Auswertungen konnte allerdings gezeigt werden, dass bei rechteckigen Strukturen ein besseres Druckergebnis für eine 45°-Ausrichtung erzielt werden kann. Im Gegensatz dazu wurden bessere Ergebnisse mit den oblongförmigen Strukturen und einer 0°-Ausrichtung zur Druckrichtung erfasst.

Die Kenntnis über die Effekte der maschineninternen Reinigung der Schablonenunterseite ist von hohem Interesse, um Auswirkungen der Reinigung selbst bewerten sowie einen möglichst großen Abstand zwischen den Reinigungen erreichen zu können. Der Reinigungsprozess hat sich hinsichtlich der erzielten Reinigungsleistung als besonders beachtenswert herausgestellt. Der Initialdruck nach einer durchgeführten maschineninternen

Reinigung hat mit höheren Transfereffizienzen bei vergleichbarer Streuung zu besseren Ergebnissen geführt als bei den darauffolgend durchgeführten Drucken und hat sich daher im Rahmen der Versuche als unkritisch erwiesen. Die Druckversuche zu möglichen minimalen Abständen der Strukturen haben gezeigt, dass die besten Ergebnisse unter Verwendung einer nanobeschichteten 60 µm Schablone und dem Lotpastentyp 6 erzielt werden können. Um eine eindeutige Grenze für kleinste Abstände identifizieren zu können, ist für den konkreten Anwendungsfall die Durchführung spezifischer Versuchsreihen über die jeweiligen gewählten Materialien für die Überführung in den Serienprozess erforderlich.

3.4 Einfluss von Aperturform und Flächenverhältnis auf den Schablonendruckprozess

Die vorliegenden Ergebnisse in den vorangegangenen Untersuchungen zeigen auf, dass die Ermittlung von Prozessgrenzen aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen häufig eine spezifische Betrachtung darstellt. Die technologischen Grenzen der eingesetzten Prozesse sind dabei im Wesentlichen bestimmt durch die Kombination der verwendeten Druckparameter, des Lotpastenmaterials, der Druckschablone und des Substratmaterials. Die Angabe von Prozessgrenzen erfolgt dabei häufig durch die Angabe des Flächenverhältnisses (FV), welches noch ein prozesssicheres Auslösen der Lotpaste aufweist.

Die Verwendung von kreisförmigen Aperturgeometrien bringt das rechnerisch günstigste Verhältnis von Aperturöffnung zu Aperturwandung mit sich. Davon abweichende Geometrien, wie beispielsweise häufig eingesetzte rechteckige Strukturen, sind durch die reine Angabe des FV nicht ausreichend beschrieben, um die Druckbarkeit abschätzen zu können. Für das Seitenverhältnis zwischen Länge und Breite rechteckiger Aperturen gibt es dabei keine Empfehlungen, was Optimierungspotenzial in der Auslegung von Druckschablonen für miniaturisierte Strukturen bietet.

Es soll daher anhand von Druckversuchen mit einem speziell entwickelten Schablonenlayout grundlegend untersucht werden, wie sich die Druckbarkeit von Strukturen verhält, deren Seitenverhältnis stufenweise variiert wird, wobei das jeweilige FV unverändert bleibt [85].

3.4.1 Auslegung der Druckschablonen und Vorgehensweise

Als Substratmaterialien kommen aus den Erfahrungen der bisherigen Versuchsreihen erneut 1,5 mm starke Aluminiumplatten mit Abmessungen

von 160 mm × 100 mm zum Einsatz. Das Fehlen der Metallisierung bzw. des Lötstopplacks begünstigt dabei die Betrachtung der Unterschiede im Prozessverhalten. Die schwarze eloxierte Oberfläche ermöglicht darüber hinaus die exakte Vermessung der gedruckten Strukturen mittels 3D-Pasteninspektion, wobei für das präzise Bestimmen der Messfenster die Ausrichtung des Messsystems an den ebenfalls gedruckten Referenzmarken erfolgt.

Um den spezifischen Einfluss der Gestaltung der Aperturen zu ermitteln, werden lasergeschnittene Schablonen ohne weitere Oberflächenveredelungen mit Stärken von 80 µm, 100 µm sowie 120 µm verwendet. Das entwickelte Layout für die Untersuchungen ist anhand Bild 34 exemplarisch mit der Darstellung einer 120 µm dicken Schablone erläutert, welche insgesamt 6.680 Aperturen beinhaltet.

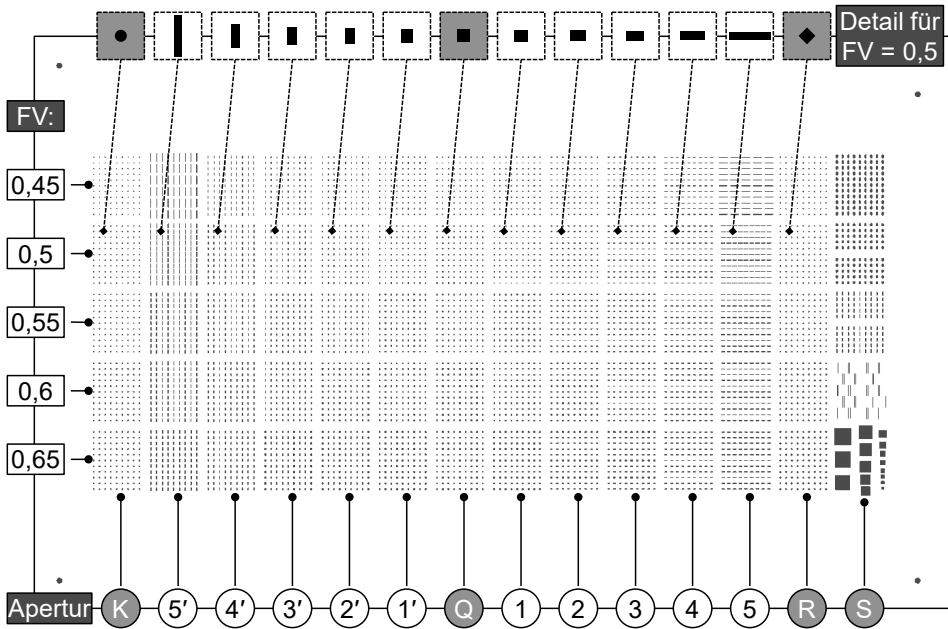


Bild 34: Das entwickelte Layout berücksichtigt eine Vielzahl unterschiedlicher Aperturgeometrien und Flächenverhältnisse

Basis des schachbrettartig gestalteten Layouts stellen kreisförmige und insbesondere rechteckige Aperturen dar. Zeilenweise ist dabei im oberen Bereich ein FV von 0,45 bis zur untersten Zeile mit 0,65 vorgesehen. Spaltenweise erfolgt die Variation der Seitenverhältnisse der Aperturen in den jeweiligen FV. Die rechteckigen Strukturen werden ausgehend von einer quadratischen Form in 5 Stufen variiert, welches sich in einer Dehnung

bzw. Stauchung der Aperturen bezüglich der Druckrichtung auswirkt. Bei den Stufen 1' bis 5' ist dabei die Längsrichtung in Druckrichtung ausgerichtet, die Stufen 1 bis 5 besitzen dagegen die Längsrichtung senkrecht zur Bewegung der Rakel. Zusätzlich sind in den Feldern der Spalte K kreisförmige Strukturen sowie in den Feldern der Spalte R quadratische Aperturen mit 45°-Ausrichtung bezüglich der Druckrichtung berücksichtigt. Die Spalte S im rechten Teil des Layouts beinhaltet verschiedenartig ausgeprägte Sonderformen, welche hinsichtlich möglicher Auffälligkeiten durch Randeffekte in das Layout aufgenommen werden. Details zu den verwendeten Abmessungen für alle 3 Schablonenstärken sind im Anhang (vgl. Tabelle 19) aufgeführt. Bild 35 veranschaulicht schematisch die gewählten Bezeichnungen der gewählten Aperturen bezüglich der Druckrichtung.

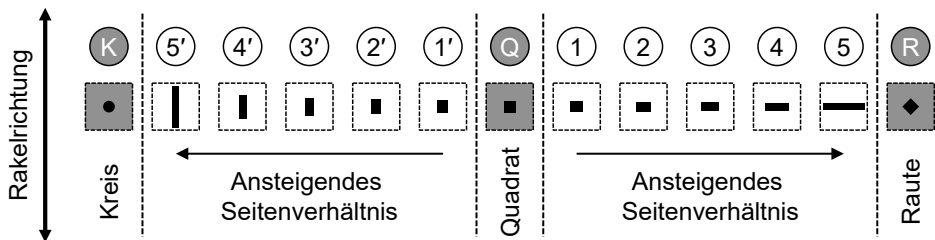


Bild 35: Bezeichnung der untersuchten Schablonenöffnungen

Als Lotpastenmaterial werden erneut von 2 verschiedenen Lotpastenherstellern jeweils Zinn-Silber-Kupfer-Legierungen (SAC305) vom Pastentyp 4 und Typ 5 verwendet. Im Versuchsplan sind 2 verschiedene Rakelgeschwindigkeiten sowie die Verwendung eines aktiven Rakelsystems vorgesehen, um prozessbedingte Streuungen möglichst breit in die Analyse mit einbeziehen zu können. Die verwendeten Rakelgeschwindigkeiten sind herstellerspezifisch in Vorversuchen ermittelt worden und liegen mit 30 mm/s bis zu 80 mm/s für den Pastentyp 4 sowie 30 mm/s bis zu 55 mm/s für den Pastentyp 5 innerhalb des empfohlenen Prozessfensters der jeweiligen Lotpaste. Das Vorgehen der Druckversuche ist über alle Versuchsserien konstant gehalten worden. Nach der Auswahl der Materialien werden 125 g Lotpaste appliziert und für eine homogene Verteilung gewalzt. Im Anschluss erfolgt der Druck von 5 Substraten, eine anschließende maschineninterne Schablonenreinigung und die Wiederholung von 5 weiteren Drucken mit identischen Parametereinstellungen. Bedruckte Substrate werden mittels 3D-Lotpasteninspektion vom Typ KohYoung KY-3030 mit einer 10 µm lateralen Auflösung vermessen, welche die teilweise klein ausgelegten Depots zuverlässig erfassen kann. Je nach Änderungen im Versuchsplan erfolgt eine Umrüstung des Schablonendruckers mit der

Fortsetzung der Versuchsserien anhand des Versuchsplans. Mit den 3 berücksichtigten Schablonenstärken ergibt sich dabei bei vollfaktorieller Durchführung der Versuchsreihen eine Datenbasis von insgesamt 480 gedruckten Substratmaterialien. Der vollständige Versuchsplan ist im Anhang aufgeführt (vgl. Tabelle 20). Diese Grundlage ermöglicht eine tiefgehende Analyse der aufgestellten Hypothese zur Bewertung des Einflusses der Aperturform und Ausrichtung bezüglich der Druckrichtung. Nach Aufbereitung der erfassten Daten wird hierfür die Software ‚Minitab‘ zur statistischen Auswertung verwendet. Neben der Betrachtung der Hauptgeometrien Kreis und Rechteck erfolgt insbesondere eine gesonderte Betrachtung der spezifischen Einflussparameter bei rechteckigen Strukturen, um hieraus einen grundlegenden Zusammenhang zwischen Seitenverhältnis und Druckbarkeit der Aperturen zu bestimmen.

3.4.2 Analyse der erfassten Prozessergebnisse

Die Auswertung nach den Aperturformen Kreis (K), Quadrat (Q) und dem 45° zur Druckrichtung gedrehtem Quadrat (Raute R) zeigt für kreisförmige Aperturen das schlechteste Auslöseverhalten. Bild 36 stellt die erzielten Transfereffizienzen den wesentlichen Aperturformen gegenüber.

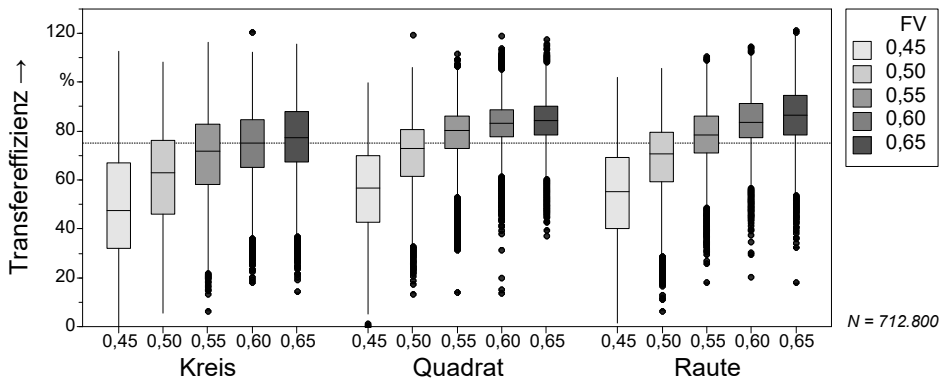


Bild 36: Ermittelte Transfereffizienzen der Aperturen Kreis, Quadrat und Raute für die Flächenverhältnisse (FV) 0,45 bis 0,65

Die rechteckigen Formen weisen im Mittel eine um 8 Prozentpunkte höhere Transfereffizienz auf, wobei sich die Formen Q und R bei der Gesamtbetrachtung über die verschiedenen Flächenverhältnisse hinweg nicht signifikant unterscheiden. Die Unterteilung in die jeweiligen Werte des Flächenverhältnisses zeigt das erwartete Verhalten mit einem abnehmenden Wert bei kritischerem Flächenverhältnis und einem gleichzeitigen Anstieg der Streuung der Messwerte.

Im Folgenden erfolgt die Analyse der rechteckigen Aperturen, die ausgehend von Q in 5 Schritten längs bzw. quer zur Druckrichtung ein ansteigendes Seitenverhältnis aufweisen (vgl. auch Bild 35). Für die Bewertung der Einflussfaktoren werden zunächst die Haupteffekte analog der variierten Faktoren des Versuchsplans berechnet. Neben dem Flächenverhältnis besitzen ebenso die Schablonendicke und die Aperturgeometrie einen hochsignifikanten Einfluss auf das gedruckte Volumen. Daher werden die erfassten Messwerte ausgehend von einer Gesamtauswertung nach den jeweiligen Schablonendicken in Abhängigkeit des Flächenverhältnisses evaluiert.

Bei der Gesamtbetrachtung der Messergebnisse über alle Schablonendicken lässt sich nachweisen, dass sich die Auswirkungen der verschiedenen Flächenverhältnisse direkt im erzielten Mittelwert zeigen. Die Unterschiede in der realisierten Transfereffizienz werden mit abnehmendem Flächenverhältnis zunehmend deutlicher, wobei mit einem FV von 0,45 die niedrigsten Transfereffizienzen erzielt werden. Bild 37 zeigt die beschriebenen Zusammenhänge auf, wobei aus Darstellungsgründen an dieser Stelle auf die Kennzeichnung der ermittelten Streuungen verzichtet und auf den Anhang verwiesen wird (vgl. Bild 92).

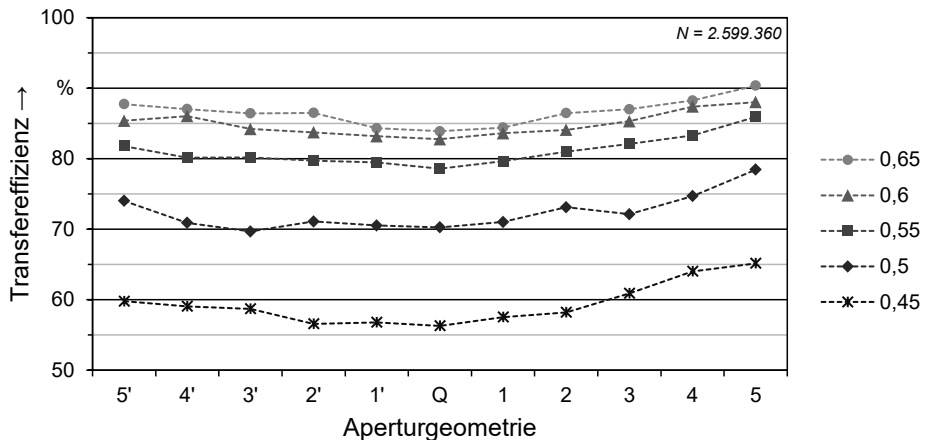


Bild 37: Mittelwerte der Transfereffizienzen für die unterschiedlichen Ausprägungen der Schablonenöffnungen in der Gesamtbetrachtung

Unabhängig vom Flächenverhältnis wirkt sich ein verändertes Seitenverhältnis der rechteckigen Aperturen auf eine gesteigerte Transfereffizienz aus, wobei bei der quadratischen Form Q die niedrigsten Werte der TE erzielt werden. Hierbei ist eine deutliche Richtungsabhängigkeit dieser Steigerung erkennbar, wobei die Rechtecke 1 bis 5 mit langer Seite zur

Rakelkante eine signifikant gesteigerte Transfereffizienz besitzen. Bei der Betrachtung der zugehörigen Streuung der Messwerte besitzen die Aperturen einen vergleichbaren Wert, lediglich die äußeren Strukturen in den Formen 5' und insbesondere 5 weisen eine höhere Streuung der Messwerte auf.

Mit den 3 untersuchten Schablonendicken erfolgt die Bewertung nach einem wesentlichen Kriterium für einen stabilen Druckprozess. In den vorangegangenen Druckversuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung einer dünneren Druckschablone mit einem stabileren Druckprozess und höheren Transfereffizienzen insbesondere bei miniaturisierten Strukturen einhergeht. Die Betrachtung der Druckschablone mit 80 µm Dicke zeigt über alle Flächenverhältnisse hinweg einen verhältnismäßig homogenen Verlauf der Druckergebnisse, wie in Bild 38 dargestellt.

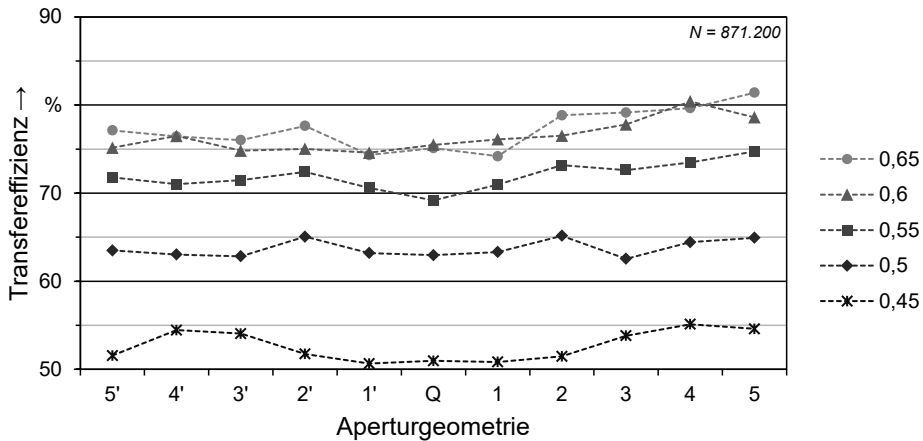


Bild 38: Mittelwerte der Transfereffizienzen der verschiedenen Flächenverhältnisse bei Verwendung der 80 µm dicken Druckschablone

Mit steigendem Flächenverhältnis werden erneut höhere Transfereffizienzen erreicht. Auffällig hierbei ist die jeweils höchste erzielte Transfereffizienz, wobei dies bei einem FV von 0,5 bei den Formen 2' und 2 auftritt. Größere Flächenverhältnisse zeigen einen ähnlichen Verlauf. Beim kleinsten Flächenverhältnis von 0,45 scheinen die Maxima der Transfereffizienz in den stärker variierten Formen um 4' und 4 zu liegen, wobei bei den stärksten Variationen der Formen 5' und 5 fallende Werte auftreten. Die Analyse der zugehörigen Standardabweichungen zeigt eine Reduzierung der Streuung bei Flächenverhältnissen kleiner als 0,5 bei ersten abweichenden Formen gegenüber Q, wobei dieser Effekt bei größerem Seitenverhältnis abnimmt und teilweise unter dem Wert der quadratischen Struktur liegt

(vgl. Anhang Bild 93). Dabei verhält sich die Standardabweichung bei der 80 µm Schablonendicke vergleichsweise konstant über die verschiedenen Aperturgeometrien. Die weiteren Verläufe über einem FV von 0,5 weisen keine signifikanten Tendenzen auf, wodurch Rückschlüsse auf die Form oder die Ausrichtung möglich sind.

Die Mittelwerte der 100 µm dicken Druckschablone zeigen erneut steigende Transfereffizienzen mit steigenden Flächenverhältnissen. Die unterschiedlichen FV weisen dabei einen gemeinsamen Trend auf, wobei das Minimum jeweils die quadratische Form Q darstellt. Davon abweichende rechteckige Formen erhöhen die erzielte Transfereffizienz. Die äußersten Rechtecke weisen leicht abfallende Werte auf, lediglich bei einem FV von 0,5 ist dieses Verhalten nicht festzustellen. Die Standardabweichungen folgen den Betrachtungen der Gesamtergebnisse und besitzen insgesamt vergleichbare Werte (vgl. Anhang Bild 94). Bei Flächenverhältnissen über 0,5 ist eine minimale Streuung bei den quadratischen Formen festzustellen, welche sich in Richtung der Form 2' kontinuierlich steigert. Generell werden mit der 100 µm Druckschablone höhere Werte der mittleren Transfereffizienz erzielt, was bei gleichbleibendem Flächenverhältnis auf die größeren Aperturen zurückzuführen ist. Das Verhalten der 100 µm Druckschablone ist in Bild 39 aufgezeigt.

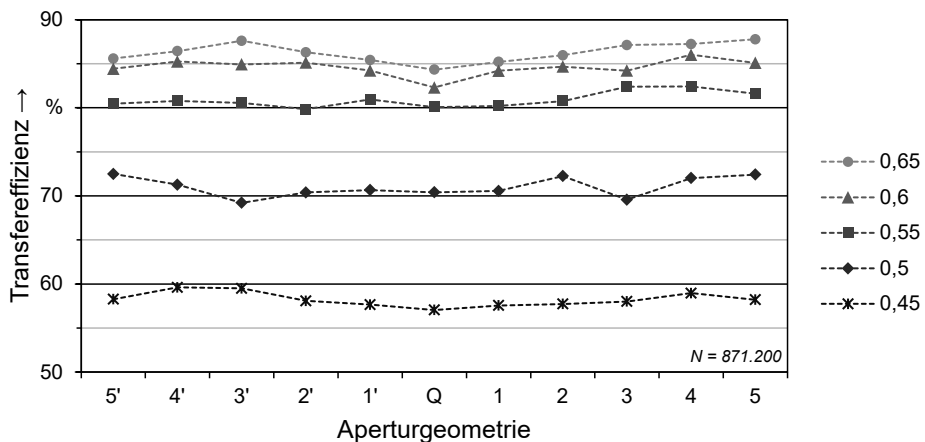


Bild 39: Mittelwerte der Transfereffizienzen der verschiedenen Flächenverhältnisse bei Verwendung der 100 µm dicken Druckschablone

Bei der Verwendung einer 120 µm dicken Druckschablone werden insgesamt die höchsten mittleren Transfereffizienzen erreicht, so dass selbst bei einem FV von 0,5 die mittlere TE über 75 % Volumen liegt. Dies könnte

sich aus der Menge der applizierten Lotpaste ableiten lassen, welche absolut betrachtet im Vergleich zu den dünneren Schablonen deutlich höher liegt und damit durch die insgesamt höhere Menge an Lotpaste das Auslöseverhalten aufgrund der Klebrigkeit innerhalb der Paste begünstigt. Ausgehend von der quadratischen Form Q ist im Vergleich zu den dünneren betrachteten Druckschablonen die deutlichste Steigerung der applizierten Lotpaste hin zu den rechteckigen Aperturen nachweisbar. Insbesondere bei kleiner werdenden Flächenverhältnissen wird dieser Effekt stärker sichtbar, wie in Bild 40 ersichtlich ist.

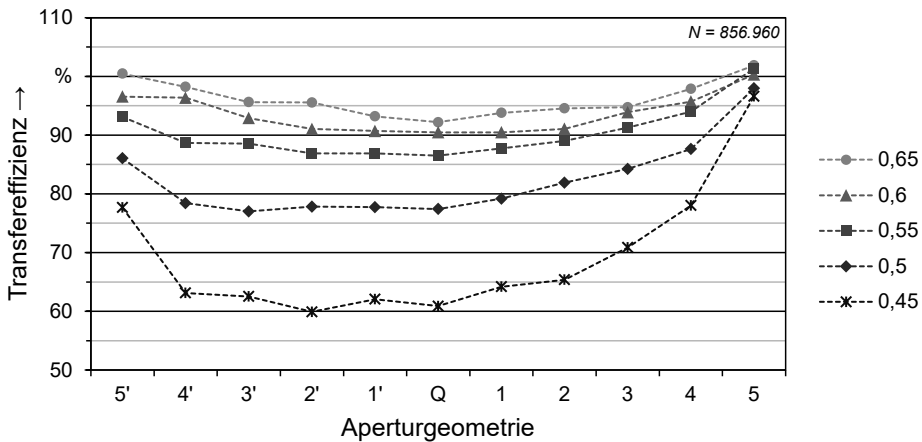


Bild 40: Mittelwerte der Transfereffizienzen der verschiedenen Flächenverhältnisse bei Verwendung der 120 µm dicken Druckschablone

Bei detaillierter Betrachtung der Ausrichtung der rechteckigen Form bezüglich der Druckrichtung wird deutlich, dass gesteigerte Werte insbesondere bei Aperturen auftreten, die mit der langen Seite zum Rakelblatt ausgerichtet sind. Beispielhaft für ein FV von 0,5 werden die Transfereffizienzen ausgehend von etwa 77 % bei Form Q auf 86 % mit der Form 5' bzw. auf 98 % appliziertem Volumen mit der Form 5 angehoben. Die Standardabweichung zeigt dabei im Vergleich zu dem Formen 1' bis 5' sowie dem Quadrat eine geringere Streuung für die Formen 1 bis 5 auf, wobei eine stärker ausgeprägte rechteckige Form eine herabgesetzte Standardabweichung bedingt (vgl. Anhang Bild 95).

Der Einfluss der Lotpaste äußert sich in allen Versuchspunkten durch ein verbessertes Druckergebnis für beide Lotpastenhersteller unter Verwendung der feinkörnigeren Paste vom Typ 5. Hierbei lassen sich leicht verbesserte Transfereffizienzen und eine verringerte Streuung nachweisen. Die

Betrachtung der unterschiedlichen Flächenverhältnisse bestätigt die Gesamtbetrachtung, wonach mit zunehmendem FV die Transfereffizienz gesteigert ist. Die Unterteilung nach den untersuchten Aperturöffnungen folgt grundsätzlich der Gesamtbetrachtung, wobei ein Lotpastentyp 5 bei den Formen von 1' bis 5' ein besseres Druckverhalten aufweist und damit ein Lotpastentyp 4 bei den Aperturen mit der kurzen Seite zur Rakelkante wesentlich stärkeren Einfluss mit herabgesetzter Transfereffizienz zeigt (vgl. Anhang Bild 96 bzw. Bild 97).

3.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Aperturform bei der Gestaltung von Druckschablonen

Die Auswertung der Modellbildung mittels Regression liefert keine systematische Ursache für aufgetretene Abweichungen der Prozessergebnisse. Die Analyse der Residuen lässt sich hierbei nur auf sporadisch aufgetretene Effekte zurückführen, welche das applizierte Druckvolumen zufällig verteilt beeinflussen und keine spezifische Parameterkombination einwirkt. In Bild 41 sind die ermittelten Haupteffekte für die gesamte Versuchsreihe grafisch aufgezeigt.

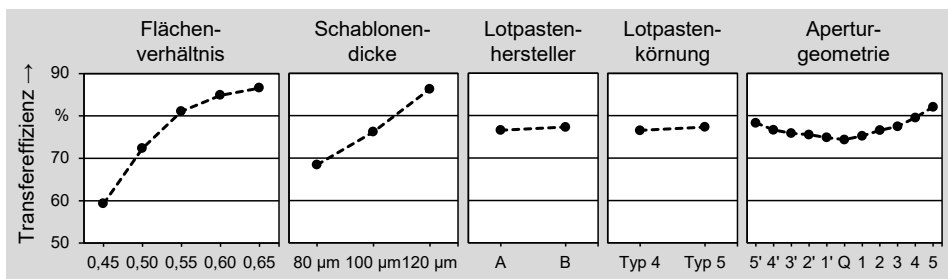


Bild 41: Berechnete Haupteffekte für die erzielten Transfereffizienzen der rechteckigen Aperturen in den gewählten Faktorkombinationen

Das Flächenverhältnis stellt einen wesentlichen Faktor auf das übertragene Lotpastenvolumen dar, wobei mit kleiner werdendem FV auch die erzielte Transfereffizienz abnimmt. Als ebenso signifikanter Effekt wirkt die Dicke der Druckschablone auf das Prozessergebnis ein. Der Hersteller der Lotpaste und die Korngrößenverteilung besitzen ebenfalls statistisch signifikanten Einfluss, wobei unter Verwendung eines Lotpastentyps 5 bei beiden Herstellern eine höhere Transfereffizienz erreicht wird. In der Darstellung der Haupteffekte ist weiterhin der nachgewiesene Einfluss der Aperturgeometrie auf das gedruckte Volumen ersichtlich. Ausgehend von der quadratischen Struktur Q sind je nach Ausrichtung der rechteckigen Öffnungen deutliche Steigerungen im Prozessergebnis realisierbar. Durch die

rechteckigen Formen 1' bis 5' kann dabei der Mittelwert der Transfereffizienz auf über 5 % gegenüber dem Quadrat gesteigert werden. Die abweichende Ausrichtung der Formen 1 bis 5 mit Ausrichtung der längeren Seite zum Rakelblatt ermöglicht dabei sogar gesteigerte Werte über 10 % gegenüber dem Quadrat. Die Art der Ausprägung unterliegt dabei in ihrer Auswirkung auf das Druckvolumen einer Wechselwirkung mit der Dicke der Druckschablone, wie in Bild 42 zu sehen.

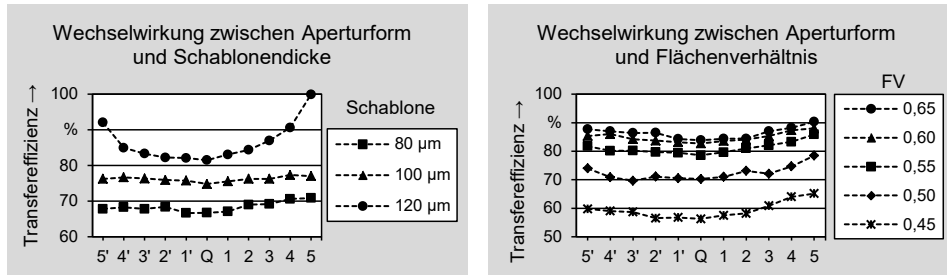


Bild 42: Identifizierte Wechselwirkungen zwischen Aperturgeometrie und Schablonendicke (links) bzw. Flächenverhältnis (rechts)

Ausgehend von der quadratischen Form Q wirkt sich das veränderte Seitenverhältnis insbesondere bei einer Schablonendicke von 120 μm positiv auf die erzielbare Transfereffizienz aus. Bei einer 100 μm wie auch bei 80 μm dicken Druckschablone ist dieser Effekt ebenfalls nachweisbar, allerdings weniger stark ausgeprägt. Dies lässt sich bei detaillierter Betrachtung der jeweiligen Druckschablone auf das Layout zurückführen, wobei die Variation des Seitenverhältnisses besonders bei der 120 μm Druckschablone stärker auffällig ist (vgl. auch Tabelle 22). Eine weitere Wechselwirkung ist zwischen der Aperturgeometrie und dem Flächenverhältnis feststellbar. Über alle Messreihen hinweg ist der Effekt eines gesteigerten Volumens für kleiner werdende Werte des FV stärker ausgeprägt. Damit ist die Betrachtung des beschriebenen Verhaltens einer gesteigerten Transfereffizienz insbesondere in Grenzbereichen mit kleinen Werten des FV relevant.

Die Analysen der Transfereffizienzen zeigen damit, dass sowohl die Form als auch die Ausrichtung der Aperturen einen deutlichen Einfluss auf das Druckergebnis haben. Im mittleren Durchschnitt kommen der quadratischen Form die geringsten Werte der Transfereffizienz zu. Davon abweichende rechteckige Formen erzielen mit steigendem Aspektverhältnis eine deutliche Erhöhung der Transfereffizienz und erfordern eine detaillierte Betrachtung für das spezifische Verhalten in Wechselwirkung mit der eingesetzten Druckschablone.

Grundsätzlich folgen die erfassten gesteigerten Transfereffizienzen dem ebenso ansteigenden Seitenverhältnis der Aperturvariationen bzw. dem theoretisch möglichen Volumen der vorgesehenen Druckstrukturen. Da sich das Auslöseverhalten aufgrund der kritischen Flächenverhältnisse nicht an die gewünschten 100 % Transfereffizienz annähert und zudem auf Basis der durchgeführten Druckserien eine starke Richtungsabhängigkeit bei rechteckigen Öffnungen festgestellt werden kann, ist eine differenzierte Betrachtung für den Schablonendruckprozess notwendig.

Es gilt bei der Bewertung der Ergebnisse zu beachten, dass im Layout der Druckschablone allgemeine Gestaltungsrichtlinien im Schablonendruck bewusst in kritische Bereiche geführt sind. Im Anhang sind die zugehörigen Werte für die Berechnung der Aspektverhältnisse (vgl. Tabelle 21), der Seitenverhältnisse (vgl. Tabelle 22) sowie der 5-Körnerregel (vgl. Tabelle 23 bzw. Tabelle 24) für den entwickelten Versuchsträger vollständig aufgeführt. Die Verwendung der erforderlichen dünneren Druckschablonen für miniaturisierte Strukturen führt zudem schneller in kritischere Bereiche bei den Empfehlungen zum Aspektverhältnis. Dies könnte ein zuverlässiges Füllen der Aperturen beeinträchtigen, wobei insbesondere die 120 µm Schablone die geringsten Werte aufweist. Da bei dieser Schablonendicke allerdings die höchsten Transfereffizienzen ermittelt werden, kann eine negative Auswirkung bei der Betrachtung dieser Gestaltungsvorgabe für die durchgeführten Druckversuche nicht abgeleitet werden. Bei der weiteren Betrachtung ist ersichtlich, dass bei Anwendung der 5-Körnerregel die Empfehlungen ebenfalls teilweise unterschritten werden, was im Allgemeinen eine herabgesetzte Prozessleistung beim Füllen der Aperturen vorzugsweise bei Verwendung des Lotpastentyps 4 erwarten lässt. Da diese Vorgaben noch keine Aussagen über das reale Auslöseverhalten zulassen, erweitern die durchgeführten Druckversuche die allgemeinen Empfehlungen für den Einsatz insbesondere in den Grenzbereichen.

Der Einfluss des Verhältnisses zwischen längerer zu kürzerer Seite bei rechteckigen Aperturen ist derzeit in den allgemeinen Gestaltungsrichtlinien der IPC-7525B [48] nicht näher berücksichtigt. Insbesondere bei miniaturisierten Strukturen mit kleinen Flächenverhältnissen gilt es, diesen Zusammenhang daher mit in die Schablonenauslegung einfließen zu lassen. Die ermittelte Steigerung der Transfereffizienzen ist stark von der Ausrichtung der langen Seite der Apertur zum Rakelblatt abhängig. Es wird damit das Potenzial aufgezeigt, den Einfluss des Seitenverhältnisses in etablierte Gestaltungsrichtlinien mit einzubeziehen. Ein erster Ansatz hierzu wurde in [85] dargelegt. Hierbei wird die Berechnung zur Ermittlung

des resultierenden Flächenverhältnisses derart erweitert, dass insbesondere bei kritischen Aperturen eine vom Quadrat abweichende Form der Apertur in die Wertermittlung mit eingeht, um die Grenzen für ein prozesssicheres Auslösen der Lotpaste im Schablonendruckprozess genauer bestimmen zu können.

Die Auslegung der Druckschablonen für einen gesicherten Schablonendruckprozess kann mit dieser Betrachtung unterstützt werden. Unterschreitet die Gestaltung der Schablone die als kritisch angenommenen Werte des FV von 0,66, stehen neben materialseitigen Maßnahmen, wie beispielsweise der Verwendung einer nanobeschichteten Schablone oder einer Lotpaste mit feinerer Körnung, auch erweiterte Gestaltungsmöglichkeiten in der Auslegung der Druckschablone zur Verfügung. Damit besteht ein weiterer Ansatz, um das Prozessverhalten unter Einbeziehung des Seitenverhältnisses der Aperturgeometrie besser abschätzen zu können. Ergänzende Druckversuche auf weiteren Versuchsträgern können die aufgezogenen Ergebnisse fortlaufend erweitern, um damit die notwendige Datenbasis für eine Modellbildung bereitzustellen und eine präzisere Vorhersage des Schablonendruckprozesses zu ermöglichen.

3.5 Konzept zur Optimierung der Prozessparameter im Schablonendruck

Die Einführung miniaturisierter Bauelemente bedingt den Einsatz neuer Materialien, wie beispielsweise unterschiedliche Schablonentechnologien, feinkörnige Lotpastenmaterialien oder neue Komponenten für eine optimierte Prozessführung im Schablonendruck. Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Untersuchungen zeigen Grenzen in den Verarbeitungsparametern auf, wobei bei allen Untersuchungen neben dem Lotpastenhersteller und Pastentyp im Wesentlichen die Hauptparameter Druckgeschwindigkeit, Rakeldruck und Trenngeschwindigkeit signifikanten Einfluss auf das Prozessergebnis haben. Neuartige Komponenten und Materialien bedingen dabei aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren im Schablonendruckprozess eine Neubestimmung der Verarbeitungsparameter. Die Identifikation optimierter Parameter für eine gesicherte Prozessführung ist daher wesentliche Grundlage für die Evaluation des Schablonendruckprozesses. Insbesondere im industriellen Umfeld unterstützen systematisch durchgeführte Druckversuche das meist schon in hohem Umfang vorliegende Expertenwissen für eine effiziente Prozessdefinition. Im Folgenden sollen daher mittels statistischer Versuchsplanung Konzepte für die Optimierung des Schablonendrucks gegenübergestellt werden, um mit

einem möglichst geringen Umfang an Druckversuchen mit ausgewählten Faktorkombinationen optimale Prozessparameter zu identifizieren. Hierbei erfolgt eine statistische Bewertung der Auswirkungen auf das Prozessergebnis bei gezielter Parameteranpassung und die Diskussion verschiedener Antwortoptionen zur Zielgrößenoptimierung.

3.5.1 Anwendung der statistischen Versuchsplanung

Grundlegendes Ziel der Versuchsplanung ist es, mit minimalem Kosten- oder Zeitaufwand eine statistisch gestützte Information über ein Produkt oder einen Prozess zu erhalten, um beispielsweise Kundenanforderungen besser zu erfüllen, Fertigungskosten zu verringern oder die Leistungsfähigkeit von Produkten oder Prozessen zu verbessern. Die Auswahl geeigneter Versuchspläne ermöglicht es, Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern und deren Einfluss auf das Ergebnis zu ermitteln. Eine statistische Auswertung hilft dabei, die Aussage und die Wirkzusammenhänge besser darstellen und bewerten zu können. Darüber hinaus werden Fehleinschätzungen aufgrund statistisch gesicherter Datensätze minimiert. [86]

In [87] wurde nachgewiesen, dass sich die statistische Versuchsplanung grundsätzlich auch im Schablonendruckprozess für eine systematische Analyse der Parameter anwenden lässt. Um ein Prozessverhalten optimal beschreiben zu können, ist es häufig unzureichend, vorliegende Daten zu analysieren, die beispielsweise in einem laufenden Fertigungsprozess erhoben werden. Für die Bestimmung des Einflusses von Parametern auf das Prozessergebnis sind gezielte Versuchsreihen erforderlich. Bei der Umsetzung der Versuchsplanung werden bei systematischer Durchführung gezielt ein oder mehrere Parameter gleichzeitig geändert. Damit lassen sich die Gesamtzahl der erforderlichen Versuche reduzieren und zudem verdeckte Wechselwirkungen im Vergleich zu einem unsystematischen Vorgehen (‘one factor at a time’) aufzeigen.

Die Zielgröße beschreibt das ausgewählte Ergebnis der Versuche, das Gegenstand einer Prozessbeschreibung oder Optimierung ist. Am Beispiel des Schablonendruckprozesses handelt es sich entweder um direkte Messwerte wie die Transfereffizienz oder um berechnete Werte wie die erzielte Standardabweichung. Bei der Versuchsplanung können zudem mehrere Antwortoptionen als Zielgrößen definiert werden. Tabelle 10 beschreibt die wesentlichen verwendeten Begriffe der Versuchsplanung mit Anwendung auf den Schablonendruckprozess.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

Tabelle 10: Begriffe der Versuchsplanung

Begriff	Definition	Anwendung bzw. Strategie	Beispiele im Schablonendruckprozess
Zielgröße	Ausgewählte Antwortoptionen des Versuchs	Direkte Messwerte oder berechnete Werte	Transfereffizienz, Standardabweichung, Flächenbedruckungsgrad, Höhe
Einflussgröße	Zielgrößenbeeinflussend, nicht Gegenstand der Untersuchungen	Möglichst konstante Ausprägung	Winkel des Rakelblatts
Steuergröße	Einstellbare Einflussgröße, deren Wert gezielt beeinflusst wird	Möglichst konstante Ausprägung	Rakeldruck
Störgröße	Einflussgröße mit fehlender Möglichkeit zur Kontrolle	Weitestgehende Minimierung	Stochastisches Auslöseverhalten
Faktor	Relevante Einfluss- und Steuergröße	Auswahl nach Signifikanz auf das Prozessergebnis	Rakeldruck, Rakelgeschwindigkeit, Trenngeschwindigkeit
Faktorstufen	Unterschiedliche Ausprägungen eines Faktors nach Versuchsplan	Keine Veränderung innerhalb des Versuchs	Niedrige und hohe Rakelgeschwindigkeit

Die verschiedenen Arten von Versuchsplänen lassen sich grundsätzlich in 3 Hauptgruppen unterteilen. Quadratische Pläne finden bei Untersuchungen Verwendung, um genau eine Einflussgröße und mindestens 2 Störgrößen zu analysieren. Über eine anschließende Varianzanalyse lässt sich die Signifikanz der Störgröße ermitteln. Aus der Analyse lassen sich daher nur wichtige von unwichtigen Einflussgrößen unterscheiden, was einem Modell mit Haupteffekten entspricht, welche direkten Einfluss auf die Zielgröße besitzen. Faktorielle Versuchspläne bieten gegenüber quadratischen Plänen den Vorteil, dass gleichzeitig mehrere Faktoren auf eine oder mehrere Zielgrößen in die Untersuchungen einbezogen werden können. Als Basis der statistischen Versuchsplanung haben faktorielle Pläne eine sehr hohe Aussagekraft und meist eine einfach nachvollziehbare Auslegung des Versuchsplans. Neben der Aussage über Haupteffekte können zusätzlich Aussagen über Wechselwirkungen abgeleitet werden. Der Ansatz von Wirkungsflächen-Versuchsplänen (engl. response surface models) verfolgt die sequenzielle Optimierung der Zielgröße. Innerhalb des mehrstufigen Vorgehens bestimmen die ermittelten Ergebnisse den Aufbau des darauffolgenden Versuchsplans. Je nach verwendeter Methode sind zusätzlich zu Haupteffekten und Wechselwirkungen auch Aussagen über quadratische Effekte möglich.

Für den Einsatz statistischer Versuchsplanung bieten sich aufgrund der Komplexität des Schablonendrucks für eine initiale Prozessparameterermittlung insbesondere faktorielle Versuchspläne an. Ergänzend könnten

Wirkungsflächen-Versuchspläne verwendet werden, wenn bereits durch faktorielle Versuchspläne die Signifikanz der Störgrößen ermittelt wurde. Im Folgenden werden verschiedene Versuchspläne erläutert und für den Einsatz im Schablonendruckprozess bewertet. In Bild 43 sind 3 Arten von faktoriellen Versuchsplänen grafisch dargestellt. [86, 88]

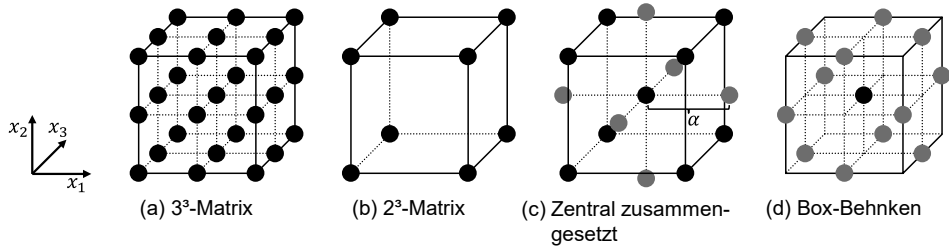


Bild 43: Grafische Darstellung von drei Faktoren (x_1 , x_2 , x_3) in verschiedenen faktoriellen Versuchsplänen

Allgemeine vollfaktorielle Versuchspläne werden eingesetzt, wenn nur geringe Kenntnisse über ein Produkt bzw. einen Prozess vorhanden sind. Sie haben den Vorteil, dass beliebig viele Faktoren untersucht werden können, bei Verwendung von Faktoren mit mehr als 2 Stufen nichtlineare Zusammenhänge erkannt und die Wechselwirkungen jeweils getrennt ausgewertet werden können. Darüber hinaus kann eine systematische Auswertung über die Effektberechnung und Varianzanalyse erfolgen. Mit steigender Anzahl an Faktoren erhöht sich der Versuchsaufwand exponentiell, beispielsweise bereits auf 27 Versuchspunkte bei 3 Faktoren mit jeweils 3 Faktorstufen (vgl. Bild 43a).

