

Michael Rösch

*Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses
in der Elektronikproduktion*

Michael Rösch

*Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonen-
druckprozesses in der Elektronikproduktion*

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung: 01. April 2011
Tag der Promotion: 13. Juli 2011
Dekan: Prof. Dr.-Ing. R. German
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. J. Franke
Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter, TU Dresden
Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1431-6226

ISBN 978-3-87525-319-1

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2011
Herstellung: inprint GmbH, Erlangen
Printed in Germany

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.

Mein herzlichster Dank gilt dem ehemaligen Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann und seinem Nachfolger Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, die mir beide die Möglichkeit zur Promotion gegeben haben. Der zum wissenschaftlichen Arbeiten notwendige Freiraum und das in mich gesetzte Vertrauen bei der Durchführung der Forschungsprojekte haben mich in meiner Promotionszeit am Lehrstuhl FAPS stark positiv geprägt.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Wolter, Direktor des Instituts für Aufbau und Verbindungstechnik der Elektronik (IAVT) an der Technischen Universität Dresden, für die Übernahme des Koreferates. Gedankt sei auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Weckenmann für die Übernahme des Vorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Teich als weiterem Mitglied des Prüfungskollegiums.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl FAPS möchte ich mich für die hervorragende Arbeitsatmosphäre bedanken, die ganz wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen hat. Besonders würdigen möchte ich dabei meine Kollegen aus der Gruppe Elektronikproduktion, Herrn Dr.-Ing. Florian Schüßler, Herrn Dipl.-Ing. Daniel Craiovan, Herrn Dipl.-Ing. Christian Goth, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Härter, Herrn Dipl.-Ing. Johannes Hörber, Herrn Dipl.-Ing. Martin Müller, Herrn Dipl.-Ing. Michael Pfeffer, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Reinhardt, Herrn Dipl.-Ing. Rene Schramm, Herrn Dipl.-Ing. Denis Kozic, Herrn Dipl.-Ing. Gerald Gion, Herrn Siegfried Maly und Herrn Leonhard Maußner, die mir im Laufe meiner Promotionszeit am Lehrstuhl FAPS auch zu Freunden geworden sind.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Frau Petra, die mich auf dem von mir gewählten Weg immer unterstützt hat. Durch ihre Bereitschaft auf den Verzicht gemeinsamer Freizeit sowie den von ihr gebotenen Rückhalt hat sie maßgeblichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit. Hierfür bin ich ihr sehr dankbar.

Röthenbach, im August 2011

Michael Rösch

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Einordnung des Schablonendruckprozesses in die Oberflächenmontagetechnik..... | 3 |
| 2.1 | Entwicklungstrends in der Aufbau- und Verbindungstechnik..... | 4 |
| 2.2 | Verfahrensablauf des Schablonendruckprozesses | 6 |
| 2.2.1 | Rollen der Lotpaste | 8 |
| 2.2.2 | Füllen der Aperturen..... | 9 |
| 2.2.3 | Auslösen der Lotpaste | 11 |
| 2.3 | Zusammensetzung von Lotpaste und druckrelevante Eigenschaften .. | 13 |
| 2.3.1 | Eigenschaften des Metallpulvers | 14 |
| 2.3.2 | Eigenschaften des Flussmittels | 15 |
| 2.3.3 | Eigenschaften der Lotpaste | 16 |
| 2.4 | Einflussgrößen auf den Schablonendruckprozess | 18 |
| 2.5 | Qualitätsmerkmale der bedruckten Leiterplatte | 22 |
| 2.6 | Typische Fehlerbilder und mögliche Ursachen..... | 24 |
| 2.7 | Analyse von Qualitätsdaten aus einer Serienfertigung..... | 26 |
| 2.8 | Ableitung des Forschungsbedarfs..... | 29 |
| 3 | Einsatz der 3D-Pastendruckinspektion zur Bewertung und Optimierung des Schablonendrucks | 30 |
| 3.1 | Verfügbare Systemlösungen zur 3D-Pastendruckinspektion | 31 |
| 3.1.1 | Gegenüberstellung und Bewertung alternativer Messverfahren..... | 31 |
| 3.1.2 | Leitfaden zur Auswahl einer geeigneten Systemlösung | 33 |
| 3.2 | Einsatz der 3D-Pastendruckinspektion im industriellen Umfeld | 35 |
| 3.2.1 | Prinzip der Messdatenerfassung und -auswertung..... | 35 |
| 3.2.2 | Nachweis der Prüf- und Messmittelfähigkeit..... | 38 |
| 3.2.3 | Qualifizierung des Schablonendruckprozesses vor dem Serienanlauf | 43 |
| 3.2.4 | Nutzung der 3D-Pastendruckinspektion als Prüfmittel..... | 43 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3 | Technologisch-wirtschaftliche Bewertung der 3D-Pastendruckinspektion | 44 |
| 4 | Eigenschaften und Potenziale innovativer Druckschablontentechnologien..... | 47 |
| 4.1 | Gegenüberstellung alternativer Schablontentechnologien | 49 |
| 4.1.1 | Bewertungskriterien für Druckschablonen | 50 |
| 4.1.2 | Technologisch-wirtschaftliche Bewertung verfügbarer Schablontentechnologien | 51 |
| 4.1.3 | Aktuelle Ansätze zur Optimierung der Schablontentechnologien | 55 |
| 4.2 | Stufenschablonen zur Erhöhung der Fertigungsflexibilität | 56 |
| 4.2.1 | Herstellungstechnologien für Stufenschablonen..... | 56 |
| 4.2.2 | Schwerpunkte der Untersuchungen | 62 |
| 4.2.3 | Auswertung der Druckversuche..... | 64 |
| 4.2.4 | Gestaltungsrichtlinien und Prozessempfehlungen für den Einsatz von Stufenschablonen | 73 |
| 4.3 | Nanobeschichtete Schablonen zur Optimierung des Druckprozesses | 75 |
| 4.3.1 | Sol-Gel-Verfahren zur Herstellung nanobeschichteter Druckschablonen..... | 77 |
| 4.3.2 | Charakterisierung der Beschichtungseigenschaften..... | 79 |
| 4.3.3 | Potenziale für den Schablonendruckprozess..... | 84 |
| 4.3.4 | Gestaltungsrichtlinien und Prozessempfehlungen für den Einsatz nanobeschichteter Druckschablonen | 94 |
| 4.3.5 | Zusammenfassende Bewertung nanobeschichteter Druckschablonen | 95 |
| 5 | Steigerung der Baugruppenzuverlässigkeit durch spezifische Optimierungen des Schablonendrucks | 97 |
| 5.1 | Identifizierung wesentlicher Einflussfaktoren und Quantifizierung deren Auswirkungen auf die Fertigungsqualität | 97 |
| 5.1.1 | Bewertung des Auslöseverhaltens alternativer Lotpasten | 98 |
| 5.1.2 | Einfluss leiterplattenspezifischer Eigenschaften auf das transferierte Lotpastenvolumen | 105 |
| 5.1.3 | Auswirkungen wesentlicher Maschinenparameter auf die Druckqualität..... | 108 |
| 5.1.4 | Einfluss der Prozessführung auf die Fertigungsqualität..... | 117 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.2 | Ganzheitlicher Ansatz zur Bestimmung von Designrichtlinien für Druckschablonen..... | 121 |
| 5.2.1 | Vorgehensweise zur Ermittlung der realen Auslösecharakteristik..... | 122 |
| 5.2.2 | Berücksichtigung herstellerepezifischer Fertigungstoleranzen bei der Schablonenauslegung..... | 125 |
| 5.2.3 | Bewertung des realen Auslöseverhaltens verschiedener Druckschablonentechnologien..... | 127 |
| 5.3 | Experimentelle Ermittlung bauelementspezifischer Prozessfenster für das aufzutragende Pastenvolumen im Druckprozess | 130 |
| 5.3.1 | Versuchsplanung | 132 |
| 5.3.2 | Quantifizierung der applizierten Lotpastenvolumen | 133 |
| 5.3.3 | Bewertung der Lötstellenqualität und -zuverlässigkeit..... | 135 |
| 5.3.4 | Definition bauelementspezifischer Prozessfenster für das aufzutragende Pastenvolumen | 143 |
| 6 | Konzept zur Beurteilung der Prozessfähigkeit des Schablonendrucks .. | 145 |
| 6.1 | Grundlegende Schritte einer Prozessfähigkeitsanalyse | 147 |
| 6.2 | Defizite verfügbarer Ansätze zur Prozessfähigkeitsbeurteilung | 148 |
| 6.3 | Konzept zur Prozessfähigkeitsbeurteilung des Schablonendruckprozesses | 149 |
| 6.3.1 | Definition der relevanten Qualitätsmerkmale und deren Toleranzgrenzen..... | 149 |
| 6.3.2 | Festlegung von Stichprobenentnahme und -häufigkeit..... | 150 |
| 6.3.3 | Identifikation der relevanten Verteilungszeitmodelle..... | 151 |
| 6.3.4 | Berechnung der Qualitätsfähigkeitskenngrößen | 158 |
| 6.4 | Validierung des entwickelten Konzeptes zur Prozessfähigkeitsbeurteilung | 159 |
| 7 | Zusammenfassung | 163 |
| 8 | Summary..... | 165 |
| 9 | Abkürzungsverzeichnis..... | 167 |
| 10 | Literatur | 168 |
| 11 | Anhang | 181 |

1 Einleitung

Die Innovationskraft vieler Schlüsselbranchen in Deutschland basiert vor allem auf dem Einsatz leistungsfähiger elektronischer Systeme. Dies hat einen stetig steigenden Wertschöpfungsanteil der Elektronik in nahezu allen Marktsegmenten zur Folge. Angetrieben durch die fortschreitende Miniaturisierung nimmt aber auch die Fertigungskomplexität bei der Herstellung elektronischer Baugruppen zu. Begleitet wird diese Entwicklung durch einen fortwährend steigenden Kostendruck sowie erhöhte Kundenanforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit, die im globalisierten Umfeld auf die Unternehmen wirken. In der Folge gewinnt die Beherrschung der einzelnen Fertigungsprozesse bei der Herstellung elektronischer Baugruppen und Systeme zunehmend an Bedeutung. Einen Kernprozess der Oberflächenmontagetechnik, der für einen Großteil aller Fertigungsfehler verantwortlich ist und somit enormes Optimierungspotenzial aufweist, stellt der Schablonendruck von Lotpaste dar. Die einzelnen Beiträge, die im Rahmen dieser Arbeit zur Beherrschung der Komplexität des Schablonendruckprozesses beitragen sollen, sind in Abbildung 1 visualisiert.

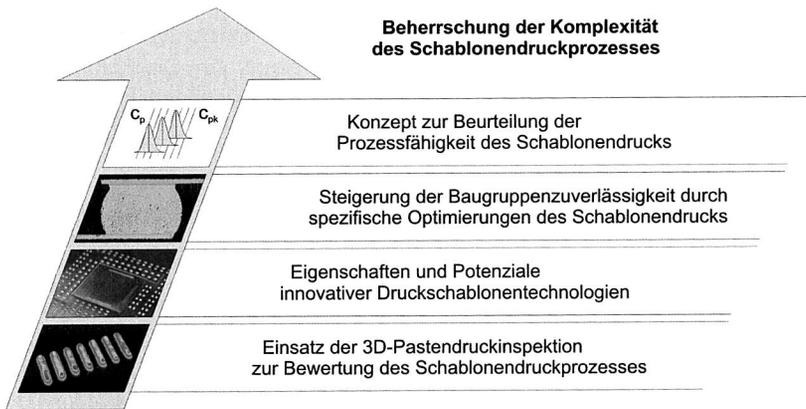


Abbildung 1: Beiträge dieser Arbeit zur Beherrschung der Komplexität des Schablonendruckprozesses

Zu Beginn der Arbeit erfolgt zunächst eine Einordnung des Schablonendruckprozesses in die Oberflächenmontagetechnik zur Herstellung elektronischer Baugruppen. Neben der Darstellung der aktuellen Entwicklungstrends in der Aufbau- und Verbindungstechnik und der Beschreibung des prinzipiellen Verfahrensablaufs werden in diesem Kapitel die Grundlagen vermittelt, die für das Verständnis der Forschungsarbeiten in den Folgekapiteln von Bedeutung sind. Dies beinhaltet die Zusammensetzung von Lotpaste und deren druckrelevante Eigenschaften ebenso wie Einflussgrößen auf den Schablonendruckprozess, Qualitätsmerkmale bedruckter Leiterplatten sowie typische Fehlerbil-

der des Druckprozesses und deren mögliche Fehlerursachen. Die durchgeführte Analyse von Qualitätsdaten aus einer Serienfertigung zeigt abschließend das enorme Optimierungspotenzial auf, welches sich für den Schablonendruckprozess ergibt.