Es werden daher verschiedene Strategien verfolgt, den Versuchsumfang möglichst ohne Verlust der wesentlichen Kenntnisse über das Prozessverhalten zu reduzieren. Zweistufige vollfaktorielle Versuchspläne betrachten im Vergleich zu allgemein vollfaktorieller Planung bei reduziertem Versuchsaufwand dieselbe Anzahl an Faktoren, indem nur die Eckpunkte der Faktorstufen beobachtet werden (vgl. Bild 43b). Allerdings wird ein linearer Zusammenhang zwischen den Faktoren und der Zielgröße angenommen, was die Aussagekraft dieser Pläne bei Nicht-Linearität stark einschränkt. Sind mehr als 4 Einflussfaktoren Gegenstand der Untersuchungen, werden zur Reduktion des Versuchsaufwands häufig teilfaktorielle Versuchspläne eingesetzt. Dies führt entweder zu weniger Versuchen bei einer größeren Anzahl überprüfter Hauptinflüsse oder zu weniger Versuchen bei gleicher Zahl an Haupteffekten.

Um die Orthogonalität zu erhalten, werden bei der Auswertung 3-Faktoren-Wechselwirkungen vermengt, da sich deren Effekte häufig ohnehin nicht von der Prozessstreuung separieren lassen. Durch diese Vermengung von Haupteinflussfaktoren und Wechselwirkungen kann es zu Interpretationsfehlern kommen, weshalb die Aussagekraft des Versuchsplans ohne gezielte Vermengung stark eingeschränkt werden kann. Es gilt zu beachten, dass die Überlagerung von Hauptfaktoren mit Wechselwirkungen höherer Ordnung vom Versuchsplangenerator und der Anzahl der Faktoren abhängig ist. Eine Erweiterung der zweistufigen vollfaktoriellen Pläne stellt die Einführung eines Zentralpunkts dar. Dieser ermöglicht eine Abschätzung des angenommenen linearen Zusammenhangs durch Berechnung des Mittelwertabweichungseffekts. Häufig wird durch mehrfache Durchführung der Prozesseinstellungen im Zentralpunkt zusätzlich die Prozessstreuung bestimmt.

Ist die Erweiterung mittels Zentralpunkts nicht ausreichend, können zentral zusammengesetzte Versuchspläne durch die Verwendung eines quadratischen Regressionsmodells komplexere Kurvenverläufe mit einer detaillierteren Beschreibung der Zusammenhänge erreichen. Dabei erfolgt eine Erweiterung eines faktoriellen Versuchsplans mit Zentralpunkt um so genannte Sternpunkte, welche im Abstand α vom Zentralpunkt entfernt liegen (vgl. Bild 43c). Dieser Abstand α ist maßgebend verantwortlich für die Eigenschaften dieses Versuchsplans. Üblicherweise wird auch hier auf die Orthogonalität geachtet, wobei die Faktorstufen alle den gleichen Abstand vom Zentralpunkt besitzen. Der Fall $\alpha = 1$ wird häufig als flächenzentrierter Versuchsplan bezeichnet, da die Sternpunkte bei angenommenen 3 Einflussgrößen auf der Seitenfläche des Würfels liegen. Damit ist der Versuchsplan nicht orthogonal und sollte nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden, beispielsweise aus technischen Gründen oder Grenzen in den Stufenwerten der Faktoren. Aufgrund der höheren Anzahl der überprüften Faktorstufen werden damit Abweichungen von der Linearität der Zielgröße gut erkannt.

Als Alternative zu zentral zusammengesetzten Plänen existieren verschiedene Pläne, wie beispielsweise der Box-Behnken-Versuchsplan, der keinen eingebetteten faktoriellen oder teilfaktoriellen Versuchsplan enthält. Für spezielle Anwendungen kann dieser Versuchsplan aufgrund des geringen Versuchsumfanges sehr gut geeignet sein, um Nicht-Linearität bei geringem Versuchsumfang auszuwerten. Die Variation der Faktoren ist dabei auf 3 Stufen festgelegt. Aufgrund der eingeschränkten Aussagekraft hinsichtlich quadratischer Modellansätze und eines breiteren Vertrauensbereiches im Gegensatz zu zentral zusammengesetzten Plänen kommen

Box-Behnken-Pläne nur bei geeignetem Versuchsziel zum Einsatz. Da diese Art der Versuchsplanung besonders für eine effiziente Untersuchung von 3 oder 4 Faktoren geeignet ist, wird dieser Plan ebenfalls für die Ermittlung von Prozessparametern im Schablonendruck in dieser Arbeit berücksichtigt. [86, 88–90]

3.5.2 Analyse und Bewertung faktorieller Versuchspläne

Zur systematischen Ermittlung von Prozessparametern sind quadratische Versuchspläne aufgrund des eingeschränkten Betrachtungsbereichs ungeeignet. Der Einsatz von Wirkungsflächen-Versuchsplänen hat dagegen häufig die Optimierung des Prozesses zum Ziel und erfordert ein sehr gutes Verständnis des Initialzustands vor den Untersuchungen. Für eine effiziente Ermittlung der Prozessparameter bei neuartigen Materialkombinationen erscheint die Anwendung faktorieller Versuchspläne bei überschaubarer Komplexität als sehr gut geeignet. Darüber hinaus können durch gezielte Erweiterung auch nichtlineare Zusammenhänge aufgezeigt werden. Im Folgenden werden die dargestellten grundlegenden faktoriellen Versuchspläne hinsichtlich der Eignung zur Prozessparameterermittlung im Schablonendruck überprüft. Der Fokus hierbei liegt in einem möglichst geringen Versuchsumfang und einer genauen Bestimmung der Prozessparameter. Die Zielgröße nimmt bei der Auswertung statistischer Versuchspläne eine wesentliche Rolle ein. Neben der eigentlichen Art des Versuchsplans werden daher insbesondere mögliche Antwortoptionen für die Bestimmung der Prozessparameter gegenübergestellt, welche für die Beschreibung der Prozessleistung im Schablonendruck verwendet werden können.

Für die Versuchsreihen wird ein entwickeltes Layout verwendet, welches ein breites Spektrum an Bauelementen abdeckt. Neben BGA- und Leadless-Bauteilen mit Anschlussstrukturen direkt unter dem Gehäusekörper sind annähernd 1.000 Bauelemente der Größe 01005 berücksichtigt, um die Auswertung am Beispiel miniaturisierter Anschlussstrukturen durchzuführen. Die verschiedenen Technologien der Bauteile sind dabei segmentartig über die komplette Leiterplatte hinweg angeordnet. Bild 44 stellt den schematischen Aufbau der Leiterplatte grafisch dar.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

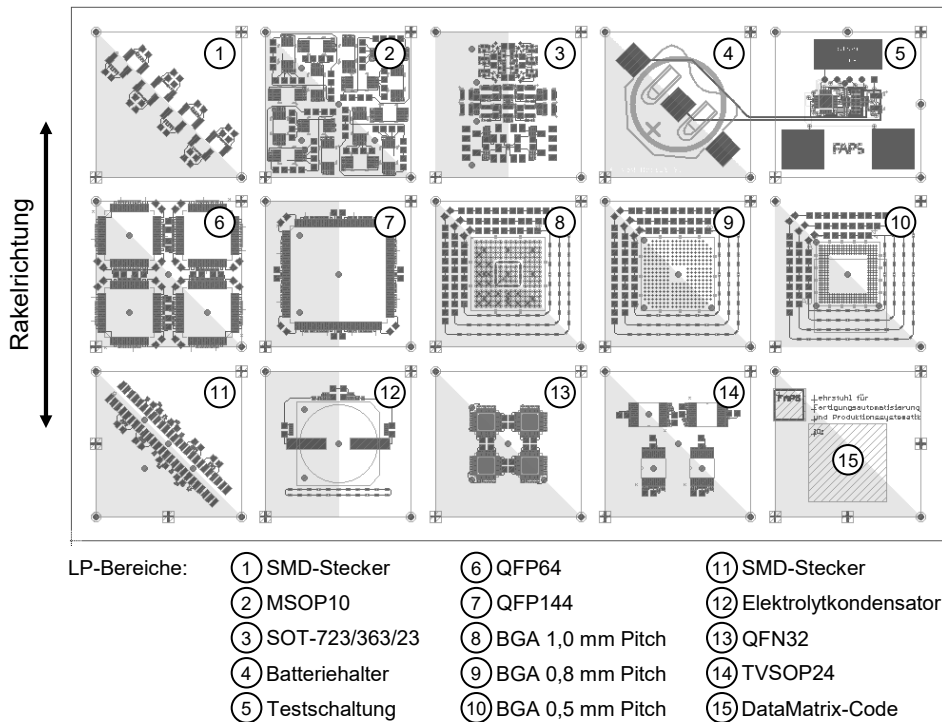


Bild 44: Entwickeltes Layout der Leiterplatte mit Komponenten der Baugröße 01005 in Mischbestückung

Die Durchführung der Druckversuche auf dieser Leiterplatte erfolgt mit dem Schablonendrucker DEK Horizon 03iX und Rakeln mit einer Länge von 200 mm. Initial werden 125 g einer SAC305-Lotpaste vom Typ 5,5 aufgetragen und gewalzt, um eine weitestgehend homogene Verteilung sicherzustellen. Die Vermessung der gedruckten Depots erfolgt direkt im Anschluss mittels 3D-Lotpasteninspektion, wobei zunächst auf die Transfereffizienz als wesentliche Zielgröße fokussiert wird. Nach Aufbereitung der Messdaten erfolgt die weitere Verarbeitung in der Statistiksoftware ‚Minitab‘, wobei Haupteffekte und Wechselwirkungen betrachtet werden. Die Gesamtübersicht der 4 jeweils eigenständig überprüften Versuchspläne ist in Tabelle 11 veranschaulicht, wobei die systematischen Nummern randomisiert und für jeden Versuchspunkt 3 aufeinander folgende Drucke durchgeführt werden mit anschließender maschineninternen Reinigung im Modus Nass-Vakuum-Trocken und Anpassung der Faktorstufen.

Tabelle 11: Berücksichtigte Versuchspläne und Faktorstufen der Druckserien

Syst. Nr.	a) Zweistufig mit ZP			b) Zusammengesetzt			c) Flächenzentriert			d) Box-Behnken		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	0
4	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	0
5	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0	-1
6	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	0	-1
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	0	+1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	+1
9	0	0	0	- α	0	0	-1	0	0	0	-1	-1
10				+ α	0	0	+1	0	0	0	+1	-1
11				0	- α	0	0	-1	0	0	-1	+1
12				0	+ α	0	0	+1	0	0	+1	+1
13				0	0	- α	0	0	-1	0	0	0
14				0	0	+ α	0	0	+1			
15				0	0	0	0	0	0			

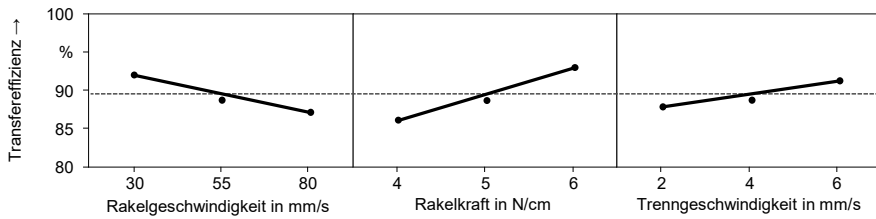
Gewählte Stufenparameter der Faktoren:

Faktor	Faktorstufe				
	- α	-1	0	+1	+ α
A - Druckgeschwindigkeit in mm/s	12,96	30	55	80	97,04
B - Rakeldruck in kg pro 100 mm Rakellänge	1,66	2	2,5	3	3,34
C - Trenngeschwindigkeit in mm/s	0,64	2	4	6	7,36

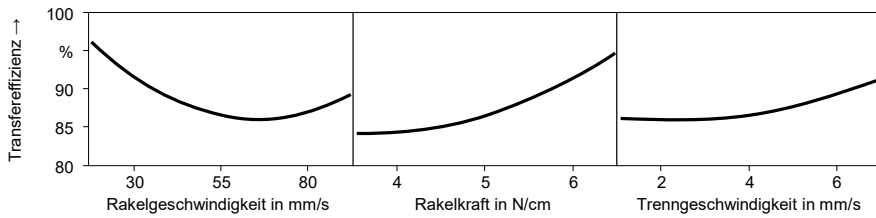
Die Analyse der Druckversuche ergibt, dass grundsätzlich alle Versuchspläne für den Einsatz im Schablonendruckprozess geeignet und daher für die praktische Anwendung im industriellen Umfeld relevant sind. Dies zeigt sich an vergleichbaren Ergebnissen der standardisierten Effekte der untersuchten Parameter für die zunächst fokussierte Transfereffizienz. In Bild 45 sind die berechneten Haupteffekte der untersuchten Versuchspläne gegenübergestellt.

3 Evaluation des Schablonendruckprozesses für den optimierten Lotpastenauftrag feiner Strukturen

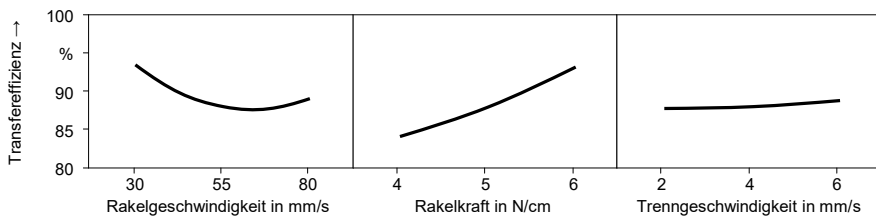
a) Vollfaktoriell



b) Zentral zusammengesetzt



c) Flächenzentriert



d) Box-Behnken

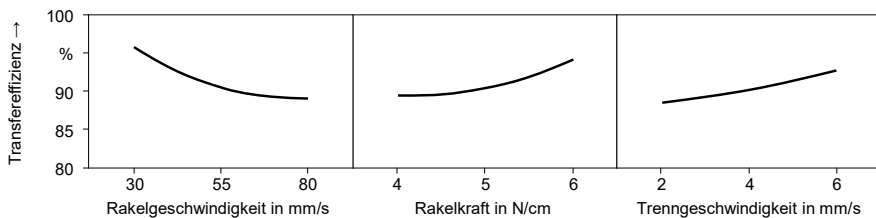


Bild 45: Berechnete Haupteffekte der untersuchten Versuchspläne

Insbesondere bei miniaturisierten Strukturen wird allerdings ein hoher Detaillierungsgrad benötigt, um das Prozessverhalten möglichst präzise beschreiben zu können. Bei der Bewertung des zweistufig vollfaktoriellen Versuchsplans besteht die Gefahr, dass die Annahme eines linearen Zusammenhangs nicht ausreichend für den Druckprozess ist, was sich durch eine abweichende Lage des Zentralpunktes äußert und damit keine gesicherte Aussage bezüglich der Nicht-Linearität des Prozessverhaltens erlaubt. Der zentral zusammengesetzte Versuchsplan mit Sternpunkten weist eine deutlich höhere Aussagekraft zum Prozessverhalten auf.

Für die Verwendung im Schablonendruck erscheint dieser Versuchsplan nur eingeschränkt geeignet, da die vergleichsweise hohen Abweichungen der Sternpunkte das Prozessverhalten sehr stark beeinflussen können. Die Prozessparameter der Sternpunkte zeigen dabei teilweise deutlich überhöhte Transfereffizienzen, was die Gefahr von Fehlinterpretationen beinhaltet. In den Messreihen sind dabei bei gestiegenen Transfereffizienzen bei Sternpunkten ebenfalls die Streuung der Messwerte sowie Fehlerbilder wie Brückenbildungen aufgetreten, die sich negativ auf die weiteren Prozesse der Fertigungskette auswirken können.

Mit der Annahme von $\alpha = 1$ werden im flächenzentrierten Versuchsplan nur Parameterkombinationen untersucht, welche sich je nach Auswahl der Eckpunkte innerhalb des üblicherweise gut zu verarbeiteten Bereichs befinden. Die Effektberechnungen erweitern dabei die Erkenntnisse des zweistufig vollfaktoriellen Versuchsplans mittels quadratischen Zusammenhängen. Darüber hinaus befinden sich alle Parameter ohne Sternpunkte innerhalb der gewählten Ecken des Versuchswürfels und sind daher grundsätzlich auch für eine weitergehende Optimierung im laufenden Prozess geeignet. Der Box-Behnken-Versuchsplan ist aufgrund seines geringen Versuchsumfanges insbesondere für die Anwendung im industriellen Umfeld interessant, bei der nur eine möglichst kurze Untersuchungsdauer eingeräumt wird. Dabei kommt es im Vergleich zu abweichenden Ergebnissen bei der Effektberechnung. Durch den Wegfall der Eckpunkte treten mathematische Ungenauigkeiten bei der Modellbildung auf, wonach der Box-Behnken-Versuchsplan nur dann angewendet werden sollte, wenn eine geringe Anzahl der notwendigen Versuche eine hohe Priorität hat. Tabelle 12 stellt die analysierten Versuchspläne gegenüber.

Tabelle 12: Zusammenfassende Bewertung der analysierten Versuchspläne zur Ermittlung optimierter Prozessparameter im Schablonendruck

Untersuchter Versuchsplan	Eignung zur Ermittlung der Prozessparameter	Möglichst geringer Versuchsumfang
Zweistufig vollfaktoriell mit Zentralpunkt	-	++
Zentral zusammengesetzt mit Sternpunkten	o	o
Flächenzentriert zentral zusammengesetzt	++	o
Box-Behnken	o	+

nicht erfüllt (--), kaum erfüllt (-), halb erfüllt (o), nahezu voll erfüllt (+), voll erfüllt (++)

Bei der statistischen Auswertung ist zu beachten, dass die Modellgüte und Signifikanz der Wechselwirkungen in hohem Maße vom verwendeten Layout der Leiterplatten, der Auslegung der Druckschablone und dem Schablonendrucker selbst abhängt. Anhand der Betrachtung der Varianz der Einzeldrucke gilt es, die Anzahl der notwendigen für die Auswertung zu erfassenden gedruckten Substrate abzuwägen und bei Notwendigkeit anzupassen.

Neben der häufig angewendeten Transfereffizienz, welche das theoretisch mögliche Volumen der Apertur zur tatsächlich gemessenen Lotpaste ins Verhältnis setzt, sind auch weitere Zielgrößen als Antwortoptionen möglich. Daher werden anhand der durchgeführten Druckversuche verschiedene Antwortoptionen unter Verwendung des flächenzentrierten Versuchsplans analysiert und hinsichtlich der Eignung zur Prozessbeschreibung bewertet. Die tabellarische Übersicht der Einzelergebnisse ist im Anhang aufgeführt (vgl. Tabelle 25).

Der arithmetische Mittelwert der Transfereffizienz ist mit dem Durchschnitt aller Beobachtungen für die jeweilige Stufe der Faktorkombinationen bestimmt und eine Kennzahl für die Verteilungstendenz. Der Median der Transfereffizienz ist zwar deutlich robuster gegenüber Ausreißern. Allerdings liefert die Berücksichtigung der Ausreißer wertvolle Zusatzinformationen zum Prozessverhalten, insbesondere bei mischbestückten Leiterplatten mit miniaturisierten Bauelementen und damit einem kritischen Auslöseverhalten im Druckprozess. Typische Fehlerbilder können darüber hinaus verstärkt in das Prüfergebnis einbezogen werden, um diese Effekte für ein ideales Prozessfenster zu berücksichtigen. Auf Basis der durchgeführten Versuchsreihen kann aufgezeigt werden, dass Brückenbildungen oder ein unzureichender Auftrag von Lotpaste zur Messwertkorrektur eingesetzt werden kann. Je nach individuellem Schwellenwert für ein zu gering bedrucktes Pad sowie zur Erfassung einer Druckbrücke hat sich eine Herabstufung genau dieses Messwerts auf einen Wert von -100 % Volumen als geeignet herausgestellt, um bei einer Effektberechnung detektierte Fehlstellen im Druck für eine bessere Identifikation optimierter Prozessparameter mit einfließen zu lassen. Neben der Standardabweichung zur Beurteilung der Streuung, des Flächenbedruckungsgrades zur Ermittlung des Füllgrades sowie der Druckhöhe, welche insbesondere bei Stufenschablonen einen wertvollen Indikator darstellt, steht mit der vorgeschlagenen angepassten Transfereffizienz eine geeignete Antwortoption zur Verwendung im Rahmen statistischer Versuchspläne zur Verfügung. Tabelle 13 fasst die Empfehlungen zur Verwendung verschiedener Antwortoptionen zusammen.

Tabelle 13: Bewertung möglicher Zielwerte zur Optimierung des Schablonendruckprozesses

Untersuchte Varianten der Transfereffizienz als Antwortoption	Eignung zur Optimierung des Zielwerts
Arithmetischer Mittelwert	+
Arithmetischer Mittelwert mit Anpassung für Fehler ‚Druckbrücke‘	o
Arithmetischer Mittelwert mit Anpassung für Fehler ‚Druckbrücke‘ und ‚Unzureichend‘	++
Median	o
Standardabweichung	++

nicht erfüllt (--), kaum erfüllt (-), halb erfüllt (o), nahezu voll erfüllt (+), voll erfüllt (++)

3.5.3 Ableitung eines systematischen Vorgehens mittels DOE

Der Einsatz der statistischen Versuchsplanung stellt eine etablierte Methode für die Ermittlung von Druckparametern dar. Damit steht bei neuartigen Komponenten und Materialien eine effiziente Möglichkeit zur Verfügung, Prozessfenster im Schablonendruck für miniaturisierte Bauformen zu bestimmen. Für den Einsatz im industriellen Umfeld wird dabei neben einer einfachen Vorgehensweise und wirtschaftlichen Aspekten zum Versuchsumfang auch die Verarbeitbarkeit der gedruckten Strukturen in den weiteren Prozessschritten berücksichtigt. Die systematische Ermittlung von Prozessparametern kann dabei in folgende Schritte unterteilt werden:

- Gleichmäßige Segmentierung der Leiterplatte
- Aufstellen und Durchführung eines statistischen Versuchsplans
- Auswertung der Versuche mit geeigneten Zielgrößen
- Optimierung der Antwortoptionen
- Validierung der Prozessparameter

Ziel des Vorgehens ist eine statistisch gesicherte Aussage zur Auswahl der Prozessparameter im Schablonendruck für die Verwendung im industriellen Umfeld. Im ersten Schritt wird die Leiterplatte in gleichmäßige Segmente unterteilt. Dies können örtliche Positionen nach dem Layout der Leiterplatte sein oder auch eine gruppierte Zusammenfassung nach den Werten der resultierenden Flächenverhältnisse aus der Druckschablone. Ergänzend hierzu kann eine weitere Analyse der gewählten Segmente nach der Dichte hochminiaturisierter Bauelemente erfolgen. Basierend auf den

dargestellten Analysen des letzten Abschnitts wird auf Grundlage eines flächenzentrierten Versuchsplans der Versuchsablauf definiert, der weitestgehend randomisiert durchgeführt werden sollte. Die gewählten Einflussgrößen sollten sich dabei an den identifizierten Haupteinflussgrößen im Schablonendruck orientieren, wie beispielsweise der Rakelgeschwindigkeit, dem Rakeldruck oder der Trenngeschwindigkeit. Die Auswahl der Faktorstufen innerhalb eines technologisch sinnvollen Prozessfensters ermöglicht die Weiterverarbeitung der bedruckten Leiterplatten in den Folgeprozessen. Zur Absicherung der Aussagekraft gilt es, eine geeignete Anzahl an Replikationen (z. B. mindestens 3 Leiterplatten), maschinenspezifisches Verhalten (z. B. Anpassung des Rakeldrucks nach Parameteränderung) sowie eine maschineninterne Reinigung der Schablone nach jedem Versuchspunkt zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollten Auffälligkeiten während der Durchführung der Druckversuche dokumentiert werden, um dies in die Interpretation der erfassten Messwerte mit einfließen lassen zu können. Programme zur statistischen Versuchsplanung ermöglichen die rechnergestützte Auswertung des Versuchsplans anhand der gewählten Antwortoptionen. Ferner können diese Programme mittels Zielgrößenoptimierung einen berechneten Parametersatz mit Prognosewerten liefern, beispielsweise für die Erreichung der angepassten Transfereffizienz mit Berücksichtigung von Druckfehlern an einen bestimmten Sollwert oder die Minimierung der Standardabweichung. Die derart bestimmten Parameter werden im abschließenden Schritt in die gewählten Segmente mit der höchsten Dichte an miniaturisierten Elementen und damit den Positionen mit einem höheren Potenzial für Fehldrucke eingesetzt. Die Zielgrößenoptimierung für diese Auswahl ermöglicht es, einen spezifischen Parametersatz insbesondere für kritische druckbare Bereiche bereitzustellen. Ein Abgleich dieser Konfiguration mit der Optimierung auf der gesamten Leiterplatte bietet dabei die Bestimmung einer annähernd optimalen Parameterkombination für eine gesicherte Transfereffizienz bei geringer Fehlerquote.

Die dargestellte Methodik eignet sich zudem für die Implementierung in ein automatisiertes Lernverfahren, welches autark ohne Bedienereinfluss ausgeführt werden kann. Es gilt hierbei, die Anpassungen der Prozessparameter nur innerhalb technologischer Grenzen, insbesondere hinsichtlich der verwendeten Lotpaste und der vorliegenden Flächenverhältnisse, zu variieren. Im Zusammenspiel einer angepassten Ergebnisauswertung der Lotpasteninspektion mit dem Schablonendrucker kann die Optimierung der verwendeten Prozessparameter erfolgen. Neben einer Reduzierung

oder gezielten Auslösung des maschineninternen Reinigungsprozesses besteht hiermit die Möglichkeit einer Prozessanpassung im laufenden Betrieb, um den Lotpastenauftrag im Schablonendruck robust zu gestalten. Für die Überführung der Parameteroptimierung in ein mathematisches Modell ist dabei in Abhängigkeit der Messmittelfähigkeit und der Prozessstreuung eine deutliche Erhöhung der erfassten bedruckten Leiterplatten erforderlich, um die notwendige Datenbasis bereitstellen zu können. An dieser Stelle sei beispielsweise auf erste Ansätze in [91] oder [92, 93] zur Anwendung im Schablonendruckprozess verwiesen, welche als Datengrundlage über 500 Leiterplatten einbezogen haben.

3.6 Kriterien des Schablonendruckprozesses für hochminiaturisierte Komponenten

Ein robuster Prozess zum Auftrag des Verbindungsmediums ist eine Schlüsselanforderung bei der Verarbeitung hochminiaturisierter Bauelemente. Es gilt daher das Prozessfenster des Schablonendrucks für zukünftige Bauelementtypen möglichst präzise zu beschreiben. Neben der Bauelementgröße 01005 stellt insbesondere die Bauform 03015M bis hin zu 008004 (0201M) hohe Anforderungen zur Beherrschung des Druckprozesses. Die Kenntnis zum Verhalten verschiedener Aperturformen bei kritischen Flächenverhältnissen unterstützt dabei die gesicherte Verarbeitung kleinster Lotpastendepots in grenzwertigen Einbausituationen auf komplexen Baugruppen.

Für die Untersuchungen zum Schablonendruckprozess von Strukturen der Bauteilgröße 01005 wurde ein spezifischer Versuchsträger entwickelt. In den Analysen zum Schablonendruck konnte gezeigt werden, dass die verwendete Lotpaste und die Dicke der Druckschablone signifikanten Einfluss auf das Prozessergebnis haben. In den Untersuchungen haben sich eine feinkörnigere Lotpaste vom Typ 5 und die Verwendung einer Druckschablone mit 80 µm Dicke als vorteilhaft herausgestellt. Zudem wirkte sich eine diagonale Ausrichtung der Aperturen bezüglich der Druckrichtung günstig auf die erzielbare Transfereffizienz aus. Es gilt, die Prozessparameter, die Gestaltung der Leiterplatte und Schablone sowie die beteiligten Materialien aufeinander abzustimmen, um eine optimierte Prozessleistung erreichen zu können.

Die Analyse weiterer Miniaturisierungsschritte wurde anhand der Bauteilgröße 03015M durchgeführt und eine weitere Teststruktur entwickelt. Die Verwendung eines schwarz eloxierten Basismaterials hat sich als vorteilhaft erwiesen, um substratbedingte Störgrößen möglichst gering zu halten und

um den Fokus der Untersuchungen auf die Prozessparameter zu lenken. Als Haupteffekte konnten signifikante Effekte der Schablonendicke, des verwendeten Lotpastentyps und der Funktionalisierung der Schablonenoberfläche nachgewiesen werden. Identifizierte Wechselwirkungen beispielsweise der Orientierung und der Ausführung der Aperturen deuten auf eine hohe Komplexität bei der Evaluation der Prozessparameter hin.

Der Einfluss der Aperturform und des Flächenverhältnisses auf Qualitätsmerkmale im Schablonendruckprozess war bisher in der Literatur nicht ausreichend untersucht. Hierzu wurde eine Teststruktur konzipiert, die bei definierten Flächenverhältnissen eine Variation des Seitenverhältnisses beinhaltet. Es konnte belegt werden, dass je nach Ausrichtung und Parameterkombination Steigerungen der Transfereffizienzen von 5 % bis 10 % möglich sind. Damit kann bei der Auslegung der Druckschablone in Grenzbereichen ein zusätzlicher Indikator herangezogen werden, um das Auslöseverhalten und damit die Prozessleistung insbesondere bei miniaturisierten Strukturen bereits in der Designphase besser bewerten zu können.

Die Verwendung der statistischen Versuchsplanung ist im industriellen Umfeld ein verbreitetes Werkzeug, um Prozesse analysieren und stabilisieren zu können. Speziell für den Schablonendruckprozess wurden unterschiedliche Arten von Versuchsplänen angewendet und mit verschiedenen Varianten der Transfereffizienz als Antwortoption anhand von Druckversuchen auf einer entwickelten Demonstratorschaltung analysiert. Die Zielstellung verfolgte dabei ein möglichst strukturiertes Vorgehen für die einfache Anwendung im industriellen Umfeld. Es konnte auf Basis der Analysen ein systematisches Vorgehen zur Optimierung von Druckparametern, beispielsweise bei der Einführung neuer Komponenten und Materialien, abgeleitet werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass dem Schablonendruckprozess für miniaturisierte Strukturen eine hohe Komplexität zuzuordnen ist. Die genaue Beschreibung der Einbausituationen ist entscheidend, um Prozessparameter für die Verarbeitung in einem robusten Produktionsprozess definieren zu können. Neben den grundlegend beschriebenen Effekten und Wechselwirkungen innovativer Materialien für miniaturisierte Komponenten wird die spezifische Einzelbetrachtung als notwendig erachtet, um die erzielbare Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses bewerten zu können.

4 Prozessfenster für den Bestück- und Reflow-Lötprozess von Komponenten der Baugröße 01005

Im Bestückprozess werden SMT-Komponenten in das vorher aufgebraute Verbindungsmedium gesetzt. Dieser Prozessschritt ist geprägt von einem hohen Automatisierungsgrad und der Forderung nach großer Flexibilität bei der Verarbeitung. Die notwendige Genauigkeit zur Einführung von Bauformen mit miniaturisierten Abmessungen ist mit modernen Bestückungsautomaten seit der Verwendung einer direkten Lageerfassung mit hochauflösenden Messsystemen und Linearantrieben mit dynamischer Lageregelung häufig ohne tiefgreifende Anpassungen gegeben. Die erzielbare Qualität der Bestückung ist zum einen beeinflusst durch die Art der Bauelementzuführung, die mittels Rolle, Stange, Magazinsystem oder als Schüttgut erfolgen kann. Darüber hinaus gilt es, die verwendete Pipette derart auszulegen, dass eine sichere Handhabung von Bauelementen mit kleinsten Abmessungen ohne Vorschädigung und in einem robusten Prozess mit höchster Verfügbarkeit ermöglicht wird.

Auf dieser Basis werden für Bauteile der EIA-Größe 01005 die Wechselwirkungen aus der Gestaltung der Leiterplatte, dem verwendeten Lotpastenmaterial und der Auslegung der Druckschablone auf die erzielbare Qualität im abschließenden Reflow-Lötprozess bestimmt. Bei Betrachtung der Toleranzkette und der stochastischen Verteilung des Bestückprozesses ist trotz optimierter Prozessführung eine auftretende Abweichung der Bauelemente in Bezug zur Sollposition nach dem Bestückprozess nicht zu vermeiden. Es werden daher die möglichen auftretenden Zustände bei der Verarbeitung der Bauteile analysiert und unter verschiedenen Randbedingungen, wie dem Versatz des Bauelementes, dem Versatz des Lotpastenauftrags und einem kombinierten Zustand der Abweichungen anhand realer Baugruppen im Rahmen einer Musterproduktion verifiziert.

4.1 Anforderungen an den Bestückprozess miniaturisierter Komponenten

Mit immer kleiner werdenden Bauelementen steigen ebenso die Anforderungen an die Prozessführung in der gesamten Verarbeitungskette. Die präzise Platzierung der Komponenten stellt ein wesentliches Element dar, Baugruppen mit einer hohen Qualität fertigen zu können. Im Folgenden

werden hierzu Begrifflichkeiten und verwendete Berechnungsgrundlagen aufgezeigt. Insbesondere die Definition der Bestückgenauigkeit und das Vorgehen zum Nachweis der Maschinen- bzw. Prozessfähigkeit sollen dargelegt werden. Die genaue Kenntnis der Bestückgenauigkeit stellt die Grundlage zur Abschätzung der erzielbaren Verarbeitungsqualität sowie die Basis für die Identifikation von Einflussfaktoren auf den Bestückprozess dar.

Die Begriffsdefinitionen lassen sich nach [94] in 3 wesentliche Kenngrößen zusammenfassen. Die Bestückgenauigkeit definiert die Abweichung der Bestückposition von der Sollposition des Bauelements. Es wird hier unterschieden in Positionsfehler mit translatorischen Abweichungen Δx bzw. Δy (x- bzw. y-Versatz) sowie einer rotatorischen Abweichung $\Delta\phi$ zur Beschreibung des Drehfehlers. Auch Verwindungen des Portalsystems, Fehler der Visionmodule und Zentrierfehler werden hierbei berücksichtigt. Die Positioniergenauigkeit charakterisiert dagegen lediglich Abweichungen zur Sollposition der linearen Achsen und ggf. der Pipetten. Dreh- und Zentrierfehler werden hierbei ebenso wie die tatsächliche Istposition der bestückten Bauteile nicht betrachtet. Die Wiederholgenauigkeit ist definiert über die Abweichung bei erneutem Anfahren der wiederholt anzufahrenden Position. Für die gezielte Entwicklung und Optimierung präziser Bestückungsautomaten ist diese Unterscheidung bei der Beschreibung der erzielbaren Genauigkeit von hoher Bedeutung. Für den Anwender ist im Wesentlichen die Bestückgenauigkeit entscheidend, um in der Produktion einen robusten Fertigungsprozess zu erreichen.

Die Abweichung eines Bauteils von der tatsächlichen Istposition zur programmierten Sollposition setzt sich aus einer reproduzierbaren sowie einer zufälligen Komponente zusammen. Die systematische Abweichung kann durch gezielte Kalibriermaßnahmen beeinflusst werden. Der stochastische Anteil unterliegt dagegen wie viele technische Prozesse einem gewissen Zufall und lässt sich häufig durch eine Normalverteilung darstellen, was beispielsweise in [95] experimentell nachgewiesen wurde. Der Mittelwert μ ist durch das arithmetische Mittel der systematischen Abweichungen beschrieben und berechnet sich mit dem Stichprobenumfang n für den Versatz Δx nach

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (4.1)$$

Unter Annahme eines Mittelwerts $\mu = 0$ kennzeichnet die verbleibende Abweichung die zufällige Komponente des Bestückvorgangs. Die Normalverteilung einer stetigen Zufallsgröße x , der Mittelwert μ , die Standardabweichung σ und die Varianz σ^2 ist durch folgende Dichtefunktion beschrieben

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.2)$$

Die Dichtefunktion entspricht dabei einer Gaußschen Glockenkurve, welche bei der einfachen Standardabweichung vom Mittelwert ($\mu - \sigma$ sowie $\mu + \sigma$) einen Wendepunkt der Kurve besitzt. Die Standardabweichung stellt demnach ein Maß für die Güte des Bestückautomaten dar und ermöglicht eine exakte mathematische Beschreibung der Bestückgenauigkeit. Die Standardabweichung σ ist anhand der zweiten Ableitung der Gleichung (4.2) definiert durch

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i + \mu)^2} \quad (4.3)$$

Zur Bestimmung der Bestückgenauigkeit wird üblicherweise eine ausreichende Anzahl hochpräziser Bauelemente auf einer Glasplatte verarbeitet und vermessen [96]. Nach Bestimmung des Versatzes in translatorischer Richtung und des Drehfehlers kann die Häufigkeit der Verteilung in die Dichtefunktion der Versatzwerte überführt werden. Zur Beurteilung der Qualität eines Bestückungsautomaten ist daher die Angabe der Bestückgenauigkeit in Bezug auf die Standardabweichung notwendig, um weitere Abschätzungen hinsichtlich Prozessfähigkeit treffen zu können. In Bild 46 sind die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Bestückversatz, Dichtefunktion und dem Zusammenhang einer Abweichung d in Abhängigkeit der Standardabweichung σ und potenzieller Fehlerrate aufgezeigt.

Die Angabe der Bestückgenauigkeit erfolgt häufig in Form von beispielsweise $\pm 40 \mu\text{m}$ (3σ). Dies beinhaltet die Beschreibung, dass die verarbeiteten Bauelemente mit einer Wahrscheinlichkeit P innerhalb der spezifizierten Grenzen $\pm 40 \mu\text{m}$ liegen. Die Fehlerwahrscheinlichkeit $1 - P$ drückt dagegen die Häufigkeit der Lage von Bauelementen außerhalb des angegebenen Intervalls aus und lässt damit Rückschlüsse auf die langfristige Prozessleistung und die erreichbare Fehlerrate in dpm zu.

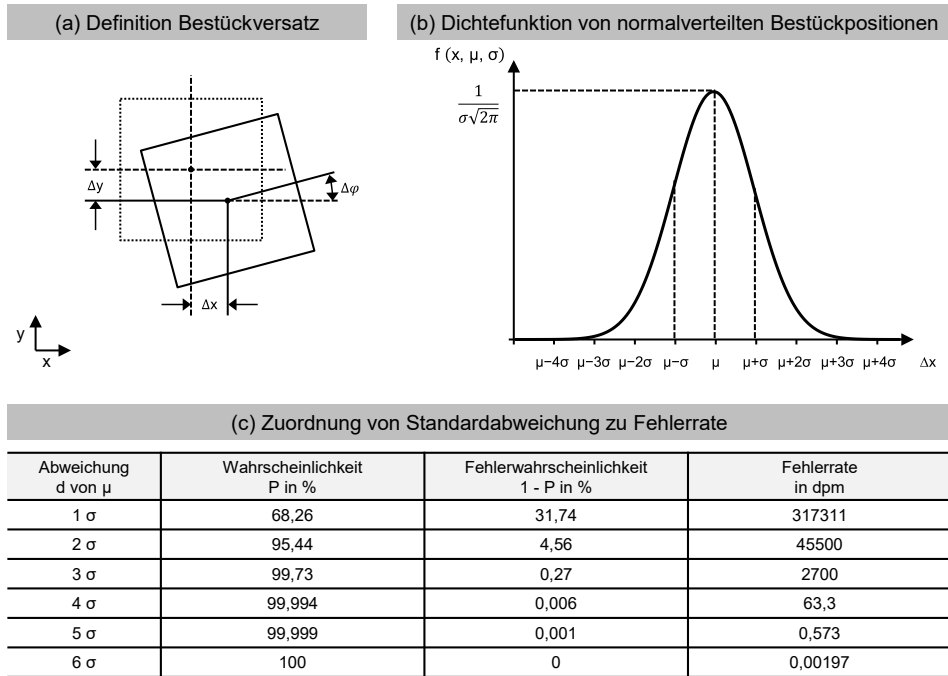


Bild 46: Abweichung eines quadratischen Bauelements von der Sollposition (a), Dichtefunktion bei Normalverteilung (b) und Zuordnung von Standardabweichung zu Fehlerrate (c) nach [94, 95, 97]

Der Nachweis zur Beherrschung des Verarbeitungsprozesses erfolgt bei Abnahme einer Bestückanlage mittels Maschinenfähigkeitsuntersuchung. Es erfolgt zur Bestimmung der Bestückgenauigkeit die Verarbeitung von idealen Bauelementen (z. B. aus Keramik oder Glas) auf einer idealen Leiterplatte (z. B. maßhaltige Glasträgerplatte). Durch Vermessung der bestückten Bauteile werden die vorherrschenden Abweichungen bestimmt. Die Auswertung der statistischen Merkmale resultiert in der Ableitung von Fähigkeitskoeffizienten innerhalb definierter Spezifikationsgrenzen.

Die standardisierten Berechnungsmethoden sind in [98] dargelegt und basieren auf verschiedenen Prozessmodellen. Unter Annahme eines stabilen Prozesses mit Normalverteilung kann das klassische Modell („Methode M1“) angewendet werden. Zur Bestimmung der Maschinenfähigkeit c_m ist zunächst die Definition der Spezifikationsgrenzen erforderlich. Die Lage der oberen (OSG) und unteren Spezifikationsgrenze (USG) befindet sich symmetrisch zur Sollposition.

Damit erfolgt die Berechnung aus dem Verhältnis der Toleranz zur Streubreite nach

$$c_m = \frac{OSG - USG}{6\sigma} \quad (4.4)$$

Die kritische Maschinenfähigkeit c_{mk} berücksichtigt zusätzlich, dass sich die Lage des Prozessmittelwerts üblicherweise nicht in der Mitte der Toleranz befindet. Der Wert von c_{mk} basiert daher auf dem geringeren Abstand der Prozessstreuung zu der entsprechenden Toleranzgrenze und ist definiert als

$$c_{mk} = \min\left(\frac{OSG - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - USG}{3\sigma}\right) \quad (4.5)$$

In der industriellen Praxis werden derart bestimmte Fähigkeitsindizes benutzt, um die Qualität von Prozessen zu beurteilen und zu vergleichen. Die Festlegung der Anforderungen erfolgt häufig firmenspezifisch, wonach die Grenzwerte für Qualitätsfähigkeitskenngrößen nicht allgemein geregelt sind. In [99] sind als typische Maschinengrenzwerte für $c_m > 2,33$ und $c_{mk} > 2,0$ aufgeführt, ebenso gebräuchlich sind Angaben für $c_m > 2,0$ und $c_{mk} > 1,67$ [96, 99].

Zusammengefasst nach [97] sind folgende Schritte notwendig, um die Fähigkeitskoeffizienten zu ermitteln:

- Festlegung der Qualitätsmerkmale
- Eindeutige Definition der Toleranzgrenzen
- Auswahl eines fähigen Messmittels und der Messmethode zur Erfassung der Qualitätsmerkmale
- Überprüfung der statistischen Eigenschaften (z. B. Verteilungstyp und Prozessmodell)

Die derart bestimmten Fähigkeitskennwerte sind durch die Verwendung idealisierter Komponenten, wie beispielsweise spezielle Bauelemente und ein maßhaltiges Trägersubstrat, der Maschinenfähigkeit zuzuordnen und stellen eine wesentliche Basis zur Evaluation der Maschine dar. Aufgrund des Untersuchungsumfangs wird ebenso der Begriff Kurzzeitfähigkeit verwendet. Im Rahmen der Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU) werden darüber hinaus weitere Einflussgrößen berücksichtigt, welche bei einer laufenden Serienproduktion vorherrschen. In der Betrachtung einer realen Fertigungsumgebung wirken dabei weitere Faktoren aus Mensch (z. B. Bedienung), Material (z. B. Komponenten und Leiterplatten) oder auch

Umwelt (äußere Einflüsse) auf den Prozess ein. Die Berechnungsgrundlagen der PFU zur Bestimmung der Prozessfähigkeit c_p bzw. der kritischen Prozessfähigkeit c_{pk} sind analog zu den Gleichungen (4.4) und (4.5). Die aufgezeigten Berechnungsmethoden gelten nur für den Fall, dass die ermittelten Messwerte normalverteilt sind. Daher muss für die Anwendung im Bestückprozess eine Unterscheidung in einen möglichen Versatz Δx sowie Δy erfolgen. Im Folgenden wird bewusst der Begriff Maschinenfähigkeit verwendet, da die durchgeführten Untersuchungen unter idealisierten Laborbedingungen stattgefunden haben. [96, 99]

4.1.1 Bestimmung der Bestückgenauigkeit

Zur Bestimmung der Maschinenfähigkeit von SMD-Bestückungsautomaten werden vergleichende Untersuchungen mit unterschiedlichen Bauelementtypen durchgeführt. Hiermit sollen der Einfluss des Bauelementtyps sowie die grundsätzliche Fähigkeit der Platzierung von Komponenten der Baugröße 01005 bestimmt werden. Das Vorgehen lehnt sich dabei an die Vorgaben der IPC-9850 an [100]. Die gewählte Methodik zur Vermessung der bestückten Bauteile basiert ebenfalls auf den Empfehlungen in [100]. Ein Koordinatenmessgerät erfasst hier zunächst 4 lokale Referenzmarken des Trägermaterials, die sich jeweils umlaufend um die bestückten Bauteile befinden. Anhand dieser Sollposition werden im Anschluss die Abweichungen in Δx bzw. Δy sowie die Verdrehung $\Delta\phi$ als Qualitätsmerkmale erfasst (vgl. Bild 47).