Die Basis dieser Arbeit stellt die Verfügbarkeit eines geeigneten Inspektionssystems zur ganzheitlichen Bewertung bedruckter Leiterplatten dar. Während der Schablonendruckprozess bereits seit Mitte der 1980er Jahre in der industriellen Fertigung zum Einsatz kommt, existieren ausreichend schnelle und genaue Inspektionssysteme zur Vermessung und Überprüfung bedruckter Leiterplatten erst seit wenigen Jahren auf dem Markt. Vor diesem Hintergrund wird in Kapitel 3 der Einsatz von 3D-Pasteninspektionssystemen zur Bewertung und Optimierung des Schablonendrucks untersucht. Basierend auf der Gegenüberstellung verfügbarer Systemlösungen wird der Einsatz des ausgewählten Inspektionssystems im industriellen Umfeld beurteilt und im Rahmen einer abschließenden technologisch-wirtschaftlichen Analyse bewertet.

Der im Rahmen des Schablonendrucks eingesetzten Druckschablone kommt eine zentrale Rolle zu, so dass in Kapitel 4 der Einsatz innovativer Druckschablonentechnologien untersucht und bewertet wird. Basierend auf der Gegenüberstellung aktuell verfügbarer Schablonentechnologien zu Beginn werden sowohl Stufenschablonen als auch nanobeschichtete Druckschablonen hinsichtlich ihres Potenzials für den Druckprozess analysiert. Spezifische Gestaltungsrichtlinien und Prozessempfehlungen für den Einsatz geben abschließend dem Anwender Hilfestellung für den Einsatz dieser Schablonentechnologien in der Fertigung.

Die Steigerung der Baugruppenzuverlässigkeit durch spezifische Optimierungen des Schablonendrucks ist Gegenstand des Kapitels 5 dieser Arbeit. Im Rahmen der Identifizierung wesentlicher Einflussfaktoren und der Quantifizierung deren Auswirkungen wird zunächst untersucht, in welchem Maße sich lotpasten- und leiterplattenspezifische Eigenschaften sowie Maschinenparameter und Prozessführung auf das Druckergebnis auswirken. Des Weiteren wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Bestimmung von Designrichtlinien für Druckschablonen vorgestellt, der bei der Schablonenauslegung Fertigungstoleranzen der Herstellung berücksichtigt. Die experimentelle Ermittlung von bauelementspezifischen Prozessfenstern für das zu applizierende Pastenvolumen vervollständigt Kapitel 5.

Ein geeignetes Konzept zur Beurteilung der Prozessfähigkeit des Schablonendruckprozesses auf Basis geeigneter Fähigkeitsindizes ist Gegenstand von Kapitel 6. Das für den Schablonendruckprozess angepasste Konzept baut dabei auf den grundlegenden Schritten einer Prozessfähigkeitsanalyse auf und berücksichtigt in geeigneter Weise die Defizite, die aktuell verfügbare Ansätze aufweisen. Die Eignung des vorgestellten Konzeptes wird abschließend anhand von Qualitätsdaten aus einer realen Flachbaugruppenfertigung validiert.

2 Einordnung des Schablonendruckprozesses in die Oberflächenmontagetechnik

Mit dem Einzug der Oberflächenmontagetechnik (SMT – Surface Mount Technology) in die Elektronikproduktion zu Beginn der 1980er Jahre hat die Durchsteckmontagetechnik (THT – Through Hole Technology) für die Fertigung elektronischer Baugruppen zunehmend an Bedeutung verloren [154]. Bedingt durch die hervorragende Automatisierbarkeit der SMT-Fertigungsprozesse konnte durch diese Substitution einerseits eine wesentlich wirtschaftlichere Herstellung elektronischer Baugruppen erreicht werden. Andererseits hat diese Aufbautechnologie auch die Miniaturisierung auf Baugruppen-ebene stark vorangetrieben, so dass die Leistungsfähigkeit elektronischer Systeme stark zugenommen hat. Während sich die Durchsteckmontagetechnologie vor allem auf Bauelemente mit hohen Verlustleistungsdichten, hohen mechanischen Anforderungen an die Lötstelle oder einer hohen Eigenwärmerzeugung beschränkt, ist ein Großteil der elektronischen Bauelemente heutzutage für die Oberflächenmontagetechnik ausgelegt.

Die Oberflächenmontagetechnik setzt sich prinzipiell aus den Teilprozessen Schablonendruck, Bauelementbestückung und Reflowlöten zusammen (siehe Abbildung 2). Der Schablonendruckprozess stellt dabei ein etabliertes Verfahren zum Auftragen von Lotpaste auf eine Leiterplatte dar und wurde erstmals 1983 in einem Entwicklungslabor von IBM in Austin, USA, eingesetzt [133].

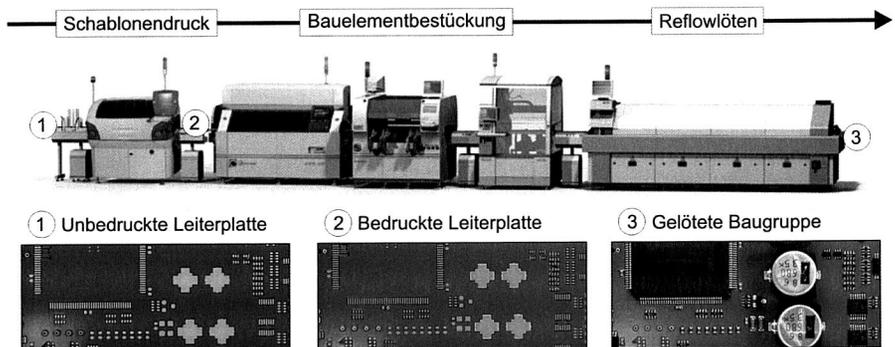


Abbildung 2: Fertigungslinie für die Oberflächenmontagetechnik

Unter Verwendung einer baugruppenspezifischen Druckschablone besteht die Zielsetzung des Druckprozesses in der zuverlässigen und reproduzierbaren Bereitstellung von Lotpaste auf jedem einzelnen Pad einer strukturierten Leiterplatte [2]. Im Gegensatz zu den alternativen Möglichkeiten des Pastenauftrags wie Dispensen oder Jetten, bei denen die Pastendepots sequentiell aufgetragen werden, erfolgt der Pastenauftrag im Schablonendruckprozess somit parallel [2] [121]. Nach dem Bestücken der elektroni-

schen Bauelemente in die dafür vorgesehenen Pastendepots erfolgt anschließend im Reflowprozess das Umschmelzen der Lotpaste, so dass sich zwischen der Leiterplatte und den Bauelementanschlüssen eine zuverlässige mechanische und elektrische Verbindung ausbildet.

Innerhalb der SMT kommt dem Schablonendruckprozess besondere Bedeutung zu, weil laut zahlreicher Studien und Veröffentlichungen ein Großteil der Fertigungsfehler diesem Prozessschritt zuzuordnen ist. Während nach [153] etwa 64 % der Fertigungsfehler dem Schablonendruckprozess entstammen, summieren sich die in [53] aufgeführten Fertigungsfehler mit Bezug zu dem Schablonendruckprozess auf etwa 60 %. In weiteren zahlreichen Veröffentlichungen ist von prozessbezogenen Fehlerraten für den Schablonendruck von 52 % bis 71 % die Rede [62] [134] [171]. Und auch durchgeführte Studien zur Analyse typischer Fehlerbilder in der SMT belegen, dass ein Großteil der Fertigungsfehler seine Ursache im Schablonendruck hat [130] [131] [132] [169].

Welches Optimierungspotenzial der Schablonendruckprozess in der SMT aber tatsächlich aufweist, verdeutlichen die zum Teil enorm hohen Prozessfehlerraten, die sich in der Industrie für diesen Prozessschritt identifizieren lassen. Während in [2] die Analyse typischer Fehlerbilder nach dem Reflowlöten zu einer moderaten leiterplattenbezogenen Prozessfehlerrate des Schablonendrucks von gerade einmal 0,025 % bzw. 250 dpm (defects per million) führt, berichten Elektronikfertiger mit einer linienintegrierten 3D-Pastendruckinspektion heutzutage von Ausschussquoten für den Druckprozess von 1 % bis 8 %. Diese doch erheblichen Prozessfehlerraten werden durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Qualitätsdatenanalysen gestützt.

Dass es in der Industrie zu stark unterschiedlichen Ausschussraten für den Druckprozess kommen kann, liegt darin begründet dass sowohl die Baugruppenkomplexität als auch die Anzahl der Pastendepots auf einer Leiterplatte die Ausschussrate direkt beeinflussen. Vor dem Hintergrund, dass als Ausschussursache bereits ein fehlerhaft bedrucktes Pastendepot auf einer Leiterplatte ausreicht, nimmt die Ausschussquote prinzipiell mit zunehmender Baugruppenkomplexität und Pastendepotanzahl zu [48]. Das enorme Optimierungspotenzial für die gesamte Fertigung resultiert aber nicht alleine aus der Reduzierung der Ausschussquote für den Druckprozess, sondern auch aus der Verringerung der Reparatur-, Nacharbeits- und Ausschusskosten nach dem Reflowlöten, da fehlerhaft bedruckte Leiterplatten nach dem Druckprozess keiner weiteren Wertschöpfung unterzogen werden [47] [136].

2.1 Entwicklungstrends in der Aufbau- und Verbindungstechnik

Das Produktionsvolumen für elektronische Baugruppen in Deutschland wird maßgeblich durch die Marktbereiche Industrie- und Medizintechnik sowie die Automobilindustrie bestimmt. Von den insgesamt 21,5 Milliarden Euro entfallen für das Jahr 2010 etwa 14

Milliarden Euro auf diese Sparten, wohingegen die Marktbereiche Telekommunikation, Datentechnik und Konsumelektronik in Deutschland eine eher untergeordnete Rolle spielen. Aus den Treibern der Elektronikindustrie resultieren auch die wesentlichen Anforderungen an die elektronischen Produkte. Neben der zunehmenden Miniaturisierung auf Baugruppenebene und dem Produkteinsatz unter rauen Umgebungsbedingungen stellen aus technologischer Sicht vor allem die Forderungen nach einer höheren Zuverlässigkeit und längeren Lebensdauern der elektronischen Produkte Herausforderungen dar [156]. Begleitet wird dies durch den extremen Kostendruck, der im globalisierten Umfeld auf die fertigenden Unternehmen wirkt. [47]

Diese technologischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen beeinflussen maßgeblich die Aufbau- und Verbindungstechnik für elektronische Baugruppen. Bedingt durch die zunehmende Miniaturisierung auf Baugruppenebene kommen Bauelemente mit stark reduzierten Abmessungen (z. B. Chipwiderstände der Baugröße 01005), hochintegrierte Bauelemente (z. B. CSP – Chip Scale Package oder FC – Flip Chip) und Bauelemente mit neuartigen Gehäuseformen für eine bessere Entwärmung (z. B. QFN – Quad Flat No Lead) zum Einsatz [16] [46] [88] [89] [109] [157] [170]. Dies hat steigende Anforderungen an den Druckprozess zur Folge, da zur Herstellung mischbestückter Baugruppen mit einem großen Bauelementspektrum stark unterschiedliche Pastenvolumen auf der Leiterplatte im Druckprozess aufzutragen sind [75] [79] [104] [105]. Aber auch die Weiterentwicklung der Lotpasten hin zu feineren Pulverpartikelabmessungen, temperaturbeständigeren Legierungszusammensetzungen oder druckoptimierten Pastenrheologien beeinflusst den Druckprozess erheblich [67].