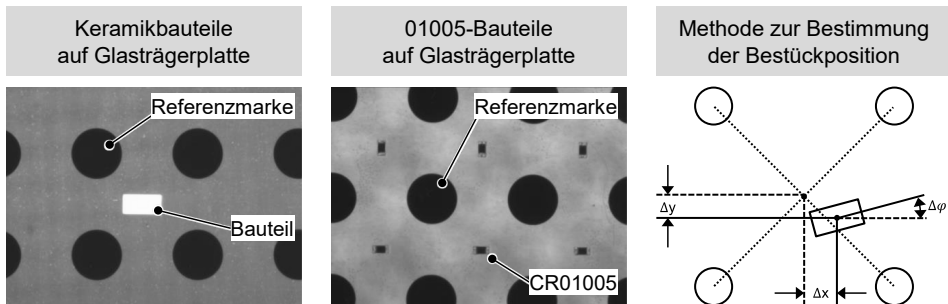


Bild 47: Bestimmung der Bestückposition von Bauelementen der Größe 01005 und Keramikbauteilen als Referenz

Zu Versuchsbeginn erfolgen zur Berücksichtigung der Eigenerwärmung mehrere Simulationsläufe der Bestücksequenz des Automaten. In jeder Versuchsreihe werden 192 Bauelemente verarbeitet, wobei zum einen hochpräzise Keramikbauelemente mit Abmessungen von $1.000\ \mu\text{m}$ auf $500\ \mu\text{m}$ zum Einsatz kommen.

Zum anderen erfolgen weitere Bestückserien mit Widerständen der Baugröße 01005 mit Abmessungen von 400 μm Länge und 200 μm Breite. Die Auswertung der erzielten Genauigkeit weist unterschiedliche Ergebnisse in Abhängigkeit des Bauelementtyps auf, wie in den Bestückdiagrammen in Bild 48 dargestellt.

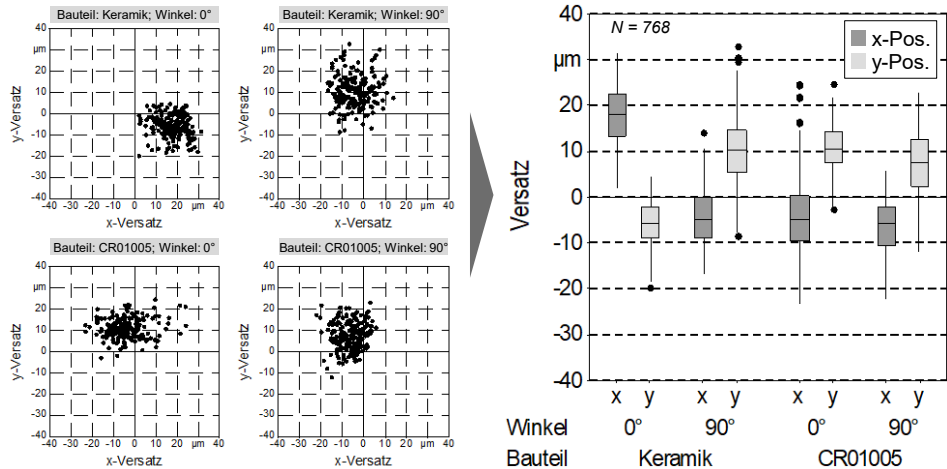


Bild 48: Ermittelte x/y-Bestückdiagramme und Boxplots der unterschiedlichen Bauelementtypen für 0° und 90°-Ausrichtung

Jeder Bauelementtyp wird in 0°-Lage sowie mit einer Verdrehung von 90° auf einer Glaskalibrierplatte verarbeitet. Das gewählte Verfahrenprofil des Bestückvorgangs entspricht der vollen Leistung des Automaten ohne definierte Reduzierung von Geschwindigkeiten im Bestückvorgang, um die seriennahe Verarbeitung der Bauteile nachzustellen. Der eingesetzte Bestückungsautomat ist mit einer Bestückgenauigkeit von $\pm 41 \mu\text{m}$ (3σ) in x-/y-Richtung und einer Winkelgenauigkeit von $\pm 0,5^\circ$ (3σ) spezifiziert.

Bei der Vermessung der Keramikbauteile ist ein systematischer Versatz um etwa 16 μm bei 0°- bzw. ca. 9 μm bei 90°-Orientierung feststellbar. Die ermittelten Abweichungen in y-Richtung bei 0°- sowie x-Richtung bei 90°-Ausrichtung sind mit 4 μm bzw. 5 μm dagegen deutlich geringer. In einer Detailbetrachtung lässt sich hierbei kein zeitreihenbedingter Effekt innerhalb der Versuchsreihe aufzeigen. Die Abweichungen bei Komponenten der Baugröße 01005 sind dagegen gleichartig, wobei sich die systematischen Abweichungen in y-Richtung um etwa 6 μm bis 10 μm befinden. Die Streuung der ermittelten Werte für die x-Richtung bei 0°-Ausrichtung bzw. y-Richtung bei 90°-Ausrichtung ist leicht erhöht, was sich innerhalb der Vermessung auf die bauelementbedingt schwierigere Kantendetektion aufgrund der Rundung der Metallisierung der Bauteilkappen zurückführen

lässt. Eine Zusammenfassung der erreichten Qualitätsmerkmale ist in Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 14: Ermittelte Qualitätsmerkmale mit unterschiedlichen Bauformen für USG = -50 µm und OSG = +50 µm

Bauteil	Keramikbauteil				CR01005			
	0° (N = 190)		90° (N = 191)		0° (N = 191)		90° (N = 192)	
Größe	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
μ in µm	15,78	-5,45	-4,00	9,38	-3,80	9,68	-5,83	6,41
σ in µm	5,65	4,79	5,94	6,74	7,63	4,35	5,15	6,00
c _m	2,95	3,48	2,81	2,48	2,19	3,84	3,23	2,78
c _{mk}	2,02	3,10	2,59	2,01	2,02	3,09	2,86	2,42

Neben dem reinen Bestückprozess gilt es den Einfluss der Messung der Bestückposition und dabei insbesondere der Kantendetektion von Bauteilen bei automatisierter Erfassung des Messsystems zu betrachten. Im direkten Vergleich der Bauteilgröße CR01005 mit den verarbeiteten Keramikbauteilen werden vergleichbare Werte für die Streuung der ermittelten Bestückpositionen erzielt. Mit angenommenen Spezifikationsgrenzen von ±50 µm ergeben sich für den 01005-Bestückprozess Werte für die kritische Maschinenfähigkeit von über 2,0. Für den Einsatz in der Praxis ist nach [96] eine komponentenbezogene Fähigkeit des Bestückautomaten als gegeben anzusehen und die strenge Einhaltung der Spezifikationen ist nur für Extremkomponenten erforderlich. Für spezifische Komponenten können demnach systematische Versätze bis zu einer gewissen Ausprägung geduldet werden. Für miniaturisierte Komponenten gilt es, Mindestspezifikationen für den automatisierten Bestückprozess abzuleiten und auf Basis von Messungen zur Ermittlung der Maschinenfähigkeiten Korrekturen, beispielsweise durch Feinkalibrierungen, vorzunehmen. Auf Grundlage der aufgeführten Grenzwerte von $c_{mk} > 1,67$ bzw. $c_{mk} > 2,0$ in [96, 99] wird für die Versuchsreihen in den folgenden Unterkapiteln die ermittelte Bestückgenauigkeit des verwendeten Bestückautomaten von $c_{mk} > 2,0$ (vgl. Tabelle 14) für die Verarbeitung der untersuchten Bauelementformen als fähig bestätigt.

4.1.2 Einfluss der Prozessführung auf die erzielbare Qualität

Mit zunehmender Miniaturisierung wird das Bestücken kleinster Bauelemente vor neue Herausforderungen gestellt. Neben einer ausreichenden Bestückgenauigkeit des Automaten, die im vorangegangenen Unterkapitel erläutert wurde, sind weitere Einflussfaktoren für die gesicherte Verarbeitung von Bauteilen der Größe 01005 entscheidend. Insbesondere bei der Verwendung von Schablonendicken und Lotpastenklassen, die für die Verarbeitung größerer Bauelemente ausgelegt sind, werden verhältnismäßig große Lotpastendepots aufgedruckt. Beim Bestückprozess kann dies folglich in Abhängigkeit des Bauelementversatzes zur Verkippung des Bauelementes und in Abhängigkeit der Bestückkraft zur Verquetschung der Lotpaste mit unterschiedlichen Eindringtiefen in das Lotpastendepot führen. Überhöhte Kräfte im Bestückprozess können darüber hinaus bereits bei der Herstellung einer Baugruppe aufgrund der mechanischen Beanspruchung zu Rissbildungen in Bauelementen führen. Derartige Vorschädigungen sind durch optische Inspektionsmethoden nicht zu detektieren und auch in einer anschließenden elektrischen Prüfung zu einem Großteil nicht auffällig, was zu Frühausfällen der Baugruppe im Feld führen kann. Daher gilt es, die bei der Montage auftretenden möglichen Überlastungen auf miniaturisierte Bauteile nachzustellen und zu analysieren.

Verkippung von Bauelementen im Bestückprozess und Verquetschen der Lotpaste

Um das mögliche Verhalten von Bauelementen der Baugröße 01005 im Bestückprozess hinsichtlich Verkippung zu untersuchen, werden insgesamt 1.400 Kondensatoren mit einem programmierten Bestückversatz verarbeitet. Es soll hierbei analysiert werden, wie sich die Bestückung mit 50 % Versatz bezogen auf die Metallisierung auf den Bestückprozess auswirkt, um die Neigung zur Verkippung aufgrund des halbseitigen Auftreffens auf das Lotpastenmaterial nachzustellen. Darüber hinaus werden weitere 1.400 Kondensatoren ohne Bestückversatz mittig auf die Sollposition platziert, um den Referenzprozess zu beurteilen. Die Verarbeitung der Bauelemente erfolgt direkt im Anschluss an den Auftrag der Lotpaste vom Typ 5 mit unterschiedlichen Lotpastenvolumina.

Die Bestückversuche erfolgen auf dem entwickelten Demonstrator aus Abschnitt 2.2, wobei jeweils 140 Bauelemente auf die Felder A, E, H, I und K platziert werden (vgl. auch Bild 10). Im Anschluss an den Bestückprozess

erfolgt die Vermessung der bestückten Bauelemente mittels Lasermikroskopie. Die berücksichtigten Abweichungen und das Erscheinungsbild der Bauelemente mit programmiertem Versatz sind in Bild 49 dargestellt.



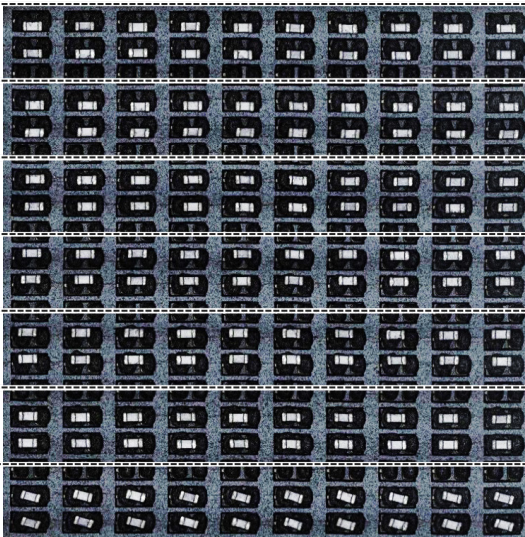
Programmierte Abweichungen				Lichtaufnahme bestückter Bauteile mit Versatzwerten	
Reihe	x-Position	y-Position	Winkel		Maßstab: 1 mm 
R1	0	-100 µm	0		
R2	+50 µm	-100 µm	0		
R3	+50 µm	0	0		
R4	0	+100 µm	0		
R5	-50 µm	+100 µm	0		
R6	-50 µm	0	0		
R7	0	0	+15°		

Bild 49: Programmierte Abweichungen im Bestückprozess zur Bestimmung der Verkipfung von Bauteilen

Die ermittelte Neigung mit programmiertem Versatz beträgt dabei unabhängig von der gewählten Parameterkombination in allen Fällen weniger als 1° bezogen auf die horizontale bzw. vertikale Lage des Bauteils in der Lotpaste. Die gewählte Bestückkraft der Versuchsreihen entspricht annähernd der Federkonstante im verwendeten Bestückkopf und beträgt etwa 2,0 N. Damit ist die Verkipfung von Bauelementen der Größe 01005 bei Verwendung eines geeigneten Verfahrsprofils als nicht signifikant einzuschätzen.

Neben einer möglichen Verkipfung besteht bei Bauteilen in feinen Strukturen weiterhin auch die Gefahr des Verquetschens von Lotpaste im Bestückprozess. Daher werden zur Bestimmung der Eindringtiefe in die aufgebrauchten Lotdepots weitere 420 Bauelemente mit unterschiedlichen Bestückkräften verarbeitet. Für die Erhöhung der Bestückkraft auf 5,0 N bzw. 10,0 N zur Nachbildung potenzieller Überlastung von Bauteilen bei der Bestückung sind manuelle Eingriffe in das Verfahrsprofil notwendig, da diese Kräfte üblicherweise in Bestückungsautomaten nicht für die Platzierung

kleiner Bauformen vorgesehen sind. Im Anschluss an die Bestückversuche erfolgen zunächst die Beurteilung des Erscheinungsbildes am Lichtmikroskop sowie eine Vermessung der Eindringtiefe. In Bild 50 sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Bestückkräfte exemplarisch gegenübergestellt. Die hohe Menge an Paste ist für diese Versuchsreihe bewusst durch ein verhältnismäßig großes Layout im Schablonendruckprozess berücksichtigt.

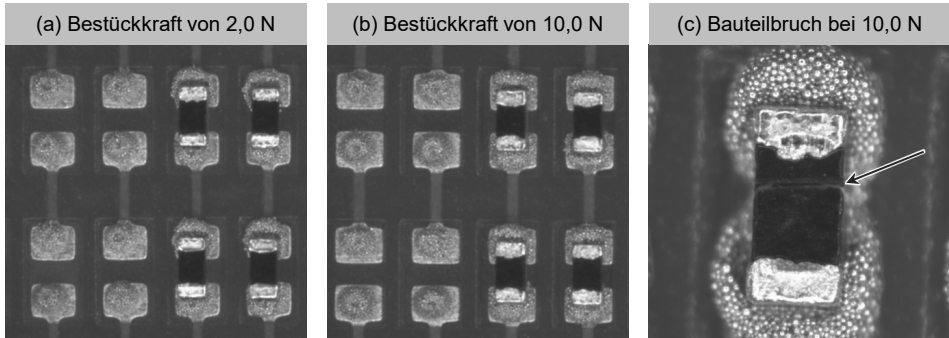


Bild 50: Optisches Erscheinungsbild bei unterschiedlichen Bestückkräften und mögliche Bauteilschädigung bei überhöhter Krafteinwirkung

Bei der optischen Beurteilung weisen die verwendeten Bestückkräfte von 2,0 N, 5,0 N sowie 10,0 N keine offensichtlichen Unterschiede hinsichtlich des Verdrückens von Lotpaste auf. Das grundsätzlich mögliche Verschmieren von Lotpaste sollte dennoch bei einem engen Rastermaß bzw. engen Abständen im Bestückungsbild in Abhängigkeit der gewählten Randparameter beachtet werden. Die vergleichsweise hoch gewählte Bestückkraft von 10,0 N führt nach den durchgeführten Messungen mittels Laserscanning-Mikroskop zu einer maximal 13,5 μm höheren Eindringtiefe in die Lotpastendepots im Vergleich zum Referenzprozess mit etwa 2,0 N. Die applizierte Lotpaste bildet auf Basis der Versuchsreihe für das Auftreffen des Bauteils im Bestückvorgang eine vergleichsweise feste Auftrefffläche, was in der Verbindung der dicht gepackten Metallpartikel mit dem Flussmittelsystem begründet liegt. Die Unterschiede der gewählten Bestückkräfte hinsichtlich Verquetschung von Lotpastenmaterial werden als weniger relevant eingestuft als die Bauteilschädigungen, die an 3 Widerständen der Versuchsreihe nachweisbar sind. Die Analyse dieser Einbauversuche deutet daher bereits an, dass eine verhältnismäßig hohe Krafteinwirkung von etwa 10,0 N im Bestückprozess zu einer Schädigung einzelner Bauteile führen kann.

Bauteilschädigung durch Biegebelastung im Bestückprozess

Durch Biegebelastung während der Montage kann insbesondere bei Vielschicht-Kondensatoren die Bildung von Rissen induziert werden. Bei einem Versagen der Isolierung zwischen den beiden Elektroden resultiert dies in einer elektrischen Verbindung und führt zu einem Kurzschluss mit lokaler Überhitzung. Spannungsinduzierte Schädigungen an MLCCs stellen ein bekanntes Fehlerbild dar. Durch alternative Aufbauvarianten sollen Biegerisse verhindert oder deren Auswirkungen im Fehlerfall insbesondere in kritischen Funktionen abgemildert werden. Die am weitesten verbreiteten Alternativen sind in Bild 51 aufgeführt.

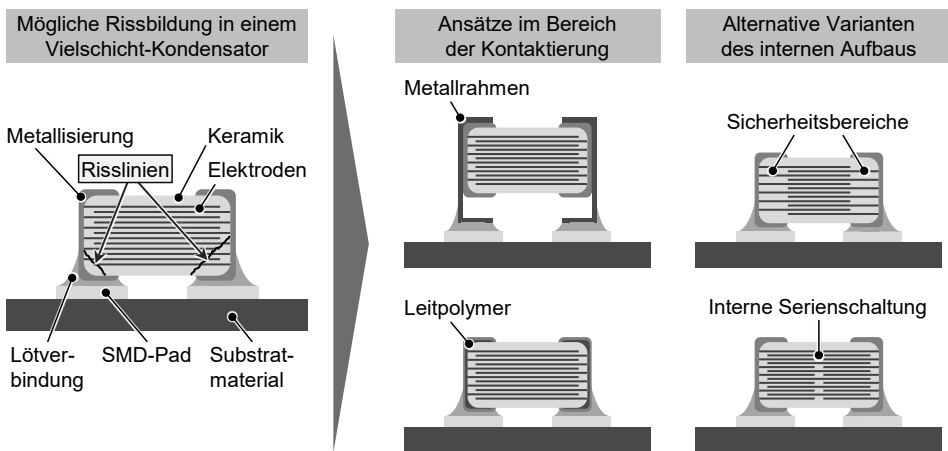


Bild 51: Typisches Auftreten von Biegerissen in Vielschicht-Kondensatoren und Lösungsansätze durch alternative Aufbauvarianten [101, 102]

Die Verwendung eines Metallrahmens (engl. lead frame) ermöglicht zum einen das Stapeln mehrerer Kondensatoren zur Erhöhung der Kapazität. Zum anderen wird hierdurch die Biegebelastung durch den Rahmen aufgenommen und nicht direkt auf die Kontaktierung des eigentlichen Bauteils übertragen. Eine weitere Möglichkeit zur Robustheitssteigerung der Kontaktierung besteht in der Verwendung eines elektrisch leitfähigen Polymers zur Trennung des Schichtaufbaus innerhalb des Kondensators (engl. soft termination). Damit können auftretende Biegebelastungen durch das elastische Polymer verringert werden. Auch ein optimierter Aufbau der Elektroden innerhalb eines Kondensators bietet Vorteile im Fehlerfall, ist allerdings mit deutlichen Einschränkungen hinsichtlich des Verlusts der Kapazität pro Volumen verbunden. Durch Aussparungen der aktiven Elektrodenfläche im Randbereich werden Sicherheitsbereiche geschaffen, an denen die Lagen der anderen Polaritäten nicht in den möglichen Bruchstellen überlappen (engl. open mode). Weiterhin ermöglicht die interne

Serienschaltung zweier Kondensatoren die Verhinderung der Bildung von Kurzschlüssen (engl. float mode).

Durch hohe Feuchtigkeit kann bei Rissbildung der beschriebene Ausfallmechanismus der Verbindung begünstigt werden. Um Bauteilschädigungen bei MLCCs der Baugröße 01005 zu untersuchen, werden im Folgenden Baugruppen mit unterschiedlichen Bestückkräften verarbeitet und anschließend einer Feuchte-Wärme-Lagerung ausgesetzt. Für die Bewertung einer möglichen mechanischen Beschädigung im Montageprozess werden insgesamt 4.800 Bauelemente mit unterschiedlichen Prozessparametern bestückt.

Der Aufbau erfolgt auf 2 Feldern pro Leiterplatte mit unterschiedlicher Ausrichtung bezüglich der Druckrichtung mit jeweils 200 parallel geschalteten Positionen, die für die Bestückung der Keramik Kondensatoren mit je 10 nF vorgesehen sind. Um die Bestückkraft variieren zu können, wird das Fahrprofil des verwendeten Bestückungsautomaten manuell entsprechend angepasst. Damit stehen insgesamt je 4 Leiterplatten mit Bestückkräften von 5,0 N und 10,0 N und einem Referenzprozess von etwa 2,0 N zur Verfügung. Die Ergebnisse des Produktionsprozesses werden zunächst mittels Lichtmikroskop bewertet und hinsichtlich möglicher Auffälligkeiten geprüft. Daraufhin folgt eine Auslagerung im Klimaschrank bei +85 °C mit 85 % relativer Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von 500 Stunden.

Pro Feld wird auf jeder Leiterplatte die Gesamtkapazität der je 200 Kondensatoren initial sowie zu definierten Zeitpunkten der Feuchte-Wärme-Auslagerung bestimmt. Für eine bessere Vergleichbarkeit ist in Bild 52 der Wert der Gesamtkapazität zum Zeitpunkt $C(t)$ bezogen auf den Startwert C der Gesamtkapazität über die Zeit aufgetragen. Alle Mittelwerte und Standardabweichungen liegen in der tolerierten Schwankungsbreite unter Berücksichtigung der Herstellertoleranz von $\pm 10\%$.

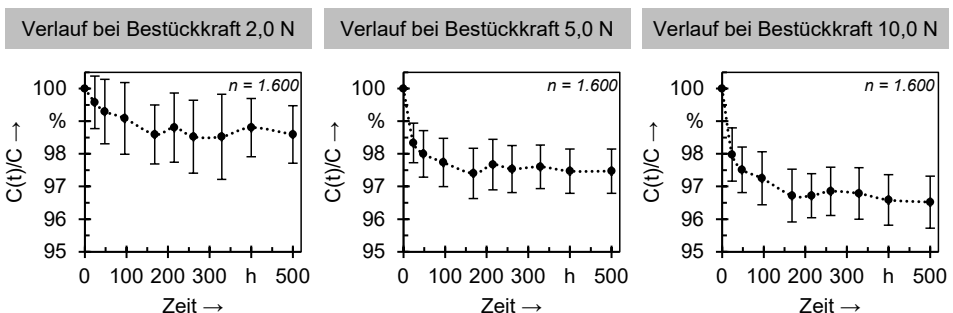


Bild 52: Verhalten der Gesamtkapazität der verarbeiteten Flachbaugruppen bei Feuchte-Wärme-Auslagerung (+85 °C/85 % rel. Feuchte)

Zu Beginn beträgt der Messzyklus alle 24 Stunden, danach erfolgt im Abstand von 48 bis 72 Stunden die Entnahme und Messung der Probekörper. Anhand der Messungen ist erkennbar, dass die Gesamtkapazität der einzelnen Messreihen bei allen Proben während des Betrachtungszeitraums abnimmt. Durch Anlegen einer Referenzspannung, mit der entsprechend schaltungstechnischen Voraussetzung, könnte dieser Effekt weiter verstärkt werden, um die Dendritenbildung an Stellen mit Vorschädigungen zu beschleunigen. Zu Beginn der Messungen ist der gemessene Abfall der Kapazität stärker ausgeprägt, im weiteren Verlauf nähert sich die Kapazitätsabnahme einem Grenzwert an. Bei der Referenzbestückung mit etwa 2,0 N ist über die beobachteten 500 Stunden eine Abnahme der Kapazität von 1,5 % zu verzeichnen. Je größer die eingesetzte Bestückkraft, desto stärker verringert sich die gemessene Gesamtkapazität. Besonders in den ersten 48 Stunden zeigen die Messreihe 5,0 N und 10,0 N eine deutliche Abnahme.

Die Gesamtkapazität der Versuchsreihen mit erhöhten Bestückkräften ist nach 500 Stunden Auslagerung in der Klimakammer um ca. 2,5 % bei 5,0 N bzw. 3,5 % bei 10 N herabgesetzt. Vermutlich erfahren Bauelemente, die mit einer größeren Bestückkraft bestückt sind, eine gewisse Vorschädigung, die aufgrund der Belastung in der Feuchte-Wärme-Belastung sichtbar wird, wenn auch in geringem Umfang zum Initialwert. Eine potenzielle Ursache kann das Eindringen von Wasser in Mikrorisse darstellen, welches sich im Abfall der Kapazität eines Bauelements zeigt. Nach den Anfangseffekten an spezifischen Einbauplätzen ist dieser Prozess weitestgehend vollendet und die Kapazität sinkt in herabgesetztem Maße, da keine weiteren Schädigungen induziert werden. Dadurch streben die Messungen einem Grenzwert entgegen, der ab etwa 180 Stunden mit nur noch leichten Schwankungen um einen Sättigungswert bei allen Proben vorherrscht.

Bei der Betrachtung unter dem Mikroskop wird abschließend jede Baugruppe nach Auffälligkeiten und möglichen ausgebildeten Beschädigungen untersucht. Bei vereinzelt Bauelementen deuten sich bereits optische Veränderungen nach 500 Stunden Auslagerung in der Klimakammer an. Bild 53 zeigt mögliche sichtbare Beschädigungen von Bauelementen aus der Bestückserie 5,0 N bzw. 10,0 N. Die Auffälligkeiten mit leichten Vertiefungen oder Verfärbungen sind zum einen auf der Oberseite des Keramikgrundkörpers erkennbar. Insbesondere Bauteile aus den Messreihen mit 5,0 N und 10,0 N weisen sichtbare optische Veränderungen der Oberfläche auf, die möglicherweise auch in die Tiefe des Bauelementes eindringen und damit eine erhebliche Beschädigung des Bauteils darstellen.

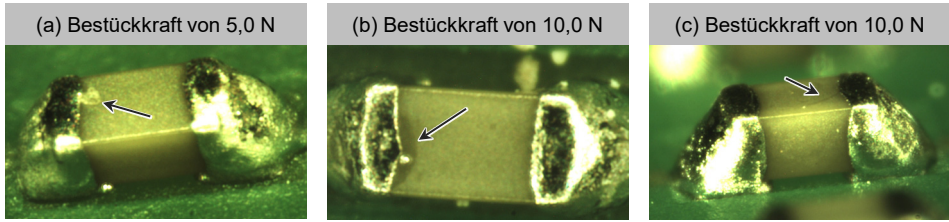


Bild 53: Sichtbare Beschädigungen auf der Bauteiloberseite aufgrund überhöhter Bestückkraft nach Feuchte-Wärme-Auslagerung

Die Beeinträchtigung reicht von Haarrissen in der Mitte des Keramikkörpers in Bild 53 (c), die vermutlich auch in das Innere des Bauteils vordringen, bis hin zu Veränderungen an der Metallisierung in Bild 53 (a, b) mit deutlichen Verfärbungen. Zum anderen sind weitere Auffälligkeiten an der Seite des Bauteilkörpers erkennbar, wie in Bild 54 gekennzeichnet. Die bruchähnlichen Stellen, an denen sich das Bauelement optisch verfärbt, sind auf beiden Seiten gleichermaßen zu finden. Nach optischer Beurteilung hat sich hier ein Bruchspalt gebildet, der durch den gesamten Körper des Bauelements verläuft. Er befindet sich nahezu in der Mitte des Bauelementkörpers. Hier wirkt die Belastung durch das Biegemoment resultierend aus der Bestückkraft über die verwendete Pipette maximal.

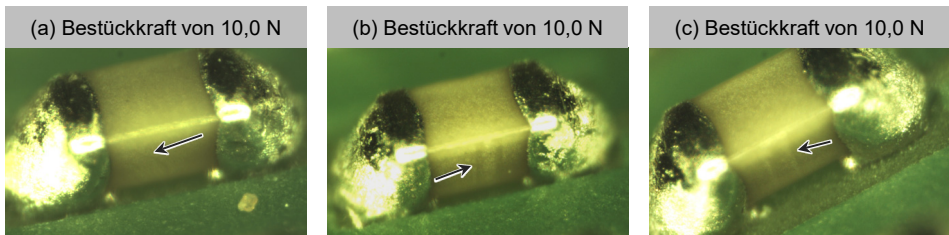


Bild 54: Sichtbare Beschädigungen auf der Seite von Bauteilkörpern aufgrund überhöhter Bestückkraft nach Feuchte-Wärme-Auslagerung

Die besten Ergebnisse in Bezug auf Widerstandsfähigkeit und Haltbarkeit unter der Feuchte-Wärme-Auslagerung werden bei den Bauelementen erzielt, die mit der niedrigsten Bestückkraft verarbeitet wurden. Aufgrund der gezeigten Beobachtungen lässt sich ableiten, dass für das Bestücken von 01005-Bauelementen eine möglichst geringe Bestückkraft angestrebt werden sollte. Neben der Auswahl einer geeigneten MLCC-Aufbauvariante gilt es darüber hinaus, auch den Einbauort hinsichtlich möglicher Krafteinwirkung bei der Gehäusemontage sowie bei thermomechanischer Belastung durch Verspannungen auf der Leiterplatte zu betrachten. Damit können spannungsinduzierte Schädigungen an Keramik-Kondensatoren effektiv verhindert werden.

4.1.3 Empfehlungen für die Gestaltung des Bestückprozesses

Für einen robusten Bestückprozess ist zunächst die Aufnahme des Bauelements aus der Bauteilzuführung entscheidend. Hier spielen nach [103] Maßhaltigkeit und Toleranzen der Bauteilabmessungen, die Qualität der Zuführung (beispielsweise des Bauteilgurtes), die Genauigkeit der Feederstellposition sowie die verwendete Pipette eine entscheidende Rolle. Insbesondere die Anlieferform miniaturisierter Zweipoler weist nach [104] Herausforderungen bei statischer Aufladung der Folie auf.

Das Verhältnis von Umverpackung zur eigentlichen Bauteilgröße führt zu verschiedenen Entwicklungen der Anlieferform, wie beispielsweise der Verwendung eines Feeders zur Aufnahme einer 4 mm Gurtbreite oder zu Modulen zur Verarbeitung kleinster Bauelemente in Form von Schüttgut. Nach [65] ermöglichen eine höhere Auflösung der Kamera und ein optimiertes Pipettendesign nach erfolgter Bauteilaufnahme den Bestückprozess mit niedriger Fehlerrate gestalten zu können. Das Visionsystem zur Erkennung der Bauelemente muss eine ausreichend hohe Auslösung besitzen, um anhand der Aufnahmeposition eine korrigierte Bestückposition bestimmen zu können. Ebenso müssen Defekte wie gekippte Bauelemente zuverlässig erkannt werden. Die Überwachung von Bauteilabwürfen während des Verfahrensweges ist bei den erforderlichen Pipettenabmessungen für Bauteile der EIA-Größe 01005 und kleiner nicht trivial. Eine Überwachung des Vakuum-Wertes während des Verfahrensweges kann unter Umständen nicht ausreichend sein, so dass auf ergänzende Überwachungen wie beispielsweise eine Messung mittels Lasersensorik zurückgegriffen werden muss.

Ebenso muss der eigentliche Bestückprozess mit angepassten Bestückkräften und Beschleunigungswerten optimal eingestellt werden, um Verquetschen von Lotpaste oder mechanische Bauteilschädigungen zu verhindern. Eine geeignete Unterstützung des Substratmaterials sollte hierbei Vibrationen während des Bestückprozesses weitestgehend vermeiden. Es gilt zu beachten, dass insbesondere aufgrund der geringeren Höhe von Widerständen im Vergleich zu Kondensatoren bei der Baugröße 01005 die Gefahr des Kontakts von Pipette zu Lotpaste besteht. Die Gestaltung der Pipette sollte daher im Idealfall derart ausgeführt sein, dass die Pipettengröße das Bauelement nicht überragt, um nicht in Berührung mit bereits bestückten Bauelementen zu kommen. An dieser Stelle sei auf die ergänzende Diskussion der Einflussparameter auf den Bestückprozess mittels Ishikawa-Diagramm in Abschnitt 5.1 verwiesen.

4.2 Evaluation von Einflussparametern auf den Selbstzentriereffekt

Die Verarbeitung der Bauelementgröße 01005 stellt sowohl an die Produktionsprozesse als auch an die verschiedenen Inspektionsschritte erhebliche Ansprüche. Trotz zahlreicher Veröffentlichungen, in denen die Verarbeitung von 01005-Bauteilen thematisiert wurde (beispielsweise in [63, 65, 66, 68, 70, 105–108]), bestehen weiterhin weder eindeutige Empfehlungen noch gesicherte Prozessfenster oder eine vollständige Beschreibung potenzieller Fehlerursachen. Ein häufig auftretender Fehler bei 01005-Bauteilen ist die Tombstone-Bildung, bei der sich das zweipolige Bauelement durch eine einseitige Kontaktierung aufrichtet. Beispielhafte Ursachen können ein unzureichender Lotpastenauftrag, ein Versatz im Bestückprozess oder eine unzureichende Prozessführung im abschließenden Reflow-Lötprozess sein. Eine zuverlässige und automatisierte Inspektion dieser Baugröße zur Kontrolle aller wesentlichen 3D-Merkmale bringt eine Vielzahl an Herausforderungen für das einzusetzende AOI-System.

Im Rahmen der durch statistische Verfahren gestützten Untersuchungen werden in einer Musterproduktion Baugruppen mit insgesamt 44.800 Bauelementen unter Variation signifikanter Einflussfaktoren verarbeitet. In der anschließenden AOI-Prüfung gilt es, die teilweise provozierte Tombstone-Bildung zuverlässig zu erkennen. Bei erfolgreicher Kontaktierung erfolgt zudem eine hochgenaue Positionsvermessung der Bauelemente, um den Selbstzentriereffekt analysieren zu können. Der Selbstzentriereffekt beschreibt das Einschwimmverhalten der Bauelemente, die sich durch die Oberflächenspannung des Lotes während des Reflow-Lötprozesses neu ausrichten. Die Untersuchungen leisten einen Beitrag, Einflussfaktoren auf Tombstone-Effekte und die Selbstzentrierung von Bauelementen der Größe 01005 besser bewerten zu können. [109–111]

4.2.1 Methodik und Versuchsbeschreibung

Für die Untersuchungen wird ein Layout für eine Leiterplatte mit Abmessungen von 100 mm × 160 mm entwickelt (vgl. Bild 55). Die Dicke der Leiterplatte beträgt 0,8 mm und besitzt als Metallisierung ein Nickel-Gold-Finish. Auf der Oberseite der Leiterplatte sind im linken Bereich neben 01005-Bauelementen Zweipoler der Baugröße 0201, 0402 sowie 0603 vorgesehen, um vor allem Effekte im Schablonendruckprozess evaluieren zu können, die bei der gleichzeitigen Verarbeitung unterschiedlicher Baugrößen zu erwarten sind. Für die Auslegung dieser Padgrößen werden die

Empfehlungen der IPC-7351B [62] berücksichtigt. Neben einzelnen Positionen von Bauteilen, in denen die Abstände der Bauteile zueinander in einem ‚Gap-Test‘ analysiert werden können, sind auch einzelne Landeflächen vom Typ solder-mask-defined (SMD-Pads) einbezogen. Alle übrigen Pads sind mit Aussparungen im Lötstopplack ausgeführt und damit non-solder-mask-defined (NSMD-Pads).

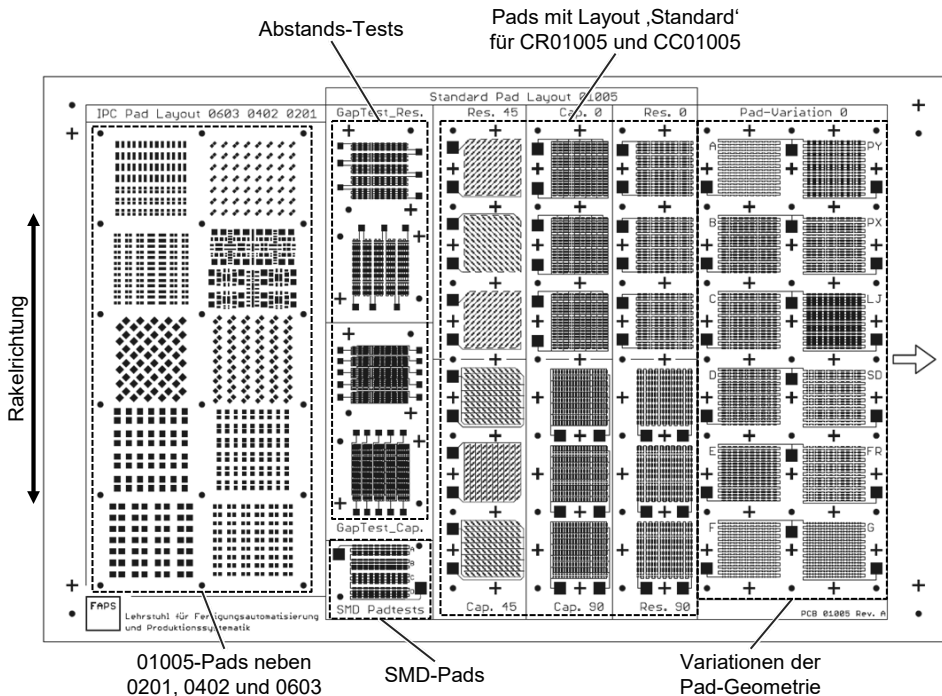


Bild 55: Leiterplatte mit Variationen der SMD-Anschlussflächen

Auf der rechten Seite der Leiterplatte sind insgesamt 14 verschiedene Geometrien für die Form der Anschlussflächen von 01005-Komponenten berücksichtigt. Hiermit soll der Einfluss unterschiedlicher SMD-Landeflächen bewertet werden. Darüber hinaus wurde aus einer Vielzahl an Veröffentlichungen ein Standard-Layout für Kondensatoren bzw. Widerstände abgeleitet [81], welches in Bild 56 dargestellt ist. Die detaillierten Abmessungen der variierten Pad-Geometrien sind dem Anhang zu entnehmen (vgl. Bild 91). Die hohe Variation der Form der Metallisierung soll Rückschlüsse auf das Verhalten von 01005-Komponenten bei der Verarbeitung auf unterschiedlich ausgeprägten SMD-Landeflächen ermöglichen. Die verwendeten Bauelemente besitzen Abmessungen von etwa 400 µm Länge und 200 µm Breite, wobei die Kondensatoren mit ca. 250 µm etwa die doppelte Höhe des Bauteilkörpers im Gegensatz zu den Widerständen mit

ca. 120 μm Höhe aufweisen. Dies wird in dem definierten Standard-Layout durch 20 μm breitere Anschlussflächen in Längsrichtung des Bauelementes beachtet.

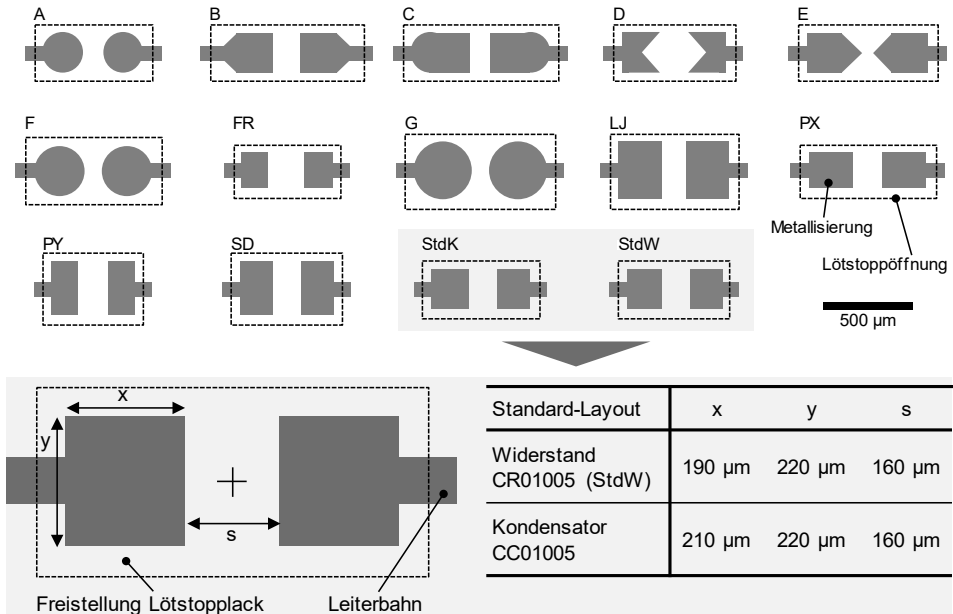


Bild 56: Layoutvarianten und abgeleitetes Standard-Layout für die SMD-Landeflächen

Da die Flächenverhältnisse der verwendeten 80 μm und 100 μm dicken Schablonen teilweise den üblicherweise empfohlenen Wert von 0,66 deutlich unterschreiten, werden für den Auftrag der Lotpastenmaterialien nanobeschichtete Edelstahlschablonen verwendet, welche sich für kritische Aperturgrößen bewährt haben [51]. In Vorversuchen werden zunächst optimale Druckparameter für die jeweilige Lotpaste ermittelt, welche möglichst hohe Werte bei geringer Streuung für die Transfereffizienz sicherstellen sollen. Die verwendeten Lotpasten von 2 unterschiedlichen Herstellern basieren auf einer bleifreien Zinn-Silber-Kupfer-Legierung (SAC305) und werden in den beiden Pastentypen 4 sowie 5 verarbeitet. Nach [49, 98] besitzt eine Lotpaste vom Pulvertyp 4 mindestens 90 % Massenanteil mit Korngrößen zwischen 20 μm bis 38 μm im Durchmesser. Im Pulvertyp 5 sind mindestens 80 % Massenanteil zwischen Korngrößen von 15 μm bis 25 μm Durchmesser verteilt.

Der Versuchsplan in Tabelle 15 umfasst 32 Leiterplatten mit insgesamt 44.800 Bauelementen. Im Schablonendruckprozess werden Lotpastenlieferant, Körnung der Paste sowie die Schablonendicke in jeweils 2 Stufen

variiert. Im darauffolgenden Bestückprozess sind insgesamt 4 Bestückpositionen berücksichtigt. Auf die 14 verschiedenen gestalteten Layouts der Metallisierung werden pro Leiterplatte jeweils 50 Widerstände sowie 50 Kondensatoren bestückt, die unter Stickstoffatmosphäre im abschließenden Reflow-Prozess verlötet werden.

Tabelle 15: Versuchsplan zur Untersuchung des Einschwimmverhaltens

LP-Nr.	Schablonendruck		Bestückung Versatz	Reflow-Löten Profil
	Lotpaste	Schablonendicke		
1-8	Hersteller A, Typ 4	80 µm	Sollposition	Optimiertes Temperatur- profil unter Stickstoff- atmosphäre
			x + 50 µm	
		100 µm	y + 100 µm	
			φ + 30°	
9-16	Hersteller A, Typ 5	80 µm	Sollposition	
			x + 50 µm	
		100 µm	y + 100 µm	
			φ + 30°	
17-24	Hersteller B, Typ 4	80 µm	Sollposition	
			x + 50 µm	
		100 µm	y + 100 µm	
			φ + 30°	
25-32	Hersteller B, Typ 5	80 µm	Sollposition	
			x + 50 µm	
		100 µm	y + 100 µm	
			φ + 30°	

Die Versuchsreihen werden unter konstanten klimatischen Bedingungen an einer verketteten SMD-Fertigungslinie durchgeführt. Die Druckparameter für die Verarbeitung der unterschiedlichen Lotpasten werden im Vorfeld hinsichtlich einer möglichst hohen Transfereffizienz mit geringer Standardabweichung der Lotpastendepots ermittelt. Für die Versuchsreihen erfolgt nach dem Walken der Lotpaste eine maschinenintegrierte Reinigung im Modus Nass-Vakuum-Trocken. Der erste Druck nach dieser Reinigung wird ausgeschleust, so dass für die vollständig aufgebauten Flachbaugruppen für ein möglichst vergleichbares Druckbild nur der jeweils zweite und dritte Druck nach einem Reinigungsvorgang verarbeitet werden. Nach dem Pastendruckprozess werden die gedruckten Leiterplatten für eine umfassende Datenbasis mittels Lotpasteninspektion vermessen.

Die anschließende Bestückung der Bauelemente erfolgt nach dem Collect & Place-Prinzip mit voller Bestückleistung. Der eingesetzte Bestückkopf besitzt eine Bestückgenauigkeit von $\pm 41 \mu\text{m}$ (3σ) bzw. $\pm 0,5^\circ$ (3σ). Vor Beginn der Versuchsreihen wurde eine Kalibrierung des Bestückautomaten durchgeführt, um einen systematischen Versatz weitestgehend ausschließen zu können.

In den Variationen sind 4 programmierte Positionen der Bauelemente enthalten, die sich in Referenzbestückung auf Sollposition, Bestückung mit $50 \mu\text{m}$ Versatz in x- bzw. $100 \mu\text{m}$ Versatz in y-Richtung sowie mit 30° Verdrehung bestückte Bauelemente unterscheiden (vgl. Bild 57). Bei der Profilierung des Temperatur-Zeit-Verlaufes sind die jeweiligen Herstellerempfehlungen der eingesetzten Lotpastenmaterialien berücksichtigt, um eine möglichst gute Prozessführung beim abschließenden Reflow-Löten zu erzielen. Nach der Fertigung der Baugruppen werden die Bauelemente mittels automatischer optischer Inspektion geprüft und vermessen.

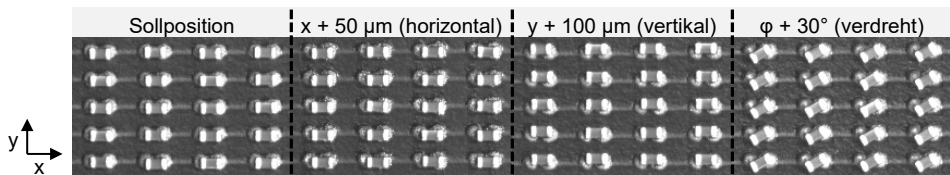


Bild 57: Berücksichtigte Bestückpositionen innerhalb der Versuchsreihe

Die Vermessung der verarbeiteten 01005-Bauteile wird mit dem System S3088 ultra der Firma Viscom AG durchgeführt. Das eingesetzte AOI besitzt ein Kameramodul mit $8 \mu\text{m}$ Auflösung. Zur Sicherstellung vergleichbarer Ergebnisse wird für die Bauformen CR01005 und CC01005 jeweils ein eigener Prüfablauf definiert, der für alle Pad- und Versuchsvariationen identisch ist. Neben der eigentlichen Vermessungsaufgabe werden auch die klassischen AOI-Prüfschritte wie Bauteilanwesenheit, Qualität der Lötstelle und Tombstone-Bildung abgedeckt.

Initial erfolgt eine Verifikation hinsichtlich der Eignung für die Messaufgabe, indem Stabilität und Messfähigkeit überprüft werden. Bei der Ermittlung der Messwerte kommt ein Algorithmus zum Einsatz, welcher durch die Kombination der Kanten- und Bauteilschwerpunktinformationen Ergebnisse im Subpixelbereich der $8 \mu\text{m}$ Auflösung der Kamera ermöglicht. Zur Verifikation der Reproduzierbarkeit werden jeweils 50 Kondensatoren sowie 50 Widerstände der Baugröße 01005 über 100 Mal nacheinander vermessen und die Ergebnisse in ein Verteilungsdiagramm überführt. Die Auswertung der Verteilung ergibt für das eingesetzte AOI einen Sigma-

Wert $< 3 \mu\text{m}$ und wird damit für die Positionsvermessung der Bauteile als fähig erklärt.

Durch die Variationen insbesondere beim programmierten Bestückversatz der Bauelemente entstehen bei den Versuchsreihen teilweise Baugruppen mit sehr vielen Tombstones als Fehlerbild. Um die Integrität der Messwerte sicherzustellen, wird der Prüfablauf daher wie folgt abgebildet:

- ❑ Schritt 1: Überprüfung auf Bauteilanwesenheit und Tombstone-Bildung,
- ❑ Schritt 2: Vermessung des Bauteils hinsichtlich x-, y- und ϕ -Lage, wobei nur gültige Messwerte ausgegeben werden, wenn explizit der erste Prüfschritt fehlerfrei durchlaufen wird,
- ❑ Schritt 3: Überprüfung der Lötstellenqualität.

Die Auswertung der Prüfergebnisse zeigt, dass fehlende Bauteile und fehlerhafte Lötstellen nur marginal auftreten und daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt sind. Das Auftreten von Tombstones ist dagegen bei gewissen Faktorkombinationen sehr stark ausgeprägt und wird als wichtiger Indikator für die Evaluation herangezogen. Bei der Vermessung der 44.800 Bauelemente sind insgesamt 1587 Bauelemente als Tombstones klassifiziert. Daher erfolgt eine getrennte Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Tombstone-Bildung und auf den Selbstzentriereffekt.

4.2.2 Bewertung des Auftretens von Tombstone-Effekten

Wesentliche Basis der Untersuchungen zum Einschwimmverhalten bilden die gedruckten Lotpastendepots auf den Leiterplatten mit den gewählten Kombinationen der Versuchsparameter. Vor Beginn der Versuchsreihen erfolgt die Optimierung der Parameter im Schablonendruckprozess für den jeweils verwendeten Lotpastentyp. Die Ergebnisse der 3D-Lotpastenspektroskopie sind in Bild 58 zusammenfassend dargestellt. Beide Lotpastenhersteller erreichen Mittelwerte für die Transfereffizienz zwischen 73 % und 108 %. Die Verwendung der feinkörnigeren Lotpaste vom Typ 5 ermöglicht eine deutliche Erhöhung der Transfereffizienz, wobei dieser Einfluss bei Hersteller A mit etwa 13 % im Vergleich zu ca. 5 % gesteigerten Werten bei Hersteller B stärker ausfällt. Gleichmaßen verhalten sich die beiden Lotpasten der Hersteller mit den gewählten Schablonendicken. Bei Hersteller A wird eine 15 % höhere Transfereffizienz unter Verwendung einer $80 \mu\text{m}$ dicken Schablone im Vergleich zu 5 % höheren mittleren Werten bei Hersteller B erzielt.

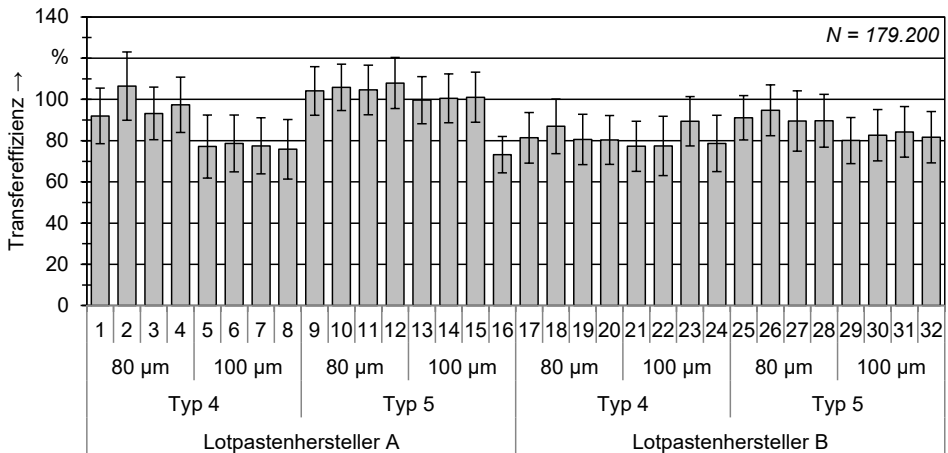


Bild 58: SPI-Ergebnisse der 32 Leiterplatten in der Versuchsreihe

Die Kontur der lasergeschnittenen Druckschablone folgt dem entwickelten substratseitigen Layout. Aufgrund der Variationen der SMD-Landflächen lassen sich im Schablonendruckprozess wesentliche Unterschiede für die jeweiligen Felder nachweisen, die in den resultierenden unterschiedlichen Flächenverhältnissen begründet liegen. Bild 59 verdeutlicht das unterschiedliche Auslöseverhalten durch die dargestellte Vermessung der gedruckten Depots.

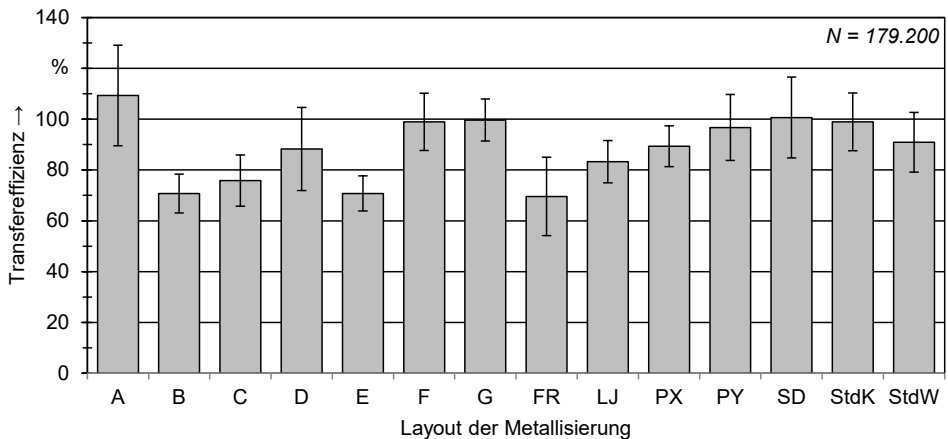


Bild 59: Erzielte Transfereffizienzen für die verschiedenen Landflächen

Auffällig sind hier vor allem Aperturen mit niedrigen Flächenverhältnissen wie beispielsweise das Feld D, das mit einem FV von 0,44 bei einer 80 µm Schablone (FV von 0,35 bei einer 100 µm Schablone) als sehr kritisch im Druckprozess einzuordnen ist. Im Vergleich zu größeren Öffnungen wie beispielsweise dem Feld B mit einem FV von 0,63 unter Verwendung einer

80 µm Schablone (FV von 0,50 bei einer 100 µm Schablone) lassen sich deutlich höhere Werte für die Transfereffizienz abbilden, was auf weitere Randeffekte hindeutet, wie etwa das Anhaften spezifischer Korngrößen-durchmesser an den Rundungen der Aperturen.

Bei der Gesamtbetrachtung der aufgetretenen Fehlstellen in Bild 60 lässt sich nachweisen, dass im Vergleich zu Widerständen die detektierten Tombstones bei Kondensatoren etwa doppelt so häufig vorkommen. Mit ca. 120 µm weisen Widerstände nur etwa die Hälfte der Bauteilhöhe der Kondensatoren auf, was ein verändertes Kippmoment und damit die Tombstone-Bildung direkt beeinflusst. Dieses Verhalten ist nahezu bei allen Padgeometrien gleichermaßen ausgeprägt.

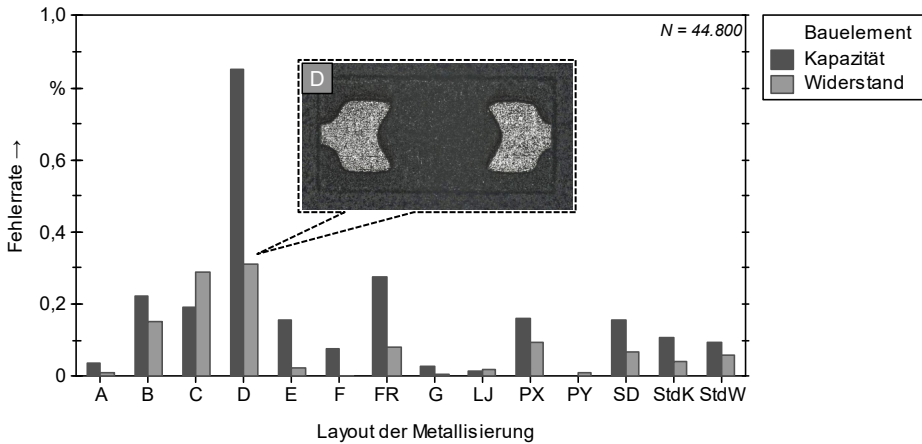


Bild 60: Aufgetretene Tombstones auf den entwickelten Padgeometrien

Das Verhalten hinsichtlich der Bildung von Tombstones auf den jeweiligen Layouts deutet bereits signifikante Unterschiede an, wobei insbesondere stark vom häufig empfohlenen Rechteck abweichende Formen, wie beispielsweise kreisförmige Pads (z. B. Layout A und G) oder Geometrien mit gestauchten Abmessungen (z. B. Layout PY) niedrige Tombstone-Raten aufweisen. Bei getrennter Betrachtung der eingesetzten Lotpastenmaterialien werden signifikante Unterschiede deutlich, wie anhand Bild 61 ersichtlich ist. Die gestaltete Sonderform im Layout D zeigt sowohl bei der Neigung zur Tombstone-Bildung als auch bei der späteren Auswertung des Selbstzentriereffektes die schlechtesten Ergebnisse und kann damit in den gewählten Abmessungen nicht empfohlen werden. Pastenmaterial A induziert dabei einen Großteil der Fehlerbilder, wobei dies vermehrt auf den Lotpastentyp 4 zurückgeführt werden kann. Der Einsatz einer Druckschablone mit 80 µm Dicke bedingt zudem einen höheren Fehleranteil. Bei Hersteller B treten nur etwa ein Viertel aller Tombstone-Fehler auf. Ohne

Berücksichtigung des Layouts in Feld D sind die Unterschiede sowohl im Lotpastentyp als auch in der Schablonenstärke bei diesem Hersteller nicht auffällig.

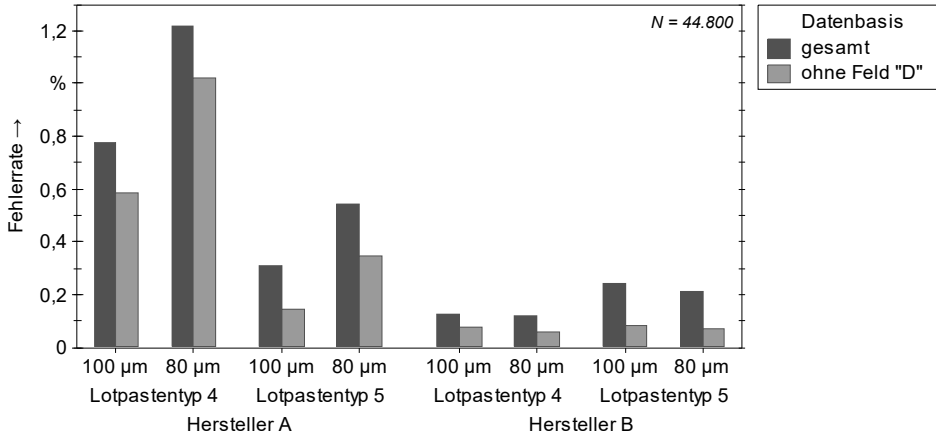


Bild 61: Tombstone-Fehlerbild aufgeteilt nach Hersteller und Lotpastentyp

Ein vorgegebener Versatz der Bauteilposition mit Abweichungen von der Sollposition verursacht eine höhere Neigung zur Tombstone-Bildung im Reflow-Lötprozess. Unterteilt in die jeweiligen Positionen vor dem Lötprozess treten die meisten Tombstone-Fehler bei den mit Verdrehung bestückten Bauelementen auf (vgl. Bild 62).

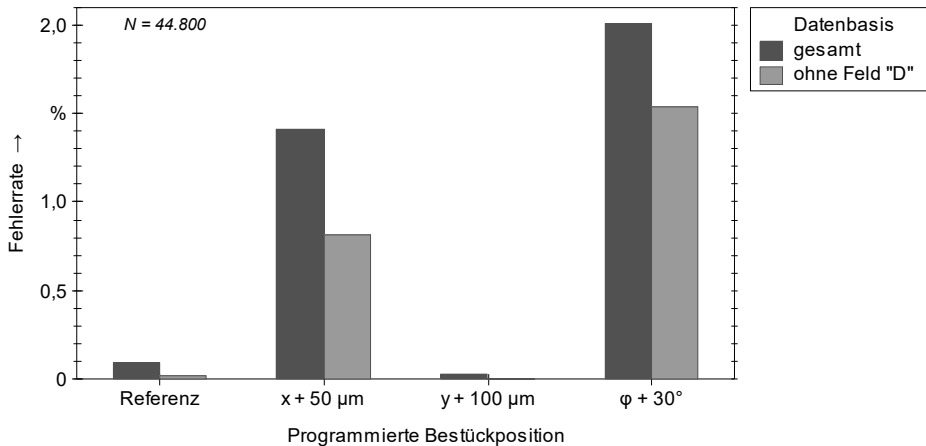


Bild 62: Durch Bestückversatz induzierte Tombstone-Bildung

Ein horizontaler Bestückversatz in x-Richtung wirkt sich ebenfalls signifikant auf die Grabsteinbildung aus. Bei Bauteilen ohne Versatz oder bei vertikaler Verschiebung in y-Richtung treten nur vergleichsweise wenige

Fehlerbilder auf. Ein Großteil der aufgetretenen Tombstones ohne programmierten Bestückversatz kann bei detaillierter Betrachtung auf das Padlayout in Feld D zurückgeführt werden, wobei das Verhältnis der aufgetretenen Fehlerbilder unverändert bleibt.

Durch die Berechnung der Haupteffekte wird in der Gesamtbetrachtung der Versuchsreihe das Layout als größter Einflussfaktor auf das Prozessergebnis nachgewiesen. Unter Ausschluss des Layouts D von der weiteren Betrachtung wirken sich die mit Verdrehung sowie mit Versatz in Längsrichtung bestückten Bauelemente am stärksten auf das Tombstone-Fehlerbild aus. Die beiden untersuchten Hersteller der Lotpaste zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede mit den beschriebenen Wechselwirkungen bei Lotpastentyp und Schablonenstärke. In Tabelle 16 wird die Robustheit der verschiedenen Layouts hinsichtlich des Lotpastendrucks und der potenziellen Fehlerentstehung durch Tombstone-Bildung während des Reflow-Lötens dargestellt.

Tabelle 16: Bewertung der SMD-Landeflächen hinsichtlich Verarbeitung im Schablonendruckprozess und Fehlerentstehung im Lötprozess

Layout \ Wertung	Schablone mit günstigem Flächenverhältnis		Erreichte Transfereffizienz im Schablonendruck		Geringer Fehleranteil nach dem Lötprozess	
	80 µm	100 µm	80 µm	100 µm	Kapazität	Widerstand
A	+	-	++	++	-	++
B	+	-	o	o	--	-
C	+	-	o	+	--	o
D	o	--	+	++	--	o
E	+	-	o	o	-	++
F	++	+	++	++	+	++
G	-	--	++	++	o	+
FR	++	++	-	+	++	++
LJ	++	+	+	+	++	++
PX	++	-	+	++	-	o
PY	o	--	+	++	++	++
SD	o	--	++	++	-	+
StdK	+	-	++	++	o	+
StdW	+	--	+	++	o	+

nicht erfüllt (--), kaum erfüllt (-), halb erfüllt (o), nahezu voll erfüllt (+), voll erfüllt (++)

Die Bewertung beinhaltet die Druckbarkeit der Strukturen, welche zum einen von dem Layout der Padgeometrie und zum anderen von der gewählten Schablonendicke abhängig ist. Hiervon ist ebenso die ermittelte Transfereffizienz in hohem Maß beeinflusst. Ein gesicherter Lotpastenauftrag auf geeigneten SMD-Landeflächen begünstigt eine hohe Ausbeute erfolgreicher Kontaktierungen nach dem Lötprozess. Je nach spezifischer Kombination aus Schablonendicke und Layout der SMD-Landeflächen sind damit das erwartete Druckergebnis aus dem Schablonendruckprozess und der erwartete Fehleranteil nach dem Lötprozess im entwickelten Versuchsträger umfassend bewertet (vgl. auch Tabelle 26 im Anhang für detaillierte Bewertungskriterien).

4.2.3 Bestimmung des Selbstzentrierverhaltens

Neben der grundsätzlichen Robustheit gegen Tombstone-Bildung ist insbesondere das Verhalten der entwickelten Layout-Varianten hinsichtlich des Einschwimmverhaltens von hoher Relevanz, um ein prozesssicheres Verhalten zu erreichen. Der untersuchte Selbstzentriereffekt tritt während des abschließenden Lotvorgangs auf und verursacht durch die wirkenden Kräfte zwischen dem flüssigen Lot und den Anschlussflächen eine Bewegung mit Neu-Ausrichtung des Bauteils. In Anlehnung an [96] erfolgt in der Analyse eine getrennte Betrachtung der erfassten Positionen der Bauelemente in Längs- und Querrichtung nach dem Reflow-Lötprozess.

In der Auswertung der Referenzbestückung ohne programmierten Bestückversatz sind insgesamt nach Ausschluss der Fehlerbilder bzw. nicht abnahmefähiger Verbindungen 11.156 Bauelemente enthalten. Im Mittel werden Abweichungen der Bauteile von $x = 3,98 \mu\text{m}$ ($\sigma = 6,99$) in horizontaler sowie $y = -5,21 \mu\text{m}$ ($\sigma = 10,44$) in vertikaler Richtung erreicht. Die Ausgangsposition der Sollwerte weist damit auch nach Kalibrierung des Bestückautomaten einen leichten systematischen Versatz auf, der sich im niedrigen einstelligen Bereich befindet und daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt ist. In Bild 63 sind die gemessenen Werte der Bauelemente unterteilt nach den untersuchten SMD-Landeflächen visualisiert. Der größte Effekt ist auf das Layout der SMD-Landeflächen zurückzuführen. Als Auffälligkeit hierbei weisen Widerstände im Layout G sowie LJ eine vergleichsweise hohe Streuung auf. Auch das Layout D, welches bereits das Auftreten von Fehlstellen begünstigt hat, induziert einen nachweislich höheren Versatz.

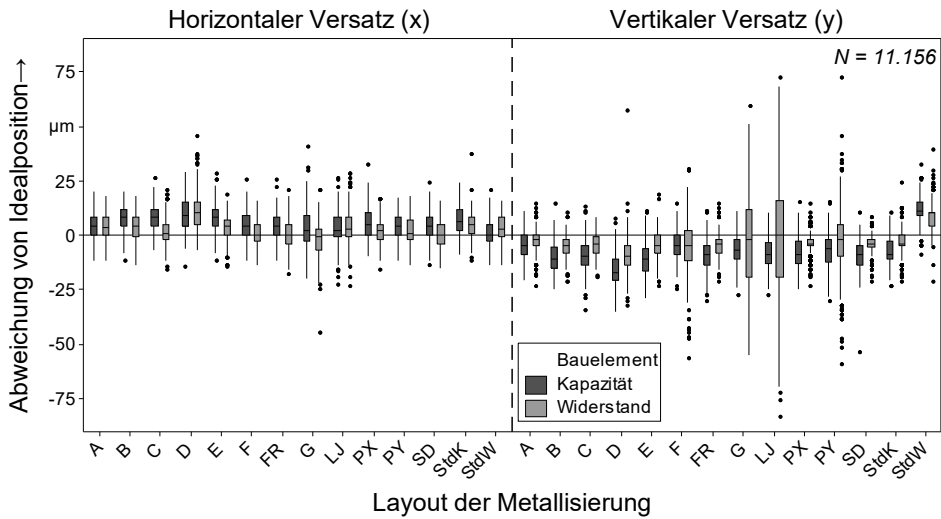


Bild 63: Ermittelte horizontale und vertikale Positionsabweichungen der Bauelemente bei der Referenzbestückung

Bei der weiteren Analyse der Referenzbestückung lässt sich zudem ein großer Einfluss auf die Art des Bauteils zurückführen. Dabei zeigen Widerstände mit einer horizontalen Abweichung von $x = 2,73 \mu\text{m}$ ($\sigma = 6,96$) und $y = -3,26 \mu\text{m}$ ($\sigma = 10,42$) in vertikaler Richtung im Vergleich zu Kapazitäten ein besseres Einschwimmverhalten. Dies könnte auf die Ausbildung der Lötmenisken zurückgeführt werden, welche bei Widerständen aufgrund der geringeren Bauteilhöhe deutlich stärker ausgeprägt sind. Weiterhin muss beachtet werden, dass die erfassten Positionen in vertikaler Richtung bei automatisierter Vermessung mit einer gewissen Varianz behaftet sind. Die Ursache liegt in den Toleranzen bei der Metallisierung der Widerstände begründet, welche stark schwankend ausgeprägt ist und hierdurch die Unterscheidung zwischen Bauteilkörper und Lötstelle erschwert. In der weiteren Auswertung der Haupteffekte zeigen bei der Verarbeitung von Bauelementen ohne programmierten Bestückversatz der verwendete Hersteller der Lotpaste, der Lotpastentyp und die Schablonendicke keinen signifikanten Einfluss auf das Prozessergebnis.

Für die Bewertung des Einschwimmverhaltens in Längsrichtung werden die Bauteile mit einem programmierten Versatz von $50 \mu\text{m}$ bestückt. In Bild 64 sind die Ausgangslage von $+50 \mu\text{m}$ und die resultierenden Abweichungen für die eingesetzten Bauteilarten auf den untersuchten SMD-Landeflächen dargestellt.

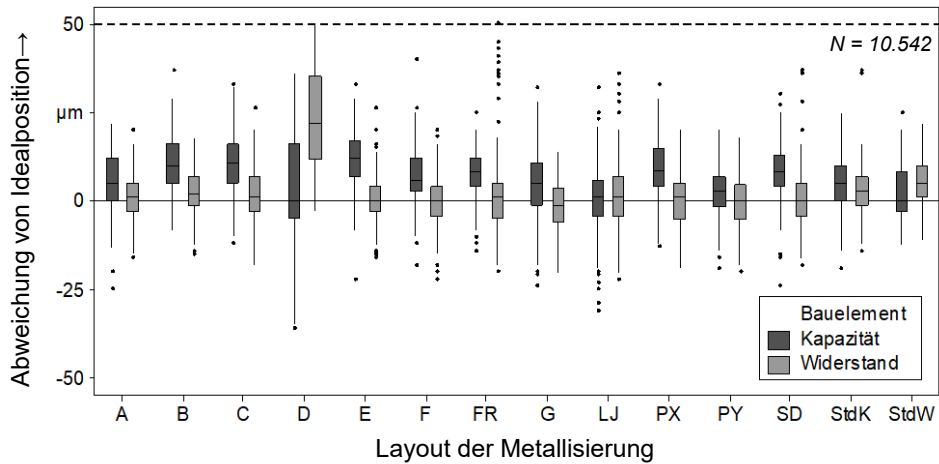


Bild 64: Positionierung der Bauelemente nach dem Lötprozess bei programmiertem horizontalen Bestückversatz ($x = +50 \mu\text{m}$)

Die Auswertung nach dem Lötprozess weist nach, dass Widerstände mit einem resultierenden Versatz von $2,47 \mu\text{m}$ ($\sigma = 9,24$) eine höhere Wahrscheinlichkeit zur Neu-Ausrichtung besitzen als Kapazitäten mit einem Mittelwert der horizontalen Verschiebung von $6,48 \mu\text{m}$ ($\sigma = 8,82$). Das Verhalten von Kapazitäten lässt sich in 2 Gruppen einteilen, wobei ein Teil etwa $7 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$ Abweichung aufweist (z. B. in Layout B, C, E) und andere Landeflächen eine sehr gute Neu-Ausrichtung ermöglichen (z. B. in Layout LJ, PY, StdW). Besonders auffällig ist das Layout D mit der größten Streuung der ermittelten Positionen, wobei insbesondere Widerstände mit einer abweichenden Lage betroffen sind. Die übrigen Layouts besitzen bis auf die Layouts G sowie LJ eine vergleichbare Varianz.

Bauelemente, welche mit programmiertem vertikalem Versatz von $100 \mu\text{m}$ bestückt sind, weisen eine verhältnismäßig hohe Neigung zur Selbstzentrierung auf. In Bild 65 werden die Ausgangslage von $+100 \mu\text{m}$ und die ermittelten Abweichungen der Bauelemente aufgezeigt. Widerstände zeigen bis auf die Layouts D, LJ und PY mit $y = 1,75 \mu\text{m}$ ($\sigma = 11,43$) ein besseres Verhalten der Neu-Ausrichtung mit geringeren Streuungen. Die gemessenen Positionswerte der Kapazitäten besitzen im Mittel $y = 9,60 \mu\text{m}$ ($\sigma = 11,24$) resultierende Abweichungen, wobei auch hier die Layouts D, LJ und PY mit größeren Werten auffällig sind. Die Varianzen sind bei Kapazitäten über alle SMD-Landeflächen hinweg vergleichbar.

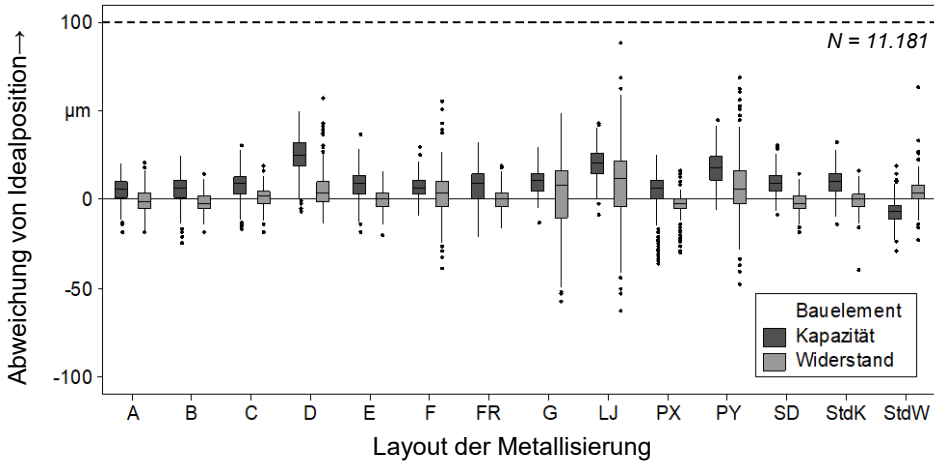


Bild 65: Positionierung der Bauelemente nach dem Lötprozess bei programmiertem vertikalen Bestückversatz ($y = +100 \mu\text{m}$)

Die Auswertung der mit 30° Verdrehung bestückten Bauelemente wird aufgrund der deutlich besseren Kantendetektion auf die Bauform Kapazität beschränkt. Bild 66 veranschaulicht die ermittelte Verdrehung der Bauelemente nach dem Lötprozess grafisch.

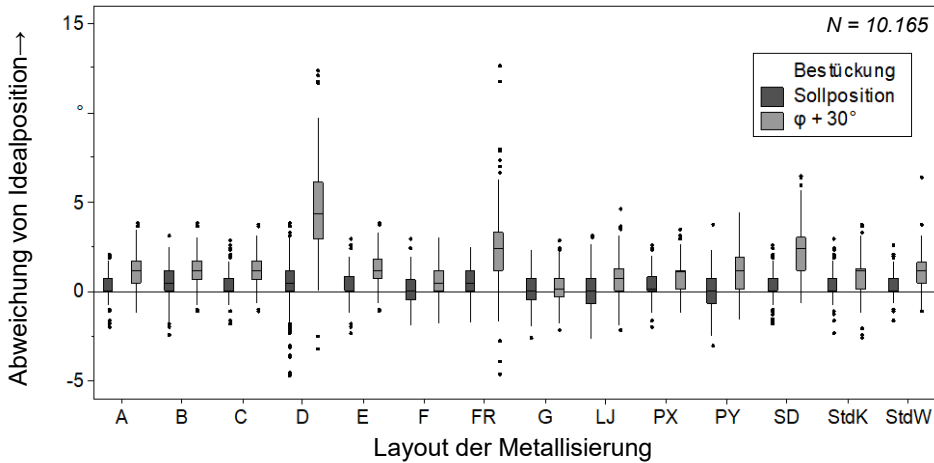


Bild 66: Ermittelte Verdrehung der Kapazitäten nach dem Lötprozess bei programmiertem Winkelversatz ($\phi = +30^\circ$) im Bestückvorgang

Bei erfolgreicher Kontaktierung nach dem Reflow-Prozess weisen Bauteile der Größe 01005 eine stark ausgeprägte Neigung zur Neu-Ausrichtung auf, was sich anhand der mittleren Winkelabweichung von $12,78^\circ$ zeigt. Bei den SMD-Layouts D, FR sowie SD ist ein auffällig schlechteres Ergebnis bei den

ermittelten Winkelstellungen mit über 20° Verdrehung und höheren Streuungen zu verzeichnen. Rund gestaltete Metallisierungen in den Layouts A, F und G zeigen mit größeren Abmessungen ein besseres Verhalten in den erzielten endgültigen Winkelstellungen der Bauteile.

Für die zusammenfassende Bewertung des Einschwimmverhaltens von Bauteilen der Größe 01005 werden die ermittelten Werte auf die entsprechenden SMD-Landeflächen bezogen. Neben den Mittelwerten der Positionsabweichungen wird die erzielte Streuung als Indikator für eine robuste Prozessgestaltung mit aufgenommen. Der Einfluss von Lotpastentyp und Hersteller weist ebenso wie die verwendete Schablonendicke keinen eindeutigen Trend auf. Das Layout der Bauteile auf unterschiedlichen SMD-Landeflächen sowie das Verhalten bei unterschiedlichen Bestückpositionen sind dagegen signifikant und grafisch in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Gesamtbewertung basiert auf einer gemeinsamen Betrachtung der verarbeiteten Widerstände und Kapazitäten und ist relativ auf die untersuchten Bestückpositionen mit programmiertem Versatz bezogen.

Tabelle 17: Zusammenfassende Bewertung des Einschwimmverhaltens der Bauteilgröße 01005 auf den ausgewählten SMD-Landeflächen

Layout \ Wertung	Verarbeitung der Bauelemente ohne Versatzwerte	Einschwimmeffekt bei horizontalem Bauteilversatz	Einschwimmeffekt bei vertikalem Bauteilversatz	Einschwimmeffekt bei Verdrehung der Bauelemente
A	+	+	++	+
B	o	+	+	+
C	+	+	++	+
D	-	-	o	--
E	o	+	+	+
F	+	+	+	++
G	+	+	+	-
FR	+	+	+	++
LJ	o	+	-	+
PX	+	+	o	++
PY	+	++	-	+
SD	+	+	++	o
StdK	+	++	++	++
StdW	+	++	+	++

nicht erfüllt (--), kaum erfüllt (-), halb erfüllt (o), nahezu voll erfüllt (+), voll erfüllt (++)

In der Analyse der Selbstzentrierung weisen die Layouts StdK und StdW eine durchgängig gute Verarbeitbarkeit mit den besten resultierenden Abweichungen auf. Ferner kommen den rund gestalteten Layouts A, F und G ebenfalls sehr gute Prozesseigenschaften zu. Generell ist aus den Layout-Variationen abzuleiten, dass mit größer werdendem Abstand zwischen den SMD-Landeflächen negative Effekte bei einer Bestückung mit Versatz in Längsrichtung der Bauelemente oder bei Verdrehung auftreten. Darüber hinaus ist bei der Auslegung der Metallisierung bei rechteckiger Gestaltung darauf zu achten, dass das Layout die Toleranzen der Bauelemente mit einbezieht, um ein robustes Prozessverhalten zu erzielen. Auf Basis der Untersuchungen kann aufgezeigt werden, dass eine horizontale Stauchung des Layouts PX quer zum Bauteil die resultierende Winkelstellung positiv beeinflusst. Daneben ermöglicht eine schmale Auslegung in Längsrichtung des Bauteils im Layout PY geringe horizontale Abweichungen. Der unterschiedlich ausgeprägte Selbstzentriereffekt kann auch bei Bauelementen der Größe 01005 nachgewiesen werden, was anhand Bild 67 erläutert wird.

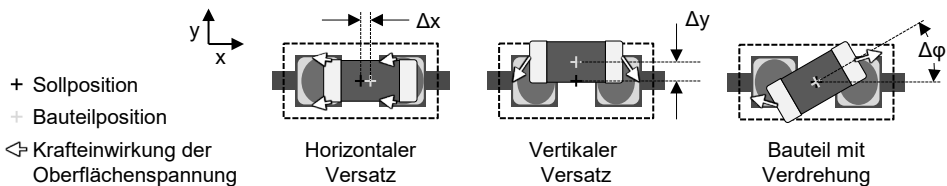


Bild 67: Wirkung der Oberflächenspannung an der Metallisierung von zweipoligen Bauelementen im Lötprozess (in Anlehnung an [112])

Nach [113, 114] ist bei einem vorliegenden Versatz des Bauteils die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes die hauptsächlich wirkende Kraft, welche die Neu-Ausrichtung der Bauteile beeinflusst. Weiterhin sind hydrostatische Kräfte sowie Kapillarkräfte vorhanden, welche sich an den benetzbaren Flächen der Metallisierung ausprägen und das Bauteil aus dem Lot herausdrücken [115]. Die dynamische Reibung tritt zwischen flüssiger und fester Phase auf und reduziert die Bewegung des Bauteils, wobei keine Bauteilbewegungen mehr stattfinden, sofern sich das Bauteil auf der Mitte der Sollposition befindet. Bei der Auslegung des Prozesses für die Verarbeitung von Bauteilen der Größe 01005 ist zu beachten, dass die wirkenden Kräfte bei horizontalem Versatz nur zu Beginn des Einschwimmens annähernd gleichgerichtet und später entgegengerichtet sind [116]. Daher ist die Neigung für eine Neu-Ausrichtung während des Lötprozesses bei verdreht bestückten Bauelementen und insbesondere im Fall einer vertikalen Abweichung grundsätzlich höher, da hier die Kräfte um denselben Drehpunkt bzw. gleichgerichtet wirken. In Abhängigkeit der SMD-Landeflächen ist die

mögliche Selbstzentrierung unterschiedlich stark ausgeprägt, was die Prozessführung über die Verarbeitungskette hinweg wesentlich bestimmt. Mit den dargestellten Analysen zum Einfluss der spezifischen Auslegung von SMD-Landeflächen besteht daher über die Empfehlungen der IPC hinaus eine grundlegende Basis für die individuelle Prozessgestaltung mit angepassten Landeflächen bei der Verarbeitung von Widerständen und Kapazitäten der Bauform 01005.

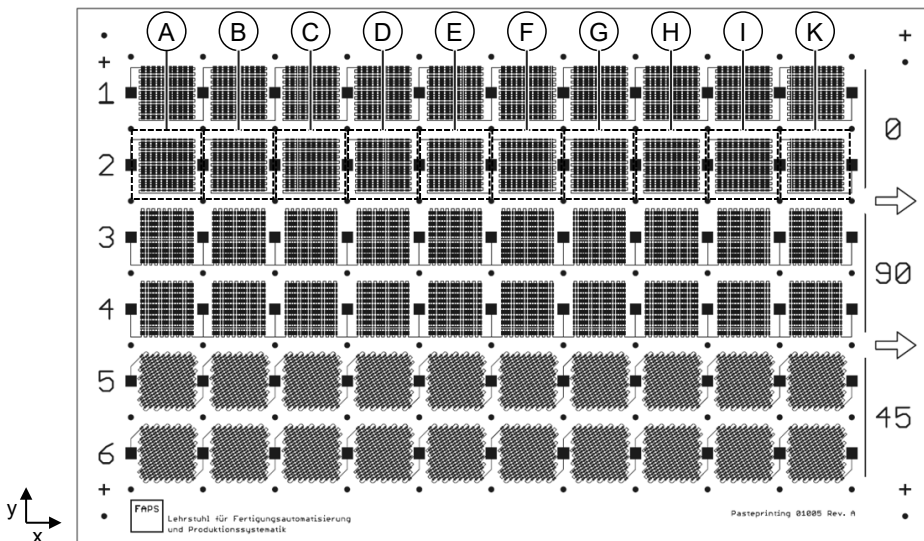
Neben einer mathematischen Betrachtung in [117], ist in [118] ein erster Ansatz beschrieben, maschinelles Lernen für die Vorhersage des Einschwimmverhaltens für die Bauteilgröße 0603 einzusetzen. Die Genauigkeit des aufgestellten neuronalen Netzwerks erzielt hierbei einen Wert von etwa 10 % bis 30 %. Mit den evaluierten Einbausituationen in diesem Kapitel ist ein statistisch abgesichertes Prozessverständnis erarbeitet, ein quantifizierbares Modell zur Berechnung des Selbstzentriereffektes für die Bauteilgröße 01005 abzuleiten. Für eine Präzisierung der Modellbildung gilt es, zusätzliche Einflussparameter in die Betrachtung mit einfließen zu lassen, wie beispielsweise abweichende Legierungen und Flussmittelsysteme von Lotpasten, die Geometrie der Bauteilmetallisierung, die Benetzungsfähigkeit des Bauteils und der SMD-Landeflächen sowie die Temperaturführung im Reflow-Lötprozess.

4.3 Einfluss von Lotpasten- und Bauelementversatz auf die Fehlerrate

Neben den bereits aufgezeigten Herausforderungen und Lösungsansätzen für einen optimierten Lotpastenauftrag hat nach dem abschließenden Lötprozess insbesondere der Bestückprozess einen erheblichen Einfluss auf eine möglichst geringe Fehlerrate. Etwaige Ursachen für nicht abnahmefähige Kontaktierungen können zum einen im Schablonendruckprozess begründet liegen, wie beispielsweise mit Versatz gedruckte Lotpastendepots. Zum anderen begünstigen versetzt bestückte Bauelemente in Bezug zur Sollposition die Entstehung von Fehlerbildern. Obwohl der Effekt der Selbstzentrierung nicht in die erzielbare Qualität mit einberechnet sein sollte, ist dieses Verhalten der Neu-Ausrichtung der Bauelemente im Lötprozess von entscheidender Bedeutung für eine hohe Ausbeute. Trotz einiger Veröffentlichungen zum Thema der Selbstzentrierung bei passiven Bauelementen (beispielsweise [112, 116, 119–121]) ist bisher insbesondere für die Baugröße 01005 nicht genauer bekannt, wo die Grenze für ein gesichertes Einschwimmen liegt und welche Einflussfaktoren das Verhalten der

Bauelemente im Wesentlichen bestimmen. Insbesondere der Zusammenhang zwischen einem mit Versatz aufgetragenen Lotpastendepot und einem nicht ideal platzierten Bauelement ist nicht ausreichend beschrieben.

Die Untersuchung basiert daher auf dem Ansatz, dass unterschiedliche Kombinationen aus Abweichungen im Druckbild sowie zur gewünschten Sollposition der Bauteile im Versuchsplan enthalten sind. Um Abweichungen der gedruckten Lotpastendepots so reproduzierbar wie möglich auszuliegen, ist der gewünschte Versatz der Lotpaste im Layout der lasergeschnittenen Schablone berücksichtigt. Wie bereits in den vorangegangenen Untersuchungen gezeigt werden konnte, begünstigt die für die Schablone gewählte nanobeschichtete Oberfläche das Auslöseverhalten und minimiert damit Schwankungen aus dem Druckprozess. Bild 68 gibt eine schematische Übersicht zum Substratmaterial, wobei nur die zweite Reihe alternierend mit Bauelementen bestückt wird, was pro Spalte jeweils 50 Kondensatoren sowie 50 Widerständen der Bauelementgröße 01005 entspricht.



Layout	Spalte										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	
x-Versatz der Druckschablone in μm	0	25	50	75	0	0	0	25	50	75	
y-Versatz der Druckschablone in μm	0	0	0	0	25	50	75	25	50	75	

Bild 68: Berücksichtigter Versatz der gedruckten Lotpastendepots im gestalteten Layout der nanobeschichteten 70 μm Druckschablone

Zum Einsatz kommt eine Schablone mit 70 μm Dicke und einem Eckenradius von 20 μm , was dem mittleren Kugeldurchmesser der verwendeten

Lotpaste vom Typ 5 entspricht. Um den materialeseitigen Einfluss bewerten zu können, werden Lotpasten von 2 verschiedenen Herstellern in die Untersuchungen mit einbezogen, die beide auf einer SAC₃₀₅-Legierung basieren. Das entwickelte Leiterplattenlayout entspricht dem in Abschnitt 3.2 erläuterten Demonstrator, wobei die Fläche der Metallisierung der SMD-Landeflächen 190 × 250 µm beträgt.

Für eine umfassende Bewertung des Einschwimmverhaltens werden in einem Versuchsplan neben einer Referenzbestückung Bauteile mit einem programmierten Bestückversatz zur Sollposition verarbeitet (vgl. Bild 69). Ebenso werden auf Sollposition bestückte Bauelemente auf den mit Versatz bedruckten Lotpastendepots berücksichtigt (Fall 1). Darüber hinaus wird untersucht, wie sich Bauelemente der Größe 01005 verhalten, wenn ein gleichermaßen ausgeprägter Versatz von Lotpaste und Bauelement vorliegt (Fall 2). Damit wird neben der reinen Bewertung der Fähigkeit zur Selbstzentrierung auch der Ansatz untersucht, ob eine Weitergabe der mittels SPI erfassten Daten zum Versatz der Lotpastendepots an den nachfolgenden Bestückprozess zur Korrektur der individuellen Bestückpositionen eine niedrigere Fehlerrate ermöglicht. Die entgegengerichtete Positionierung der mit Versatz gedruckten Lotpaste und der bestückten Bauelemente soll Grenzen im Prozessverhalten aufzeigen (Fall 3). Insgesamt werden im Rahmen der Versuchsreihen 6.000 Widerstände und 6.000 Kondensatoren der Größe 01005 in den unterschiedlichen aufgezeigten Kombinationen verarbeitet.

Variante Prozess	Referenz	Fall 1	Fall 2	Fall 3
Lotpastenauftrag	Sollposition	Versatz	Versatz	Versatz
BE-Bestückung	Sollposition	Sollposition	Versatz	Versatz (negativ)



Bild 69: Untersuchte Kombinationen aus Versatz der gedruckten Lotpaste und der bestückten Bauelemente der Größe 01005

Die Bestückung erfolgt vollautomatisiert auf einer Maschine vom Typ Siplace SX₂, welche vor den Versuchsreihen kalibriert und mit neuen Pipetten ausgestattet wird. Darüber hinaus kommt für eine möglichst präzise Bestückung ein spezielles Fahrprofil für Bauelemente der Größe 01005

zum Einsatz, das den Herstellervorgaben des Bestückungsautomaten entspricht. Direkt im Anschluss an den Bestückprozess erfolgt das Umschmelzen im Lötprozess, wobei für die Minimierung von Tombstone-Bildung annähernd ein Linearprofil verwendet wird.