Die aufgezeigten Entwicklungen führen für den Druckprozess zu einer Komplexitätszunahme und in der Folge zu signifikant höheren Prozessfehlerraten des aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen und Wechselwirkungen ohnehin schwer zu beherrschenden Schablonendrucks. Vor diesem Hintergrund findet auch in zunehmendem Maße ein Philosophiewandel in der prozessbegleitenden Qualitätssicherung statt. Während sich die prozessbegleitende Qualitätssicherung in der Vergangenheit in der Regel auf eine automatische optische Inspektion nach dem Reflowlöten und vereinzelt auf eine selektive 2D-Inspektion des Druckprozesses beschränkt hat, hält vermehrt auch eine Prozessprüfung der zuvor stattfindenden Fertigungsschritte Schablonendruck und Bestücken Einzug in die Fertigung. Der Trend in der Baugruppenfertigung geht damit in eine Richtung, die in [77] auf provokative Weise noch als Idealvorstellung für die Hersteller von Inspektionssystemen skizziert wurde. Dabei folgt jedem Fertigungsschritt in der Prozesskette eine automatische optische Inspektion zur Überprüfung des Prozessergebnisses. Die Prüfung des Schablonendruckprozesses in der Fertigungslinie erfolgt heutzutage mit Hilfe geeigneter 3D-Pasteninspektionssysteme, deren Entwicklung in den vergangenen Jahren eine logische Konsequenz des ungenutzten Optimierungspotenzials im Schablonendruck darstellte.

2.2 Verfahrensablauf des Schablonendruckprozesses

Prinzipiell lässt sich der Schablonendruckprozess hinsichtlich seines Ablaufs in elf Teilprozesse untergliedern, die schematisch in Abbildung 3 visualisiert sind. Aufgrund der Tatsache, dass den einzelnen Teilprozessen eine stark unterschiedliche Bedeutung für den Druckprozess zukommt, wird zunächst der Verfahrensablauf allgemein beschrieben, um einen Überblick über diesen komplexen Fertigungsprozess zu geben. Im Anschluss daran werden wichtige Teilprozesse ausführlich und detailliert erläutert.

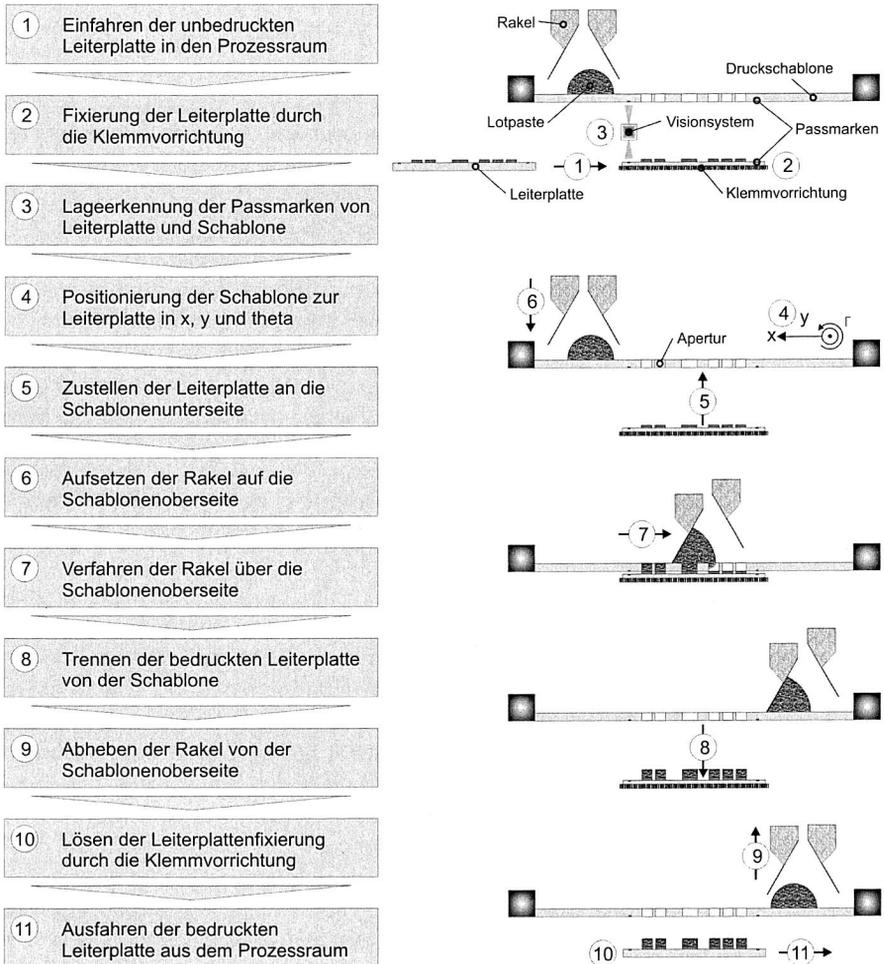


Abbildung 3: Teilprozesse des Schablonendrucks

Nach dem Einfahren der unbedruckten Leiterplatte in den Prozessraum wird diese zunächst durch die Klemmvorrichtung des Druckers fixiert. Im nächsten Teilprozess erfolgt die Lageerkennung der Passmarken auf der Leiterplattenoberseite und der Schablonenunterseite durch das integrierte Visionsystem. Auf Basis der Lageinformationen der Passmarken im Maschinenkoordinatensystem werden die Schablone und die Leiterplatte in x-Richtung (x), y-Richtung (y) und Drehlage (theta) zueinander ausgerichtet. Anschließend wird die Leiterplatte an die Schablonenunterseite zugestellt und die Rakel auf die Schablone abgesenkt. Durch das Verfahren der Rakel auf der Schablonenoberfläche wird die Lotpaste in eine Rollbewegung versetzt, wodurch das Befüllen der Aperturen mit Lotpaste ermöglicht wird. Nach dem Erreichen der Rakelendposition wird die bedruckte Leiterplatte von der Schablone getrennt und die Rakel von der Schablonenoberseite abgehoben. Dem Lösen der Leiterplattenfixierung schließt sich das Ausfahren der bedruckten Leiterplatte an. Neben diesen Teilprozessen existieren weitere Prozessschritte, die optionalen Charakter haben und bei Bedarf ausgeführt werden. Einerseits trifft dies auf die maschinenintegrierte, automatisierte Reinigung der Schablonenunterseite zu. Diese ist in zyklischen Intervallen notwendig, um Pastenrückstände auf der Schablonenunterseite und in den Aperturen zu entfernen. Andererseits ist aufgrund der stetigen Abnahme an Lotpaste im Schablonendrucker von Zeit zu Zeit Lotpaste nachzulegen, was in der Regel manuell geschieht.

Im Hinblick auf die Prozessqualität kommt einzelnen Teilprozessen des Schablonendrucks eine bedeutende Stellung zu. Ein wesentliches Qualitätsmerkmal einer bedruckten Leiterplatte stellt der Versatz dar, mit dem das Druckbild auf der Leiterplatte appliziert wird. Maßgeblich hierfür ist die Positioniergenauigkeit des Schablonendruckers, die aus der Genauigkeit der Lageerkennung der Passmarken, der Schablonenpositionierung und der Leiterplattenzustellung resultiert. Weitere wichtige Qualitätsmerkmale wie beispielsweise die Transfereffizienz oder der Flächenbedruckungsgrad von einzelnen Pastendepots werden maßgeblich durch das Verfahren der Rakel auf der Schablonenoberseite sowie das Trennen der bedruckten Leiterplatte von der Schablone beeinflusst. Aufgrund der enormen Bedeutung für den Druckprozess werden im Speziellen diese beiden Teilprozesse im Folgenden detailliert erläutert.

Während die vorgestellten elf Teilprozesse des Schablonendruckprozesses den chronologischen Verfahrensablauf ausreichend genau darstellen, ist für ein detailliertes technologisches Verständnis der ablaufenden Vorgänge im Schablonendruck eine tiefer gehende Betrachtung notwendig. Prinzipiell lässt sich das Verfahren der Rakel auf der Schablonenoberfläche in die technologischen Subprozesse „Rollen der Lotpaste“ und „Füllen der Aperturen“ einteilen. Der anschließende technologische Subprozess „Auslösen der Lotpaste“ ist folglich mit dem Trennen der Leiterplatte von der Schablone gleichzusetzen. [4] [44] [45] [133]

2.2.1 Rollen der Lotpaste

Durch das Verfahren der Rakel auf der Schablone bei einem gleichzeitigen Wirken einer Rakelkraft senkrecht zur Schablonenoberfläche baut sich im Lotpastenreservoir ein hydrodynamischer Druck mit einer charakteristischen Druckverteilung auf. Während der hydrodynamische Druck nahe des Berührungspunktes zwischen Rakel und Schablone in der Lotpaste am größten ist, nimmt dieser mit zunehmender Entfernung vom Berührungspunkt ab. Auf Basis der in [22] durchgeführten mathematischen Modellbildung ergibt sich ein charakteristischer Druckverlauf über der Schablonenoberfläche, der in Abbildung 4 schematisch dargestellt ist. Des Weiteren sind in Abbildung 4 alle wesentlichen Einflussgrößen auf die Ausbildung der charakteristischen Druckverteilung in der Lotpaste illustriert. Aus der Abnahme des hydrodynamischen Druckes in der Lotpaste mit zunehmender Entfernung vom Rakelaufsetzpunkt resultieren eine Abnahme der Scherrate sowie eine Zunahme der Lotpastenviskosität [37]. Bedingt durch das Verfahren der Rakel mit einer definierten Geschwindigkeit, dem sich einstellenden hydrodynamischen Druck in der Lotpaste sowie der Reibung zwischen Lotpaste und Schablonenoberfläche stellt sich eine Rollbewegung der Lotpaste ein [44] [98]. Das Modell der rollenden Lotpaste, alle wesentlichen Einflussgrößen auf den Rollprozess sowie die schematische Darstellung der Druck-, Scherraten- und Viskositätsverteilung über der Schablonenoberfläche ist in Abbildung 4 dargestellt.

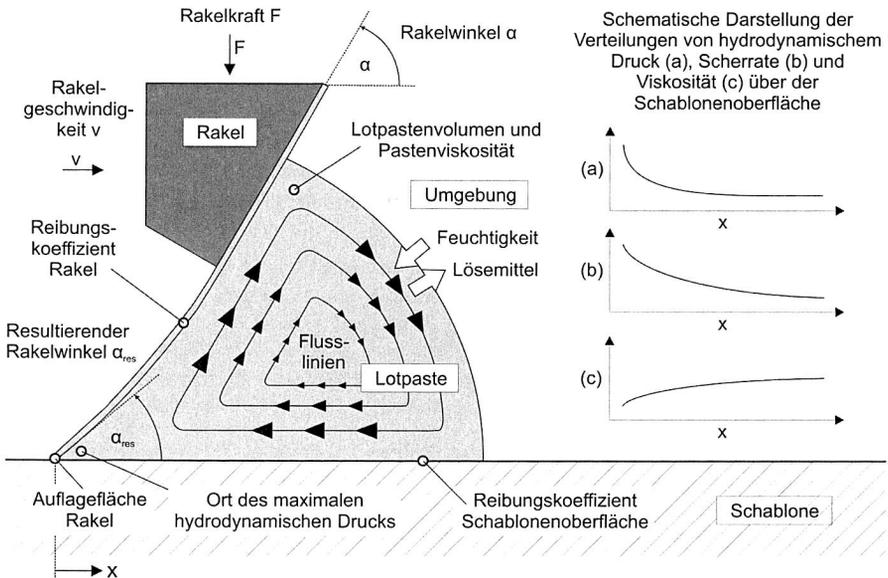


Abbildung 4: Modell der rollenden Lotpaste sowie alle wesentlichen Einflussgrößen nach [22] [37] [44] [45] [51] [98]

Das komplexe Zusammenwirken der einzelnen Einflussgrößen auf den Rollprozess bestimmt maßgeblich die hydrodynamische Druckverteilung in der Lotpaste und konsequenterweise die resultierenden Scherraten- und Viskositätsverteilungen über der Schablonenoberfläche [37]. Als Folge davon stellt sich in der Lotpaste ein laminares Strömungsprofil ein [98]. Im Hinblick auf ein zuverlässiges Füllen der Aperturen im anschließenden Subprozess kommt den rheologischen Verhältnissen in der Lotpaste zentrale Bedeutung zu. Den Bestrebungen, die rheologischen Verhältnisse in der Lotpaste möglichst konstant zu halten, stehen jedoch die fortwährend stattfindenden Wechselwirkungen zwischen der Lotpaste und der Umgebung entgegen. Diesbezüglich ist vor allem das Verflüchtigen von Lösemittel aus der Lotpaste sowie die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Luft anzuführen [45]. Des Weiteren wird die Pastenrheologie auch durch die entstehende Reibungswärme beeinflusst, die im Bereich des maximalen hydrodynamischen Drucks zwischen Rakel, Schablone und Lotpaste entsteht [45] [98].