In der gesamten Versuchsreihe tritt bei idealer Ausrichtung kein einziger Fehler auf, sofern kein Versatz der Lotpaste oder der Bestückposition der Bauelemente vorgesehen wird. Die Rahmenbedingungen für die folgenden Auswertungen werden damit als gegeben angenommen und der Prozess zur Verarbeitung von 01005 Bauelementen erscheint grundsätzlich als sehr gut beherrschbar. Auf Basis der im Rahmen der durchgeführten Versuche zuverlässig kontaktierten Bauteile werden vollfaktoriell verschiedene Kombinationen aus Lotpastenversatz und Abweichung in der Bestückposition bewertet.

4.3.1 Bewertung von Abweichungen im Schablonendruckprozess

Bauelemente, die exakt auf die Sollposition bestückt werden, weisen in Abhängigkeit des Lotpastenauftrags signifikante Abweichungen in der Fehlerrate auf. Im Gegensatz zur Referenzbestückung in Feld A begünstigt die mit systematischem Versatz aufgetragene Lotpaste die Entstehung von Fehlerbildern. Die Identifikation der provozierten Fehler erfolgt durch optische Kontrolle mit Hilfe von Mikroskopie-Aufnahmen. Als Fehler werden dabei Zustände bezeichnet, bei denen gemäß IPC-A-610 (Klasse 3) [122] keine abnahmefähige Kontaktierung zwischen Bauteil und Lotpad vorliegt. Im Wesentlichen werden die Fehlerbilder Tombstone sowie, bei entsprechend stark variierten Verarbeitungsparametern, eine komplette Verschiebung des Bauteils auf eine Seite des Lotpads beobachtet.

Bei der Verarbeitung von insgesamt 12.000 Bauelementen sind unter Variationen im Lotpastendruck 27 Fehler aufgetreten, was einer Gesamtfehlerrate von ca. 0,23 % entspricht. Die erfassten Fehlstellen sind ausschließlich bei der Verwendung des Lotpastenherstellers A aufgetreten (vgl. Bild 70). Bei Verwendung der Lotpaste von Hersteller B sind selbst bei den größten diagonalen Abweichungen von 75 µm in x/y-Richtung keine fehlerhaften Kontaktierungen aufgetreten. Dies lässt sich auf die unterschiedliche Flussmittelformulierung zurückführen, welche zu einem abweichenden Einschwimmverhalten der Bauelemente während des Lötprozesses führt.

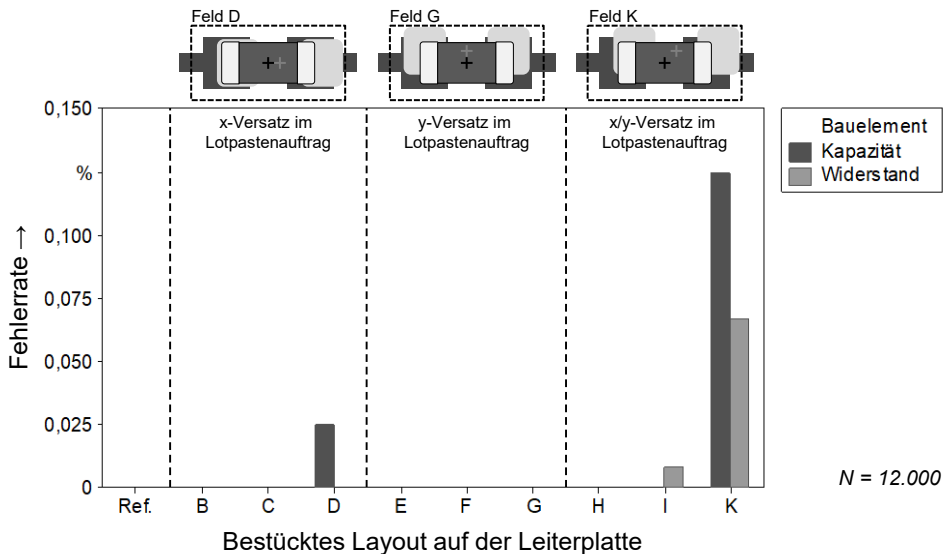


Bild 70: Provozierte Fehlerrate durch Tombstone-Bildung in Abhängigkeit des Versatzes im Auftrag von Lotpaste (Hersteller A)

Mit insgesamt 17 im Vergleich zu 10 Tombstones treten Fehlstellen zu etwa zwei Dritteln vorzugsweise bei Kondensatoren auf, was sich auf den höheren Bauteilkörper und damit ein abweichendes Kippmoment zurückführen lässt. Die weitere Auswertung nach der Abweichung im Lotpastendruck zeigt, dass die vertikale Abweichung (Feld E bis G) besser kompensiert werden kann als eine horizontale Abweichung im Pastenauftrag (Feld B bis D). Die größte Gefahr zur Bildung von Fehlstellen besteht dabei im kombiniert auftretenden Versatz von Lotpaste in vertikaler und horizontaler Richtung (Feld H bis K).

4.3.2 Bewertung des Versatzes im Schablonendruck und der Bestückposition

Bei gleichzeitiger Abweichung im Lotpastenauftrag und im Bestückprozess ist zwischen den beiden Möglichkeiten zu unterscheiden, ob die Bestückposition dem Lotpastendruck folgt oder diesem entgegengesetzt ausgeprägt ist (vgl. auch Bild 69). Bauelemente, die exakt in die versetzt gedruckte Lotpaste platziert sind, zeigen im Rahmen der Versuchsreihen mit insgesamt 12.000 Bauelementen keine einzige Fehlstelle, was die vergleichsweise hohen wirkenden Kräfte bei der Neu-Ausrichtung der Bauteile stark verdeutlicht. Die Korrektur der Bestückposition zur Kompensation von Schwankungen im Lotpastenauftrag erscheint daher als sehr effektive Maßnahme zur Vermeidung von Fehlstellen.

Für die Ermittlung der Grenzen bei der Neuausrichtung der Bauelemente erfolgt die erneute Durchführung einer Versuchsreihe mit entgegengesetzten Ausrichtungen im Versatz der Lotpaste und der Bestückpositionen. Dabei wird ausschließlich Hersteller B verwendet, der im vorangegangenen Versuch bei Abweichungen im Lotpastendruck kein einziges Fehlerbild aufweist. Ein Versatz von $75\ \mu\text{m}$ im Druckbild in Kombination mit $75\ \mu\text{m}$ entgegengerichteter programmierter Bestückposition stellt hierbei die maximal berücksichtigte Differenz in der Positionierung dar. Bild 71 verdeutlicht grafisch die innerhalb der Versuche am stärksten gewählten Abweichungen von $150\ \mu\text{m}$ zwischen der gedruckten Lotpaste und dem Bauteil vor dem Reflow-Löten, welche in horizontaler, vertikaler oder diagonaler Richtung einbezogen sind.

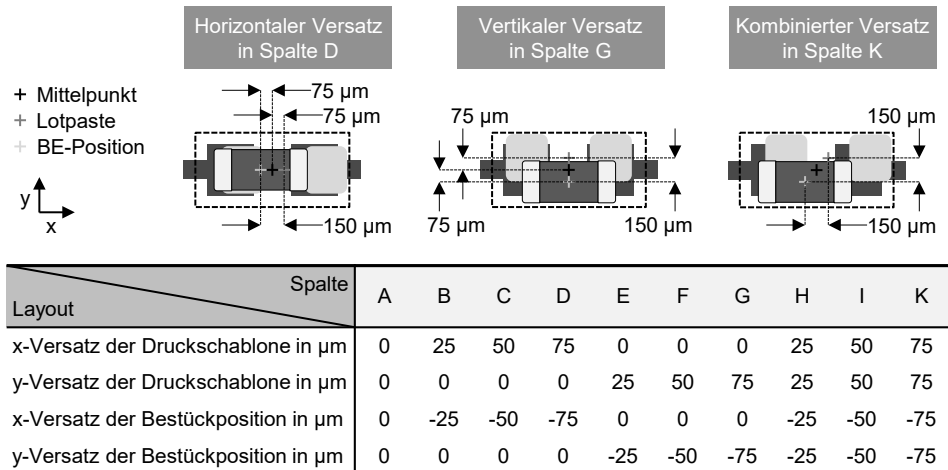


Bild 71: Schematische Darstellung der definierten Abweichungen im Lotpastendruck und in der programmierten Bestückposition

Für die Versuchsreihe zum entgegengesetzten Versatz von Lotpastendepot und Bauteil werden insgesamt 6.000 Bauelemente verarbeitet. Durch die stark vergrößerte Abweichung zwischen Bauteil- und Lotpastenposition wird mit 831 Fehlern ein signifikanter Anteil an nicht abnahmefähigen Verbindungen provoziert. Im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen ergibt sich mit einem Fehleranteil von 52 % bei Widerständen keine erhöhte Fehlerrate bei Kondensatoren, was auf die starke Variation und die erheblichen Abweichungen von der Referenzbestückung hindeutet. Gestützt wird dies durch insgesamt 88 fehlerhafte Kontaktierungen überwiegend in Feld D, wobei das Bauteil komplett auf eine Seite der SMD-Landeflächen versetzt verlötet ist. Die Betrachtung der insgesamt 743 erfassten

Tombstones weist mit einem Anteil der Kondensatoren von 54 % den erwarteten Trend zur erhöhten Fehlerbildung aufgrund der höheren Bauteilgeometrie auf.

Die systematisch versetzte Positionierung vor dem Reflow-Löten zeigt signifikante Unterschiede der provozierten Fehlerrate. Bild 72 stellt in einer Gesamtübersicht die ermittelten Fehlerraten dar, wobei die aufgetretenen Fehler nach gewählter Bestückvariante auf dem zugehörigen Layout der Leiterplatte zugeordnet sind.

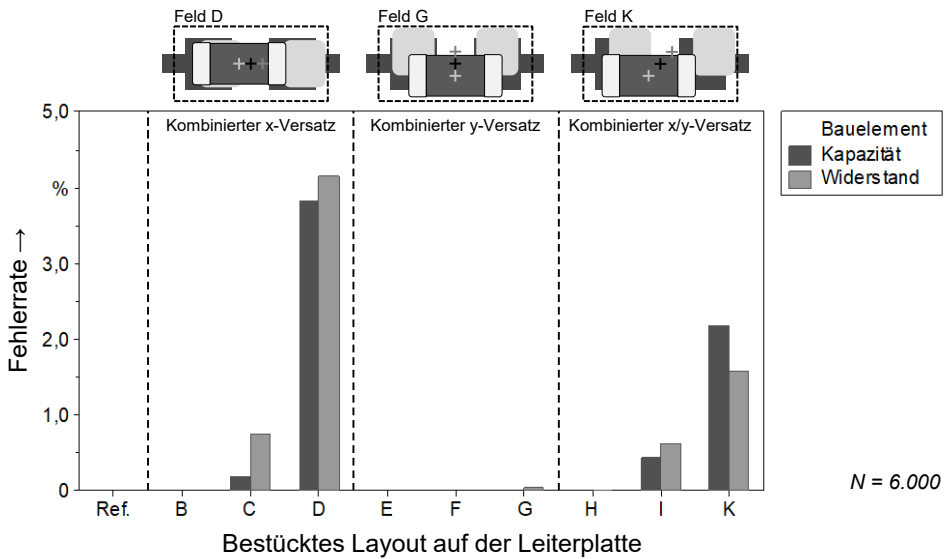


Bild 72: Provozierte Fehlerraten durch einen entgegengerichteten Versatz von Lotpastenauftrag und Bauelement

Die Referenzbestückung in Feld A zeigt erneut keine Fehlstellen. Mit ansteigendem horizontalem Versatz zwischen Lotpaste und Bauelement ist eine deutlich erhöhte Anzahl an Fehlern festzustellen. Insbesondere die mit 150 µm Versatz zwischen Lotdepot und Bauelement bestückten Bauteile in Feld D besitzen einen erheblichen Fehleranteil. Ein Versatz in vertikaler Richtung wird erneut sehr gut kompensiert und weist lediglich vereinzelte Fehlstellen in Feld G mit 150 µm Versatz auf. Ein diagonaler Offset zwischen Bauteil und aufgetragener Lotpaste wird bis zu 50 µm in Feld H noch kompensiert, darüber hinaus wird auch für diesen Fall die Ausprägung von Tombstones provoziert. Die insgesamt geringere Fehlerrate im Vergleich zu horizontalem Versatz deutet darauf hin, dass bei diagonaler

Verschiebung noch eine höhere Wahrscheinlichkeit besteht, dass das Bauelement korrekt verlötet wird, was auf den möglicherweise geringeren Anteil an verdrückter Lotpaste unter dem Bauelement zurückzuführen ist.

4.3.3 Zusammenfassende Bewertung

Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen werden insgesamt 18.000 Bauelemente der Größe 01005 verarbeitet. Neben einer Referenzbestückung sind unterschiedliche Kombinationen aus Versatz im Lotpastenauftrag und programmiertem Bestückversatz berücksichtigt, um den Einfluss auf nicht abnahmefähige Kontaktierungen zu bestimmen. In den Referenzpositionen ohne Versatz sind keine Fehlerbilder aufgetreten, was ein Indiz für die grundsätzliche Verarbeitbarkeit und eine gute Prozessführung darstellt. Für die Analyse des Einflusses eines systematischen Versatzes der aufgetragenen Lotpastendepots werden mit Hilfe einer entwickelten Druckschablone Bauelemente verarbeitet und hinsichtlich Fehlstellen inspiziert. Dabei sind bei Bestückung in Sollposition erhebliche Unterschiede in der Fehlerrate feststellbar, wobei lediglich bei einem Lotpastenhersteller Fehlstellen aufgetreten sind. Ein horizontaler Versatz wirkt sich zunehmend auf die Ausprägung von Tombstones aus, wohingegen ein vertikaler Versatz sehr gut kompensiert werden kann. Eine diagonal versetzt gedruckte Lotpaste provoziert die meisten Fehlstellen. Bild 73 visualisiert die ermittelte Gesamtfehlerrate von 0,23 % qualitativ für den entsprechenden Versatz im Lotpastenauftrag.

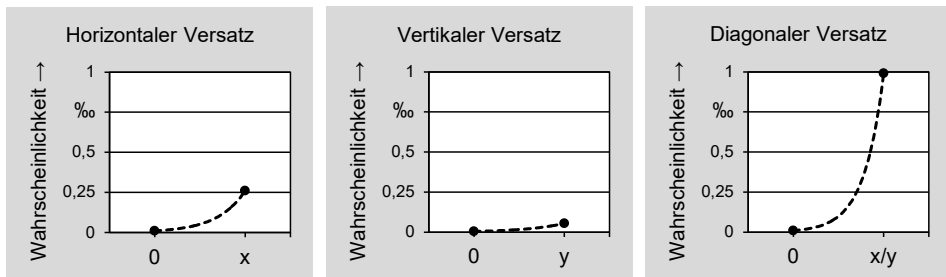


Bild 73: Ermittelte Wahrscheinlichkeit für Fehlerbilder bei Versatz im Schablonendruckprozess

Bauelemente, welche dem systematischen Versatz des Lotpastenauftrags folgen, weisen im Rahmen der Versuchsreihen keine einzige Fehlstelle auf. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Korrektur der Bestückposition anhand des Versatzes im Schablonendruck eine effektive Maßnahme zur Fehlervermeidung darstellt. Unter Verwendung des Lotpastenherstellers C wird in einer zweiten Versuchsreihe ein entgegengerichteter Versatz von

Lotpaste und Bestückposition untersucht. Hierbei wird eine Gesamtfehler-rate von 13,85 % erzielt, was diese kritischen Randbedingungen bei der Ver-arbeitung der Bauteilgröße 01005 verdeutlicht. In Bild 74 ist der ermittelte Zusammenhang des Prozessverhaltens qualitativ veranschaulicht.

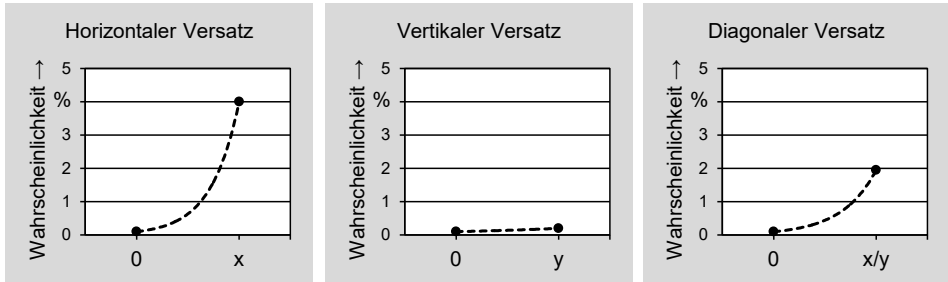


Bild 74: Ermittelte Wahrscheinlichkeit für Fehlerbilder bei kombiniertem Versatz aus Schablonendruck und Bestückprozess

Ein horizontaler Versatz wirkt sich am deutlichsten auf Fehlstellen aus. Die Ursache hierfür wird in dem Verdrücken von Lotpaste unter den Bauelementkörper in Kombination mit dem unzureichend aufliegenden Bauelement vor dem Lötprozess vermutet. Ein vertikaler Versatz kann auch in kombiniertem Versatz von Lotpaste und Bestückposition sehr gut kompensiert werden und führt erst bei signifikanten Abweichungen zu Fehlstellen. Diagonal versetzt gedruckte Lotpaste und entgegengerichtete Bestückpositionen weisen ebenfalls einen erheblichen Fehleranteil auf, wobei bei guter Prozessführung durch ein optimiertes Aufschmelzverhalten der Lotpaste die Neuausrichtung mit Kompensation begünstigt werden kann.

4.4 Prozessführungsgrößen für eine erfolgreiche Kontaktierung

Der Bestückprozess für passive Bauteile der Größe 01005 und kleiner ist bei der Verwendung moderner Bestückungsautomaten mit entsprechenden Genauigkeitswerten häufig gegeben. Um die Prozessfähigkeit zu erhalten, sollte die Bestückgenauigkeit regelmäßig überprüft und durch entsprechende Kalibriermaßnahmen optimiert werden, um den Platziervorgang mit optimierten Maschinenparametern sicherzustellen. Auf Basis der durchgeführten Versuchsreihen wurde die Verkipfung von Bauelementen beim schrägen Auftreffen auf die Lotpastendepots ebenso wie das Verquetschen von Lotpaste als weniger relevant eingestuft als der Einfluss der verwendeten Bestückkraft. Eine übermäßige Belastung im Montageprozess wurde hierbei als kritisch nachgewiesen, wobei entweder direkt nach der

Bestückung oder nach Auslagerung der Baugruppen in der Klimakammer ein vollständiges Versagen der Bauteile auftreten kann.

Das Verhalten der Neu-Ausrichtung von Bauteilen der Größe 01005 während des Reflow-Lötprozesses wurde in einer breit angelegten Versuchsreihe unter Variation der Lotpaste bzw. des Lotpastentyps, der Schablonendicke, der SMD-Landefläche und der eigentlichen Bestückposition systematisch untersucht. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Gestaltung der SMD-Landeflächen erheblichen Einfluss auf die erzielbare Qualität einer erfolgreichen Kontaktierung aufweist. Darüber hinaus wurde das Lotpastenmaterial als wesentlicher Einflussfaktor identifiziert, wobei sich die Flussmittelformulierung der Pasten verschiedener Hersteller signifikant auf das Benetzungsverhalten und damit auf Fehlstellen bzw. die Ausprägung der Kontaktierung auswirkt. Ein Versatz der Bauelemente in Längsrichtung des Bauteilkörpers sowie eine Verdrehung wurden als besonders kritische Einbausituationen bewertet, wobei die unterschiedlich wirkenden Kräfte der Kontaktierungspartner zu abweichenden Prozessergebnissen führen.

Eine erweiterte Betrachtung des Selbstzentriereffektes wurde in der Evaluation verschiedener Kombinationen aus Versatz der Lotpaste und der platzierten Bauteile erzielt. Abweichungen im Schablonendruckprozess in Bezug zur Längsrichtung des Bauteils wirken sich deutlich stärker aus als vertikal versetzte Lotpaste. Ein kombinierter Zustand mit gleichzeitiger Abweichung der Lotpastendepots in x- und y-Richtung wurde als kritischste Ausprägung nachgewiesen. Für eine präzisierte Bestimmung der Prozessgrenzen wurden darüber hinaus kombinierte Einbausituationen mit Versatz im Schablonendruckprozess und des Bestückprozesses analysiert. Diese Randbedingungen provozieren deutlich mehr Fehlstellen, wobei erneut die Abweichungen in Längsrichtung des Bauteils sowie diagonaler Versatz als kritisch einzustufen sind.

Neben der Referenzbestückung ohne definierte Abweichungen konnten ebenso Bauteile, welche dem Versatz gedruckter Lotpastendepots folgend platziert wurden, prozesssicher verarbeitet werden. Dies stellt neben der hohen Benetzungsfähigkeit der Kontaktierungspartner die Bedeutung heraus, dynamisch angepasste Bestückpositionen auf Lotpastendepots mit spezifisch ermittelten Qualitätsmerkmalen des Lotpastenauftrags einzusetzen. Bei der Bewertung von Fehlstellen konnte zudem nachgewiesen werden, dass ein Schwerpunkt den Chip-Keramikkondensatoren zugeordnet werden kann. Dies liegt im Vergleich zu Chip-Widerständen in der annähernd doppelten Bauteilhöhe begründet, was eine veränderte

Krafteinwirkung bei ungleichmäßiger Benetzungssituation und damit die Bildung von Tombstones aufgrund der wirkenden Oberflächenspannung bedingt.

Für die Verarbeitung miniaturisierter Bauteile ist es daher entscheidend, die gesamten Einflussfaktoren, welche auf eine erfolgreiche Kontaktierung einwirken, zu erfassen und für den spezifischen Anwendungsfall zu bewerten. Daneben können auch anlagenseitige Modifikationen die Neu-Ausrichtung der Bauelemente durch Schwingungsanregung während des Lötprozesses unterstützen [121, 123, 124]. An dieser Stelle sei auf die ergänzende Diskussion der Einflussfaktoren im Bestückprozess sowie während des Reflow-Lötprozesses in Abschnitt 5.1 dieser Arbeit hingewiesen. Mit genauer Kenntnis der Verarbeitungsbedingungen können auch hochminiaturisierte Bauformen mit einem automatisierten Bestückverfahren und abschließenden Lötprozess in der SMT prozesssicher verarbeitet werden.

5 Prozessübergreifende Bewertung von Qualitätsmerkmalen mischbestückter Baugruppen

Ein Trend in der Oberflächenmontagetechnik stellt die schrittweise Umsetzung neuartiger Produktionstechnologien dar, welche häufig unter dem Schlagwort ‚Industrie 4.0‘ zusammengefasst werden [125]. Ziel der Integration von intelligenter und autonomer Sensorik im Fertigungsbereich ist eine optimierte Ansteuerung der ausführenden Aktorik [126]. Durch die Vernetzung findet ein Datenaustausch mit Kommunikation von Maschine zu Maschine statt, wodurch ein geschlossener Regelkreis ermöglicht wird. Bei Anwendung auf Produktionsprozesse in der Elektronik stehen allerdings zwei konkurrierende Entwicklungen gegenüber. Zum einen steigt die Komplexität moderner elektronischer Baugruppen durch verdichtetes Leiterplatten-Design bei einer gleichzeitig zunehmenden Miniaturisierung der Bauelemente.

Dies ist beispielsweise am Einsatz passiver Zweipoler zu erkennen, wobei der Bedarf an Bauteilen der Größe 0201 und 01005 stark ansteigt, wohingegen die Baugrößen 0603 und 0402 stagnieren oder sogar abnehmen [7, 16]. Zum anderen stellt die Verwendung miniaturisierter Bauformen erhöhte Anforderungen an die eingesetzten Inspektionssysteme in der Produktion [28]. Die Inspektion von Komponenten der Baugröße 01005 oder kleiner benötigt zur Erreichung der geforderten Qualität der Inspektion höhere Auflösungen oder neuartige Kamerasysteme der eingesetzten Anlagen. Dies ist mit einer erhöhten Datenakquisition und damit steigenden Anforderungen an die Bildaufnahme und -verarbeitung verbunden, um die Linientakzeit an dieser Stelle nicht negativ zu beeinflussen. Damit fällt in der Regel ein höheres Datenvolumen an, welches die Identifikation relevanter Prozessdaten zur Prozessanalyse und Datenarchivierung erfordert.

Daher wird die Implementierung von Regelkreisen in einer SMD-Fertigungslinie im folgenden Kapitel erläutert. Hierzu ist die umfassende Kenntnis der Einzelprozesse zur Beschreibung der beteiligten Einflussfaktoren notwendig, um die Stellgrößen im gesamten Fertigungsprozess zu identifizieren. Zur Beschreibung des Verhaltens von Bauteilen der Größe 01005 erfolgt im Rahmen einer praktischen Versuchsreihe neben der Einzelprozessbetrachtung die Korrelation von Daten aus der Lotpasteninspektion, der automatischen optischen Inspektion und Röntgenanalyse auf einer mischbestückten Baugruppe mit miniaturisiertem Bauteilspektrum.

Auf Basis der Versuchsreihen wird das Potenzial von Regelkreisen in der Elektronikproduktion aufgezeigt und Strategien zur erfolgreichen Anwendung abgeleitet. Die Untersuchungen stellen damit einen Beitrag zur Anwendung geschlossener Regelkreissysteme im industriellen Umfeld dar. [127]

5.1 Einflussgrößen auf die Produktionsprozesse der SMT

Die Fertigung elektronischer Baugruppen besteht im Wesentlichen aus den Produktionsschritten Lotpastenauftrag, Bestücken der Bauelemente und Reflow-Löten zum Erzielen einer elektrischen und mechanischen Verbindung. Die fortschreitende Miniaturisierung stellt dabei erhöhte Anforderungen an alle beteiligten Inspektions- und Produktionsprozesse. Eine genaue Kenntnis aller Einflussgrößen ist von hoher Bedeutung, um bei verkleinerten Prozessfenstern eine hohe Ausbeute mit hoher Qualität zu erzielen. Die Betrachtung der einzelnen Technologien stellt hierzu die notwendige Basis dar, um die beteiligten Produktionsprozesse zu stabilisieren. Für die Analyse der Auswirkungen von Bauelementen der Größe 01005 werden daher im Folgenden zunächst die wesentlichen Einzelprozesse systematisch dargestellt. Darüber hinaus muss für eine nachhaltige Optimierung die gesamte Produktionskette analysiert werden, um auch prozessübergreifende Effekte und Wechselwirkungen zu identifizieren und Maßnahmen ableiten zu können [128]. Dies bildet die Grundlage, um automatisierte Regelschleifen in der Prozesskette elektronischer Baugruppen anzuwenden.

Wie in den Untersuchungen zum Lotpastenauftrag erläutert, wird die Ursache für Produktionsfehler auf elektronischen Baugruppen in verschiedenen Studien zwischen 42 % und 80 % dem Schablonendruckprozess zugeordnet [32–36]. Die teilweise recht hohen Anteile für die Einschätzung dieses Fehlerschwerpunkts liegen in der vergleichsweise großen Anzahl an Einflussfaktoren, welche das Druckergebnis beeinflussen. Da die Wirkzusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und dem erzielten Prozessergebnis aufgrund der vielen Randbedingungen und individuellen Parameterkombinationen größtenteils unbekannt sind, ist dem Schablonendruckprozess hinsichtlich der Fertigungsstabilität ein hohes Maß an Komplexität zuzuordnen. Bild 75 visualisiert systematisch die Einflussgrößen auf das Prozessergebnis.

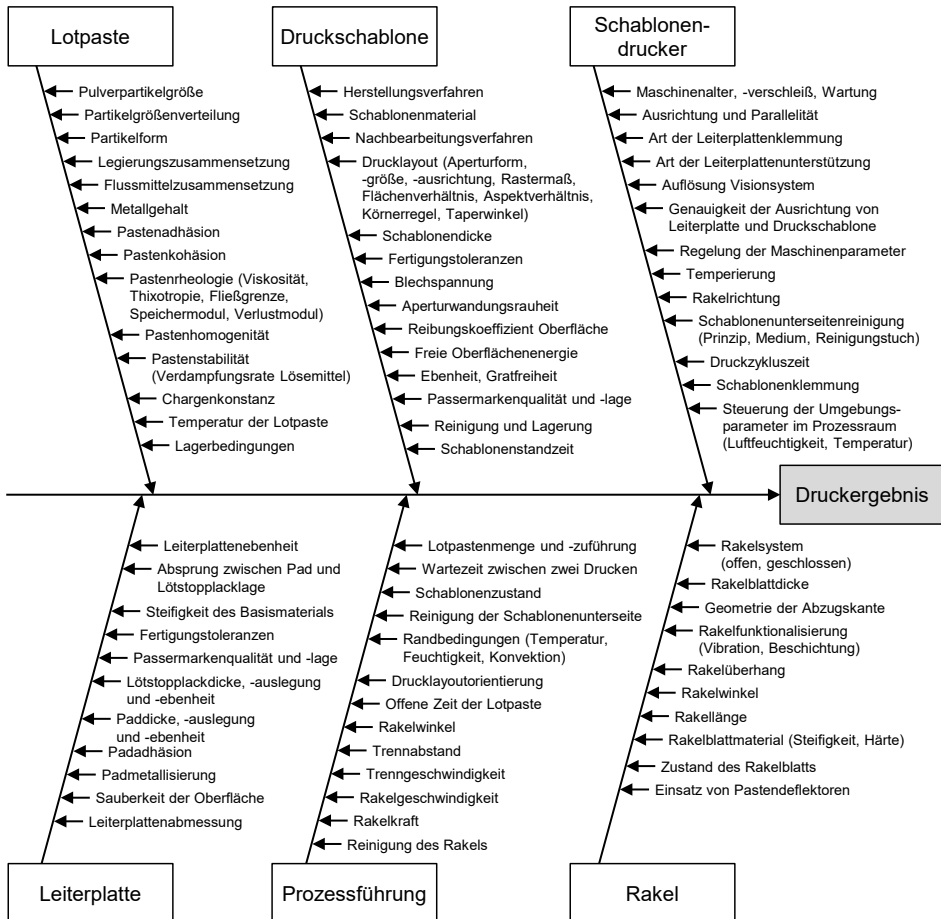


Bild 75: Einflussgrößen auf den Schablonendruckprozess auf Basis [22]

Für die Verarbeitung miniaturisierter Bauelemente bekommen die unterschiedlichen Einflussgrößen abweichende Bedeutung auf das erzielbare Prozessergebnis. Ein zentrales Element stellt dabei beispielsweise die verwendete Lotpaste dar, welche unter Umständen eine feinere Körnung für eine hohe Druckqualität bedingt. Der Einsatz einer Lotpaste höheren Typs bedeutet häufig einen tiefgreifenden Eingriff in bestehende Fertigungen, welcher eine umfassende Qualifizierung über die gesamte Prozesskette verlangt. Insbesondere ein abweichendes Flussmittelsystem bedingt die Betrachtung der Einflüsse auf die Einzelprozesse bis hin zum Endprodukt. Eine weitere Herausforderung, die mit der Einführung miniaturisierter Bauformen einhergeht, wirkt sich signifikant auf die Gestaltung der Druckschablone aus. Miniaturisierte Bauformen bedingen häufig verkleinerte

Abmessungen der SMD-Landeflächen und damit kleiner werdende Abmessungen der Schablonenöffnungen. Insbesondere bei Mischbestückungen von Bauelementen mit unterschiedlichem Bedarf an Lotpastenmenge ergibt sich ein Spannungsfeld der erzielbaren Qualität im Schablonendruckprozess, welches in Bild 76 herausgestellt wird.

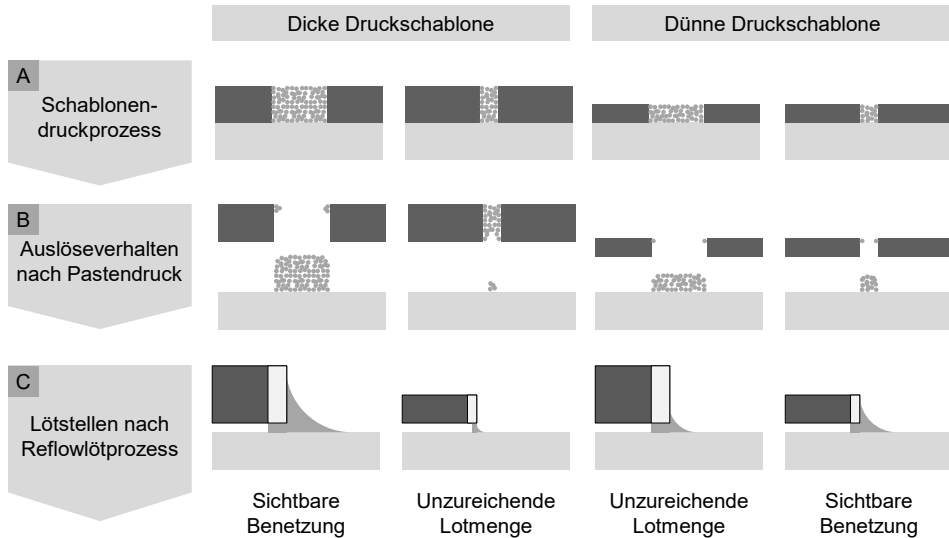
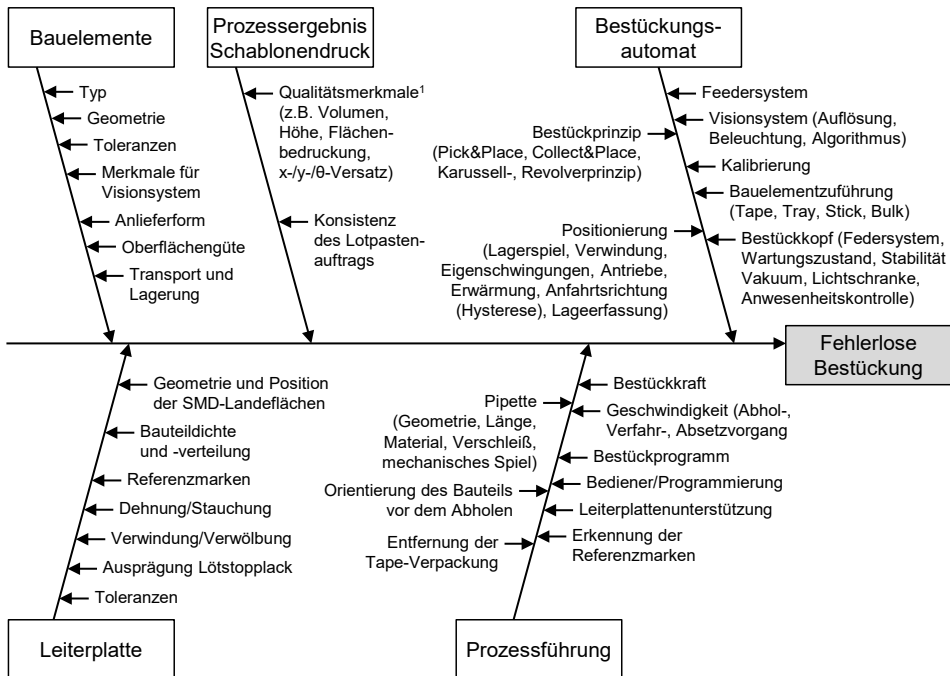


Bild 76: Herausforderungen in der Gestaltung von Druckschablonen bei miniaturisierten Bauformen in Mischbestückung nach [52, 129]

Ausgehend von einer möglichst hohen Basisdicke von Schablonen für ein breites Bauteilspektrum ergibt sich aufgrund kritischer Flächenverhältnisse im Schablonenlayout ein herabgesetztes Auslöseverhalten für miniaturisierte Bauformen. Eine dünnere Druckschablone ermöglicht einen stabileren Druckprozess für kleine Bauformen, ist aber begrenzt in dem verfügbaren Lotangebot für größere Anschlüsse. Der Einsatz von Stufenschablonen kann die unterschiedlichen Anforderungen an die Gestaltung der Druckschablone nur bedingt erfüllen, denn neben den deutlich höheren Kosten ergeben sich weitere Nachteile wie z. B. Einschränkungen im Layout oder auch Effekte durch abweichenden Lotpastenauftrag oder erhöhte Streuung in Übergangsbereichen.

Der Bestückprozess elektronischer Bauteile ist ebenfalls von einer Vielzahl an Einflussgrößen bestimmt. Einige dieser Größen lassen sich in der Prozessführung beeinflussen, wohingegen äußere Einflussfaktoren sowie materialbedingte Faktoren durch Bauelemente, Leiterplatte sowie das Ergebnis aus dem vorangegangenen Schablonendruckprozess die Fehlerrate der

Bestückung bestimmen. Viele Einflussfaktoren auf die erzielbare Bestückgenauigkeit gewinnen durch die fortschreitende Miniaturisierung an Bedeutung, da die Toleranzen im Bestückprozess selbst sowie prozessübergreifend deutlich kleiner werden und damit erhöhte Verarbeitungsbedingungen stellen. In Bild 77 sind die wesentlichen Einflussgrößen auf den Bestückprozess systematisch dargestellt.



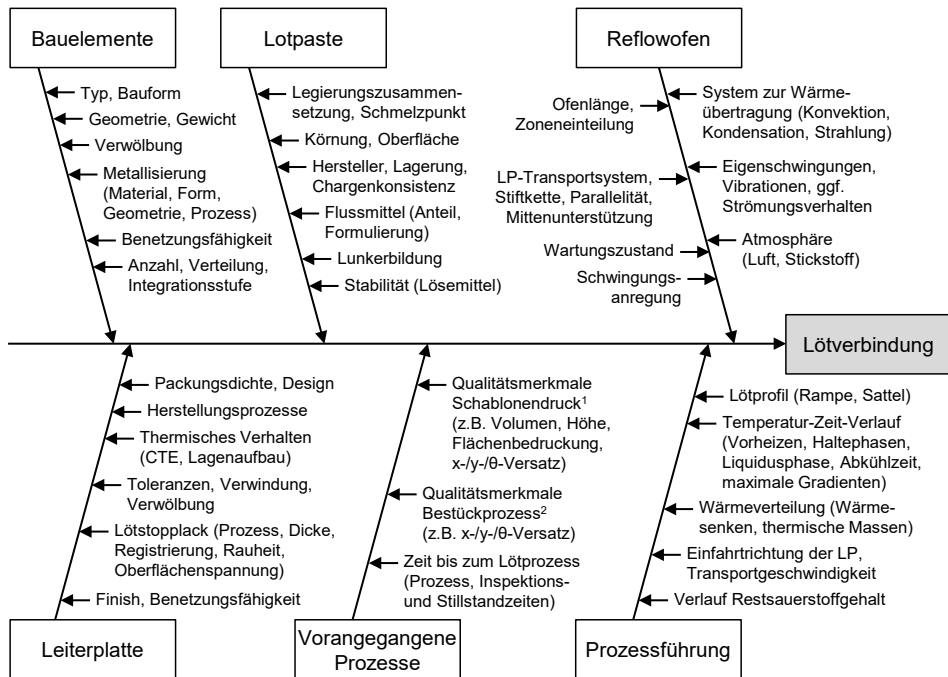
¹vgl. auch Darstellung „Einflussgrößen auf den Schablonendruckprozess“

Bild 77: Einflussgrößen auf den Bestückprozess nach [96, 130–136]

Die Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass hochpräzise Bestückungsautomaten aktueller Generationen grundsätzlich in einem hohen Maß fähig sind, miniaturisierte Bauformen der Größe 01005 innerhalb der Spezifikationen zu verarbeiten, wenn als zulässiger Versatz 50 % der Bauteilmetallisierung angenommen wird. Neben der Leiterplatte sowie den angeführten Ergebnissen aus dem Schablonendruckprozess stellen die zu verarbeitenden Komponenten einen wesentlichen Faktor in der erzielbaren Qualität dar. Für eine weitere Bewertung dieses Faktors werden daher jeweils 7 verschiedene Chargen von Widerständen (CR01005) und Kondensatoren (CC01005) hochgenau mittels Lasermikroskopie vermessen, um die Varianz in der Anlieferform zu analysieren. Die Ergebnisse der stichprobenartigen Messung von jeweils 18 Bauelementen

sind im Anhang aufgeführt (vgl. Tabelle 27 und Tabelle 28). Die Messergebnisse verdeutlichen die teilweise deutlich abweichenden Abmessungen von 01005-Bauelementen zur Herstellerangabe und können Auswirkungen auf die Auslegung der SMD-Landeflächen sowie die Gestaltung der Druckschablone haben. Aufgrund der erfassten Varianz der Messwerte, insbesondere von Länge, Breite und Höhe des Bauteilkörpers sowie der Metallisierung, sind steigende Anforderungen an den Bestückprozess mit kleiner werdenden Abmessungen zu erwarten. Neben der erzielbaren Qualität kann dies einen signifikanten Einfluss auf die Abwurfrate des Bestückers bewirken.

Der abschließende Reflow-Lötprozess stellt eine elektrische und mechanische Verbindung zwischen Bauelement, Lotpaste und Leiterplatte her. Bild 78 zeigt einen Überblick der Einflussgrößen, welche während des Reflow-Verfahrens auf die erzielbare Lötverbindung einwirken.



¹vgl. auch Darstellung ‚Einflussgrößen auf den Schablonendruckprozess‘

²vgl. auch Darstellung ‚Einflussgrößen auf den Bestückprozess‘

Bild 78: Einflussgrößen auf den Reflow-Lötprozess [115, 123, 137–150]

Die Qualität der Lötverbindung ist dabei stark von vorherigen Prozessschritten abhängig. Beispielsweise können dies leiterplattenbedingte Randbedingungen der Leiterplatte, ein unzureichender Lotpastenauftrag oder

Fehler im Bestückprozess der Bauelemente sein. Darüber hinaus bestimmt die Anlage selbst sowie die Prozessführung maßgeblich die erzielbare Qualität des Lötprozesses. Für eine hohe Qualität müssen während des Lötprozesses definierte Temperaturen eingehalten werden, welche zum einen durch die verwendete Lotpaste und zum anderen durch die eingesetzten Bauelemente bestimmt werden. Die üblicherweise angewendeten Vorgaben nach IPC/JEDEC für ein bleifreies Temperatur-/Zeitprofil sind in Bild 79 zusammengefasst.

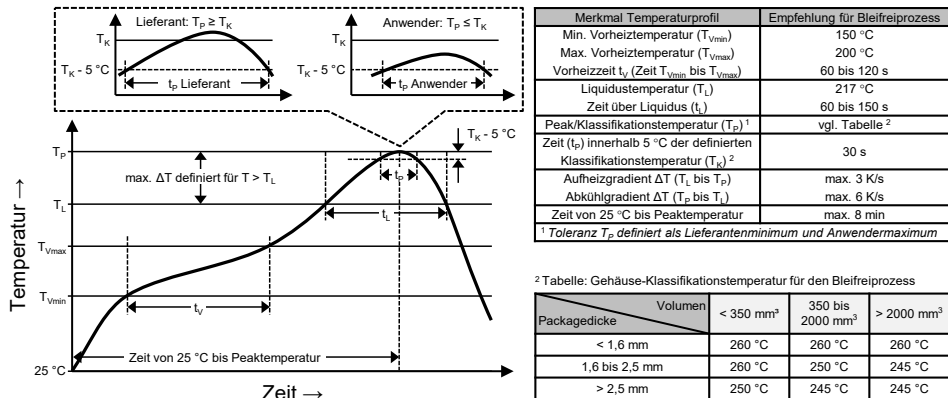


Bild 79: Definition von Lötprofilgrenzen gemäß J-STD-020D [15]

Für eine gesicherte Lötverbindung werden bei einer typischen bleifreien Lotpaste (z. B. einer SAC305-Legierung) zudem häufig Temperaturen von mindestens 10 Sekunden über 230 °C gefordert, wobei die maximal möglichen Temperaturen durch feuchteempfindliche Bauelemente wie BGAs (engl. Ball Grid Array) oder Elektrolytkondensatoren definiert sind. In diesem Spannungsfeld ist die Temperaturführung bei Bauelementen der Größe 01005 eher sekundär, da diese Bauelemente in der Regel deutlich robuster gegenüber den Maximaltemperaturen sind. Um dennoch die Spezifikationen des Grenzprofils bei einer mischbestückten Baugruppe einzuhalten, muss die Prozessführung mit den vorhandenen thermischen Massen sowie den lokal exponierten Positionen spezifisch angepasst werden. Es gilt hierbei, die unterschiedlichen Anforderungen an die Lötprozessgestaltung zu beachten, welche in der Kupferverteilung bzw. dem Layout der Leiterplatte sowie den spezifischen Eigenschaften der eingesetzten Bauelemente begründet liegen.

Die Verarbeitung von Bauelementen der Größe 01005 bewirkt damit eine veränderte Gewichtung der aufgeführten Einflussgrößen in der gesamten Prozesskette. Die miniaturisierten Abmessungen führen bei kleinsten

Schwankungen in der Prozessführung aufgrund der signifikant größeren Auswirkungen innerhalb der Toleranzkette zu einer verringerten Ausbeute. Für die optimale Gestaltung einer robusten Produktion ist es daher essenziell, das Verhalten von Bauelementen der Größe 01005 im Detail zu betrachten, um damit Prozessfenster aller beteiligten Prozessschritte ableiten zu können. Mit dieser Kenntnis besteht die Möglichkeit, prozessübergreifende Regelkreise für eine optimierte Produktion elektronischer Baugruppen aufzubauen.

5.2 Evaluation der Verarbeitung von Bauelementen der Größe 01005 auf einer Leiterplatte mit heterogenem Bauteilspektrum

Bauteile der Größe 01005 stellen aufgrund der vergleichsweise kleinen Abmessungen erhebliche Ansprüche an die eingesetzten Komponenten und Materialien. Daher ist eine ganzheitliche Untersuchung der Prozesskette erforderlich, um Verständnis für mögliche Einflussfaktoren aufzubauen und eine möglichst geringe Fehlerrate für die zu fertigende elektronische Baugruppe zu erzielen. In einer systematischen Versuchsreihe werden wesentliche Prozessparameter variiert und die Auswirkungen auf die Fertigungsqualität von Bauteilen der Größe 01005 auf einer Leiterplatte mit hoher Bauteilvarianz bewertet. Für die Untersuchungen wird ein spezielles Layout für eine 4-lagige Leiterplatte mit Abmessungen von 180 mm × 110 mm und einer Dicke von 1,0 mm entwickelt, welche in Bild 80 visualisiert ist.

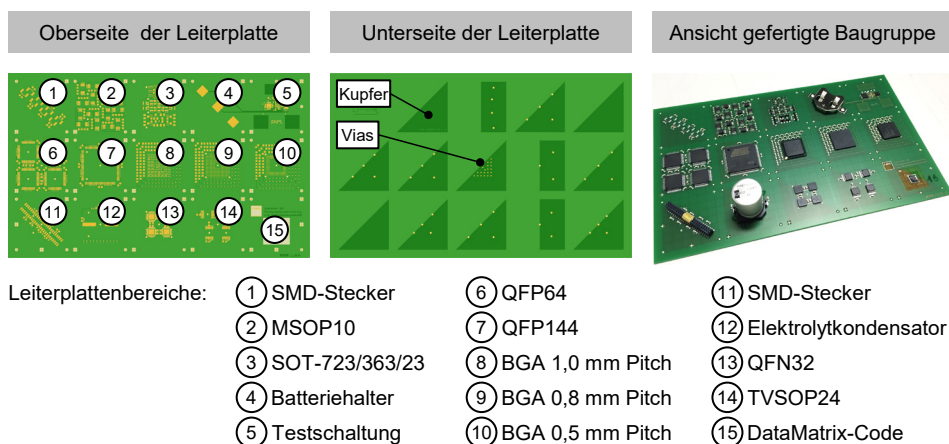


Bild 80: Entwickelter Versuchsträger mit Komponenten auf der Oberseite und berücksichtigten Vias bzw. Kupferflächen auf der Unterseite

Um den Einfluss der Metallisierung zu bestimmen, kommen Oberflächen mit chemisch Zinn sowie einem Nickel-Gold-Finish zum Einsatz. Unterteilt in verschiedene Felder enthält das Layout über 20 verschiedene Komponenten, wie beispielsweise QFP, QFN, SOT und BGA mit einem Raster bis zu 0,5 mm sowie passive Bauteile der Bauform 0603 bis hin zu 01005. Insgesamt sind damit 1.249 Bauelemente in einem heterogenen Bauteilspektrum auf der Leiterplatte vorgesehen. Darüber hinaus wird gezielt Kupfer in den Innenlagen bzw. insbesondere auf der Unterseite des Layouts vorgesehen, welches mittels Durchkontaktierungen das Verhalten einer thermisch kritischen Anbindung von SMD-Landeflächen abdecken soll. In Anlehnung an IPC-7351B [62] und insbesondere der Auswertung verschiedener Veröffentlichungen in [71] wird das Anschlusslayout für Widerstände mit $190\ \mu\text{m} \times 220\ \mu\text{m}$ sowie $210\ \mu\text{m} \times 220\ \mu\text{m}$ für die mit $300\ \mu\text{m}$ nahezu doppelt so hohen Kapazitäten definiert (vgl. auch Abschnitt 3.2). Der vollständige Versuchsplan ist in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Vollständiger Versuchsplan mit einer Gesamtzahl von 96 Leiterplatten in 24 Versuchsreihen

Versuchsblock	Versuchsreihe	LP-Nr.	Leiterplattenoberfläche	Schablondicke	Lotpastenhersteller	Lotpaste	Reflow-Lötprofil
1	1	1-4	NiAu	80 μm	A	Typ 4	niedrig
	2	5-8	chem. Sn				hoch
	3	9-12	NiAu				
	4	13-16	chem. Sn				
2	5	17-20	NiAu	100 μm	A	Typ 5	hoch
	6	21-24	chem. Sn				niedrig
	7	25-28	NiAu				
	8	29-32	chem. Sn				
3	9	33-36	NiAu	80 μm	A	Typ 5	niedrig
	10	37-40	chem. Sn				hoch
	11	41-44	NiAu				
	12	45-48	chem. Sn				
4	13	49-52	NiAu	80 μm	A	Typ 4	hoch
	14	53-56	chem. Sn				niedrig
	15	57-60	NiAu				
	16	61-64	chem. Sn				
5	17	65-68	NiAu	100 μm	A	Typ 5	niedrig
	18	69-72	chem. Sn				hoch
	19	73-76	NiAu				
	20	77-80	chem. Sn				
6	21	81-84	NiAu	80 μm	A	Typ 5	hoch
	22	85-88	chem. Sn				niedrig
	23	89-92	NiAu				
	24	93-96	chem. Sn				

Die Versuchsreihen werden unter konstanten klimatischen Bedingungen an einer automatisch verketteten Produktionslinie durchgeführt. Nach dem Schablonendruckprozess mit einem Schablonendrucker vom Typ DEK Horizon erfolgt eine 3D-Lotpasteninspektion mittels der Anlage Viscom S3088 ultra zur Charakterisierung des Pastenauftrags. Im Anschluss findet die Bestückung der elektronischen Bauelemente mit einem Bestückungsautomaten vom Typ Siplace SX2 nach dem Prinzip Collect & Place sowie Pick & Place statt. Um einen systematischen Versatz weitestgehend auszuschließen, erfolgt vor Versuchsbeginn eine Kalibrierung des Bestückers. Nach dem abschließenden Lötprozess werden alle Baugruppen in einer automatischen optischen Inspektion vermessen und zusätzlich per Röntgenanalyse bewertet. Für jede Versuchsreihe werden nach Auftragen und Walken der Lotpaste nach maschineninterner Reinigung 4 bedruckte Leiterplatten mittels 3D-SPI vermessen. Nachdem die erste bedruckte Leiterplatte nach der Lotpastevermessung nicht weiterverarbeitet wird, durchlaufen 3 Leiterplatten jeder Testreihe für eine vollständige Bewertung der Einflussfaktoren die vollständige Prozesskette.

Im Schablonendruckprozess werden die beiden Schablonenstärken von 80 µm und 100 µm verwendet. Als Lotpaste kommen SAC305-Lotpasten vom Typ 4 sowie vom Typ 5 von 2 verschiedenen Herstellern zum Einsatz. In den vorangegangenen Druckversuchen konnten bereits die Limitierungen bei der Kombination einer Typ 4 Lotpaste und einer 100 µm dicken Druckschablone gezeigt werden, weshalb im Rahmen dieser Versuchsreihe diese Kombination nicht weiter betrachtet wird. Der abschließende Reflow-Lötprozess wird unter Stickstoffatmosphäre (Restsauerstoff < 500 ppm) durchgeführt, wobei 2 Temperaturprofile berücksichtigt sind. Im Wesentlichen unterscheiden sich die beiden Profile in der Zeit über Liquidus mit etwa 30 Sekunden beim niedrigeren Profil und etwa 90 Sekunden beim hohen Profil mit leicht unterschiedlichen Gradienten in der Temperaturführung.

Der Gesamtversuchsumfang beinhaltet über 400.000 Lotpastendepots, welche im Rahmen der Lotpasteinspektion analysiert werden. Darüber hinaus werden etwa 90.000 elektronische Bauteile unter den beschriebenen Variationen auf den Versuchsträgern aufgebaut. Die Verwendung von Maschinen desselben Herstellers für die Lotpasteinspektion sowie für die automatische optische Inspektion ermöglicht softwareseitig eine genaue Korrelation der erfassten Messwerte zur Bewertung der erfassten Qualitätsdaten bis auf Bauteilanschluss-Ebene. Im Folgenden sind die Ergebnisse in die beiden Teilaspekte der mischbestückten Bauteile sowie den Zweipolern der Baugröße 0603 sowie insbesondere 01005 aufgeteilt.

Die Analyse des Pastendruckergebnisses ergibt eine gute Druckbarkeit der Strukturen, welche unter den unterschiedlichen verwendeten Lotpasten und Druckschablonen variieren. Es kann nachgewiesen werden, dass sich die eingesetzten Materialien dabei grundsätzlich stark unterscheiden. Die Ergebnisse sind auf Versuchsblöcke zusammengefasst, wobei innerhalb der jeweiligen Blöcke noch weitere Einflüsse wie beispielsweise die Druckrichtung im Schablonendruckprozess nachweisbar sind. Im Rahmen der Versuche zeigt sich ein stark herstellerbedingtes Verhalten der Lotpaste, wobei eine Wechselwirkung mit dem Lotpastentyp auftritt. Während bei Hersteller A der Lotpastentyp 4 mit 89,7 % TE im Mittel die schlechtesten Ergebnisse liefert, lässt sich die Transfereffizienz mit einem Pastentyp 5 signifikant steigern. Unter Verwendung einer Druckschablone mit 100 µm Dicke beträgt der Mittelwert des applizierten Volumens 105,3 %, mit einer 80 µm Schablone kann dieser Wert sogar auf 108,5 % bei vergleichbarer Varianz gesteigert werden. Der Hersteller B liefert dagegen gegenüber Hersteller A leicht verbesserte Druckbarkeit beim Lotpastentyp 4 von 91,5 %. Die erzielte Steigerung mit einem Pastentyp 5 unter Verwendung einer 100 µm dicken Schablone erreicht hier nur Mittelwerte von 95,6 %, welche mit einer 80 µm Schablone auf 99,9 % angehoben werden können. In Bild 81 sind exemplarische Druckergebnisse der erzielten Transfereffizienzen für 5 ausgewählte Bauformen dargestellt.

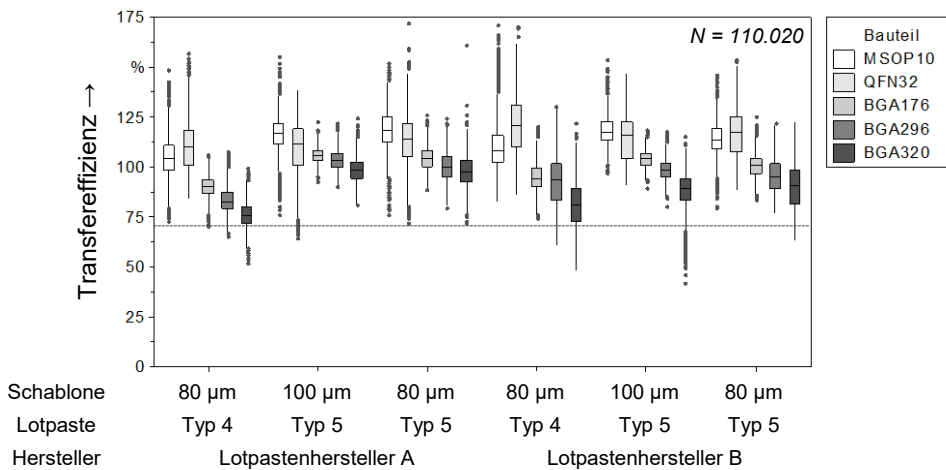


Bild 81: Ergebnisse der Transfereffizienzen für die Bauelementtypen BGA, MSOP und QFN

Auffällig ist die vergleichsweise gleichmäßige Verteilung der einzelnen Druckergebnisse für die Bauformen MSOP₁₀ sowie QFN₃₂, wobei insbesondere bei QFN₃₂-Strukturen eine leichte Tendenz zur Überdruckung besteht. Im Gegensatz hierzu sind bei den ausgewählten Bauformen BGA abfallende Werte der Transfereffizienz bei Erhöhung der Anschlusszahlen

erkennbar, welche sich von 1,27 mm beim BGA176 bis zu 0,8 mm bei der Bauform BGA320 in dem verwendeten Rastermaß und der damit verkleinerten Schablonenöffnungen erklären lassen. In Bild 82 sind die ermittelten Transfereffizienzen für die Bauteile 0603 sowie 01005, unterteilt nach Widerständen ‚CR01005‘ und Kondensatoren ‚CC01005‘, visualisiert.

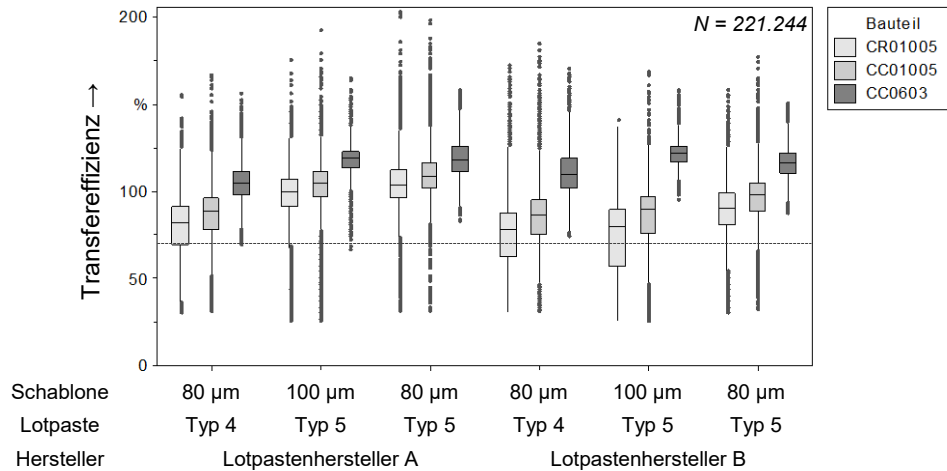


Bild 82: Erzielte Transfereffizienzen der Bauteilgrößen 0603 sowie 01005

Auch für die Bauformen 0603 sowie 01005 lässt sich eine gute Druckbarkeit nachweisen, wobei die Bauform 0603 aufgrund des deutlich unkritischeren Flächenverhältnisses vergleichsweise homogenes Druckergebnis zeigt. Mit abnehmendem Flächenverhältnis geht eine reduzierte Transfereffizienz mit gesteigerter Streuung der Einzelergebnisse einher. Die in Bild 82 ersichtlichen Ausreißer mit geringeren Transfereffizienzen treten gehäuft bei Verwendung der 100 µm dicken Druckschablone auf und zeigen in der Detailauswertung mit einem alternierenden Verlauf aufeinander folgender Drucke eine deutliche Abhängigkeit von der Druckrichtung. Insbesondere im unteren Bereich der Leiterplatte mit nach oben gerichteter Druckrichtung werden dabei herabgesetzte Ergebnisse des aufgetragenen Volumens erreicht, was sich vorzugsweise auf unzureichend gedruckte Strukturen im Randbereich zurückführen lässt.

Aufgrund sporadischer Einflüsse durch ungeplante Stillstandzeiten sind bei 2 Leiterplatten in Versuchsblock 1 und 4 für das Bauteil MSOP10 insgesamt 14 Brückenfehler sowie 112 Lotpastendepots mit über 250 % Volumen aufgetreten. In der AOI-Prüfung nach dem abschließenden Reflow-Lötprozess haben sich alle Brückenbildungen aus dem Schablonendruck aufgrund der Oberflächenspannung des flüssigen Lotes aufgelöst.

Lediglich Flussmittelreste deuten bei den betroffenen Bauelementen auf einen übermäßigen Lotpastenauftrag hin. In Bild 83 sind exemplarisch die erfassten Qualitätsdaten für ein MSOP₁₀-Bauelement aufgeführt.

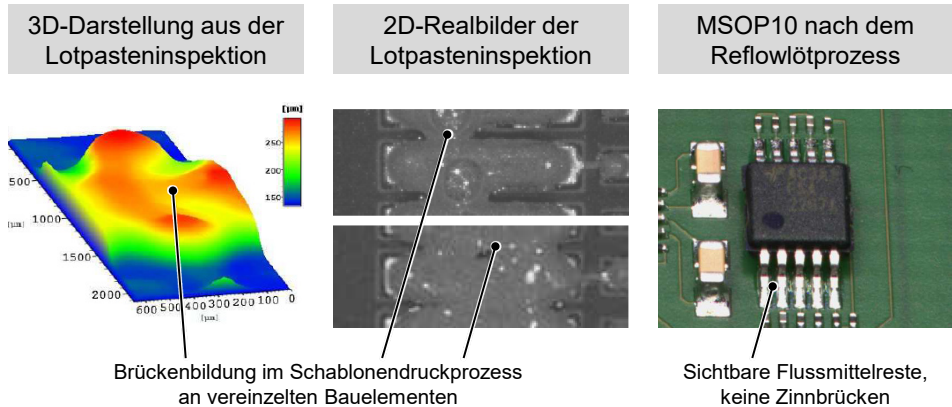


Bild 83: Sporadische Brückenbildungen im Schablonendruck beim Bauteil MSOP₁₀ haben sich im Reflow-Lötprozess vollständig aufgelöst

Weitere Auffälligkeiten sind beim Bauteil QFN₃₂ zu verzeichnen. Anhand der SPI-Ergebnisse ist der Lotpastenauftrag als sehr gleichmäßig ohne Verschmierungen oder Druckbrücken zu bewerten. Bei der Lotpasteninspektion weist dieses Bauteil lediglich leicht erhöhte Transfereffizienzen mit Mittelwerten im Bereich von 100 % bis 125 % auf. Diese befinden sich aber noch innerhalb der üblichen Toleranzen, da auch nach IPC-7527 [48] keine spezifischen Grenzwerte für das aufgetragene Volumen definiert sind. In Bild 84 ist beispielhaft das Erscheinungsbild nach dem Reflow-Lötprozess dargestellt, bei dem mittels automatischer optischer Inspektion insgesamt 140 Brücken detektiert werden.

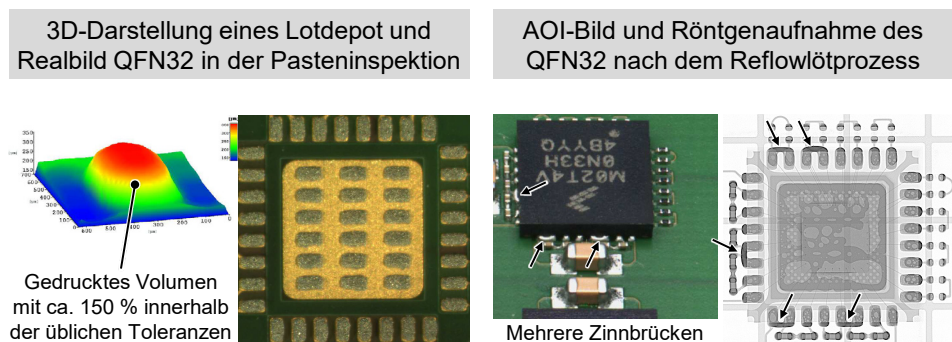


Bild 84: Ausbildung von Zinnbrücken nach dem Reflow-Lötprozess beim Bauteil QFN₃₂

Diese sind fast ausschließlich im Versuchsblock 5 mit einer 100 µm Schablone und einem Pastentyp 5 aufgetreten, wobei der Auftrag bei dieser Parameterkombination äußerst gleichmäßig ausgeprägt ist. Die detektierte Brückenbildung resultiert hierbei nicht aus einem übermäßigen Auftrag an den Anschlüssen des Bauteils, vielmehr ist die Ursache in der Flächenbedruckung des Thermal Pads in der Mitte des Bauteils begründet. Während der Benetzung im Reflow-Lötprozess findet bei zu geringer Menge an Lotpaste ein zu starkes Absenken des Bauteils hin zu einem sehr geringen Stand-Off statt. Mit nur knapp über 50 % bedruckter Fläche steigt hierdurch die Neigung zur Brückenbildung signifikant an, wobei sich aufgrund des geringen Lötspalts an der Gehäuseaußenseite (und ggf. auch im nicht sichtbaren Bereich unter dem Bauteil) Zinnbrücken an benachbarten Anschlussstellen ausbilden können. Daneben tritt dieses Verhalten bei Lotpastenhersteller B deutlich häufiger auf, was sich auf das abweichende Benetzungsverhalten der unterschiedlichen Flussmittelsysteme zurückführen lässt.

Weitere Bauteile der Standardbauformen sind im Rahmen der Versuchsreihen nicht auffällig, da hierbei keine fehlerhaften Kontaktierungen aufgetreten sind. Bei der Beurteilung der erzielten Lötstellen gilt es zu beachten, dass insbesondere die Verwendung einer 80 µm dicken Schablone das mögliche Lotangebot an den Lötstellen deutlich einschränkt. Die verarbeiteten Elektrolytkondensatoren weisen diesbezüglich eine grenzwertige Ausprägung der Kontaktierung auf, da diese aufgrund ihrer geometrischen Abmessungen der Anschlussstellen für eine zuverlässige Kontaktierung eine deutlich höhere Menge an Lotpaste benötigen (vgl. hierzu auch Bauteil 12 in Bild 80). Derartig abweichende Anforderungen an den Lotpastenauftrag müssen im Fertigungsprozess berücksichtigt werden, beispielsweise durch gezieltes Überdrucken der Metallisierung unter Berücksichtigung der Lotperlenbildung oder durch die Verwendung von Stufenschablonen.

Mit Ausnahme von layoutbedingten Fehlerbildern, wie beispielsweise das Zusammenschwimmen benachbarter Bauteile mit zu geringem Abstand, sind Bauteile der Größe 01005 mit Tombstone-Bildung das am häufigsten aufgetretene Fehlerbild. Die erste Analyse der erfassten Messdaten zielt zunächst auf die bauteilbezogene Gleichmäßigkeit der beiden Depots eines Bauteils im Lotpastenauftrag ab. Mit einem Kriterium von mehr als 60 % Unterschied im applizierten Lotpastenvolumen für ein Bauteil sind im Rahmen der Versuchsreihe über 250 Kapazitäten sowie über 850 Widerstände der Baugröße 01005 auffällig. Die ungleiche Verteilung bei den betroffenen

Zweipolern könnte insbesondere bei diesen Fällen zu einer vermehrten Bildung von Tombstones führen. In der Realität sind mit diesem Kriterium der Pastenvolumendifferenz nur insgesamt 104 Tombstones aufgetreten, was einer Gesamtfehlerrate von 0,15 % entspricht. Über 80 % der erkannten Tombstones treten bei Kondensatoren auf, was in der deutlich größeren Bauteilhöhe und dem damit veränderten Kippmoment gegenüber den verarbeiteten Widerständen begründet liegt.

Darüber hinaus lassen sich weitere Fehlerschwerpunkte identifizieren, welche Rückschlüsse auf das Design der Leiterplatte erlauben. Beispielsweise sind zwei Drittel aller Tombstones trotz nahezu identischem Lotpastenauftrag der benachbarten Depots bei CC01005-Bauteilen an derselben Einbaustelle der Leiterplatte aufgetreten. Die Ursache hierfür ist auf das entwickelte Layout zurückzuführen, da der benachbarte SMD-Stecker bzw. das CR01005-Bauteil einen hohen thermischen Einfluss auf die Wärmeleitung besitzt und damit ein ungleichmäßiges Aufschmelzen der betroffenen Lotdepots und damit einhergehender Bildung von Tombstones verursacht. Im Gegensatz hierzu muss ein unbedrucktes Pad nicht zwangsläufig zu einem eindeutig aufgestellten Bauteil führen. In Bild 85 ist beispielsweise ein CC01005 dargestellt, wobei nur eine Seite des Bauteils bedruckt ist. Nach dem Reflow-Lötprozess ist hier kein elektrischer Kontakt vorhanden und die Gefahr von Fehlerschlupf im AOI-Prozess ist je nach verwendetem Prüfalgorithmus für die Lötstellenkontrolle stark erhöht, da das Bauteil noch flach auf der Leiterplatte aufliegt.

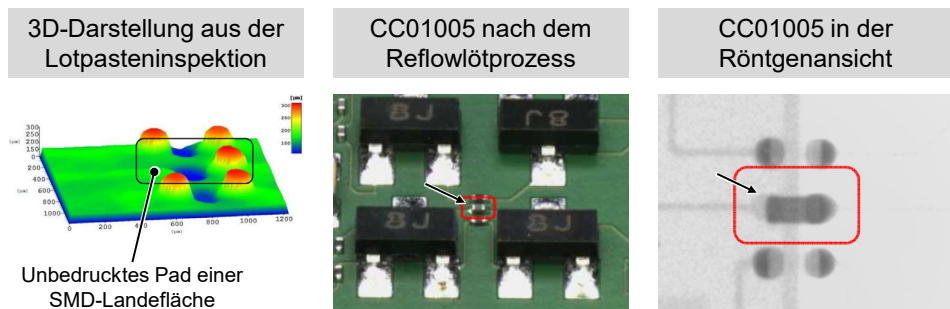


Bild 85: Unbedrucktes Pad bei einer Kapazität der Baugröße 01005 führt nicht zwangsläufig zur Bildung von eindeutigen Tombstones

Bei der Analyse der erfassten Tombstones wird deutlich, dass die Fehlerbilder vorzugsweise bei den Versuchsblöcken 1 sowie 3 auftreten. Innerhalb dieser Versuchsreihen scheint die Kombination der verwendeten Lotpaste, der Schablone sowie des eingesetzten Reflow-Lötprofils einen Einfluss auf die Fehlerrate zu haben. Dabei weist eine Oberfläche mit Nickel-Gold-

Finish aufgrund der besseren Benetzungsfähigkeit im Vergleich zu einem Leiterplattenfinish mit chemisch Zinn eine deutlich höhere Fehlerrate auf, was in Bild 86 aufgezeigt ist.

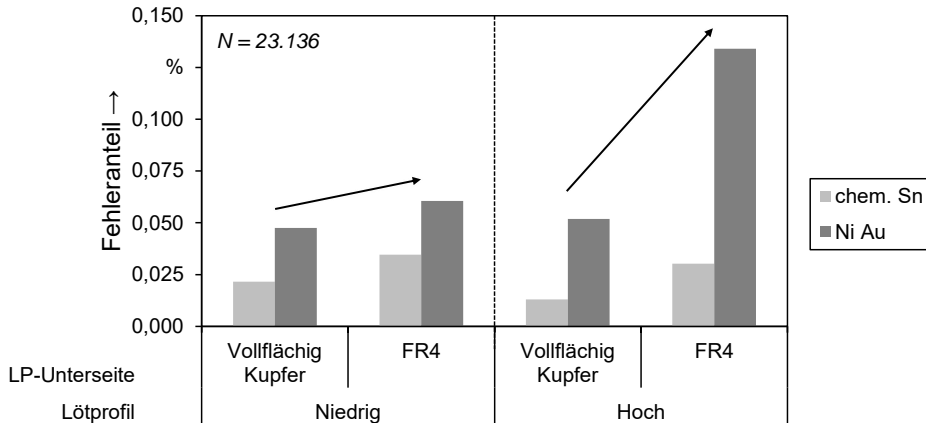


Bild 86: Aufgetretene Bildung von Tombstones bezogen auf die Leiterplatte und das verwendete Reflow-Lötprofil

Zudem ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Tombstones verringert, sofern die Unterseite der Leiterplatte eine Kupferfläche aufweist, was den Einfluss einer gleichmäßigeren Wärmeeinbringung vermuten lässt. Dieser Effekt verstärkt sich bei einem höheren Temperaturprofil und damit einhergehenden höheren Gradienten in der Temperaturführung. Für die Bauelemente der Größe 01005 treten auch bei kritischen Druckergebnissen mit weniger als 50 % Transfereffizienz oder hoher Pastenvolumendifferenz vergleichsweise wenige Fehlerbilder nach dem Reflow-Lötprozess auf. Die erfassten Tombstones lassen sich zudem häufig auf thermische Einflüsse oder layoutbedingte Effekte zurückführen.

Basierend auf den Ergebnissen ist ein unzureichender Schablonendruckprozess nicht hauptsächlich verantwortlich für Fehlerbilder der fertig verarbeiteten Baugruppe. Im Rahmen der Versuchsreihen kann aufgezeigt werden, dass eine aussagekräftige Korrelation der gewonnenen SPI- und AOI-Daten nur unter Einbeziehung der spezifischen Randbedingungen und der gesamten Prozesskette möglich ist. Hochintegrierte elektronische Baugruppen mit einem miniaturisierten Bauteilspektrum stellen insbesondere in Mischbestückung besondere Anforderungen an die Prozessführung. Für die Analyse des Fertigungsprozesses müssen dabei neben den in den Versuchsreihen variierten Einflussfaktoren weitere Randbedingungen berücksichtigt werden, wie beispielsweise Toleranzen der verwendeten Komponenten, Einfluss feinkörniger Lotpasten, Verwindung bzw. Verwölbung der

Leiterplatte, Ausführung des Lötstopplacks sowie das thermische Verhalten aufgrund umliegender Komponenten.

Unregelmäßigkeiten im Schablonendruckprozess führen zu einer höheren Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fehlstellen. Die Untersuchungen weisen großes Potenzial auf, durch Korrelation der Inspektionsdaten verifizierte Grenzwerte für elektronische Baugruppen abzuleiten. Auf Basis der durchgeführten Versuchsreihe sind alle SPI-Ergebnisse über 30 % Transfereffizienz abnahmefähige Lötstellen nach IPC-A-610 (Klasse 1, 2 und 3) [122]. Für eine spezifische Definition des minimal zulässigen Druckvolumens kann darüber hinaus ein erweiterter Test der Zuverlässigkeit der Kontaktierungen anhand von Grenzmustern mittels Temperaturschockbelastung erfolgen. Damit besteht die Möglichkeit, Grenzen für Fehler bzw. Warnungen in der Lotpasteninspektion für einen frühzeitigen Eingriff direkt nach dem Schablonendruck oder für eine aktive Steuerung der automatischen optischen Inspektion effektiv zu nutzen. Exemplarisch sind in Bild 87 anhand von Widerständen und Kondensatoren die unterschiedlichen Ausprägungen der Lötstellen in Abhängigkeit des aufgetragenen Lotpastenvolumens mit einer 80 µm Druckschablone visualisiert.

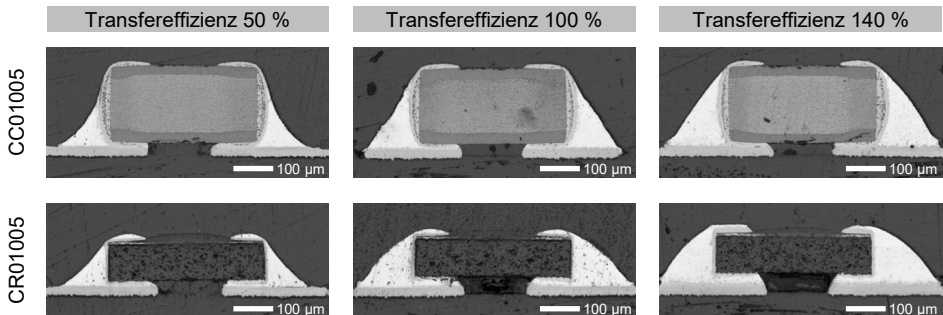


Bild 87: Ausprägung der erzielten Lötstellen bei ausgewählten Transfereffizienzen von etwa 50 % (links), 100 % (Mitte) und 140 % (rechts)

Für die Definition des unteren Prozessfensters für Druckergebnisse können dabei als abnahmefähig verifizierte Kontaktierungen aus der AOI-Prüfung bauteilspezifisch herangezogen werden. Darüber hinaus kann die aktive Nutzung kritischer SPI-Ergebnisse eine höhere Erkennungsrate oder eine erweiterte Entscheidungsbasis für den Bediener darstellen, um die Klassifikationssicherheit zu erhöhen. Damit steht eine belegbare Prozessanalyse zur Verfügung, welche die Identifikation von Fehlerschwerpunkten oder -ursachen ermöglicht. Darüber hinaus können die Auswirkungen von Prozessanpassungen, wie beispielsweise die Einführung einer neuen

Lotpaste oder beschichteter Schablonen, direkt anhand der Produktionsqualität bewertet werden. Mit zunehmender Datenerfassung anhand realer Produktionsprozesse wird die datenbasierte Grundlage für eine mögliche automatisierte Entscheidung zur potenziellen Vorhersage der Entstehung von Fertigungsfehlern bei Abweichungen der Einzelprozesse erweitert. Die Erfassung und Korrelation von Inspektions- und Prozessdaten ist somit eine wesentliche Basis für eine autonome Fertigungsumgebung.

5.3 Prozessintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

Die Verarbeitung miniaturisierter Komponenten insbesondere auf mischbestückten Baugruppen erfordert eine tiefgreifende Kenntnis der beteiligten Prozessschritte. Neben den Prozessdaten bieten Prüfdaten aus der Lotpasteninspektion (SPI), der automatischen optischen Inspektion (AOI) sowie den abschließenden Testmethoden (z. B. In-Circuit-Test, Flying-Probe-Test oder Funktionstest) die Möglichkeit, prozessübergreifende Analysen durchzuführen. Die Qualität der produzierten Baugruppen kann damit durch Betrachtung prozessübergreifender Effekte und Wechselwirkungen und daraus angepasster Prozessführung oder Inspektionsmethodik kontinuierlich verbessert werden. Bild 88 verknüpft die möglichen Zusammenhänge zur Anwendung beschreibender Analysemethoden schematisch.

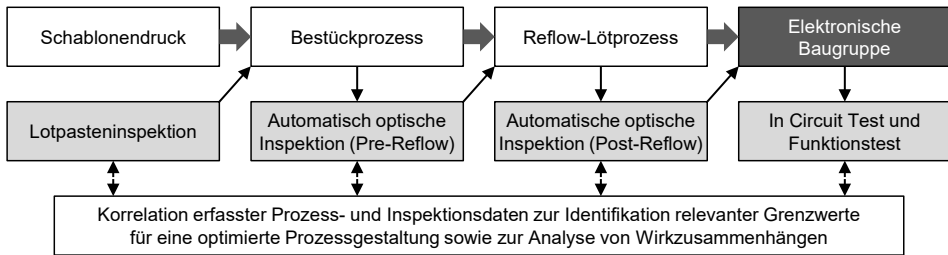


Bild 88: Beispielhafte schematische Darstellung von Produktionsprozessen in der SMT zur Erfassung von Prozess- und Inspektionsdaten

In der Produktionskette elektronischer Baugruppen werden große Mengen an Produktions- und Inspektionsdaten generiert. Neben den konventionellen Analysemethoden, welche häufig im Nachgang zur tieferen Ursachenforschung herangezogen werden, bietet die Einführung von Regelkreisen verschiedene Ansätze, die Robustheit der Produktion zu erhöhen. Der Grundgedanke der Einführung einer Closed-Loop-Qualitätskontrolle zur Steigerung des FPY ist bereits in [152, 153] beschrieben. In der Praxis stehen

einer Umsetzung jedoch erhebliche Probleme entgegen, die sich insbesondere in einer unzureichenden Schnittstellenbeschreibung und abweichender Datenbasis äußern. Mit verbesserten Methoden zur Inspektion und ersten verfügbaren Standardisierungen von Schnittstellen benachbarter Prozesse zur industriellen Anwendung finden geschlossene Regelkreise häufiger Anwendungen in modernen Fertigungsumgebungen [154].

Als Beispiel eines geschlossenen Regelkreissystems kann die Anwendung für den Schablonendruckprozess herangezogen werden. Ziel ist eine Optimierung des Schablonendruckes im laufenden Prozess ohne weitere Eingriffe aus dem äußeren Umfeld. Dies wird über eine Kopplung der Lotpasteninspektion nach dem Druckprozess realisiert. Neben der Überwachung definierter Qualitätsmerkmale können auch weitere Eingriffe in den Prozess erfolgen, wie beispielsweise das gezielte Auslösen einer maschineninternen Reinigung. Der Fokus dieser Applikation liegt in der Optimierung der Druckgenauigkeit. Diese lässt sich über den Versatz der Lotpastendepots in horizontaler, vertikaler sowie Positionsabweichung mit Winkelversatz beschreiben. Bei festgestellten Abweichungen von der Idealposition erfolgen Anpassungen an Druckparametereinstellungen. Um ein angepasstes Eingreifen in den Prozess zu erzielen, wird häufig ein Mittelwert des Pastendruckergebnisses auf Basis der letzten Druckvorgänge ermittelt.

Die Korrektur gemessener Abweichungen erfolgt daher innerhalb des geschlossenen Regelkreises um eine definierte Anzahl von Leiterplatten versetzt. Ein Eingreifen des Systems in den laufenden Prozess sollte dabei kritisch hinterfragt werden. Leistungsfähige Schablonendruker erreichen Maschinenfähigkeiten von $\pm 12,5 \mu\text{m}$ bei c_{pk} -Werten $> 2,0$. Sofern die ermittelten Abweichungen außerhalb der Spezifikation des verwendeten Druckers liegen, sollte eine Überprüfung der beteiligten Komponenten, wie beispielsweise die Einhaltung der definierten Leiterplattentoleranzen oder die verwendete Druckschablone, sowie ggf. eine Kalibrierung des Druckers vorgenommen werden. Der gezielte Einsatz dieses Regelkreissystems ermöglicht es, die Positioniergenauigkeit der aufgetragenen Lotpastendepots zu erhöhen und die sonst statisch vorgegebenen Reinigungszyklen zu erweitern und flexibel an Prozessschwankungen anzupassen [153, 155, 156]. Weitere Untersuchungen in [157] haben gezeigt, dass die Implementierung dieser Closed-Loop-Applikation effizient eingesetzt werden kann, die gewünschten Zielwerte der Qualitätsmerkmale schneller zu erreichen.

Innerhalb der Prozesskette elektronischer Baugruppen ist eine Vielzahl an weiteren Regelschleifen anwendbar. Durch Einführung eines eindeutigen

Merkmals auf der Leiterplatte, wie z. B. durch die Erfassung der Identifikation über Datamatrix-Code oder RFID, oder auch die Schaffung einer intelligenten Schnittstelle innerhalb einer Produktionslinie zur eindeutigen Rückverfolgbarkeit, kann die notwendige Datenbasis zur eindeutigen Zuordnung der Flachbaugruppen erreicht werden. Der Einsatz der Lotpasteninspektion bietet ebenfalls die Möglichkeit, Abweichungen an den darauffolgenden Bestückprozess weiterzugeben, um Bauteile mit entsprechend korrigierter Bestückposition zu verarbeiten. Weitere Ansätze bestehen in der Verwendung eines AOI vor dem Lötprozess, um Positionsabweichungen von Bauteilen an den Bestücker zurückführen zu können und eine entsprechende Zuordnung zur automatisierten Fehleranalyse zu ermöglichen (z. B. Portal, Bestückkopf, Segment, Pipette, Zuführung). Eine Stickstoffregelung im Reflow-Lötprozess zur Erreichung eines definierten Restsauerstoffgehalts kann eine Grundlage für eine Qualitätsverbesserung im AOI-Prozess darstellen. Die Kenntnis der entsprechenden AOI-Ergebnisse nach dem Lötprozess bietet hierbei Optimierungsmöglichkeiten, um gezielte Anpassungen des N_2 -Niveaus in Relation zu erzielten Pseudofehlerraten, welche häufig auch oxidationsbedingt beeinflusst sind, zu folgern. Für die effektive Regelung innerhalb der gesamten Prozesskette ist die Kenntnis aller Randbedingungen essenziell (vgl. hierzu Bild 75, Bild 77 sowie Bild 78). Es gilt bei der Einführung von Regelkreisen die kleinste Nachregelgröße abzuleiten, wobei dies in Abhängigkeit der beobachteten Stückzahl erfolgen muss. Auch geringe Abweichungen in der Prozesskette bieten bei entsprechender Stückzahl die Möglichkeit der Überführung in statistische Aussagen. Bild 89 verdeutlicht exemplarische Möglichkeiten verschiedener Regelkreise über die gesamte Prozesskette hinweg. Eine mögliche Erweiterung dieser Darstellung bezieht die Anliefer- sowie Feldqualität in die Betrachtung mit ein.

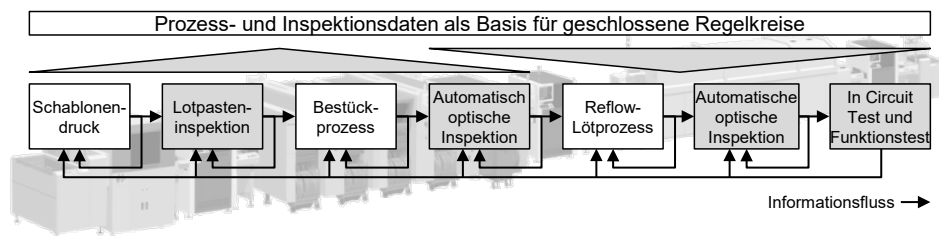


Bild 89: Schematische Darstellung geschlossener Regelkreise in der Prozesskette der Elektronikproduktion

Die Einführung immer leistungsfähigerer Sensorik und Aktorik mit erhöhter Datenakquise bietet enormes Potenzial, die konventionelle Datenanalyse einer laufenden Produktion auszubauen. Durch moderne Verfahren im

Sinne von Big Data-Methoden [158] verändert sich der Fokus der Datenanalyse von der Beschreibung der erfassten Prozess- und Qualitätsdaten hin zu einer Entscheidungsunterstützung. Laut [159] lassen sich die Veränderungen der Analysemethoden in 4 Kategorien einteilen, wie in Bild 90 dargestellt.

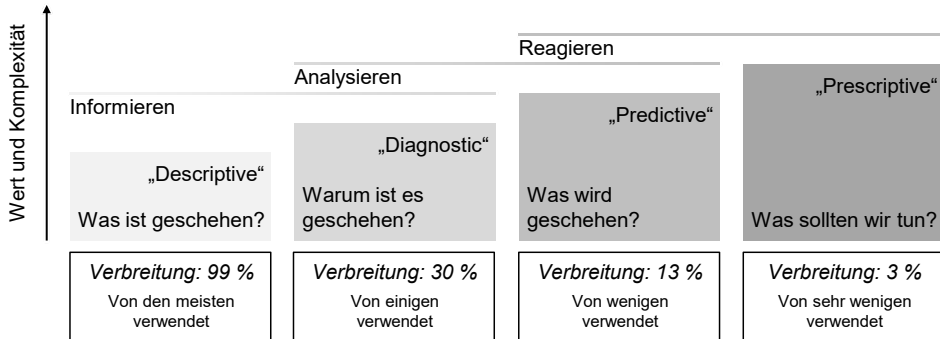


Bild 90: Potentiale der Datenanalyse nach Gartner [159]

Am häufigsten wird als wesentliche Basis der Datenanalyse eine informative Komponente verwendet, beispielsweise von Fehlerreports, Kennzahlen oder Qualitätsstatistiken. In weiteren Analysen zur Diagnose sollen Grundursachen identifiziert werden, was nach [159] nur zu etwa einem Drittel verbreitet ist. Die Anwendung einer geeigneten Datenanalyse bietet die Möglichkeit, die beschreibende Auswertung hin zu einer vorausschauenden Nutzung einzusetzen, wie beispielsweise zur Vorhersage eines bestimmten Ereignisses (beispielsweise eines Anlagenausfalls). In die Anwendung mit höchster Komplexität zielen Fragestellungen ab, z. B. welche Eingriffe in den Prozess oder Konfigurationen notwendig sind, um mögliche Ereignisse gänzlich zu vermeiden.

Für eine erfolgreiche Umsetzung in der Elektronikproduktion ist die Analyse bestehender Daten von hoher Bedeutung, um die Einflussfaktoren beschreiben und entsprechendes Optimierungspotenzial identifizieren zu können. Innerhalb eines ersten Schrittes gilt es dabei zu analysieren, welche Daten grundsätzlich vorhanden sind. Darauf aufbauend können mit statistischen Methoden aggregierte Informationen und daraus abgeleitete Erkenntnisse erarbeitet werden. Für die Gestaltung einer robusten Fertigungskette gilt es abschließend, Maßnahmen für die Optimierung und Stabilisierung für die beteiligten Einzelprozesse oder über die gesamte Prozesskette hinweg umzusetzen und kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Die Durchführung des beschriebenen iterativen Vorgehens der empirischen Datenanalyse bringt ein tiefes Verständnis der untersuchten Prozessschritte. In diesem Umfeld gewinnen Ansätze des maschinellen Lernens zunehmend an Bedeutung, deren Modelle oftmals auf statistischen Methoden basieren [160]. Der Einsatz maschineller Lernverfahren ermöglicht es, komplexe Prozesse und Ursache-Wirkungsbeziehungen zu modellieren. Durch die rasant fortschreitende Sensorik, Datenerfassung und Rechnerleistung wird die Verwendung im industriellen Umfeld zunehmend bedeutsamer. Erste Ansätze für den Einsatz in der Elektronikproduktion bestehen zur Optimierung des Schablonendruckprozesses [92, 93] sowie zu der Qualitätsvorhersage aufgrund der maschineninternen Unterseitenreinigung [161]. Für den Bestückprozess sind Möglichkeiten zur Parameteroptimierung sowie zur potenziellen Fehlererkennung beschrieben [162]. Ein interessantes Gebiet ist der Einsatz maschineller Lernverfahren im Rahmen der Endkontrolle elektronischer Baugruppen [163–165]. Insbesondere die oftmals enthaltene Klassifikation und damit Anreicherung der Daten durch den Bediener stellen eine wertvolle Datenbasis zur Modellierung dar. Bei der Umsetzung ist es von hoher Bedeutung, aufgebautes Expertenwissen zu den beteiligten Produktionsprozessen einzubringen, um Hypothesen und mögliche Wirkzusammenhänge aufzustellen [166, 167]. Insbesondere im Rahmen der Validierung aufgestellter Modelle stellt bereits erarbeitetes Prozesswissen eine wertvolle Grundlage zur erfolgreichen Realisierung in der Praxis dar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der stetig wachsende Markt der Mikroelektronik ist geprägt von der Integration neuer Bauelementtechnologien auf elektronischen Baugruppen. Diese stellen insbesondere für Anwendungen aus den Bereichen Medizintechnik, Automobil oder Industrie erhöhte Anforderungen an die verwendete Prozess- und Systemtechnik. Neben Entwicklungen auf Packaging-Ebene sind auch passive Bauelemente, welche häufig einen signifikanten Anteil auf einer Leiterplatte einnehmen, von einer starken Miniaturisierung betroffen. Aufgrund der veränderten Liefersituation von Widerständen und Kondensatoren seitens der Hersteller, entsteht für viele Bereiche zusätzlich die Notwendigkeit, innerhalb kurzer Zeit auf kleinere Bauformen umzustellen. Die Einführung kleinerer Bauteile in bestehende Fertigungsumgebungen stellt dabei die beteiligten Prozessschritte der Oberflächenmontagetechnik vor neue Herausforderungen. Zudem ist bereits die Auslegung der Elektronikbaugruppen bei deren Prozessgestaltung von diesen Einflüssen stark beeinflusst. Im Rahmen der Forschungsarbeiten sind daher wesentliche Trends aktueller Entwicklungen aufgegriffen und deren Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette analysiert worden.