2.2.2 Füllen der Aperturen

Das Füllen der Schablonenaperturen erfolgt prinzipiell in einem dreistufigen Prozess, der in Abbildung 5 visualisiert ist. Verursacht durch die Rollbewegung der Lotpaste werden die Schablonenaperturen zunächst zu einem großen Teil bereits etwa 1 cm vor dem eigentlichen Rakelaufsetzpunkt gefüllt [45]. Der Vorgang des Füllens wird dabei im Wesentlichen durch das Abgleiten und Abrollen der einzelnen Pastenkörner an der Aperturwand geprägt [45]. Beeinflusst wird das Einlaufen der Lotpaste in die Apertur prinzipiell durch das Strömungsprofil der Lotpaste über der Apertur, die Aperturabmessungen, die Reibungsverhältnisse an den Aperturwänden sowie die zum Füllen zur Verfügung stehende Zeit [38] [44].

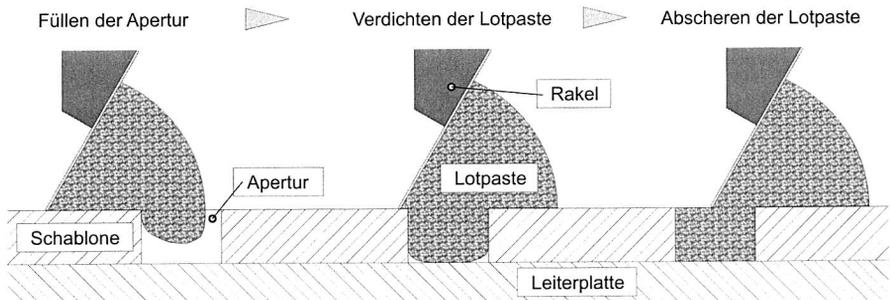


Abbildung 5: Vorgänge beim Füllen der Aperturen [44] [45]

Durch die Annäherung des Rakels kommt es zu einer Zunahme des hydrodynamischen Drucks in der Lotpaste direkt über der Schablonenapertur. Dies fördert den Transfer von Lotpaste in die Apertur, so dass zunächst die Apertur vollständig gefüllt werden kann und anschließend die Lotpaste in der Apertur verdichtet wird [22]. Bedingt durch

das Überfahren des Rakels kommt es abschließend zu einem Abscheren der Lotpaste über der Schablonenapertur.

Die Zielsetzung dieses technologischen Subprozesses liegt in der vollständigen Füllung der Apertur mit Lotpaste. Dieses Szenario, dargestellt in Abbildung 6, stellt den Idealfall des Füllprozesses dar. Beeinflusst durch eine Vielzahl wirkender Einflussgrößen wie beispielsweise der Pastenrheologie, der Prozessparameter oder auch schablonenspezifischer Eigenschaften kommt es jedoch zu Abweichungen vom Idealzustand. In Abbildung 6 sind alternative Füllszenarien dargestellt, die für das Füllen von Schablonenaperturen in der Regel von Relevanz sind.

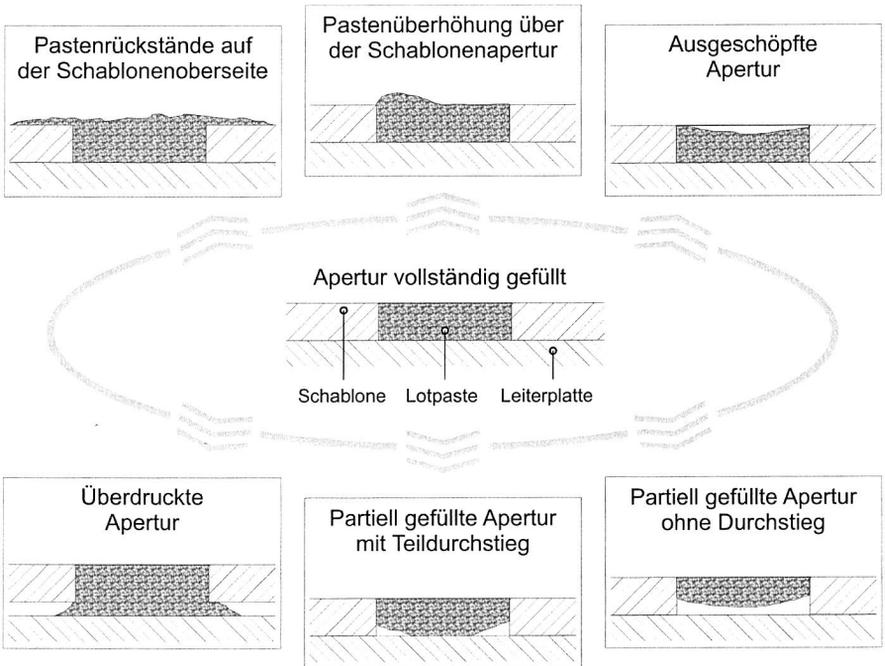


Abbildung 6: Alternative Szenarien für das Füllen der Schablonenaperturen bei Abweichungen vom Idealzustand

Pastenrückstände auf der Schablonenoberseite stellen die Folge eines unzureichenden Abzugsverhaltens des Rakels dar. Dieses wird im Allgemeinen von zu geringen Rakelkräften oder zu hohen Rakelgeschwindigkeiten begünstigt. Während in der planaren Schablonentechnologie Pastenrückstände auf der Schablonenoberseite prinzipiell durch eine geeignete Wahl der Prozessparameter vermieden werden können, sind diese beim Einsatz sogenannter Stufenschablonen oftmals unausweichlich. Die partielle Überhö-

hung eines Pastendepots über der Apertur stellt die Folge eines zu hohen hydrodynamischen Drucks während des Füllvorgangs dar, so dass beim Abscheren der Lotpaste über der Schablonenapertur die Lotpaste hinter der Rakel aus der Apertur aufsteigt. Prinzipiell besteht aber auch die Möglichkeit, dass sich beim Abschervorgang Anhaftungen von Lotpaste an der Rakelrückseite lösen und auf der Apertur zurück bleiben. Das Ausschöpfen von Lotpastendepots stellt einen weiteren Effekt dar, der zu Abweichungen im Füllvorgang führt. Ursächlich hierfür ist das Eintauchen des Rakels in die Aperturöffnung beim Abscheren der Lotpaste [44] [45] [99] [100]. Begünstigt wird das Eintauchen durch flexible Rakelmaterialien wie beispielsweise Kunststoff oder großflächige Aperturöffnungen. Im Falle eines unzureichenden Füllvorgangs kann es dazu kommen, dass nur ein Teil der Lotpaste oder aber auch gar keine Lotpaste bis zur Leiterplatte durchsteigt. Beim Füllen der Aperturen ist des Weiteren von Bedeutung, dass die Schablone sauber auf der Leiterplatte aufliegt und die Schablonenapertur zuverlässig abgedeckt ist. Dem gegenüber stehen Verschmutzungen auf der Schablonenunterseite durch Pastenrückstände oder überhöhte Lötstoppschichten auf der Leiterplatte.

2.2.3 Auslösen der Lotpaste

Bedingt durch das Trennen von Leiterplatte und Druckschablone wird die in der Schablonenapertur befindliche Lotpaste mit einer Zugkraft beaufschlagt. Diese wirkt über die Kontaktfläche der Lotpaste zur Leiterplatte und hängt im Wesentlichen von der Trenngeschwindigkeit zwischen Leiterplatte und Schablone, der Größe der Kontaktfläche sowie den Adhäsionskräften zwischen Lotpaste und Leiterplatte ab [44] [45]. Neben der wirkenden Zugkraft begünstigt prinzipiell auch die Schwerkraft ein Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur.

Im Gegensatz dazu hindern die Adhäsionskräfte, die sich zwischen der Schablonenwandung und der Lotpaste einstellen, das Auslösen der Lotpaste, da sie die Reibungswiderstände zwischen Lotpaste und Schablonenwandung beim Abgleiten der Pastenkörner wesentlich beeinflussen. Des Weiteren werden die entstehenden Reibungswiderstände beim Trennvorgang auch durch die Größe der Wandungsfläche sowie die Beschaffenheit der Schablonenwandung bestimmt [44] [45]. Die hohe Komplexität, die sich prinzipiell für den Vorgang des Auslösens ergibt, begründet sich aber nicht alleine auf dem Wirken dieser Einflussgrößen. Von zentraler Bedeutung sind vor allem die rheologischen Eigenschaften der Lotpaste [38]. Im Hinblick auf einen zuverlässigen Auslösevorgang müssen die kohäsiven Kräfte innerhalb der Lotpaste mindestens so hoch sein, dass das Pastenvolumen an der Stelle der maximalen Stressbelastung nicht einreißt [44]. In Abbildung 7 sind neben dem Modell der auslösenden Lotpaste wesentliche Einflussgrößen auf diesen technologischen Subprozess dargestellt.

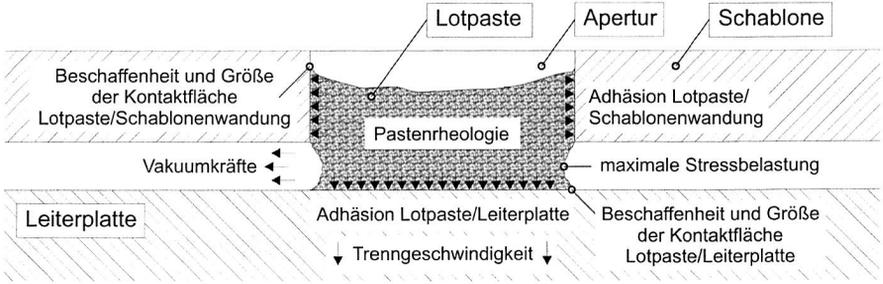


Abbildung 7: Modell der auslösenden Lotpaste sowie wesentliche Einflussgrößen auf den Auslösevorgang [38] [44] [45]

Die Zielsetzung des Auslösens der Lotpaste ist es, die in der Schablonenapertur befindliche Lotpaste vollständig und konturgetreu auf die Leiterplatte zu transferieren. Neben dem übertragenen Pastenvolumen kommt somit auch der Depotform eine essentielle Bedeutung bei der Beurteilung der Qualitätsleistung des Druckprozesses zu. Im Idealfall erfolgt somit ein vollständiges und konturgetreues Auslösen der Lotpaste aus der Apertur, wie dies in Abbildung 8 dargestellt ist. In der Realität weicht der Vorgang des Auslösens jedoch teilweise erheblich vom Idealfall ab. Alternative Auslöseszenarien, die für den Trennvorgang zwischen Leiterplatte und Druckschablone in der Regel von Relevanz sind, sind ebenfalls in Abbildung 8 visualisiert.

Aufgrund der adhäsiven Kräfte zwischen Schablonenwandung und Lotpaste verbleiben nach dem Trennvorgang prinzipiell Pastenrückstände innerhalb der Apertur, so dass nur ein Teil des Lotpastenvolumens auf die Leiterplatte transferiert werden kann. Mit zunehmend schlechteren Auslösebedingungen steigt der Anteil des in der Apertur verbleibenden Pastenvolumens [3]. Dies kann mitunter dazu führen, dass es nur zu einem partiellen Auslösen der Lotpaste kommt. Im Falle einer unvollständigen Aperturfüllung, bei der kein Durchstieg der Lotpaste erzielt werden konnte, findet indes überhaupt kein Pastentransfer statt. Ein Effekt, der in den bisherigen wissenschaftlichen Betrachtungen des Schablonendruckprozesses fast vollständig unberücksichtigt geblieben ist, stellt das Anhaften von Pastenrückständen auf der Schablonenunterseite dar. Diese treten immer dann auf, wenn einzelne Pastenkörner während des Trennvorgangs aufgrund der Adhäsionskraft um die Aperturkante umgelenkt werden und anschließend auf der Schablonenunterseite zurück bleiben [3]. In der Folge kommt somit die Druckschablone nicht mehr zum planaren Aufliegen auf der Leiterplatte, so dass das Pastendepot überdrückt wird. Eine Überdrückung des Pastendepots findet prinzipiell auch immer dann statt, wenn keine ausreichende Abdichtung zwischen der Apertur und der Leiterplatte erzielt werden kann. Eine weitere Möglichkeit stellt das Ausziehen von Pastendepots an den Depotenden dar. Ursächlich hierfür sind ebenfalls die Adhäsionskräfte, die sich zwischen der Aperturwand und der Lotpaste ausbilden.