Die Ergebnisse zum Schablonendruckprozess tragen dazu bei, Prozessfenster für einen gesicherten Auftrag des Verbindungsmediums zu bestimmen. Für die Bauform 01005 wurden in Kapitel 3 verschiedene Varianten einer möglichen Bedruckung evaluiert. Zusätzlich konnten die Einflüsse der Haupteffekte der verwendeten Lotpaste, des Schablonenmaterials und der Ausrichtung der Strukturen beschrieben werden. Neben der Baugröße 01005 wurden auch weitere Miniaturisierungsschritte wie die Bauform 03015M in die Untersuchungen einbezogen. Mit einem entwickelten Versuchsmodell konnten für Lotpastenmaterialien mit feineren Körnungen ebenfalls die Effekte und Wechselwirkungen bei reduzierten Schablonendicken und der Schablonenbeschichtung für die untersuchten Teststrukturen erarbeitet werden. Durch die erforderlichen kleineren Abmessungen der Druckschablonen verschieben sich die Prozessparameter zunehmend in kritische Bereiche. Mit systematischen Analysen zum Zusammenhang der Aperturform auf die Druckbarkeit feinsten Strukturen konnten signifikante Verbesserungen in den definierten Qualitätsmerkmalen nachgewiesen werden. Zudem wurde eine Methodik für die Anwendung im industriellen Umfeld entwickelt, Prozessparameter für den Schablonendruck mit neuartigen Materialien effizient bewerten zu können.

Der Bestückprozess erscheint unter Verwendung moderner Bestückungsautomaten sehr gut beherrschbar und konnte in Kapitel 4 hinsichtlich der Prozessfähigkeit bestätigt werden. Die Neu-Ausrichtung von Bauteilen während des Reflow-Prozesses ist ein bekanntes Verhalten, was insbesondere durch die Umstellung auf bleifreie Materialien beeinflusst wurde. Zur Beurteilung des Selbstzentriereffektes der Bauform 01005 wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher SMD-Landeflächen unter Variation der Druckschablone und des Lotpastenmaterials analysieren zu können. Es konnte gezeigt werden, dass die Gestaltung der Leiterplatte erhebliche Auswirkungen auf die erzielbare Fertigungsqualität besitzt. Hierzu wurden die entwickelten Layouts hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien an Qualitätsmerkmalen bewertet. Während des Bestückprozesses treten Abweichungen der Bauelemente von der Sollposition in spezifizierten Grenzen stochastisch verteilt auf. Um den Einfluss eines Bauteilversatzes evaluieren zu können, wurden Einbauversuche mit programmierten Versatzwerten durchgeführt. Es konnte dabei belegt werden, dass ein Versatz in Längsrichtung des Bauteils sowie Bauelemente mit Verdrehung signifikant höhere Fehlerraten provozieren und daher als kritisch einzustufen sind. Für eine genauere Bestimmung der Grenzwerte wurden zudem weitere Abweichungen im Schablonendruckprozess mit definiert abweichenden Bestückpositionen kombiniert. Damit konnte das Prozessverhalten zur Erreichung einer möglichst geringen Fehlerrate beschrieben und Zusammenhänge abgeleitet werden. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass ein angepasster Bestückprozess in versetzt aufgebrachte Lotpastendepots eine äußerst effektive Möglichkeit darstellt, Fehlerbilder zu vermeiden. Dies zeigt das Potenzial zur Entwicklung kurzer Regelschleifen insbesondere für miniaturisierte Bauelemente.

Neben der genauen Kenntnis der Einzelprozesse ist für robuste Fertigungsprozesse komplexer Baugruppen eine prozessübergreifende Betrachtung zunehmend von hoher Bedeutung. In Kapitel 5 wurde daher eine Baugruppe mit einem heterogenen Bauteilspektrum entwickelt, um Zusammenhänge der Fehlerentstehung über die gesamte Prozesskette hinweg analysieren zu können. Die Untersuchungen ergaben, dass trotz kritischer Zustände nach dem Lotpastenauftrag am Ende des Produktionsprozesses häufig abnahmefähige Kontaktierungen erzielt werden. Gleichermäßen konnten Fehlerbilder provoziert werden, die bei ausschließlicher Betrachtung des Schablonendruckprozesses als unwahrscheinlich einzustufen sind. Mit den Versuchsreihen konnte die Komplexität miniaturisierter Bauteile in Mischbestückung evaluiert und wesentliche Effekte z.B. aus der Prozessauslegung identifiziert werden. Es lässt sich damit nachweisen, dass

die Analyse der Wirkzusammenhänge über die Prozesskette hinweg für optimierte Prozess- und Inspektionsgrenzen genutzt werden können.

Im Rahmen der durchgeführten Forschungsarbeiten konnte damit ein erheblicher Beitrag erarbeitet werden, die beteiligten Einzelprozesse der Oberflächenmontage systematisch zu analysieren. In besonderem Fokus stand die Betrachtung übergreifender Effekte und Wechselwirkungen zur Identifikation von Wirkzusammenhängen. Eine umfassende Bewertung der Rahmenbedingungen und die konsequente Optimierung der Prozessparameter ermöglichen es, die Einführung miniaturisierter Bauelemente auch für anspruchsvolle Anwendungen zu realisieren.

7 Summary and outlook

The growing market of microelectronics is characterized by the integration of new interconnection technologies on electronic assemblies. Especially for applications of medical devices, automotive or industry, increased demands are placed on the process and system technology. In addition to developments on packaging level, passive components, which often claim a significant share on a printed circuit board, are also affected by a strong miniaturization. Due to the dramatically changed delivery situation on the part of the suppliers of resistors and capacitors, for many areas there is an additional necessity to adapt smaller component sizes within a short time.

Introduction of smaller components into existing production environments represents major challenges to the involved process steps in surface mount technology. In addition, the engineering of the electronic modules in their process design is already strongly affected by these influences. As part of the research work, key trends in current developments have been taken up and their effects on the entire process chain analyzed.

The results on the stencil printing process help to determine process windows for a secure application of the interconnection medium. For component size 01005, various variants of possible printing designs have been evaluated in Chapter 3. In addition, the influence of the main effects of the used solder paste material, the stencil and the orientation of the apertures could be described. Besides the size 01005, further miniaturization steps such as components of the size 03015M were also included in the investigations. With the developed experimental demonstrator, the effects and interactions of solder paste materials with finer grains at reduced stencil thicknesses and nanocoating for the analyzed test structures could be studied. Due to the required smaller dimensions of the stencils, the process parameters are increasingly shifting into critical areas. With systematic analyzes of the relationship between the aperture shape and the printability of very fine structures, significant improvements in the defined quality characteristics could be verified. In addition, a methodology for industrial applications was evolved to efficiently evaluate process parameters for stencil printing with novel materials.

The placement process appears to be manageable using modern placement machines and could be confirmed in Chapter 4 for process capability. The reorientation of components during the reflow process is a well-known behavior, which was particularly influenced by the transition to lead-free

materials. To evaluate the self-centering effect of the component size 01005, extensive test series were carried out in order to analyze the influence of different SMD land pattern designs by varying the stencil and the solder paste material. It could be shown that the design of the printed circuit board has a considerable influence on the achievable manufacturing quality. For this purpose, the developed layouts were evaluated with regard to different criteria of quality characteristics. During the placement process, deviations of the components from the nominal position occur within specific limits in a stochastically distributed manner. In order to evaluate the influence of a component offset, mounting test series with programmed offset values were carried out. It could be shown that an offset in the longitudinal direction of the component as well as components with twisted angles provoke significantly higher failure rates and therefore can be classified as critical. For a more precise determination of process limitations, further deviations in the stencil printing process were combined with defined deviating placement positions. Thus, the process behavior to achieve the lowest possible failure rate could be described and correlations derived. It could also be demonstrated that an adapted placement process in offset solder paste depots is an extremely effective way to avoid defects. This proves that there is huge potential to develop short closed loops especially for miniaturized components.

In addition to the exact knowledge of the individual processes, a cross-process consideration is increasingly important for robust production processes of complex assemblies. In Chapter 5, a demonstrator of a printed circuit board with heterogeneous component spectrum was therefore developed in order to be able to analyze correlations of failure generation across the entire process chain. It could be shown that despite critical conditions after solder paste application at the end of the production process often acceptable conditions can be achieved. Likewise, it has been possible to provoke defects that can be considered unlikely after stencil printing process. With the test series, the complexity of miniaturized components in a mixed assembly could be demonstrated and substantial effects were obtained, e.g. being influenced by the process design. It can thus be demonstrated that the analysis of causal relationships across the process chain can be used for optimized process and inspection limits.

As part of the research carried out, a considerable contribution could be made to systematically analyze the individual assembly processes involved in surface mount technology. Special attention was given to the consideration of cross-process effects and interactions for the identifications of interdependencies. A comprehensive assessment of the determining factors

and the consistent optimization of the process parameters make it possible to implement the introduction of miniaturized components even for challenging applications.

Anhang

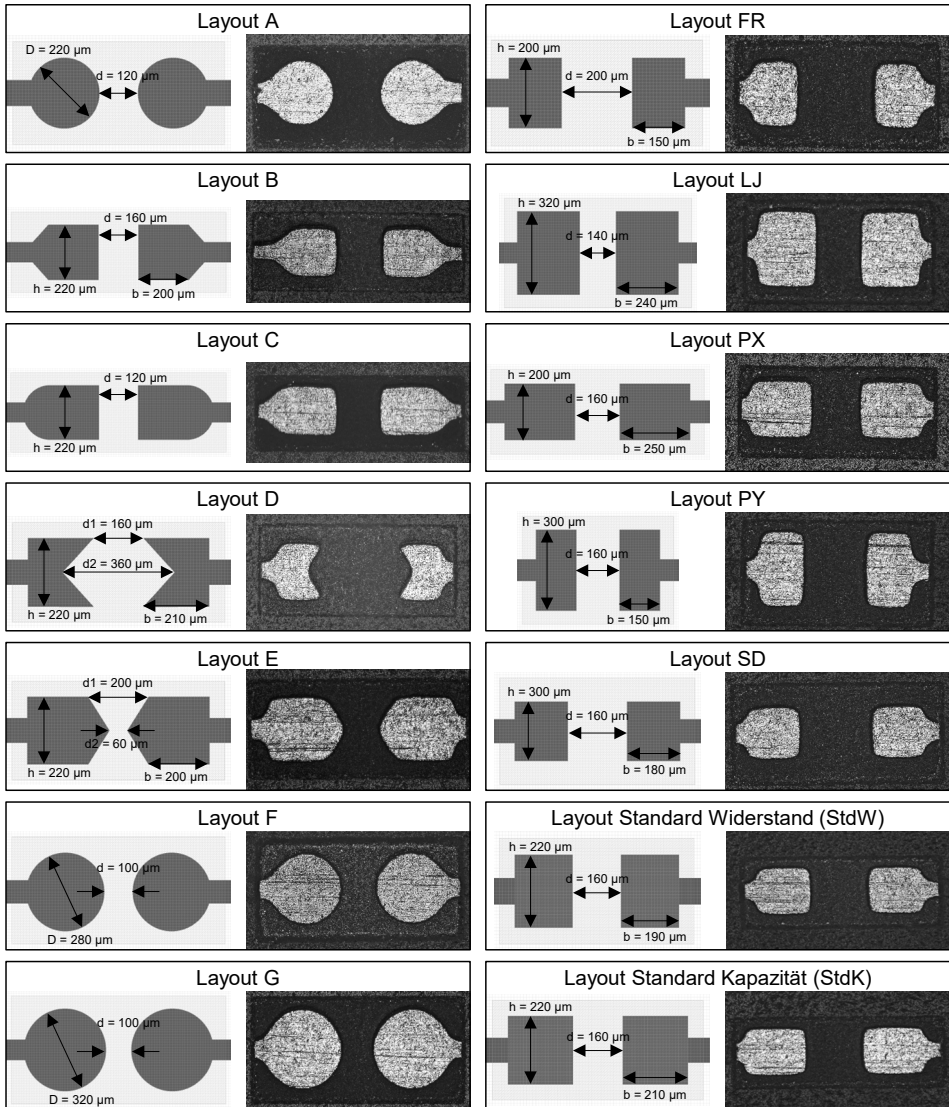


Bild 91: Layout-Varianten im CAD-Format (links) und Lichtmikroskopie-Aufnahmen (rechts)

Tabelle 19: GeometrieKennwerte der entwickelten Schablonenaperturen

Schablone: 80 µm	Stufe	Q	1/1'	2/2'	3/3'	4/4'	5/5'
FV = 0,45	S1 in µm	144	134	124	114	104	94
	S2 in µm	144	156	172	195	234	308
FV = 0,5	S1 in µm	160	150	140	130	120	110
	S2 in µm	160	171	187	208	240	293
FV = 0,55	S1 in µm	176	166	156	146	136	126
	S2 in µm	176	187	202	222	249	292
FV = 0,6	S1 in µm	192	182	172	162	152	142
	S2 in µm	192	203	217	236	261	296
FV = 0,65	S1 in µm	208	198	188	178	168	158
	S2 in µm	208	219	233	250	273	304

Schablone: 100 µm	Stufe	Q	1/1'	2/2'	3/3'	4/4'	5/5'
FV = 0,45	S1 in µm	180	170	160	150	140	130
	S2 in µm	180	191	206	225	252	293
FV = 0,5	S1 in µm	200	190	180	170	160	150
	S2 in µm	200	211	225	243	267	300
FV = 0,55	S1 in µm	220	210	200	190	180	170
	S2 in µm	220	231	244	261	283	312
FV = 0,6	S1 in µm	240	230	220	210	200	190
	S2 in µm	240	251	264	280	300	326
FV = 0,65	S1 in µm	260	250	240	230	220	210
	S2 in µm	260	271	284	299	318	341

Schablone: 120 µm	Stufe	Q	1/1'	2/2'	3/3'	4/4'	5/5'
FV = 0,45	S1 in µm	216	196	176	156	136	116
	S2 in µm	216	241	280	351	525	1566
FV = 0,5	S1 in µm	240	220	200	180	160	140
	S2 in µm	240	264	300	360	480	840
FV = 0,55	S1 in µm	264	244	224	204	184	164
	S2 in µm	264	288	321	374	467	677
FV = 0,6	S1 in µm	288	268	248	228	208	188
	S2 in µm	288	311	343	391	468	615
FV = 0,65	S1 in µm	312	292	272	252	232	212
	S2 in µm	312	335	366	410	476	591

Tabelle 20: Versuchsplanung mit jeweils 5 Drucken je Versuchsreihe

Versuchsreihe	Lotpaste		Druckgeschwindigkeit ¹	Dicke der Druckschablone	Aktives Rakelsystem ²
	Hersteller	Typ			
1	A	4	+	80 µm	+
2				-	
3				+	
4				-	
5				+	
6				-	
7			-	80 µm	+
8				-	
9				+	
10				-	
11				+	
12				-	
13		5	+	80 µm	+
14				-	
15				+	
16				-	
17				+	
18				-	
19			-	80 µm	+
20				-	
21				+	
22				-	
23				+	
24				-	
25	B	4	+	80 µm	+
26				-	
27				+	
28				-	
29				+	
30				-	
31			-	80 µm	+
32				-	
33				+	
34				-	
35				+	
36				-	
37		5	+	80 µm	+
38				-	
39				+	
40				-	
41				+	
42				-	
43			-	80 µm	+
44				-	
45				+	
46				-	
47				+	
48				-	

¹: In Vorversuchen ermittelte Druckgeschwindigkeiten, "+" entspricht "hoch", "-" entspricht "niedrig"

²: "+" entspricht aktiviertes System, "-" entspricht deaktiviertes aktives Rakelsystem

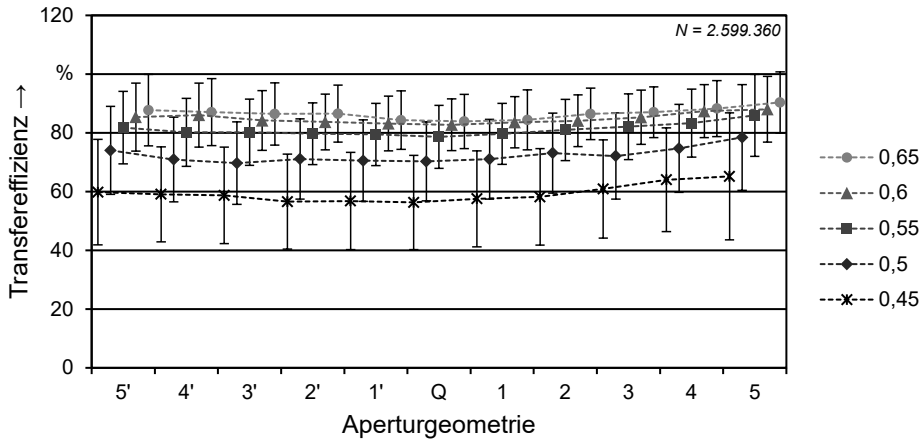


Bild 92: Mittelwerte der Transfereffizienzen für die unterschiedlichen Ausprägungen der Schablonenöffnungen in der Gesamtbetrachtung

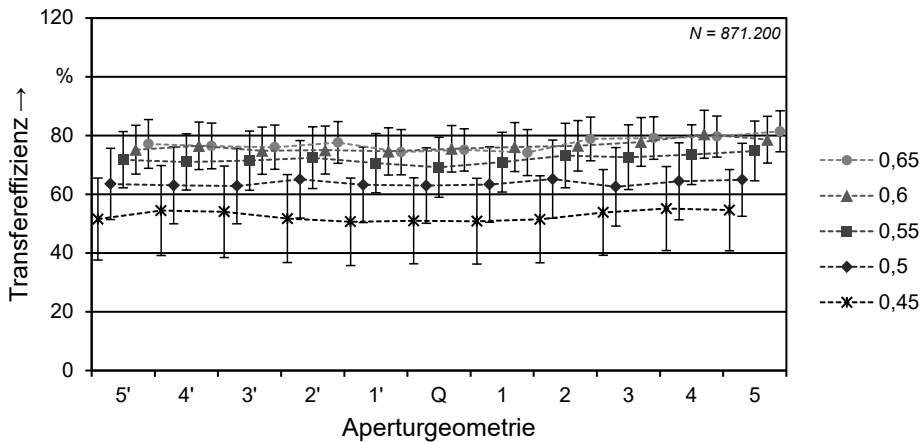


Bild 93: Mittelwerte der Transfereffizienzen für die unterschiedlichen Ausprägungen der Schablonenöffnungen unter Verwendung Druckschablone mit 80 µm Dicke

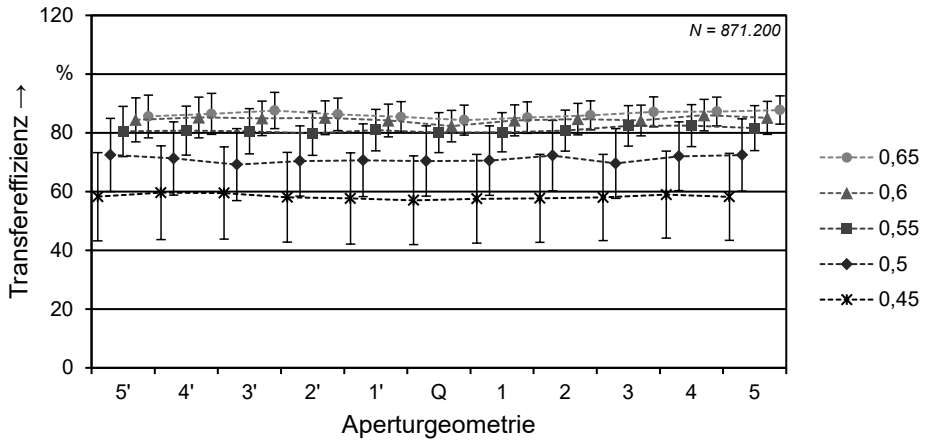


Bild 94: Mittelwerte der Transfereffizienzen für die unterschiedlichen Ausprägungen der Schablonenöffnungen unter Verwendung Druckschablone mit 100 µm Dicke

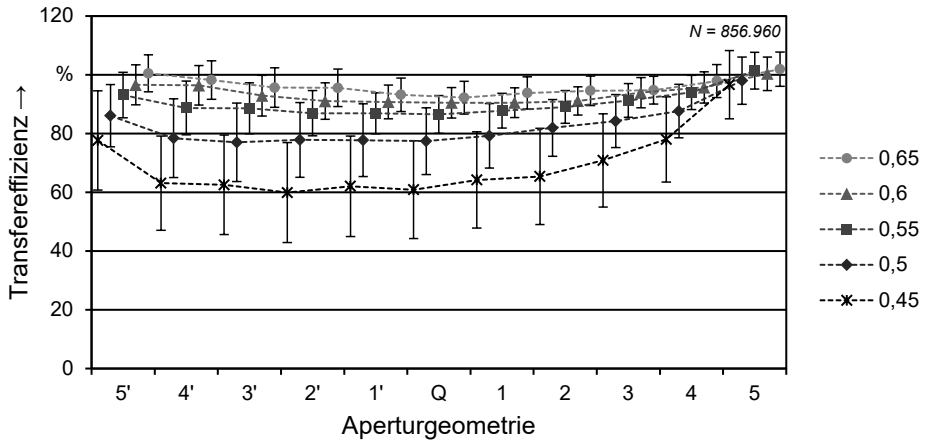


Bild 95: Mittelwerte der Transfereffizienzen für die unterschiedlichen Ausprägungen der Schablonenöffnungen unter Verwendung Druckschablone mit 120 µm Dicke

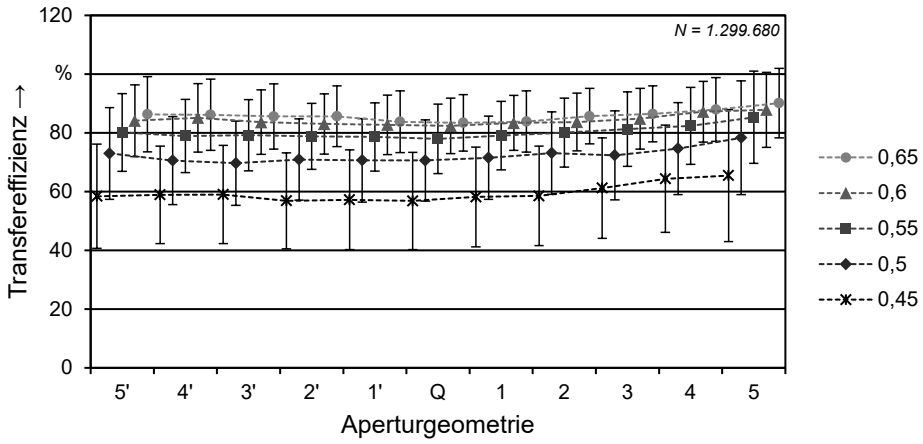


Bild 96: Mittelwerte der Transfereffizienzen für die unterschiedlichen Ausprägungen der Schablonenöffnungen unter Verwendung des Lotpastentyps 4

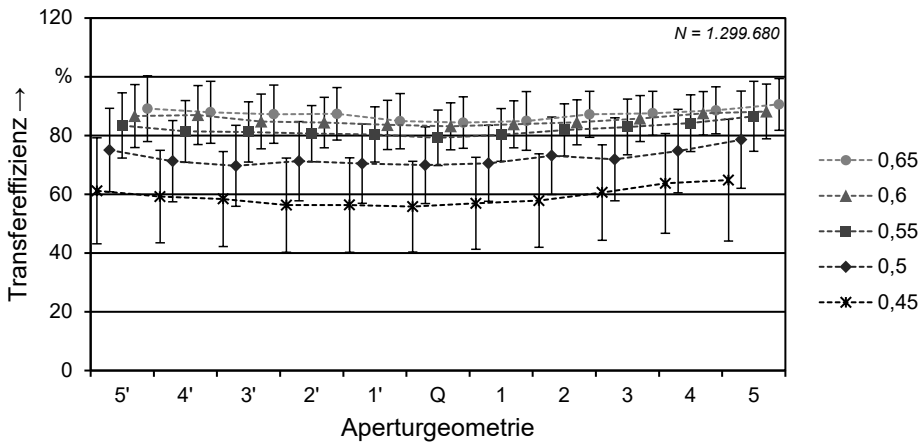


Bild 97: Mittelwerte der Transfereffizienzen für die unterschiedlichen Ausprägungen der Schablonenöffnungen unter Verwendung des Lotpastentyps 5

Tabelle 21: Aspektverhältnis (Aspect Ratio, minimale Aperturabmessung zu Schablonendicke) des entwickelten Layouts mit hervorgehobenen Werten unterhalb von 1,5

Schablonendicke	Flächenverhältnis	Q	1/1'	2/2'	3/3'	4/4'	5/5'
80 μm	0,45	1,80	1,68	1,55	1,43	1,30	1,18
	0,5	2,00	1,88	1,75	1,63	1,50	1,38
	0,55	2,20	2,08	1,95	1,83	1,70	1,58
	0,6	2,40	2,28	2,15	2,03	1,90	1,78
	0,65	2,60	2,48	2,35	2,23	2,10	1,98
100 μm	0,45	1,80	1,70	1,60	1,50	1,40	1,30
	0,5	2,00	1,90	1,80	1,70	1,60	1,50
	0,55	2,20	2,10	2,00	1,90	1,80	1,70
	0,6	2,40	2,30	2,20	2,10	2,00	1,90
	0,65	2,60	2,50	2,40	2,30	2,20	2,10
120 μm	0,45	1,80	1,63	1,47	1,30	1,13	0,97
	0,5	2,00	1,83	1,67	1,50	1,33	1,17
	0,55	2,20	2,03	1,87	1,70	1,53	1,37
	0,6	2,40	2,23	2,07	1,90	1,73	1,57
	0,65	2,60	2,43	2,27	2,10	1,93	1,77

Tabelle 22: Seitenverhältnisse (längere Seite zu kürzerer Seite der Aperturen) des entwickelten Layouts für rechteckige Strukturen

Schablonendicke	Flächenverhältnis	Q	1/1'	2/2'	3/3'	4/4'	5/5'
80 μm	0,45	1:1	1,16	1,39	1,71	2,25	3,28
	0,5	1:1	1,14	1,34	1,60	2,00	2,66
	0,55	1:1	1,13	1,29	1,52	1,83	2,32
	0,6	1:1	1,12	1,26	1,46	1,72	2,08
	0,65	1:1	1,11	1,24	1,40	1,63	1,92
100 μm	0,45	1:1	1,12	1,29	1,50	1,80	2,25
	0,5	1:1	1,11	1,25	1,43	1,67	2,00
	0,55	1:1	1,10	1,22	1,37	1,57	1,84
	0,6	1:1	1,09	1,20	1,33	1,50	1,72
	0,65	1:1	1,08	1,18	1,30	1,45	1,62
120 μm	0,45	1:1	1,23	1,59	2,25	3,86	13,50
	0,5	1:1	1,20	1,50	2,00	3,00	6,00
	0,55	1:1	1,18	1,43	1,83	2,54	4,13
	0,6	1:1	1,16	1,38	1,71	2,25	3,27
	0,65	1:1	1,15	1,34	1,63	2,05	2,79

Tabelle 23: Anwendung der 5-Körnerregel für den mittleren Durchmesser der Korngröße für den Pastentyp 4 (Werte unter 5 hervorgehoben)

Schablonen- dicke	Flächen- verhältnis	Q	1/1'	2/2'	3/3'	4/4'	5/5'
80 µm	0,45	4,97	4,62	4,28	3,93	3,59	3,24
	0,5	5,52	5,17	4,83	4,48	4,14	3,79
	0,55	6,07	5,72	5,38	5,03	4,69	4,34
	0,6	6,62	6,28	5,93	5,59	5,24	4,90
	0,65	7,17	6,83	6,48	6,14	5,79	5,45
100 µm	0,45	6,21	5,86	5,52	5,17	4,83	4,48
	0,5	6,90	6,55	6,21	5,86	5,52	5,17
	0,55	7,59	7,24	6,90	6,55	6,21	5,86
	0,6	8,28	7,93	7,59	7,24	6,90	6,55
	0,65	8,97	8,62	8,28	7,93	7,59	7,24
120 µm	0,45	7,45	6,76	6,07	5,38	4,69	4,00
	0,5	8,28	7,59	6,90	6,21	5,52	4,83
	0,55	9,10	8,41	7,72	7,03	6,34	5,66
	0,6	9,93	9,24	8,55	7,86	7,17	6,48
	0,65	10,76	10,07	9,38	8,69	8,00	7,31

Tabelle 24: Anwendung der 5-Körnerregel für den mittleren Durchmesser der Korngröße für den Pastentyp 5 (Werte unter 5 hervorgehoben)

Schablonen- dicke	Flächen- verhältnis	Q	1/1'	2/2'	3/3'	4/4'	5/5'
80 µm	0,45	7,20	6,70	6,20	5,70	5,20	4,70
	0,5	8,00	7,50	7,00	6,50	6,00	5,50
	0,55	8,80	8,30	7,80	7,30	6,80	6,30
	0,6	9,60	9,10	8,60	8,10	7,60	7,10
	0,65	10,40	9,90	9,40	8,90	8,40	7,90
100 µm	0,45	9,00	8,50	8,00	7,50	7,00	6,50
	0,5	10,00	9,50	9,00	8,50	8,00	7,50
	0,55	11,00	10,50	10,00	9,50	9,00	8,50
	0,6	12,00	11,50	11,00	10,50	10,00	9,50
	0,65	13,00	12,50	12,00	11,50	11,00	10,50
120 µm	0,45	10,80	9,80	8,80	7,80	6,80	5,80
	0,5	12,00	11,00	10,00	9,00	8,00	7,00
	0,55	13,20	12,20	11,20	10,20	9,20	8,20
	0,6	14,40	13,40	12,40	11,40	10,40	9,40
	0,65	15,60	14,60	13,60	12,60	11,60	10,60

Tabelle 25: Ergebnisse des flächenzentrierten Versuchsplans mit ausgesuchten Antwortoptionen und Parameterkombinationen

Versuchspunkt	Bewertung der Transfereffizienz über					Flächenbedrucksungsgrad	Druckparameter ¹		
	Mittelwert	Mittelwert mit Anpassung für Fehler "Druckbrücke"	Mittelwert mit Anpassung für Fehler "Druckbrücke" und "Unzureichend"	Median	Standardabweichung		Mittelwert	A	B
1	89,15	88,86	78,93	90,27	19,59	114,89	-	-	-
2	86,13	86,13	76,49	88,06	18,65	108,35	+	-	-
3	98,16	96,65	80,38	102,62	26,43	117,00	-	+	-
4	93,00	92,93	82,31	97,49	26,00	110,21	+	+	-
5	90,39	90,23	82,24	91,81	19,64	113,10	-	-	+
6	86,15	86,15	78,66	86,98	19,84	106,30	+	-	+
7	101,04	100,24	88,77	103,67	24,42	120,87	-	+	+
8	94,18	94,07	85,77	97,20	23,00	112,49	+	+	+
9	92,39	92,06	82,02	95,98	24,93	114,07	-	o	o
10	89,34	89,34	80,07	92,22	24,75	105,59	+	o	o
11	82,76	82,76	72,58	85,69	20,44	105,69	o	-	o
12	94,00	93,76	82,25	99,51	27,51	110,32	o	+	o
13	88,14	88,14	77,71	91,27	22,61	109,52	o	o	-
14	87,71	87,71	79,84	90,34	22,43	105,93	o	o	+
15	89,77	89,77	80,67	92,92	22,49	112,21	o	o	o

¹Erläuterung der Druckparameter:

"A" = Rakelgeschwindigkeit in mm/s; "-" = 30, "o" = 55, "+" = 80

"B" = Rakeldruck pro 100 mm in kg; "-" = 2, "o" = 2,5, "+" = 3

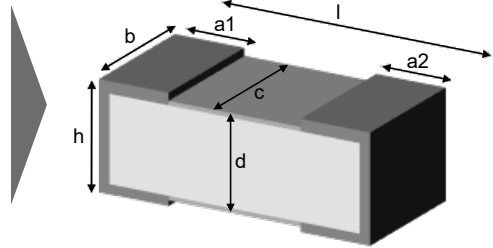
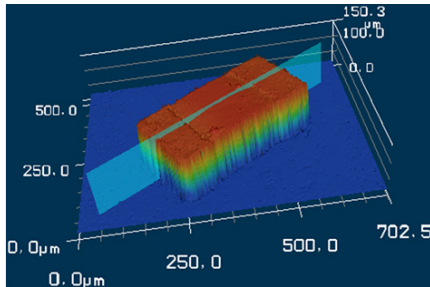
"C" = Trenngeschwindigkeit in mm/s; "-" = 2, "o" = 4, "+" = 6

Tabelle 26: Kriterien für die Bewertung des Auftretens von Tombstone-Effekten bei Bauelementen der Größe 01005

Layout \ Wertung*	Flächenverhältnis		Transfereffizienz in %		Fehleranteil in %	
	80 µm	100 µm	80 µm	100 µm	Kapazität	Widerstand
A	0,66	0,52	95,77	122,86	0,01	0,00
B	0,63	0,50	69,26	72,22	0,06	0,04
C	0,63	0,50	74,54	77,08	0,05	0,08
D	0,44	0,35	77,82	98,70	0,24	0,09
E	0,63	0,50	67,22	74,33	0,04	0,01
F	0,80	0,64	92,94	104,99	0,02	0,00
G	0,51	0,41	96,89	102,43	0,08	0,02
FR	0,95	0,76	55,65	83,56	0,01	0,00
LJ	0,82	0,65	83,49	83,03	0,00	0,01
PX	0,67	0,53	86,93	91,75	0,05	0,03
PY	0,59	0,48	88,50	104,93	0,00	0,00
SD	0,56	0,46	92,48	108,82	0,04	0,02
StdK	0,64	0,51	96,86	101,04	0,03	0,01
StdW	0,61	0,48	89,82	92,00	0,03	0,02

*Bewertungskriterien	--	-	0	+	++
Flächenverhältnis	< 0,5	> 0,5	> 0,55	> 0,6	> 0,66
Transfereffizienz in %	< 50	> 50	> 65	> 75	> 90
Fehleranteil in %	> 0,05	> 0,037	> 0,023	> 0,01	< 0,01

Tabelle 27: Ergebnisse der stichprobenartigen Vermessung von jeweils 18 Kondensatoren der Baugröße 01005 unterschiedlicher Hersteller



Bauteil	Wert in μm	Länge l	Breite b	Höhe h	Länge a1	Länge a2	Höhe d	Breite c
CC01005 100n	Mittelwert	381,5	199,0	294,3	84,0	88,4	278,7	167,5
	Stabw.	3,8	3,2	14,9	6,2	6,2	15,3	2,1
	Minimum	377,0	194,5	257,5	76,4	77,4	239,7	164,8
	Maximum	390,2	204,0	314,1	92,8	97,4	297,0	170,6
CC01005 100p	Mittelwert	389,1	194,2	254,4	91,8	96,1	241,1	163,7
	Stabw.	10,0	7,4	19,6	5,9	5,0	18,8	2,3
	Minimum	376,4	185,7	222,6	82,9	85,5	211,8	160,6
	Maximum	403,0	206,5	275,6	101,1	102,7	260,2	169,5
CC01005 100n	Mittelwert	379,2	191,2	224,6	81,3	85,5	214,4	164,0
	Stabw.	5,5	7,5	9,5	7,6	5,7	10,1	7,7
	Minimum	368,6	179,7	212,0	69,5	75,2	201,2	151,6
	Maximum	391,1	203,2	247,9	96,4	95,7	233,6	179,2
CC01005 10n	Mittelwert	384,6	193,6	239,7	91,8	90,9	230,2	173,9
	Stabw.	4,1	2,0	7,9	6,3	5,7	7,5	1,9
	Minimum	377,4	189,3	227,7	82,9	83,6	220,5	170,3
	Maximum	393,1	196,4	251,6	107,1	104,9	243,0	176,7
CC01005 10n	Mittelwert	369,6	183,3	240,2	71,4	75,3	231,5	160,1
	Stabw.	4,3	8,2	9,4	4,8	5,8	7,1	8,5
	Minimum	364,5	173,4	224,2	60,5	64,8	216,7	148,3
	Maximum	378,3	197,0	260,8	78,0	89,5	247,0	172,9
CC01005 100n	Mittelwert	377,1	196,4	249,1	98,9	101,1	239,6	176,7
	Stabw.	3,5	6,7	4,9	7,0	5,7	5,0	5,1
	Minimum	368,9	182,7	240,4	85,5	91,5	231,8	167,9
	Maximum	382,2	208,5	255,2	109,3	114,4	249,2	185,6

Tabelle 28: Ergebnisse der stichprobenartigen Vermessung von jeweils 18 Widerständen der Baugröße 01005 unterschiedlicher Hersteller

Bauteil	Wert in μm	Länge l	Breite b	Höhe h	Länge a1	Länge a2	Höhe d	Breite c
CR01005 1k	Mittelwert	399,9	203,1	151,7	96,7	98,3	158,6	184,1
	Stabw.	2,9	3,7	9,0	6,3	6,1	7,1	1,9
	Minimum	395,3	197,2	137,6	85,0	88,4	145,5	181,6
	Maximum	404,9	209,1	171,4	107,1	105,5	173,9	187,1
CR01005 4k7	Mittelwert	390,8	195,7	166,7	92,1	93,5	171,4	173,4
	Stabw.	3,4	3,2	8,3	5,7	5,6	7,2	1,1
	Minimum	382,9	190,9	153,2	81,4	87,1	159,0	171,4
	Maximum	394,9	200,6	181,2	102,5	103,4	183,1	174,9
CR01005 1M	Mittelwert	409,1	206,3	164,7	89,9	89,3	163,7	190,8
	Stabw.	6,3	9,7	11,9	7,9	11,4	13,5	10,0
	Minimum	396,0	189,5	152,8	77,5	65,5	150,5	169,3
	Maximum	415,2	221,0	190,9	103,9	107,5	193,0	204,0
CR01005 220R	Mittelwert	382,5	187,0	153,5	76,5	80,3	154,8	177,6
	Stabw.	4,4	5,1	4,1	3,8	6,2	4,7	2,6
	Minimum	376,2	180,1	147,1	70,6	69,4	147,6	172,4
	Maximum	391,2	197,8	162,5	81,7	91,3	167,3	181,7
CR01005 22R	Mittelwert	394,2	196,6	164,6	92,4	94,4	168,9	177,6
	Stabw.	2,3	2,6	5,5	8,0	7,6	5,5	2,6
	Minimum	389,9	192,1	157,0	79,3	80,2	158,4	172,8
	Maximum	400,1	202,6	176,0	105,6	109,4	179,6	183,3
CR01005 10R	Mittelwert	394,2	193,7	165,8	84,9	82,1	167,3	172,6
	Stabw.	3,1	5,0	5,3	8,0	8,5	4,6	2,5
	Minimum	390,0	186,5	156,0	73,5	69,7	159,5	168,3
	Maximum	400,8	200,7	174,8	103,7	100,8	176,1	177,9
CR01005 49R	Mittelwert	389,5	200,6	160,2	114,8	104,2	147,6	173,4
	Stabw.	4,8	7,1	53,8	10,4	7,3	53,6	3,7
	Minimum	382,6	189,0	60,4	92,5	92,7	47,1	170,0
	Maximum	398,0	213,1	197,5	133,8	116,0	185,4	179,1

Literaturverzeichnis

- [1] ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE: Mikroelektronik - Trendanalyse bis 2022. URL https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/April/Mikroelektronik_Trendanalyse_bis_2022/Mikroelektronik-Trendanalyse-bis-2022_01.pdf – Überprüfungsdatum 2018-06-11
- [2] WOLTER, K.-J.; ZERNA, T.: Produktionstechnik für eine Aufbau- und Verbindungstechnik für die Nanoelektronik. Frankfurt am Main: Fachverband Electronic Components and Systems im ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., 2005
- [3] TECHSEARCH INTERNATIONAL INC.: Advanced Packaging Update: Market and Technology Trends. 4. Aufl. Austin, TX, 2019
- [4] ULRICH, R. K. (Hrsg.); SCHAPER, L. W. (Hrsg.): Integrated passive component technology. Piscataway, New Jersey, Hoboken, New Jersey, Piscataway, New Jersey: IEEE Press Wiley-Interscience; IEEE Xplore, 2010
- [5] HILLMAN, C.: 0201 and 01005 Adoption in Industry: White Paper by DfR Solutions in collaboration with Paumanok Group [Unternehmensschrift]. College Park, MD, 2011
- [6] IPC - ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES: 2015 IPC Technology Roadmap for Electronic Interconnections. Bannockburn, IL, 2015
- [7] INTERNATIONAL ELECTRONICS MANUFACTURING INITIATIVE: iNEMI Technology Roadmap 2015. Morrisville, NC
- [8] ZVEI - ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E.V. (Hrsg.); BIRKICHT, A. (Mitarb.); WILE, J. (Mitarb.); ALBRECHT, H.-J. (Mitarb.); DETERT, M. (Mitarb.); KOWALSKI, G. (Mitarb.); PFEFFER, M. (Mitarb.); SCHMIDT, B. (Mitarb.): Technologie Roadmap Stressarme MST-Packages: Trends, Perspektive, Herausforderungen. Frankfurt, 2013
- [9] LAU, J. H.: Fan-out wafer-level packaging for 3D IC heterogeneous integration. In: CLAEYS, C. L. (Hrsg.): China Semiconductor Technology International Conference 2018 (CSTIC 2018). Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 1–6

- [10] FJELSTAD, J.: An Interconnection Technology Roadmap Overview (4th JISSO International Forum). Nürnberg, 06.-11.05.2012
- [11] GHAFARIAN, R.: Microelectronics packaging technology roadmaps, assembly reliability, and prognostics. In: Facta universitatis - series: Electronics and Energetics 29 (2016), Nr. 4, S. 543-611
- [12] ZOGBI, D. M.: Passive Electronic Components: World Market Outlook: 2018-2023. Cary, NC: Paumanok Publications, Inc., 2018
- [13] KEMET ELECTRONICS CORPORATION: Investor Presentation February 2018. URL <https://b2icontent.irpass.com/2072/173273.pdf> - Überprüfungsdatum 2018-02-16
- [14] MURATA MANUFACTURING CO., LTD.: Murata's World's Smallest 008004 Size (0.25 x 0.125 mm) Chip Ferrite Bead. URL <http://www.murata.com/products/article/pp09e1/3.html> - Überprüfungsdatum 24.09.2013
- [15] HABU, T.: Environmentally friendly packaging for miniaturizing electronic components. In: Electronics Knowledge Transfer Network (Hrsg.): The Active World of Passives, 2009
- [16] MURATA MANUFACTURING CO., LTD.: Information Meeting 2017. URL https://www.murata.com/~media/webrenewal/about/newsroom/news/irnews/irnews/2017/1130/1711_e_speech.ashx?la=en-us - Überprüfungsdatum 2017-12-01
- [17] TECHSEARCH INTERNATIONAL INC.: New Frontiers in Automotive Electronics Packaging. Austin, TX, 2018
- [18] AEC-Q200 REV D. 2010-06-01. Stress Test Qualification for Passive Components
- [19] BAUER, N.: Small Packaging Lösungen für die nächste Generation von mobilen Systemen, Automotive Anwendungen, Highspeed- und drahtloser Kommunikation (4. LaserJob Technologie-Forum). Fürstfeldbruck, 6.11.2014
- [20] ZOGBI, D. M.: MLCC Shortages Are Creating Challenges In Multiple End-Markets in 2018. URL <https://www.ttiinc.com/content/tti-inc/en/resources/marketeye/categories/passives/me-zogbi-20180302.html> - Überprüfungsdatum 2018-03-03
- [21] ADVANCED MP TECHNOLOGY INC.: The Severe Shortage of Multilayer Ceramic Chip Capacitors (MLCC). URL <http://www.advancedmp.com/severe-mlcc-shortage/> - Überprüfungsdatum 2018-05-31