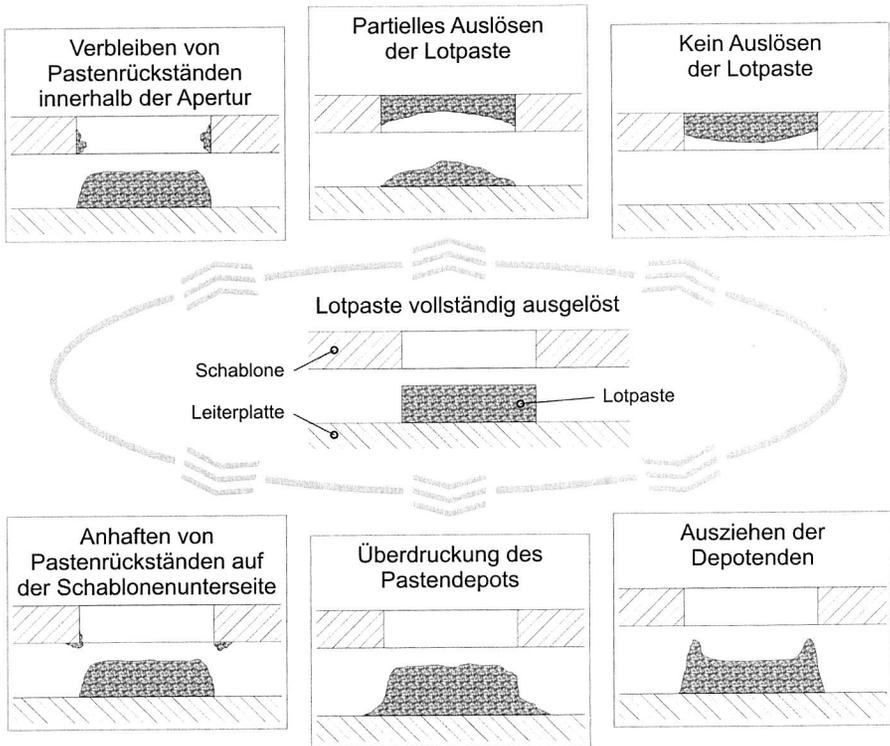


Abbildung 8: Alternative Szenarien für das Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur bei Abweichungen vom Idealzustand

2.3 Zusammensetzung von Lotpaste und druckrelevante Eigenschaften

Bei einer Lotpaste handelt es sich um eine heterogene Mischung aus einem Metallpulver und einem Flussmittel. Da das Metallpulver als Feststoff in der flüssigen Phase des Flussmittels unlöslich ist, wird diese Mischung auch als Suspension bezeichnet [78]. Die Anforderungen an eine Lotpaste ergeben sich aus den einzelnen Stadien des Produktlebenszyklus und reichen von der Herstellung und Lagerung über die Verarbeitung in den einzelnen Fertigungs- und Inspektionsprozessen der Oberflächenmontagetechnik bis hin zu dem Feldeinsatz und der abschließenden Entsorgung beziehungsweise dem Recycling. Die druckrelevanten Eigenschaften einer Lotpaste werden von den einzelnen Bestandteilen Metallpulver und Flussmittel sowie dem Mischungsverhältnis zueinander bestimmt. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden zunächst die wesentlichen Ei-

enschaften der einzelnen Bestandteile und anschließend die aus der Mischung resultierenden Eigenschaften der Lotpaste erläutert.

2.3.1 Eigenschaften des Metallpulvers

Die Eigenschaften eines Metallpulvers lassen sich im Wesentlichen anhand der Legierungszusammensetzung, der Partikelgröße, der Partikelgrößenverteilung sowie der Form der Pulverpartikel charakterisieren [2] [69] [114] [115]. Während die Legierungszusammensetzung vor allem für den Lötprozess von enormer Bedeutung ist, spielt diese für den Druckprozess eine eher untergeordnete Rolle. Dass dennoch einige wissenschaftliche Untersuchungen zu der Erkenntnis kommen, dass es druckspezifische Unterschiede zwischen bleihaltigen und bleifreien Lotpasten gibt, dürfte maßgeblich damit zusammenhängen, dass vor allem die den Druckprozess beeinflussenden Flussmittelbestandteile unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Eine Möglichkeit zur Klassifizierung von Weichlotpasten stellt die Zuordnung der verwendeten Metallpulver zu unterschiedlichen Lotpastentypen nach [114] und [115] dar. Als Klassifizierungsmerkmal wird dabei die Pulverpartikelgröße herangezogen. So ergibt sich beispielsweise für den Lotpastentyp 3, dass mindestens 80 Gewichtsprozent des Metallpulvers einen Partikeldurchmesser zwischen 25 µm und 45 µm aufweisen müssen. Des Weiteren ist vorgeschrieben, dass weniger als 10 Gewichtsprozent einen kleineren Partikeldurchmesser als 20 µm und weniger als 1 Gewichtsprozent einen größeren Partikeldurchmesser als 45 µm haben dürfen. Zudem darf kein Partikel des Lotpastentyps 3 einen Partikeldurchmesser aufweisen, der größer als 50 µm ist. In Tabelle 1 sind die Anforderungen an die einzelnen Lotpastentypen dargestellt.

| Lotpastentyp | weniger als 10 Gewichts-% kleiner als | mindestens 80 ⁽¹⁾ bzw. 90 ⁽²⁾ Gewichts-% zwischen | weniger als 1 Gewichts-% größer als | kein Partikel größer als |
|--------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|----------------------------|
| 1 | 20 µm | 75 - 150 µm ⁽¹⁾ | 150 µm | 160 µm |
| 2 | 20 µm | 45 - 75 µm ⁽¹⁾ | 75 µm | 80 µm |
| 3 | 20 µm | 25 - 45 µm ⁽¹⁾ | 45 µm | 50 µm |
| 4 | 20 µm | 20 - 38 µm ⁽²⁾ | 38 µm | 40 µm |
| 5 | 15 µm | 15 - 25 µm ⁽²⁾ | 25 µm | 30 µm [114] 28 µm [115] |
| 6 | 5 µm | 5 - 15 µm ⁽²⁾ | 15 µm | 20 µm [114] 18 µm [115] |
| 7 | | 2 - 11 µm | | |
| 8 | | 2 - 8 µm | | |

Tabelle 1: Klassifizierung von Lotpasten hinsichtlich der verwendeten Metallpulvergrößen [114] [115]

Während die Lotpastentypen 1 und 2 aufgrund der fortschreitenden Miniaturisierung auf Baugruppenebene zunehmend an Bedeutung verloren haben, werden heutzutage vor allem die Lotpastentypen 3 und 4 zur Herstellung elektronischer Flachbaugruppen eingesetzt. Steigt der Miniaturisierungsgrad auf Baugruppenebene weiter, beispielsweise durch die Integration von Bauelementen der Größenordnung 01005 oder CSP, so kommt in der Regel Lotpastentyp 5 zum Einsatz. Der Lotpastentyp 6 sowie die aktuell in der Entwicklung befindlichen Lotpastentypen 7 und 8 werden hingegen zum Beballen von Wafern verwendet [93] [156]. Während kleinere Partikeldurchmesser für den Schablonendruckprozess zwar grundsätzlich von Vorteil sind, weil kleinere Aperturen besser gefüllt und ausgelöst werden können, stellen diese jedoch erhöhte Anforderungen an den anschließenden Reflowprozess.

Neben der Pulverpartikelgröße stellt die Partikelgrößenverteilung eine wichtige Eigenschaft des Metallpulvers dar, die den Pastenauftrag im Schablonendruckprozess erheblich beeinflussen kann [98]. Im Gegensatz zu der Pulverpartikelgröße ist die Partikelgrößenverteilung jedoch eine Eigenschaft des Metallpulvers, die in der Regel nicht als Klassifizierungsmerkmal einer Lotpaste herangezogen werden kann. Aber auch die Pulverpartikelform, die das Ergebnis des Pulverherstellungsverfahrens darstellt, beeinflusst den Schablonendruckprozess. Idealerweise handelt es sich um sphärische Pulverpartikelformen. Abweichungen im Herstellungsprozess hingegen vermindern die Pulverqualität, so dass auch ellipsoidale, tropfenförmige, nadelförmige, hundeknochenartige Partikel oder Partikel mit vergrößerter Oberfläche vorkommen. Des Weiteren kann es auch zum Anhaften von Partikeln aneinander und folglich zur sogenannten Satellitenbildung kommen. Eine Übersicht prinzipiell möglicher Pulverpartikelformen ist in [69] dargestellt.

2.3.2 Eigenschaften des Flussmittels

Die organische und zugleich anorganische Natur eines Flussmittelsystems resultiert aus dessen wesentlichen Bestandteilen. Neben Harzen und Aktivatoren beinhalten Flussmittel auch thixotrope Additive und Lösemittel, um die Vielzahl der an eine Lotpaste gestellten Anforderungen erfüllen zu können [33] [78] [98] [116] [159]. Um das gewünschte Eigenschaftsprofil einer Lotpaste zu erreichen, setzen Lotpastenhersteller heutzutage bis zu zwölf unterschiedliche Komponenten in einem Flussmittelsystem ein [65].

Während die in einer Lotpaste zum Einsatz kommenden Aktivatoren im Wesentlichen die Lötbarkeit einer Lotpaste und weniger die Druckeignung beeinflussen, wirken sich die verwendeten Harze, Thixotropiermittel und Lösemittel stark auf die Druckeigenschaften einer Lotpaste aus. Die Funktionalität der Harze liegt dabei einerseits in der Bereitstellung einer ausreichenden Konturenstabilität, so dass benachbarte Pastendepots nach dem Drucken nicht zusammenlaufen. Andererseits wird durch die Harzauswahl auch die Nassklebekraft beeinflusst, die eine ausreichende Fixierung der Bauele-

mente während des Bestückprozesses sicherstellen muss. Die Hauptaufgabe der thixotropen Additive liegt hingegen in der Viskositätsreduzierung während der im Druckprozess beaufschlagten Scherspannung sowie in dem umgehenden Viskositätsanstieg nach der Beendigung der Scherspannung. Die Viskositätsanpassung der Lotpaste während des Druckprozesses ist von enormer Bedeutung, da eine zuverlässige Aperturfüllung zunächst eine niedrige Pastenviskosität, das anschließende Auslösen der Lotpaste hingegen eine höhere Pastenviskosität erfordert. Des Weiteren wirken sich die Thixotropiermittel ebenfalls auf die resultierende Konturenstabilität der Lotpaste aus. Die in der Lotpaste ebenfalls eingesetzten Lösemittel beeinflussen maßgeblich die Standzeit der Lotpaste auf der Schablone sowie die Nassklebekraft und die Konturenstabilität. [159]

2.3.3 Eigenschaften der Lotpaste

Neben den Bestandteilen Metallpulver und Flussmittel bestimmt vor allem das Mischungsverhältnis der beiden Komponenten zueinander das druckrelevante Eigenschaftsprofil der Lotpaste. In welchem Mischungsverhältnis die beiden Komponenten in der Lotpaste vorliegen, gibt der sogenannte Metallgehalt an. Dieser bezieht sich auf den Lotpastenanteil des Metallpulvers in Gewichtsprozent und liegt bei Lotpasten für den Schablonendruckprozess typischerweise zwischen 88 % und 90 % [137]. Während sich die Gewichtsanteile von Metallpulver und Flussmittel stark unterscheiden, liegen beide Komponenten aufgrund ihrer starken Dichteunterschiede in ähnlichen Volumenanteilen in der Lotpaste vor. Die großen Dichteunterschiede sind auch die Ursache dafür, dass es zu Separationsvorgängen in der Lotpaste während des Transports und der Lagerung der Lotpasten kommen kann [86].

Im Hinblick auf die Verarbeitung der Lotpaste im Schablonendruckprozess kommt der Pastenrheologie, die das Verformungs- und Fließverhalten der Suspension beschreibt, eine zentrale Rolle zu [142]. Eine wichtige rheologische Kenngröße zur Charakterisierung der inneren Reibung in einem Fluid stellt die dynamische Viskosität der Lotpaste dar. Diese ist ein Maß für die Stärke der molekularen Wechselwirkungen innerhalb der Paste. Die dynamische Viskosität der Lotpaste errechnet sich aus dem Quotienten von Scherspannung zu Scherrate und ist nach folgender Gleichung definiert:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [\eta] = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \text{ bzw. } \text{Pa} \cdot \text{s} \quad \text{Gl. 1}$$

η : Dynamische Viskosität

τ : Scherspannung

$\dot{\gamma}$: Scherrate

Die Bestimmung der dynamischen Lotpastenviskosität erfolgt mit Hilfe eines Rheometers in einem definierten Rotationsversuch mit variablen Rotationsgeschwindigkeiten [70]. Während newtonsche Fluide einen direkt proportionalen Zusammenhang zwischen Scherrate und Scherbeanspruchung aufweisen, woraus eine scherratenunabhängige Viskosität resultiert, zeigen Lotpasten ein strukturviskoses Verhalten [142]. Mit zunehmender Scherrate steigt die Scherbeanspruchung in der Lotpaste unterproportional, so dass die Lotpastenviskosität mit zunehmenden Scherraten abnimmt [123] [127] [137]. Eine geeignete rheologische Größe, um die Stärke dieses Effektes zu quantifizieren, stellt der sogenannte Thixotropieindex dar. Dieser ermöglicht eine quantitative Aussage über das Maß der thixotropen Eigenschaften. Die Berechnung des Thixotropieindex TI erfolgt im Allgemeinen nach folgender Formel [160]:

$$TI = \log\left(\frac{\eta(\dot{\gamma} = 1,8 \text{ s}^{-1})}{\eta(\dot{\gamma} = 18 \text{ s}^{-1})}\right) \quad \text{Gl. 2}$$

Die Komplexität der Lotpastenrheologie resultiert unter anderem auch aus der Tatsache, dass die dynamische Viskosität einer Lotpaste nicht nur von dem statischen Zusammenhang zwischen Scherrate und Scherspannung abhängt, sondern auch durch die Temperatur und die Beanspruchungsdauer beeinflusst wird. So führt eine Temperaturerhöhung ebenso zu einer Verringerung der Lotpastenviskosität wie eine zunehmende Beanspruchungsdauer, da bei konstanten Scherraten die Scherspannung in der Lotpaste mit zunehmender Beanspruchungsdauer abnimmt [17] [33] [36] [123]. Der dynamische Zusammenhang zwischen Scherrate und Scherbeanspruchung, der auch die Beanspruchungsdauer berücksichtigt, ist deshalb auch durch die Ausbildung einer ausgeprägten Hysterese gekennzeichnet und hat seine Ursache in dem strukturviskosen und thixotropen Verhalten einer Lotpaste [36] [78] [125] [127]. Grundsätzlich steigt die Viskosität einer Lotpaste mit zunehmender Lagerdauer, zunehmendem Metallgehalt und zunehmend kleineren Partikelgrößen an [76] [124] [137].

Neben den strukturviskosen Eigenschaften weist eine Lotpaste auch ein viskoelastisches Verhalten auf [142]. Dies bedeutet, dass die durch Scherung in eine Lotpaste eingebrachte Energie in einen elastischen Dehnungsanteil und einen plastischen Verformungsanteil umgesetzt wird. Der elastische Dehnungsanteil, der auch als Speichermodul bezeichnet wird, führt nach Beendigung der Beanspruchung zu einer Relaxation in der Lotpaste. Der plastische Verformungsanteil hingegen, der auch als Verlustmodul bezeichnet wird, führt zu einem Fließen der Paste und wird somit vollständig in Wärme umgesetzt. Ob sich eine Lotpaste eher wie ein Feststoff mit einem hohen elastischen Dehnungsanteil oder eher wie eine Flüssigkeit mit einem hohen plastischen Verformungsanteil verhält, hängt maßgeblich von dem Verhältnis von Speicher- zu Verlustmodul ab. Dieses Verhältnis ist prinzipiell scherratenabhängig und kann in sogenannten oszillatorischen rheologischen Verfahren ermittelt werden [125]. Der Punkt, an dem Speicher- und Verlustmodul den gleichen Wert annehmen, wird als Fließgrenze be-

zeichnet. Die Fließgrenze einer Lotpaste hängt dabei wiederum stark von der jeweiligen Temperatur ab. [33] [39] [65]

Eine weitere wesentliche Eigenschaft einer Lotpaste stellt die Nassklebekraft dar [137]. Vor allem bei dem Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur spielen die Adhäsionskräfte zwischen der Lotpaste und der Aperturwandung der Schablone eine wichtige Rolle. Für die Bestimmung der Nassklebekraft einer Lotpaste können die Empfehlungen aus dem Testverfahren 2.4.44 der IPC-TM-650 Test Methods Manual zum Einsatz kommen, das auch Bestandteil von [114] ist. Prinzipiell ist bei der Ermittlung der Nassklebekraft darauf zu achten, nach welchem Standard (IPC, JIS, Insertion Depth) die Messung erfolgt.

2.4 Einflussgrößen auf den Schablonendruckprozess

Der Schablonendruck von Lotpaste unterliegt einer Vielzahl von Einflussgrößen und Wechselwirkungen, die mit der fortschreitenden Miniaturisierung der Schablonenaperturen zunehmend an Bedeutung gewinnen [102] [111] [140] [141] [143] [161]. Die Komplexität des Druckprozesses ergibt sich dabei vor allem aus den teilweise unbekanntem Wirkzusammenhängen zwischen den Einflussgrößen und dem eigentlichen Prozessergebnis [10]. Einen Überblick über wesentliche Einflussgrößen auf den Schablonendruckprozess gibt Abbildung 9.

Eine zentrale Einflussgröße auf den Schablonendruckprozess stellt die zum Einsatz kommende Lotpaste dar. Während für die Auswahl einer Lotpaste für ein spezifisches Produkt vor allem die Legierungszusammensetzung sowie die Eigenschaften der erzeugten Lötstelle von Interesse sind, existieren weitere Lotpasteigenschaften, welche die Verarbeitung im Schablonendruck maßgeblich beeinflussen. Hierzu gehören pulverspezifische Eigenschaften wie die Pulverpartikelgröße, die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform ebenso wie pastenspezifische Eigenschaften wie der Metallgehalt, die Rheologie, die Pastenadhäsion und -kohäsion sowie die Homogenität und Stabilität der Lotpaste und die Chargenkonstanz. [3] [14] [19] [31] [41] [57] [76] [78] [125] [126]

Neben der Lotpaste ist die in einem Druckprozess eingesetzte Druckschablone eine weitere wesentliche Einflussgröße auf das Prozessergebnis. Schablonenspezifische Eigenschaften wie das Herstellungsverfahren, das Schablonenmaterial und das Nachbearbeitungsverfahren tragen ebenso zu dem erzielten Prozessergebnis bei wie das realisierte Drucklayout und die Schablonendicke. Aber auch Faktoren wie die Fertigungstoleranzen der Schablone, die Einspannkräfte des Schablonenblechs, die Aperturwandungsrauheit, der Reibungskoeffizient auf der Schablonenoberseite, die freie Oberflächenenergie des Schablonenmaterials, die Ebenheit und Gratfreiheit der Schablone sowie die Lage und Qualität der Passmarken haben einen bedeutenden Einfluss auf das Prozessergebnis. [3] [5] [7] [14] [19] [25] [32] [140] [141] [163]

Eine dritte Einflussgröße auf den Druckprozess stellt der Schablonendrucker selbst dar. Sowohl die Auslegung der Leiterplattenklemmung als auch die Art der Leiterplattenunterstützung wirken sich direkt auf das Prozessergebnis aus. Zusätzlich spielen die Auflösung der eingesetzten Visionssysteme, die Positioniergenauigkeit von Leiterplatte und Schablone, die Regelung der Maschinenparameter, die Temperierung in dem Prozessraum, die Rakelrichtung, die Druckzykluszeit sowie die druckerintegrierte Reinigung der Schablonenunterseite eine wichtige Rolle. [7] [143]

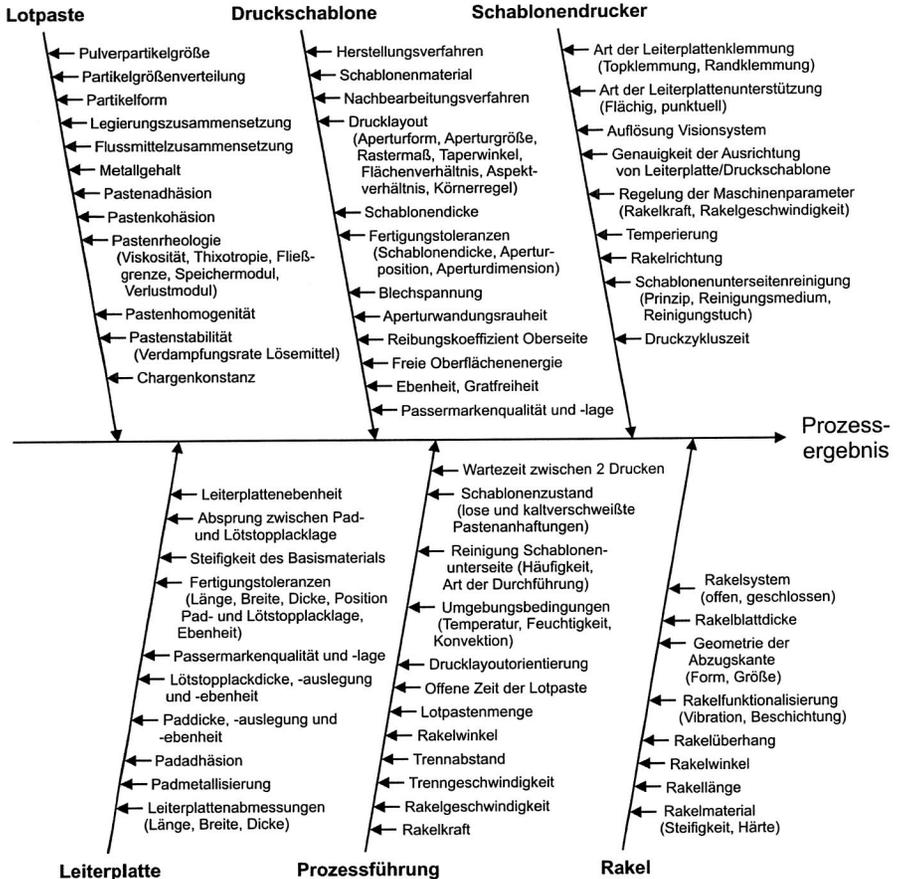


Abbildung 9: Prozesseinflussgrößen auf den Schablonendruckprozess nach [5] [9] [44] [58] [62] [94] [98] [99] [102] [103] [104] [109] [126] [133] [134] [137] [138] [140] [141] [163] [168] [172]

Die zu bedruckende Leiterplatte weist ebenfalls eine Reihe von Eigenschaften auf, die den Schablonendruckprozess stark beeinflussen können. Hierzu gehören die Leiterplattenabmessungen sowie die Qualität und Lage der Passmarken ebenso wie die zahlreichen Fertigungstoleranzen, mit denen eine Leiterplatte behaftet ist. Aber auch die Steifigkeit des Basismaterials und die Leiterplattenebenheit wirken sich ebenso wie padspezifische und lötpastenspezifische Eigenschaften wesentlich auf das Prozessergebnis aus. [143]

Ein entscheidender Einfluss auf die Qualität der bedruckten Leiterplatte kommt der Prozessführung zu. Maßgeblich zum Prozessergebnis tragen die Maschinenparameter Raketkraft, Rakelgeschwindigkeit, Trenngeschwindigkeit, Trennabstand und Rakelwinkel bei. Aber auch Faktoren wie die Drucklayoutorientierung, die Umgebungsbedingungen, der Zustand der eingesetzten Druckschablone sowie die Wartezeit zwischen zwei Drucken sind an dieser Stelle anzuführen. Aber auch die verwendete Lotpastenmenge, die offene Zeit der Lotpaste auf der Schablone sowie die Art und Häufigkeit der Schablonenunterseitenreinigung beeinflussen stark das Prozessergebnis. [3] [8] [138] [168]

Und schließlich spielen auch die zum Einsatz kommenden Rakeln eine wichtige Rolle in dem Druckprozess. Wesentliche Rakeleigenschaften wie das Rakelmaterial, die Rakellänge, der Rakelwinkel, der Rakelüberhang und die Rakelblattstärke wirken sich ebenso aus wie die Geometrie der Abzugskante, eine mögliche Rakelfunktionalisierung durch Vibration oder Beschichtung oder die Auslegung des Rakelsystems. [43] [56] [103] [109]

Obwohl die Beeinflussung des Schablonendruckprozesses durch die zahlreichen Einflussgrößen prinzipiell bekannt ist, stellt sich die Herstellung eines quantifizierbaren Zusammenhangs zwischen einer Einflussgröße und einem Prozessergebnis heutzutage als nicht möglich dar. Ursächlich hierfür sind die zahlreichen Wechselwirkungen, die im Schablonendruckprozess wirken, sowie die Unkenntnis über wesentliche Prozessparameter des Druckprozesses. Hierzu gehören beispielweise die zu dem Zeitpunkt der Aperturfüllung herrschende Lotpastenviskosität, der hydrodynamische Fülldruck über einer Schablonenapertur oder auch die Zeit, die zu dem Füllen einer Apertur zur Verfügung steht [9]. Im Gegensatz zu den messbaren Prozesseinflussgrößen können die heutzutage nicht erfassbaren Prozessparameter nur indirekt beeinflusst werden, so dass eine gezielte Einstellung dieser Prozessparameter nur schwer möglich ist. Eine Zuordnung wichtiger Einflussgrößen sowie wesentlicher Prozessparameter zu den einzelnen Teilprozessen des Druckprozesses ist in Abbildung 10 dargestellt.