- [22] RÖSCH, M.: Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion. Bamberg: Meisenbach, 2011 (Fertigungstechnik Erlangen 221)
- [23] LUK, L.: Foxconn Struggles to Meet New iPhone Demand. URL <https://blogs.wsj.com/digits/2014/09/17/foxconn-struggles-to-meet-new-iphone-demand/?mod=ST1> – Überprüfungsdatum 2016-09-14
- [24] BARBOZA, D.: How China Built ‘iPhone City’ With Billions in Perks for Apple’s Partner. URL https://www.nytimes.com/2016/12/29/technology/apple-iphone-china-foxconn.html?_r=0 – Überprüfungsdatum 2017-03-17
- [25] N.N.: Apple Returns Millions of Defective iPhone 5 Smartphones. URL <https://www.tomshardware.com/news/Apple-iPhone-Foxconn-return-defects,22195.html> – Überprüfungsdatum 2016-05-06
- [26] SANDS, A.; TSENG, V.: Cell Phone Comparison Study. URL <https://www.squaretrade.com/cell-phone-comparison-study-nov-10> – Überprüfungsdatum 2015-12-03
- [27] SIT, O.; PETRAS, J.: Using AOI in the 01005 Assembly process. In: Circuit Assembly 18 (2007), Nr. 9, S. 36–41
- [28] BLOCK, R.: Die Software macht den Unterschied: Die Inspektion moderner Bauformen erfordert neue Konzepte. In: productronic 34 (2014), S. 100–102
- [29] GEISLER, U.: AOI in der Wertschöpfungskette: Wann rechnet sich Inspektion? In: productronic 33 (2013), S. 94–96
- [30] CHEN, J.; RAJOO, S.; ZHAO, M.; WEN, W.; XU, G.; NING, A.; XIE, M.; THAO, A. Q.; QIAN, W. B.; LI, F.; WONG, K.; FENG, Z.; KURWA, M.: Method Of Determining Solder Paste Inspection Tolerance Settings. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference. Fort Worth, TX, 2011, S. 955–969
- [31] HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Technologische und wirtschaftliche Prozessfenster für die gesicherte Verarbeitung der Bauform 01005 in der Elektronikproduktion: Abschlussbericht zu IGF-Nr.: 17.420 N / DVS-Nr.: 10.068. 2015

- [32] MANGIN, C. H.: Where quality is lost on SMT boards. In: Circuit Assembly (1991), Nr. 2, S. 63–64
- [33] CLOUTHIER, R. S.: The complete solder paste printing processes. In: SMT Magazine 13 (1999), S. 6–8
- [34] COMBET, C.; CHANG, M.-M.: 01005 Assembly, the AOI route to optimizing yield [Unternehmensschrift]. Vi TECHNOLOGY, France, 15.07.2009
- [35] YANG, J.; HUANG, J. C. Y.; LEE, V.; TSAI, J.; KU, C.-L.; LI, K.-C.; HSIEH, A.; CHEN, C. Y.: Stencil evaluation of ultra fine pitch solder paste printing process. In: IMPACT (Hrsg.): Proceedings: 5th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference. Piscataway, NJ, 2010, S. 1–4
- [36] VIJAY, K.: Miniaturization - Solder Paste Attributes for Maximizing the Print & Reflow Manufacturing Process Window. In: IMAPS-Europe (Hrsg.): Proceedings: 18th European Microelectronics and Packaging Conference. Brighton, 2011, S. 26–29
- [37] COLEMAN, W. E.: Stencil Printing of Small Apertures. In: SMT Magazine (2013), S. 38–49
- [38] WHITMORE, M.; SCHAKE, J.: The Impact of Stencil Printing Upon Assembly & Reliability Of 0.3mm Pitch CSP Components. In: International Symposium on Microelectronics 2016 (2016), Nr. 1, S. 667–674
- [39] KRAMMER, O.; GYARMATI, B.; SZILÁGYI, A.; ILLÉS, B.; BUŠEK, D.; DUŠEK, K.: The effect of solder paste particle size on the thixotropic behaviour during stencil printing. In: Journal of Materials Processing Technology 262 (2018), S. 571–576
- [40] BARBOSA, F. v.; RIBEIRO, P. E. A.; CERQUEIRA, M. F.; SOARES, D. F.; TEIXEIRA, J. C. F.; TEIXEIRA, S. F. C. F.; LIMA, R. A. M. M.; PINHO, D. M. d.: Rheology Characterization of Solder Paste. In: Proceedings: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - 2017. NY: The American Society of Mechanical Engineers, 2018, V007T09A035
- [41] ZAPPELLA, P. I.; SEDEHI, S.; HIZON, R.; WILLIAMS, A. d.: Achieving Low Voiding with Lead Free Solder Paste for Power Devices. In: International Symposium on Microelectronics (2016), Nr. 1, S. 618–623

- [42] WOHLRABE, H.: Solder paste printing in six-sigma-quality. In: 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pitesti. Piscataway, NJ: IEEE, 2010, S. 33–38
- [43] RISSE, A.: *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012
- [44] PAN, J.; TONKAY, G.: A Study of the Aperture Filling Process in Solder Paste Stencil Printing. In: ASME (Hrsg.): *Proceedings: ASME International Mechanical Engineering Congress*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1999, S. 75–82
- [45] CLEMENTS, D. J.; DESMULLIEZ, M. P.Y.; ABRAHAM, E.: The evolution of paste pressure during stencil printing. In: *Soldering & Surface Mount Technology* 19 (2007), Nr. 3, S. 9–14
- [46] MANNAN, S. H.; EKERE, N. N.; ISMAIL, I.; CURRIE, M. A.: Flow processes in solder paste during stencil printing for SMT assembly. In: *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 6 (1995), Nr. 1, S. 34–42
- [47] EKERE, N.N.; MANNAN, S.H.; CURRIE, M.A.: Solder paste printing process modelling map. In: *Proceedings: Japan International Electronic Manufacturing Technology Symposium*. Omiya, 1995, S. 137–141
- [48] IPC 7525B. 2011. Stencil design guidelines. Association Connecting Electronics Industries (IPC)
- [49] IPC J-STD-005A. 2012-02-01. Requirements for Soldering Pastes. Association Connecting Electronics Industries (IPC)
- [50] DIN EN 61190-1-2. 2014-11-01. Verbindungsmaterialien für Baugruppen der Elektronik - Teil 1-2: Anforderungen an Lotpaste für hochwertige Verbindungen in der Elektronikmontage. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
- [51] RÖSCH, M.; FRANKE, J.: Characteristics and potentials of nano-coated stencils for stencil printing optimization. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): *Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference*. Orlando, FL, 2010, S. 816–822
- [52] COLEMAN, W. E.; ANGLIN, C.: Stencil Options for Printing Solder Paste for .3 mm CSP's and 01005 Chip Components. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): *Proceedings: International Printed Circuits EXPO, APEX and the Designers Summit*. Las Vegas, NV, 2010, S. 2604–2663

- [53] KELLY, M.; GREEN, W.; COLE, M.; KELLMANN, R.: Plasma Stencil Treatments: A Statistical Evaluation. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Fort Worth, TX, 2013, S. 838–847
- [54] WHITMORE, M.; SCHAKE, J. D.; ASHMORE, C.: The impact of stencil aperture design for next generation ultra-fine pitch printing. In: IEMT (Hrsg.): Proceedings: 35th International Electronics Manufacturing Technology Conference, 2012, S. 1–7
- [55] ASHMORE, C.: Investigating the Influence of Corner Radius within Rectangular Aperture Designs. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: IPC APEX EXPO 2018. Red Hook, NY: Curran, 2018
- [56] MOHANTY, R.; RAMKUMAR, M. S.; ANGLIN, C.; ODA, T.: Effect of Nano-Coated Stencil on 01005 Printing. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: International Printed Circuits EXPO, APEX and the Designers Summit, 2011, S. 1727–1736
- [57] BURR, D.: Solder Paste Inspection: Process Control for Defect Reduction. In: Proceedings: International Test Conference. Washington, DC: The Conference, 1997
- [58] PANG, GRANTHAM K. H.; CHU, M.-H.: Automated optical inspection of solder paste based on 2.5D visual images. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, 2009, S. 982–987
- [59] LATHROP, R. R.: Solder paste print qualification using laser triangulation. In: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part C 20 (1997), Nr. 3, S. 174–182
- [60] MOHANTY, R.; SHAH, V.; HAUGEN, P.; HOLTE, L.: Solder Paste Inspection Technologies: 2D-3D Correlation. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: International Printed Circuits EXPO, APEX and the Designers Summit, 2008, S. 173–180
- [61] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: Eignungsnachweis von Prüfprozessen: Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. München: Carl Hanser Verlag, 2014
- [62] IPC-7351B-DE. 2010-06-01. Basisanforderungen an das SMT-Design und SMD-Anschlussflächen-Richtlinie. Association Connecting Electronics Industries (IPC)

- [63] BORKES, T.; GROVES, L.: Process Characterization of the 01005 (English) Component Package. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference. Rosemont, IL, 2006, S. 225–234
- [64] LEE, Y.-W.; KIM, K.-S.; SUGANUMA, K.; KIM, J.-H.: Developing the Stencil Printing Process for 01005 Lead-Free Assemblies. In: ICEPT-HDP (Hrsg.): Proceedings: International Conference on Electronics Packaging Technology & High Density Packaging. Piscataway, NJ, 2008, S. 1–7
- [65] LEE, Y.-W.; KIM, K.-S.; SUGANUMA, K.: Process characterization and reliability for the assembly of 01005 chip components. In: Soldering & Surface Mount Technology 23 (2011), Nr. 4, S. 235–243
- [66] LI, J.; PORANKI, S.; GALLARDO, R.; ABTEW, M.; KINYANJUI, R.; SRIHARI, K.: Design and process development for the assembly of 01005 passive components. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference. San Diego, CA, 2009, S. 458–465
- [67] LIU, Y.; JOHNSON, W. R.: Optimization of lead free solder 01005 component assembly. In: Soldering & Surface Mount Technology 19 (2007), Nr. 1, S. 15–27
- [68] SCHAKE, J. D.: Mass reflow assembly of 01005 components. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: International Printed Circuits EXPO, APEX and the Designers Summit. Los Angeles, CA, 2007, S. 1570–1581
- [69] WANG, Y.; OLORUNYOMI, M.; DAHLBERG, M.; DJUROVIC, Z.; ANDERSON, J.; LIU, J.: Process and pad design optimization for 01005 passive component surface mount assembly. In: Soldering & Surface Mount Technology 19 (2007), Nr. 1, S. 34–44
- [70] HEILMANN, N.; LINDLOFF, A.; DOLD, C.; FRIEDRICH, D.; TRODLER, J.: 01005 Prozess-Technologie. 2007
- [71] HÄRTER, S.; LÄNTZSCH, C.; FRANKE, J.: Fundamental study on a secure printing process using NanoWork stencils for 01005 components. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Rosemont, IL, 2014, S. 878–884

- [72] RÖSCH, M.; FRANKE, J.; LÄNTZSCH, C.; KLEEMANN, G.: Eigenschaften und Potentiale nanobeschichteter Druckschablonen zur Optimierung des Schablonendruckprozesses. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen 109 (2011), Nr. 5, S. 1095–1104
- [73] ASHMORE, C.: Unlocking the Mystery of Aperture Architecture for Fine Line Printing. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: IPC APEX EXPO 2017. Red Hook, NY: Curran, 2017
- [74] ROHM CO., LTD. (Hrsg.): Through out-of-the-box miniaturization, ROHM has developed the world's smallest "03015 Size" chip resistor. https://www.rohm.de/news-detail?news-title=through-out-of-the-box-miniaturization-rohm-has-developed-the-world-s-smallest-*-03015-size-chip-resistor – Überprüfungsdatum 23.09.2013
- [75] OSWALD, S.: 03015: A seamlessly coordinated SMT process makes the difference: Placement of new, super-small components. <http://www.siplace.com/en/page20847.aspx?newsid=2358> – Überprüfungsdatum 16.01.2014
- [76] N.N.: Guide to the 0201 Part Placement Process. In: FUJI-SMT Magazine (2016), Nr. 11, S. 8–11
- [77] FISCHTHAL, B.; CIESLINSKI, M.: Beyond 0402M Placement: Process Considerations for 03015M Microchip Mounting. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: International Printed Circuits EXPO, APEX and the Designers Summit. Red Hook, NY: Curran, 2014
- [78] GEIGER, D.; NGUYEN, V.; LE, H.; CHEN, S.; PENNINGS, R.; BIEDERMAN, C.; FENG, Z.; CHAU, A.; LIU, W.; UY, W.; MOHAMMED, A.; DOIRON, M.: AOI Capabilities Study with 03015 Component. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: International Printed Circuits EXPO, APEX and the Designers Summit. Red Hook, NY: Curran, 2014
- [79] HÄRTER, S.; LÄNTZSCH, C.; FRANKE, J.: Evaluation von Einflussfaktoren auf den Schablonendruckprozess für passive Bauelemente der Größe 03015mm. In: DVS/GMM (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL, 2016, S. 105–113
- [80] HÄRTER, S.; LÄNTZSCH, C.; FRANKE, J.: Evaluation of the Stencil Printing for Highly Miniaturized SMT Components with 03015mm in Size. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Rosemont, IL, 2015, S. 756–764

- [81] HÄRTER, S.; LÄNTZSCH, C.; FRANKE, J.: Gesicherte Verarbeitung von hochminiaturisierten Bauelementen der Baugröße 01005 in der Elektronikproduktion. In: DVS/GMM (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL, 2014, S. 84-91
- [82] SHEA, C.; BIXENMAN, M.; RANEY, W.; WHITTIER, R.: Video Analysis of Solder Paste Release from Stencils. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Rosemont, IL, 2015, S. 614-626
- [83] ASHMORE, C.: Investigating the Metric 0201 Assembly Process. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: IPC APEX EXPO 2019. Red Hook, NY: Curran, 2019
- [84] ZÜHLKE, K.: 03015-Bauteile auf dem Sprung in die Fertigung: Nepcon 2013 in Shenzen. <http://www.elektroniknet.de/elektronikfertigung/fertigungstechnik/artikel/101211> - Überprüfungsdatum 13.09.2013
- [85] HÄRTER, S.; NIEMANN, J.; FRANKE, J.; SCHAKE, J. D.; WHITMORE, M.: The Effect of Area Shape and Area Ratio on Solder Paste Printing Performance. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Rosemont, IL, 2016
- [86] KLEPPMANN, W.: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 7. aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser, 2011 (Praxisreihe Qualitätswissen)
- [87] MOLAMPHY, T. A.; STEPHENSON, M. I.; MURPHY, E. A.: Application of Experimental Design to the Solder Paste Screen Printing Process. In: Soldering & Surface Mount Technology 4 (1992), Nr. 2, S. 4-6
- [88] SCHEFFLER, E.: Statistische Versuchsplanung und -auswertung: Eine Einführung für Praktiker. 3. Auflage. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997
- [89] GIMPEL, B.: Qualitätsgerechte Optimierung von Fertigungsprozessen. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 1991. Düsseldorf: VDI-Verl., 1991
- [90] GUNDLACH, C.: Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung des statistischen Versuchsplanung. Zugl.: Kassel, Univ., Diss, 2004. Kassel: Kassel Univ. Press, 2004

- [91] BARAJAS, L. G.; EGERSTEDT, M. B.; KAMEN, E. W.; GOLDSTEIN, A.: Stencil Printing Process Modeling and Control Using Statistical Neural Networks. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing 31 (2008), Nr. 1, S. 9–18
- [92] KHADER, N.; YOON, S. W.; LI, D.: Stencil Printing Optimization using a Hybrid of Support Vector Regression and Mixed-integer Linear Programming. In: Procedia Manufacturing 11 (2017), S. 1809–1817
- [93] KHADER, N.; YOON, S. W.: Stencil Printing Process Optimization to Control Solder Paste Volume Transfer Efficiency. In: IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 8 (2018), Nr. 9, S. 1686–1694
- [94] WORMUTH, D.; ZAPF, J.: Grundlagen der Surface Mount Technology. München: SiemensDematic AG, 2001
- [95] SCHEEL, W.: Baugruppenttechnologie der Elektronik: Verlag Technik, 1997
- [96] WOHLRABE, H.: Qualitätsoptimierung bei der Fertigung elektronischer Baugruppen mittels statistischer Analysemethoden. 1. Auflage. Templin: Detert, 2009
- [97] WOHLRABE, H.: Maschinen- und Prozessfähigkeit von Bestückausrüstungen der SMT. 2. überarb. und erw. Aufl. Templin: Detert, 2001
- [98] DIN 55319. 2002-03-01. Qualitätsfähigkeitskenngrößen. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
- [99] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 7., aktualisierte Aufl. München: Hanser, 2014
- [100] IPC-9850A. 2011-11-01. Surface Mount Placement Equipment Characterization. Association Connecting Electronics Industries (IPC)
- [101] FELDMANN, K.: Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte: Design, Konzepte, Strategien. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009 (VDI-Buch)
- [102] GEIER, J.: MLCCs im Vergleich: Keramikkondensatoren für extreme Automotive-Anforderungen. In: Elektronik Industrie 38 (2007), 8/9, S. 96–97
- [103] HEILMANN, N.: 01005 Assembly – From Board Design To The Reflow Process. In: OnBoard Technology (2008), S. 54–59

- [104] WILLIS, B.: 0201- 01005 Chip Component Design and Assembly Issues. <http://www.etn-uk.com/Portals/0/Content/TAWOP/3-%2001005%20Chip%20Component%20Assembly.pdf>, 2010
- [105] JARVINA, R.; GREINER, S.; WARREN, R.: 01005 SMT component assembly for wireless SIP modules. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 55th Electronic Component and Technology Conference, 2005, S. 1500–1505
- [106] MATTSSON, F.; GEIGER, D.; SHANGGUAN, D.; CASTELLO, T.: Design and Assembly of 01005 Passives Using Pb-Free Solder. In: Circuit Assembly 16 (2005), Nr. 5, S. 22–27
- [107] MOHANTY, R.; BELMONTE, J.; SHAH, V.; SANTOS, D.; NAMBI, S.: From Printing to Reflow: Process Development for 01005 Assembly. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association PanPacific Microelectronics Symposium. Maui, HI, 2007
- [108] SHAH, V.; MOHANTY, R.: Assembly Process Challenges For 01005 Components. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference. Orlando, FL, 2008, S. 468–475
- [109] HÄRTER, S.; BEER, D.; FRANKE, J.: Untersuchung des Selbstzentrierreffektes mittels automatischer optischer Inspektion (AOI) zur gesicherten Verarbeitung von 01005-Bauelementen. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen 17 (2015), Nr. 3, S. 567–573
- [110] WÖLFLICK, P.: Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen. Bamberg: Meisenbach, 2006 (Fertigungstechnik - Erlangen 175)
- [111] EISENBARTH, M.: Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen. Bamberg: Meisenbach, 2003 (Fertigungstechnik - Erlangen 139)
- [112] ARAVAMUDHAN, S.; BELMONTE, J.; PHAM-VAN-DIEP, G.; HARRELL, J.: Self-centering of chip components in a pb-free assembly as a function of component and solder paste print offsets. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference. Chicago, IL, 2005, S. 851–860

- [113] KRAMMER, O.; SINKOVICS, B.; ILLÉS, B.: Studying the Dynamic Behaviour of Chip Components during Reflow Soldering. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 30th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Cluj-Napoca: IEEE, 2007, S. 18–23
- [114] KLEIN WASSINK, R. J.; VERGULD, M.M.F.: Drawbridging of Leadless Components. In: *Microelectronics International* 3 (1986), Nr. 1, S. 18–24
- [115] ELLIS, J. R.; MASADA, G. Y.: Dynamic behavior of SMT chip capacitors during solder reflow. In: IEEE/CHMT (Hrsg.): Proceedings: 7th IEEE/CHMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium, 1989
- [116] KRAMMER, O.: Modelling the self-alignment of passive chip components during reflow soldering. In: *Microelectronics Reliability* 54 (2014), Nr. 2, S. 457–463
- [117] NAJIB, A. M.; ABDULLAH, M. Z.; SAAD, A. A.; SAMSUDIN, Z.; CHE ANI, F.: Numerical simulation of self-alignment of chip resistor components for different silver content during reflow soldering. In: *Microelectronics Reliability* 79 (2017), S. 69–78
- [118] MARTINEK, P.; KRAMMER, O.; FARKAS, A. G.: Predicting Component Self-alignment by Machine Learning Technique. In: 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 1–6
- [119] TEREDESAI, A.; BELMONTE, J.; ARAVAMUDHAN, S.; SZYMANOWSKI, R.: Self-centering of offset chip components in a pb-free assembly. In: IPC; Jedec (Hrsg.): Proceedings: 5th International Conference on Lead-Free Electronic Components and Assemblies, 2004
- [120] KRAMMER, O.; SINKOVICS, B.; ILLÉS, B.: Predicting Component Self-Alignment in Lead-Free Reflow Soldering Technology by Virtue of Force Model. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 1st Electronics Systemintegration Technology Conference, 2006, S. 617–623
- [121] FRANKE, J.; SCHÜßLER, F.; PFEFFER, M.; HÄRTER, S.: Supporting Component Self-Alignment by Forced Oscillation During Reflow Soldering. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference. Orlando, FL, 2010, S. 645–651
- [122] IPC-610-F. 2014. Acceptability of electronic assemblies. Association Connecting Electronics Industries (IPC)

- [123] SCHÜßLER, F.: Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen. Bamberg: Meisenbach, 2010 (Fertigungstechnik Erlangen 216)
- [124] FRANKE, J. (Hrsg.); DIEHM, R. (Mitarb.); DOHLE, R. (Mitarb.); GEORGIEV, G. (Mitarb.); HÄRTER, S. (Mitarb.); KEßLING, O. (Mitarb.); OPPERT, T. (Mitarb.); PFEFFER, M. (Mitarb.); SCHÜßLER, F. (Mitarb.): Kontaktierungsverfahren und Prozesstechnik für Ultra Fine-Pitch-Baugruppen. Nürnberg: FAPS-TT GmbH, 2010
- [125] REINHART, G.: Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser, 2017
- [126] LANG, K.-D.; HAMPICKE, M.: Trends in der Elektronikfertigung: Moderne Systemintegrationstechnologien als Schlüssel für Lösungen zu Industrie 4.0. In: *productronic* 34 (2014), S. 22–24
- [127] HÄRTER, S.; KLINGER, T.; BEER, D.; FRANKE, J.: Comprehensive Correlation of Inline Inspection Data for the Evaluation of Defects in Heterogeneous Electronic Assemblies. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Pan Pacific Microelectronics Symposium. Kohala Coast, HI, 2016
- [128] NIEMANN, J.; HÄRTER, S.; KÄSTLE, C.; FRANKE, J.: Challenges of the Miniaturization in the Electronics Production on the example of 01005 Components. In: SCHÜPPSTUHL, T.; FRANKE, J.; TRACHT, K. (Hrsg.): Tagungsband des 2. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Berlin: Springer Vieweg, 2017, S. 113–123
- [129] WHITMORE, M.; ASHMORE, C.: The development of new SMT printing techniques for mixed technology (heterogeneous) assembly. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 34th IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium. Melaka, 2010, S. 1–8
- [130] KAMEN, E.; GOLDSTEIN, A.; CREVELING, D.; SAHINCI, E.; ZHIJIE, X.: Analysis of factors affecting component placement accuracy in SMT electronics Assembly - Electronics Manufacturing Technology Symposium. In: IEEE/CPMT (Hrsg.): Proceedings: 23rd IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 1998, S. 50–57
- [131] SIMION-ZANESCU, D.; STREZA, F.; SVASTA, P.: Complex evaluation of SMT defects. In: ISSE (Hrsg.): Proceedings: 27th International Spring Seminar on Electronics Technology. Sofia: Technical University of Sofia, Department of Semiconductor-and Hybrid Technologies, 2004 (Annual school. Lectures, vol. 24), S. 53–57

- [132] VOEGELE, K.: Finding hidden placement problems. In: Circuit Assembly 17 (2006), Nr. 12, S. 36–38
- [133] REUSCH, G.: Optimierung des Produktwechsels in SMD-Bestückungslinien: Die Herausforderung. In: productronic 29 (2009), 1/2
- [134] PADNOS, G.: Improved Efficiency Using Root Cause Failure Analysis. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: International Printed Circuits EXPO, APEX and the Designers Summit, 2011
- [135] VAN GASTEL, S.: Influence of pick & place machines on product quality: The impact of placement quality on SMT manufacturing costs. Leuven, 05.10.2012. URL http://www.edmp.be/uploaded-Files/EDM/Events/2012-10-05_EDM-Event_Influence-Pick-And-Place-On-Product-Quality.pdf
- [136] VAN GASTEL, S.: Placement Quality Affects Costs. In: SMT Surface Mount Technology Magazine 22 (2008), Nr. 11, S. 13–15
- [137] BELL, H.: Reflowlöten: Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler. 1. Aufl. Bad Saulgau: Leuze, 2005
- [138] LEE, N.-C.: Reflow soldering processes: SMT, BGA, CSP and flip chip technologies. Boston: Newnes, 2002
- [139] CHO, S.; AMIR, D.; REICHMAN, A.: Validation of Warpage Limit for Successful Component Surface Mount (SMT). In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 58th Electronic Components and Technology Conference, 2008, S. 899–906
- [140] GANESAN, G. S.; BERG, H. M.: Model and analyses for solder reflow cracking phenomenon in SMT plastic packages. In: IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology 16 (1993), Nr. 8
- [141] JIRSA, J.; DUŠEK, K.; ČERNEK, P.: Risk Analysis of Reflow Technologies in Electronics Assembly. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2012, S. 178–182
- [142] LADANI, L. J.; DASGUPTA, A.; CARDOSO, I.; MONLEVADE, E.: Effect of Selected Process Parameters on Durability and Defects in Surface-Mount Assemblies for Portable Electronics. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing 31 (2008), Nr. 1, S. 51–60

- [143] LI, Z.; LEE, S.; LEWIS, B.; HOUSTON, B.; BALDWIN, D.; STOUT, G.; TESSIER, T.; EVANS, J.: Sensitivity Analysis of Pb Free Reflow Profile Parameters Toward Flip Chip on Silicon Assembly Yield, Reliability and Intermetallic Compound Characteristics. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 60th Electronic Components and Technology Conference, 2010, S. 1132–1138
- [144] LI, C.; WU, Z.: Process Management System Analysis and Design of SMT Reflow Soldering process. In: ICEPT-HDP (Hrsg.): Proceedings: International Conference on Electronic Packaging Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2005, S. 279–284
- [145] LI, C.; WU, Z.: SPC System Analysis and design of reflow soldering process. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 7th International Conference on Electronics Packaging Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006
- [146] MING, H. T.; MING, T. K.; KHOR, L.: Tombstone Reduction by Reflow Profile Optimization, SMT Stencil Design and Pad Design. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 34th IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium. Melaka, 2010, S. 1–5
- [147] RYAN, C.; O'NEILL, S.; DONOVAN, J.; PUNCH, J.; RODGERS, B.; MURPHY, E.: Optimising lead-free screen-printing and reflow process parameters. In: Proceedings: 9th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004, S. 664–668
- [148] SVASTA, P.; SIMION-ZANESCU, D.; WILLI, C.: Thermal Conductivity Influence in SMT Reflow Soldering Process. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 52nd Electronic Components and Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE Order Dep, 2002, S. 1613–1616
- [149] TONAPI, S.; BORGESEN, P.; SRIHARI, K.: Effects of Flux and Reflow Parameters on Lead-Free Flip Chip Assembly. Proceedings: Electronics Assembly Process Exhibition Conference (APEX), San Diego, CA, 2001; AT5-2
- [150] WOHLRABE, H.; HERZOG, T.; WOLTER, K.-J.: Optimization of smt solder joint quality by variation of material and reflow parameters. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings: 2nd Electronics System-Integration Technology Conference. Greenwich, 2008, S. 1185–1192

- [151] IPC/JEDEC J-STD-020D.1. 2008. Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices. Association Connecting Electronics Industries (IPC)
- [152] FELDMANN, K.; STURM, J.: Yield improvement in SMT production by integrated process monitoring and testing. In: IEEE/CHMT (Hrsg.): Proceedings: 15th IEEE/CHMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. NY: Inst. of Electrical and Electronics Engineers, 1993, S. 229–234
- [153] FELDMANN, K.; STURM, J.: Closed loop quality control in printed circuit assembly. In: IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology 17 (1994), Nr. 2, S. 270–276
- [154] SCHINDLER, G.: On the Smart Move: Industry 4.0 in Electronics Production. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Rosemont, IL, 2015, S. 592–596
- [155] LOTFI, A.; HOWARTH, M.: An intelligent closed-loop control of solder paste stencil printing. In: IEEE/CPMT (Hrsg.): Proceedings: 23rd IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 1998, S. 87–91
- [156] DÖRING, I.: Erfolgreiche Implementierung von Closed-Loop - SPI und Pastendruker: Maschinen im Dialog. In: Elektronik Produktion & Prüftechnik (2013), S. 47–49
- [157] HAUGEN, P.; MOHANTY, R.: Automatic solder paste printer positional feedback control. In: Curran Associates, Inc. (Hrsg.): Proceedings: Surface Mount Technology Association International Conference. San Diego, CA, 2009
- [158] KAESTLE, C.; FLEISCHMANN, H.; SCHOLZ, M.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Cyber-Physical Electronics Production. In: JESCHKE, S.; BRECHER, C.; SONG, H.; RAWAT, D. B. (Hrsg.): Industrial internet of things: Cybermanufacturing systems. Cham: Springer, 2017 (Springer series in wireless technology), S. 47–78
- [159] ALEXANDER LINDEN: Key Trends and Emerging Technologies in Big Data Analytics. In: Gartner Inc. (Hrsg.): Gartner Business Intelligence & Analytics Summit, 2014
- [160] ALPAYDIN, E.: Introduction to machine learning. Third edition (Online-Ausg.). Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press, 2014 (Adaptive computation and machine learning)

- [161] WANG, H.; HE, T.; YOON, S. W.: Recurrent Neural Network-Based Stencil Cleaning Cycle Predictive Modeling. In: *Procedia Manufacturing* 17 (2018), S. 86–93
- [162] HO, W.; JI, P.; DEY, P. K.: Optimization of PCB component placements for the collect-and-place machines. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37 (2008), S. 828–836.
- [163] JABBAR, E.; BESSE, P.; LOUBES, J.-M.; ROA, N. B.; MERLE, C.; DETTAI, R.: Supervised Learning Approach for Surface-Mount Device Production. In: NICOSIA, G.; PARDALOS, P.; GIUFFRIDA, G.; UMETON, R.; SCIACCA, V. (Hrsg.): *Machine Learning, Optimization, and Data Science: LOD 2018*. Cham: Springer, 2019 (vol 11331), S. 254–263
- [164] MELLO, A. R. de; STEMMER, M. R.: Inspecting surface mounted devices using k nearest neighbor and Multilayer Perceptron. In: *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2015)*: Rio de Janeiro. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 950–955
- [165] CHANG, Y.-M.; CHEN, J.; HSIEH, P.: Prediction of Solder Joint Quality Using a Data Mining Methodology for Surface Mounted Technology Process. In: *Proceedings: 2017 International Conference on Big Data Research: The Association for Computing Machinery, 2017 (ICPS)*, S. 52–56
- [166] ZIEGENBEIN, A.; STANULA, P.; METTERNICH, J.; ABELE, E.: Machine Learning Algorithms in Machining: A Guideline for Efficient Algorithm Selection. In: SCHMITT, R.; SCHUH, G. (Hrsg.): *Advances in Production Research*. Cham: Springer International Publishing, 2019
- [167] LINß, G.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser Carl, 2018

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] FRANKE, J.; HÖRBER, J.; HÄRTER, S.: Processing and qualification of polymer based pastes in electronics production. In: SCHMIDT, M.; VOLLERTSEN, F.; GEIGER, M. (Hrsg.): Proceedings 6th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE): ELSEVIER Science Ltd., 2010, S. 727–733
- [P2] FRANKE, J.; SCHÜßLER, F.; PFEFFER, M.; HÄRTER, S.: Supporting Component Self-Alignment by Forced Oscillation During Reflow Soldering. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings Surface Mount Technology Association International Conference. Orlando, FL, 2010, S. 645–651
- [P3] OPPERT, T.; DOHLE, R.; FRANKE, J.; HÄRTER, S.: Wafer Level Solder Bumping and Flip Chip Assembly with solder balls down to 30µm. In: Proceedings 44th International Symposium on Microelectronics (IMAPS). Long Beach, CA, 2011, S. 953–960
- [P4] DOHLE, R.; HÄRTER, S.; GOßLER, J.; FRANKE, J.: Accelerated Life Tests of Flip-Chips with Solder Bumps Down to 30 µm Diameter. In: Proceedings 44th International Symposium on Microelectronics (IMAPS). Long Beach, CA, 2011, S. 985–996
- [P5] FRANKE, J.; DOHLE, R.; SCHÜßLER, F.; OPPERT, T.; FRIEDRICH, T.; HÄRTER, S.: Processing and Reliability Analysis of Flip-Chips with Solder Bumps Down to 30 µm Diameter. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC): IEEE, 2011, S. 893–900
- [P6] HÄRTER, S.; DOHLE, R.; REINHARDT, A.; GOßLER, J.; FRANKE, J.: Reliability Study of Lead-Free Flip-Chips with Solder Bumps Down to 30 µm Diameter. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 62nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC): IEEE, 2012, S. 583–589
- [P7] DOHLE, R.; HÄRTER, S.; WIRTH, A.; GOßLER, J.; GORYWODA, M.; REINHARDT, A.; FRANKE, J.: Electromigration Performance of Flip-Chips with Lead-Free Solder Bumps between 30 µm and 60 µm Diameter. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 45th International Symposium on Microelectronics (IMAPS): IEEE, 2012, S. 891–905
- [P8] GORYWODA, M.; DOHLE, R.; HÄRTER, S.; WIRTH, A.; GOßLER, J.; FRANKE, J.: Long-term Electromigration Study of Lead-Free Flip-Chips with Solder Bumps with 50 µm or 60 µm Diameter Employing ENIG Surface Finish on Both Chip and Substrate Side. In: IEEE

- (Hrsg.): Proceedings of the 46th International Symposium on Microelectronics (IMAPS): IEEE, 2013, S. 523–530
- [P9] HÄRTER, S.; LÄNTZSCH, C.; FRANKE, J.: Gesicherte Verarbeitung von hochminiaturisierten Bauelementen der Baugröße 01005 in der Elektronikproduktion. In: DVS/ GMM (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL, 2014, S. 84–91
- [P10] ESFANDYARI, A.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: A Lean Based Overview on Sustainability of Printed Circuit Board Life Cycle. In: CIRP (Hrsg.): Proceedings of the 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM), 2014, S. 305–310
- [P11] HÄRTER, S.; LÄNTZSCH, C.; FRANKE, J.: Fundamental study on a secure printing process using NanoWork stencils for 01005 components. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Rosemont, IL, 2014, S. 878–884
- [P12] RAUER, M.; VOLKERT, A.; SCHRECK, T.; HÄRTER, S.; KALOUDIS, M.: Computed-Tomography-Based Analysis of Voids in SnBi₅₇Ag₁ Solder Joints and Their Influence on Reliability. In: Journal of Failure Analysis and Prevention 14 (2014), Nr. 3, S. 272–281
- [P13] HÄRTER, S.; LÄNTZSCH, C.; FRANKE, J.: Evaluation of the Stencil Printing for Highly Miniaturized SMT Components with 03015mm in Size. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Rosemont, IL, 2015, S. 756–764
- [P14] HÄRTER, S.; LÄNTZSCH, C.; FRANKE, J.: Evaluation von Einflussfaktoren auf den Schablonendruckprozess für passive Bauelemente der Größe 03015mm. In: DVS/ GMM (Hrsg.): Elektronische Baugruppen und Leiterplatten - EBL, 2016, S. 105–113
- [P15] HÄRTER, S.; BEER, D.; FRANKE, J.: Untersuchung des Selbstzentrierreffektes mittels automatischer optischer Inspektion (AOI) zur gesicherten Verarbeitung von 01005-Bauelementen. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen 17 (2015), Nr. 3, S. 567–573
- [P16] HÄRTER, S.; NIEMANN, J.; FRANKE, J.; SCHAKE, J. D.; WHITMORE, M.: The Effect of Area Shape and Area Ratio on Solder Paste Printing Performance. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings Surface Mount Technology Association International Conference (SMTAI). Rosemont, IL, 2016

- [P17] HÄRTER, S.; KLINGER, T.; BEER, D.; FRANKE, J.: Comprehensive Correlation of Inline Inspection Data for the Evaluation of Defects in Heterogeneous Electronic Assemblies. In: SMTA (Hrsg.): Proceedings Pan Pacific Microelectronics Symposium. Kohala Coast, HI, 2016
- [P18] NIEMANN, J.; HÄRTER, S.; KÄSTLE, C.; FRANKE, J.: Challenges of the Miniaturization in the Electronics Production on the example of 01005 Components. In: SCHÜPPSTUHL, T.; FRANKE, J.; TRACHT, K. (Hrsg.): Tagungsband des 2. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Berlin: Springer Vieweg, 2017, S. 113–123
- [P19] KAESTLE, C.; FLEISCHMANN, H.; SCHOLZ, M.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Cyber-Physical Electronics Production. In: JESCHKE, S.; BRECHER, C.; SONG, H.; RAWAT, D. B. (Hrsg.): Industrial internet of things: Cyber-manufacturing systems. Cham: Springer, 2017 (Springer series in wireless technology). S. 47–78

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S₁] ANH LÊ, T.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Evaluation eines aktiven Rakelsystems im Schablonendruckprozess zur Herstellung miniaturisierter elektronischer Baugruppen. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit. 2015-11-30
- [S₂] BACHL, M.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Untersuchung von Einflussparametern auf den Bestückprozess von hochminiaturisierten Bauelementen in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit. 2013-11-30
- [S₃] HAIDERIE, H.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Einfluss der Lötprozessgestaltung auf die Ausbildung von Lötstellen bei hochminiaturisierten Komponenten. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit. 2014-01-07
- [S₄] HALLER, S.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Evaluation des Pastendruckprozesses in der Elektronikproduktion für hochminiaturisierte Bauelemente. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit. 2014-10-31
- [S₅] HERCHET, A.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Vergleichende Untersuchung der Elektromigration in Lötverbindungen hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Studienarbeit. 2012-05-01
- [S₆] KÄSTLE, L.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Statistische Untersuchungen zum Einschwimmverhalten von Bauelementen der Größe 01005 in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit. 2016-01-31
- [S₇] KLINGER, T.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Evaluation von Einflussfaktoren für einen zuverlässigen Lotpastenauftrag im Schablonendruck für

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

- hochminiaturisierte Bauelemente in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit. 2013-12-04
- [S8] KLINGER, T.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Ganzheitliche Betrachtung der Produktionsprozesse in der Elektronik zur prozessübergreifenden Bewertung von Qualitätsmerkmalen hochminiaturisierter Bauelemente. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit. 2015-03-31
- [S9] MADER, M.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Methodische Analysen und Zuverlässigkeitsuntersuchungen zur 3D-Integration von ICs mittels Stacked Die BGA. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Diplomarbeit. 2013-03-01
- [S10] NIEMANN, J.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Evaluation eines aktiven Rakelsystems im Schablonendruckprozess zur Optimierung des Lotpastenauftrags miniaturisierter Strukturen in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit. 2016-05-02
- [S11] STAMMBERGER, T.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Untersuchungen zu Prozessfenstern für passive Bauelemente der Größe 01005 in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit. 2016-03-29
- [S12] SUMMERER, C.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Evaluation von Prozessparametern im Schablonendruck für hochminiaturisierte Bauelemente in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit. 2013-12-30
- [S13] WÖLFEL, M.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Erfassung aktueller Trends und Untersuchungen zur Langzeitzuverlässigkeit hochminiaturisierter Bauformen in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit. 2015-03-31

Verzeichnis studentischer Arbeiten anderer Themenfelder*

- [S14] BACHFISCHER, J.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Potenziale und Konzepte zur Optimierung des Schablonendruckprozesses und Reduzierung der Zykluszeit in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit. 2014-03-27
- [S15] BACHFISCHER, J.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Technisch-wirtschaftliche Betrachtung alternativer Konzepte der automatischen optischen Inspektion von Leistungselektronik zur Steigerung der Produktivität unter Einhaltung der Prozessqualität und -sicherheit. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit. 2015-03-31
- [S16] EIXENBERGER, I.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Bewertung unterschiedlicher Spannrahmensysteme für den Einsatz im Schablonendruckprozess in der Elektronikproduktion. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit. 2016-03-31
- [S17] KUHN, T.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Analyse des Pastendruckprozesses sowie des Zusammenhangs zwischen Druckergebnis und Lötfehlern in der SMD Fertigung, Kurztitel „StoRe“. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Bachelorarbeit. 2013-11-01
- [S18] PRÖSL, F.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Industrie 4.0 - Eine qualitative Auswertung der Entwicklung bei Siemens Healthcare am Beispiel von HC CP CV PS. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Projektarbeit. 31.06.2015
- [S19] SEXTL, E.; CRAIOVAN, D.; HÄRTER, S.; FRANKE, J.: Technisch-wirtschaftliche Bewertung alternativer Konzepte für die optische 3D-Pasteninspektion zur Reduzierung der Fehlerrate im SMT-Fertigungsprozess und deren Grenzen. Erlangen, Friedrich-Alexander-

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik: Masterarbeit. 2014-03-10

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):
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
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

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 Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
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 Bruchverhal-
tens 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 Montage-
feinplanung
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 Biegeumforme 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-Laserstrahlbear-
beitung 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 Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten 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 Simula-
tionsverfahrens 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 Bearbei-
tungsabläufe 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-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der 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 Steuerungssoftware 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
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden 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 mechani-
scher 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
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen 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 spritzgegossener 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
Lebensdauervorhersage 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 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 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 Integra-
tion 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 Montage-
systemen 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 Elektronikpro-
duktion
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 Anschlußkontak-
ten 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 Ein-
satz 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 Negendanck
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 - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, 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 produktbezoge-
ner 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 Magnesiumlegie-
rungen 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 Produkt-
strukturen 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 Diodenlaserstrah-
lung 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-Ent-
wicklung 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 Kleinst-
teile 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 trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten 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 - Prozessana-
lyse 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 Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung 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 Prechtl
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 Laserdurchstrahlenschweißen 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 bleifreie 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 Mikrojustiertechnik 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 Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer 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 Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit 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 prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen 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 wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
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 Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
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 Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen 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 Rührreibschweißen 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 Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen 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 Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahl-tiefschweißen
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
Laserdurchstrahl-schweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen 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 Laserdurchstrahl-
schweißen 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 Innhochdruck-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 Laserstrahlintern 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 Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation 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 Kupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - 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 für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung 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 Entwick-
lung 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 presshärzbaren 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 Develop-
ment
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 Kühl
Flexible Automatisierung der Statorenmontage 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 Metaldampffackelposition
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 aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
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 Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten 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 beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung 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 Böning
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 disk-
ret 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 Bornschlegl
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 Unternehmenscontrol-
lings 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 Werkerinformations-
systeme 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 unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellan
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) / Experi-
mentelle 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 Magnesium-
legierung 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 Blechmassivumformpro-
zessen 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 art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidlinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
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 Zöllner
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 Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge 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 Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche 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
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
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 Kon-
text 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 laserdirekt-
strukturierter 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 Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer 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 Herstel-
lung 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 schräg-
verzahnten Zahnradern
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 Heißcrimpprozesses
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 Aluminiumblech-
bauteile 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 Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen 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 Bau-
elemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Abstract

The growing market of microelectronics is characterized by the integration of new interconnection technologies on electronic assemblies. Especially for applications of medical devices, automotive or industry, increased demands are placed on the process and system technology. Introduction of smaller components into existing production environments represents major challenges to the involved process steps in surface mount technology. In addition, the engineering of the electronic modules in their process design is already strongly affected by these influences.

As part of the research work, key trends in current developments have been taken up and their effects on the entire process chain analyzed. The results on the stencil printing process help to determine process windows for a secure application of the interconnection medium. With precise knowledge of the boundary conditions, even highly miniaturized components can be reliably processed with an automated placement and final soldering process in the SMT. In addition to the exact knowledge of the individual processes, a cross-process consideration is increasingly important for robust production processes of complex assemblies. A comprehensive assessment of the determining factors and the consistent optimization of the process parameters make it possible to implement the introduction of miniaturized components even for challenging applications.

Der stetig wachsende Markt der Mikroelektronik ist geprägt von der Integration neuer Bauelementtechnologien auf elektronischen Baugruppen. Diese stellen insbesondere für Anwendungen aus den Bereichen Medizintechnik, Automobil oder Industrie erhöhte Anforderungen an die verwendete Prozess- und Systemtechnik. Die Einführung miniaturisierter Bauteile in bestehende Fertigungsumgebungen führt dabei zu neuen Herausforderungen für die beteiligten Prozessschritte der Oberflächenmontageteknik (SMT). Zudem ist bereits die Auslegung der Elektronikbaugruppen bei deren Prozessgestaltung von diesen Einflüssen stark beeinflusst.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten sind wesentliche Trends aktueller Entwicklungen aufgegriffen und deren Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette analysiert worden. Die Ergebnisse zum Schablonendruckprozess tragen dazu bei, Prozessfenster für einen gesicherten Auftrag des Verbindungsmediums zu bestimmen. Mit genauer Kenntnis der Verarbeitungsbedingungen können auch hochminiaturisierte Bauformen mit einem automatisierten Bestückverfahren und abschließenden Lötprozess in der SMT prozesssicher verarbeitet werden. Neben der Beherrschung der Einzelprozesse ist für robuste Fertigungsprozesse komplexer Baugruppen eine prozessübergreifende Betrachtung zunehmend von hoher Bedeutung. Die umfassende Bewertung der Rahmenbedingungen und die konsequente Optimierung der Prozessparameter ermöglichen es, die Einführung miniaturisierter Bauelemente auch für anspruchsvolle Anwendungen zu realisieren.

ISBN 978-3-96147-314-4



9 783961 473144