Das Rollen der Lotpaste als erster technologischer Teilprozess wird im Wesentlichen durch die in Abbildung 10 dargestellten Faktoren beeinflusst. Als Folge des Rollens stellt sich in der Lotpaste eine charakteristische Verteilung der Scherrate, der Viskosität, der Fließgeschwindigkeit und -richtung sowie des hydrodynamischen Drucks ein. Die Zielsetzung des ersten Teilprozesses liegt dabei einerseits in einem zuverlässigen Ab-

ziehen der Lotpaste, so dass keine Pastenrückstände auf der Schablonenoberfläche zurückbleiben. Dies setzt voraus, dass beim Überfahren der Rakel der Kontakt zwischen Rakel und Schablonenoberfläche trotz des hydrodynamischen Drucks, welcher auf das Rakelblatt wirkt, nicht verloren geht. Während hohe Rakelkräfte und geringe Rakelgeschwindigkeiten ein zuverlässiges Abziehen der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche prinzipiell begünstigen, führen diese aber auch zu längeren Druckzykluszeiten und einem erhöhten Schablonenverschleiß. Bei der Festlegung dieser beiden Maschinenparameter ist folglich ein Kompromiss aus betriebswirtschaftlichen und technologischen Beweggründen zu treffen.

| | Teilprozess 1 Rollen der Lotpaste | Teilprozess 2 Füllen der Aperturen | Teilprozess 3 Auslösen der Lotpaste |
|-------------------------|---|--|--|
| Einflussgröße | <input type="checkbox"/> Lotpastenviskosität <input type="checkbox"/> Lotpastenmenge <input type="checkbox"/> Lotpastenthixotropie <input type="checkbox"/> Metallgehalt Lotpaste <input type="checkbox"/> Oberflächenrauheit Schablone <input type="checkbox"/> Schablonenebenheit <input type="checkbox"/> Regelung Maschinenparameter <input type="checkbox"/> Temperierung <input type="checkbox"/> Rakelgeschwindigkeit <input type="checkbox"/> Rakelwinkel <input type="checkbox"/> Rakelkraft | <input type="checkbox"/> Lotpastenviskosität <input type="checkbox"/> Pulverpartikelgröße <input type="checkbox"/> Lotpastenthixotropie <input type="checkbox"/> Aperturöffnungsfläche <input type="checkbox"/> Schablonendicke <input type="checkbox"/> Aperturwandungsrauheit <input type="checkbox"/> Höhenniveau Leiterplattenpad <input type="checkbox"/> Lotpastenmenge <input type="checkbox"/> Rakelgeschwindigkeit <input type="checkbox"/> Rakelwinkel <input type="checkbox"/> Rakelkraft | <input type="checkbox"/> Lotpastenviskosität <input type="checkbox"/> Pastenadhäsion <input type="checkbox"/> Pastenkohäsion <input type="checkbox"/> Trenngeschwindigkeit <input type="checkbox"/> Aperturöffnungsfläche <input type="checkbox"/> Schablonendicke <input type="checkbox"/> Padfläche Leiterplatte <input type="checkbox"/> Adhäsion Aperturwandung <input type="checkbox"/> Adhäsion Leiterplattenpad <input type="checkbox"/> Füllgrad der Apertur <input type="checkbox"/> Aperturwandungsrauheit |
| Prozessparameter | <input type="checkbox"/> Resultierender Rakelwinkel <input type="checkbox"/> Scherratenverteilung in der Lotpaste <input type="checkbox"/> Verteilung der Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung in der Lotpaste <input type="checkbox"/> Hydrodynamische Druckverteilung in der Lotpaste <input type="checkbox"/> Viskositätsverteilung in der Lotpaste | <input type="checkbox"/> Hydrodynamischer Fülldruck über der Schablonenapertur <input type="checkbox"/> Fließgeschwindigkeit der Lotpaste während des Füllens <input type="checkbox"/> Scherraten- und Viskositätsverteilung in der Apertur <input type="checkbox"/> Zeit zum Füllen der Apertur <input type="checkbox"/> Eintauchtiefe des Rakels in die Apertur <input type="checkbox"/> Packungsdichte in der Apertur | <input type="checkbox"/> Betrag der maximalen Stressbelastung in der Lotpaste <input type="checkbox"/> Beträge der wirkenden Adhäsionskräfte <input type="checkbox"/> Viskositätsverteilung in der Lotpaste <input type="checkbox"/> Packungsdichte in der Apertur |

Abbildung 10: Einflussgrößen und Prozessparameter der einzelnen Teilprozesse

Der Rakelwinkel stellt eine weitere wesentliche Einflussgröße auf das Abziehverhalten der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche dar. Je geringer der Rakelwinkel gewählt wird, desto größer ist der resultierende hydrodynamische Druck. Dies verbessert zwar das Füllverhalten der Apertur im folgenden Teilprozess, kann aber auch zu einem Aufschwimmen der Rakel führen, so dass die Schablonenoberfläche nicht mehr sauber abgezogen werden kann. Ein weiterer Faktor, der den hydrodynamischen Druck maßgeblich beeinflusst, stellt die Lotpastenmenge dar, da mit ihrer Zunahme auch der hydrodynamische Druck vor der Rakel ansteigt. Grundsätzlich verschlechtert sich das Abziehverhalten der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche mit einem zunehmenden

hydrodynamischen Druck. Andererseits liegt die Zielsetzung des ersten Teilprozesses darin, ein gleichmäßiges Rollen der Lotpaste zu ermöglichen, ohne dass diese vor der Rakel hergeschoben wird. [5] [8] [122]

Auch der zweite technologische Teilprozess, das Füllen der Aperturen, hängt von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab, die sich auf die relevanten Prozessparameter auswirken. Die Zielsetzung des Füllvorgangs liegt in der vollständigen Füllung der Apertur mit Lotpaste, so dass diese vollständig bis zu dem Leiterplattenpad durchsteigt. Mit einer Zunahme des hydrodynamischen Fülldrucks verbessert sich das Füllen der Aperturen mit Lotpaste ebenso wie durch eine Erhöhung der zum Füllen zur Verfügung stehenden Zeit. Eine Erhöhung der Rakelkraft führt somit nur insofern zu einer Verbesserung des Füllverhaltens, dass hierdurch eine Reduzierung des tatsächlich wirkenden Rakelwinkels herbeigeführt wird. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass das Ausschöpfen größerer Aperturen durch eine erhöhte Rakelkraft forciert wird. Durch eine Reduzierung der Rakelgeschwindigkeit wird zwar der hydrodynamische Fülldruck verringert, die zum Füllen einer Apertur zur Verfügung stehende Zeit jedoch erhöht. Je geringer die Lotpastenviskosität ist, desto besser fließt die Lotpaste in die Schablonenaperturen. Je kleiner die Pulverpartikelgröße, desto höher ist die Packungsdichte in der gefüllten Schablonenapertur. Bei einer Erhöhung des hydrodynamischen Fülldrucks ist zu berücksichtigen, dass eine ausreichende Abdichtung zwischen Schablonenapertur und Pad erhalten bleibt. [3] [7] [8] [86] [122]

Während der zweite technologische Teilprozess im Wesentlichen durch Druckparameter bestimmt wird, sind für den dritten Teilprozess, dem Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur, vor allem Materialparameter von Bedeutung. Die Zielsetzung ist hierbei das vollständige Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur, ohne dass Pastenrückstände in den Aperturwandungen oder auf der Schablonenunterseite zurückbleiben. Mit zunehmender Nassklebekraft der Lotpaste verschlechtert sich das Auslöseverhalten druckkritischer Strukturen. Aber auch eine zu geringe Lotpastenviskosität führt zu einem schlechteren Auslöseverhalten, weil die Lotpaste während des Trennvorgangs kohäsiv reißen kann. [4] [39] [66] [122]

2.5 Qualitätsmerkmale der bedruckten Leiterplatte

Die Zielsetzung des Schablonendruckprozesses liegt in der baugruppenspezifischen Bereitstellung von Lotpaste auf einer strukturierten Leiterplatte. Dabei sind für jedes einzelne Pastendepot wesentliche Anforderungen zu erfüllen, die sich aus der weiteren Prozessierung der bedruckten Leiterplatte in den sich anschließenden Prozessschritten Bestücken und Reflowlöten ergeben. Hinsichtlich der Anforderungen ist prinzipiell zwischen fertigungs- und materialspezifischen Anforderungen zu unterscheiden. Im Hinblick auf die weitere Prozessierung kommt beispielsweise der Nassklebekraft für das Bestücken oder auch der prinzipiellen Lötignung des Pastendepots besondere Bedeu-

tung zu. Hierbei handelt es sich jedoch um materialspezifische Anforderungen, die nur kaum oder auch überhaupt nicht durch den eigentlichen Druckprozess beeinflusst werden können.

Im Gegensatz dazu stellen fertigungsspezifische Anforderungen wie beispielsweise die Depotposition, die Depotfläche, die Depottopographie sowie das Depotvolumen eines Pastendepots das direkte Ergebnis des Druckprozesses dar und ermöglichen somit eine Aussage über die Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses [164]. Die Qualitätsleistung des Druckprozesses lässt sich somit für jedes einzelne Pastendepot auf Basis der depotspezifischen Kenngrößen x-Position, y-Position, Drehlage, Fläche, Volumen, durchschnittliche und maximale Höhe beschreiben [144]. Da auf Basis des absoluten Charakters der einzelnen Kenngrößen jedoch keine Qualitätsaussage über das einzelne Pastendepot beziehungsweise die bedruckte Leiterplatte getroffen werden kann, ist eine Überführung der Kenngrößen in sogenannte Qualitätsmerkmale notwendig. Die Definition dieser Qualitätsmerkmale (siehe Abbildung 11) berücksichtigt baugruppen- und pastendepotspezifische Eigenschaften wie die Schablonendicke oder die Aperturabmessungen, so dass ein prinzipieller Vergleich zwischen dem erzielten und einem idealisierten Prozessergebnis möglich ist.

| Kenngröße | Bezugsgröße | Qualitätsmerkmal | Definition Qualitätsmerkmal | Zielwert |
|--------------------------|--------------------|--|--|----------|
| Volumen Pastendepot | Volumen Apertur | Transfereffizienz (TE) | $TE = \frac{\text{Volumen Pastendepot}}{\text{Volumen Apertur}}$ | 100 % |
| Fläche Pastendepot | Fläche Apertur | Flächenbedruckungsgrad (FBG) | $FBG = \frac{\text{Fläche Pastendepot}}{\text{Fläche Apertur}}$ | 100 % |
| x-Position Pastendepot | x-Position Apertur | x-Versatz (VE_x) | $VE_x = \frac{(\text{x-Position Pastendepot}) - (\text{x-Position Apertur})}{\text{Apertur}}$ | 0 µm |
| y-Position Pastendepot | y-Position Apertur | y-Versatz (VE_y) | $VE_y = \frac{(\text{y-Position Pastendepot}) - (\text{y-Position Apertur})}{\text{Apertur}}$ | 0 µm |
| Drehlage Pastendepot | Drehlage Apertur | θ-Versatz (VE_θ) | $VE_\theta = \frac{(\text{Drehlage Pastendepot}) - (\text{Drehlage Apertur})}{\text{Apertur}}$ | 0° |
| Mittlere Pastendepothöhe | Schablonendicke | Durchschnittliches Depothöhenverhältnis (DDHV) | $DDHV = \frac{\text{Mittlere Depothöhe}}{\text{Schablonendicke}}$ | 100 % |
| Maximale Pastendepothöhe | Schablonendicke | Maximales Depothöhenverhältnis (MDHV) | $MDHV = \frac{\text{Maximale Depothöhe}}{\text{Schablonendicke}}$ | 100 % |

Abbildung 11: Ableitung der Qualitätsmerkmale einer bedruckten Leiterplatte aus den jeweiligen Kenn- und Bezugsgrößen

Neben den einzelnen Qualitätsmerkmalen sowie den zugehörigen Kenn- und Bezugsgrößen sind in Abbildung 11 ebenso die Zielgrößen dargestellt, die sich aus einem idealisierten Druckprozess ergeben, der keinerlei systematischen und zufälligen Schwankungen unterliegt. Im Wesentlichen können für jedes Pastendepot die Qualitätsmerkmale Transfereffizienz, Flächenbedruckungsgrad, x-Versatz, y-Versatz, theta-Versatz sowie das durchschnittliche und maximale Depothöhenverhältnis identifiziert werden. Das Qualitätsmerkmal Transfereffizienz ergibt sich dabei aus dem Quotienten von appliziertem Pastenvolumen zu Aperturvolumen und weist in bei einem idealisierten Prozess einen Wert von 100 % auf [7]. Auch das Qualitätsmerkmal Flächenbedruckungsgrad sowie die im Rahmen dieser Arbeit definierten Qualitätsmerkmale durchschnittliches und maximales Depothöhenverhältnis errechnen sich aus dem Quotienten aus der jeweiligen Kenngröße und der Bezugsgröße und haben einen Zielwert von 100 %. Im Gegensatz dazu ergeben sich die Versätze in x, y und theta aus der Differenz zwischen den Ist- und den Sollwerten des Pastendepots, so dass ein idealisiertes Pastendepot einen x- und y-Versatz von 0 μm und einen theta-Versatz von 0° aufweist.

2.6 Typische Fehlerbilder und mögliche Ursachen

Die Komplexität des Schablonendruckprozesses resultiert unter anderem aus der Vielzahl an möglichen Fehlerbildern, die als Prozessergebnis auf einer bedruckten Leiterplatte für jedes einzelne Pastendepot identifiziert werden können [86] [137]. Hierzu gehören ein unzulässiger Versatz des Druckbildes ebenso wie zu geringe oder zu hohe Transfereffizienzen, zu geringe oder zu hohe Flächenbedruckungsgrade sowie eine Überschreitung des maximalen Depothöhenverhältnisses MDHV. Die im allgemeinen Sprachgebrauch oftmals verwendeten Bezeichnungen für typische Druckfehler wie fehlende Pastendepots und Hundeohren stellen hierbei lediglich eine Unter- bzw. Überschreitung der zuvor definierten Qualitätsmerkmale dar. Ein weiteres Fehlerbild stellen sogenannte Druckbrücken dar, bei denen die Pastendepots zweier benachbarter Pads miteinander verbunden sind. Neben den quantifizierbaren Qualitätsmerkmalen und den sich bei Verletzung der Prüfgrenzen ergebenden Druckfehlern existieren aber auch weitere Fehlerbilder, die sich typischerweise nur qualitativ erfassen lassen. Hierunter fallen Verschmierungen der Lotpaste ebenso wie auf der Leiterplatte zurückbleibende Fasern des druckerintegrierten Reinigungstuchs. Eine Übersicht zu den wesentlichen Druckfehlern ist in Abbildung 12 dargestellt.

Fehler des Schablonendruckprozesses haben eine reduzierte Qualität und Zuverlässigkeit der gefertigten elektronischen Baugruppe zur Folge, so dass diese den definierten Produktanforderungen nicht mehr entspricht. Obwohl der kausale Zusammenhang zwischen einem Fehlerbild des Druckprozesses und der späteren Produkteigenschaft im Allgemeinen bekannt ist, ist aufgrund der Vielzahl der beeinflussenden Faktoren eine Quantifizierung des Einflusses kaum möglich. Beispielhaft sei an dieser Stelle das

Fehlerbild Hundeohren angeführt. Die lokale Überhöhung des Pastendepots an QFP-Strukturen, die auch als Hundeohr bezeichnet wird, soll ein wesentlicher Risikofaktor dafür sein, dass im gelöteten Zustand Lötbrücken an QFP-Strukturen auftreten [3]. Eine Korrelation zwischen dem Maß der Pastendepotüberhöhung und der Anzahl der tatsächlich aufgetretenen Lötbrücken fehlt jedoch ebenso wie die Empfehlung einer Prüfgrenze zur Identifikation dieses Fehlerbildes. Ein weiteres Beispiel hierfür stellt ein zu geringes Pastenvolumen dar, welches zu einer mageren oder gar offenen Lötstelle nach dem Lötprozess führen kann [3] [20].

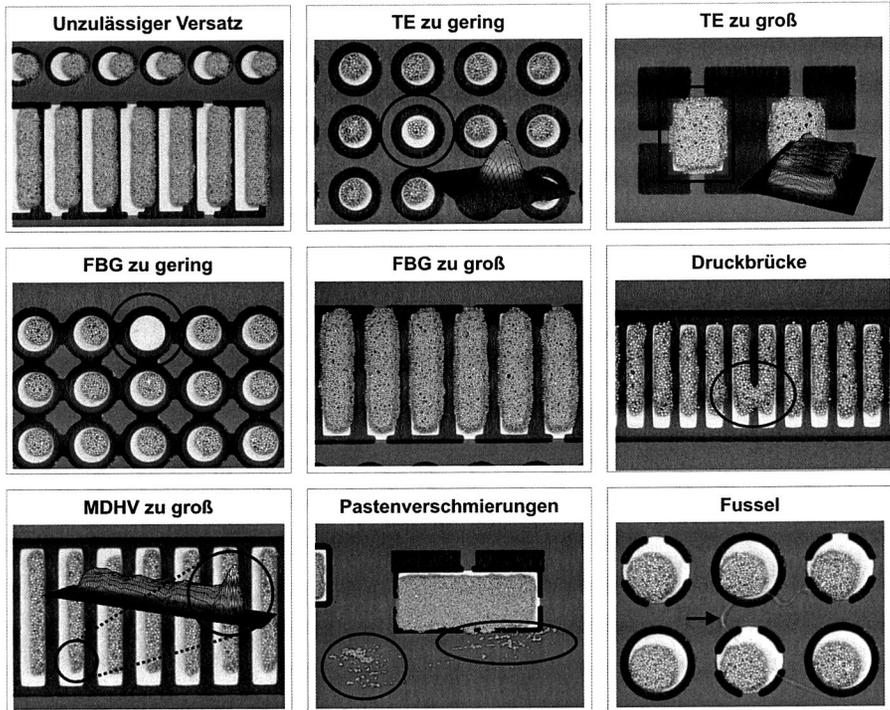


Abbildung 12: Typische Fehlerbilder des Schablonendruckprozesses

Die Zuordnung eines spezifischen Fehlerbildes zu einer eindeutigen Fehlerursache erweist sich oftmals als äußerst schwierig, da aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen sowie der relevanten Wechselwirkungen die Herstellung einer eindeutigen Kausalität nicht gegeben ist. Am Beispiel des häufigsten Fehlerbildes im Schablonendruckprozess soll dies im Folgenden erläutert werden. Treten zu geringe Transfereffizienzen im Schablonendruckprozess auf, kommen prinzipiell folgende Ursachen in Betracht:

- ❑ Partielles Auslösen der Lotpaste aus einer vollständig gefüllten Schablonenapertur aufgrund zu hoher Adhäsionskräfte an der Aperturwandung (Flächenverhältnis zu gering)
- ❑ Partielles Auslösen der Lotpaste aus einer vollständig gefüllten Schablonenapertur aufgrund zu geringer Adhäsionskräfte auf dem Leiterplattenpad (Pastendurchstieg unvollständig)
- ❑ Partielles Auslösen der Lotpaste aus einer vollständig gefüllten Schablonenapertur aufgrund zu geringer Kohäsionskräfte innerhalb der Lotpaste (Pastenviskosität zu gering)
- ❑ Partielles Auslösen der Lotpaste aus einer vollständig gefüllten Schablonenapertur aufgrund von fest anhaftenden Pastenrückständen an der Aperturwandung (Clogging) [3]
- ❑ Auslösen der Lotpaste aus einer partiell gefüllten Schablonenapertur aufgrund einer zu geringen Füllzeit (Rakelgeschwindigkeit zu hoch)
- ❑ Auslösen der Lotpaste aus einer partiell gefüllten Schablonenapertur aufgrund eines zu geringen Fülldrucks (Lotpastenmenge zu gering, Lotpastenmenge zu groß, Rakelwinkel zu hoch) [8]

Neben den zahlreichen Fehlerbildern und den möglichen Fehlerursachen resultiert die Komplexität des Druckprozesses vor allem aber auch aus der Vielzahl der Einflussfaktoren, welche die einzelnen Fehlerursachen beeinflussen. So wird beispielsweise das Clogging von Schablonenaperturen mit kleinen Flächenverhältnissen, also das sukzessive Zusetzen der Aperturen durch fest anhaftende Pastenrückstände, durch eine Reihe von Faktoren begünstigt. Hierzu gehören neben Lotpasten mit hohen Nassklebekräften und Schablonen mit hohen Rauheiten der Aperturwandungen auch längere Warte- und Stillstandzeiten im Druckprozess.

2.7 Analyse von Qualitätsdaten aus einer Serienfertigung

Während die Bedeutung des Schablonendrucks in zahlreichen Veröffentlichungen durch die Angabe der relativen Prozessfehlerraten im Vergleich zu den Folgeprozessen Bestücken und Reflowlöten motiviert wird, fehlen im Allgemeinen jedoch Angaben zu den tatsächlich in der Fertigung auftretenden Fehlerraten im Druckprozess [53] [62] [171]. Vor diesem Hintergrund soll die exemplarische Auswertung von Qualitätsdaten aus einer Serienfertigung aufzeigen, welches Qualitätsniveau heutzutage in der Fertigung tatsächlich vorliegt und welches Optimierungspotenzial sich hieraus ableiten lässt. Die durchgeführte Qualitätsdatenanalyse umfasst dabei insgesamt vier Serienprodukte, die in unterschiedlichen Stückzahlen über drei Arbeitstage in einem Dreischichtbetrieb

gefertigt wurden. Die Pastendruckinspektion erfolgte mit Hilfe eines linienintegrierten 3D-Pasteninspektionssystems der Firma Koh Young. Hinsichtlich des Aperturspektrums existieren keine wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Produkten. Bei einer Schablonendicke von 140 μm stellen Aperturen für Chipwiderstände der Größe 0201 und Oblongstrukturen mit einem Rastermaß von 500 μm die kleinsten Strukturen dar.

Wie aus der Darstellung der wichtigen Kenngrößen der durchgeführten Qualitätsdatenanalyse in Tabelle 2 ersichtlich ist, liegt der leiterplattenbezogene First Pass Yield (FPY) der vier Produkte in einem Bereich von 92 % bis 96 %. Bezogen auf die gedruckten Pastendepots ergeben sich dpm-Raten zwischen 30 und 892.

| | Produkt A | Produkt B | Produkt C | Produkt D |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Anzahl bedruckter Leiterplatten | 1164 | 530 | 353 | 2733 |
| Anzahl fehlerfrei bedruckter Leiterplatten | 1119 | 488 | 334 | 2568 |
| Anzahl fehlerhaft bedruckter Leiterplatten | 45 | 42 | 19 | 165 |
| First Pass Yield (bezogen auf Leiterplatte) | 96,134 % | 92,075 % | 94,618 % | 93,963 % |
| Anzahl Pastendepots pro Leiterplatte | 2396 | 3674 | 2374 | 2634 |
| Anzahl Pastendepots gesamt | 2788944 | 1947220 | 838022 | 7198722 |
| Anzahl fehlerfreier Pastendepots | 2786457 | 1947160 | 837997 | 7194668 |
| Anzahl fehlerhafter Pastendepots | 2487 | 60 | 25 | 4054 |
| First Pass Yield (bezogen auf Pastendepot) | 99,911 % | 99,997 % | 99,997 % | 99,944 % |
| dpm-Rate (bezogen auf Pastendepot) | 892 | 31 | 30 | 563 |

Tabelle 2: Wichtige Kenngrößen der durchgeführten Qualitätsdatenanalyse

Eine weiterführende Detailanalyse der identifizierten Druckfehler ist in Tabelle 3 dargestellt. Neben Pastendepots mit dem Fehlerbild Brückenbildung treten vor allem Pastendepots mit einem zu geringem Pastenvolumen auf. Vereinzelt können aber auch Pastendepots mit einem zu hohen Pastenvolumen identifiziert werden.

| | Produkt A | Produkt B | Produkt C | Produkt D |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Anzahl fehlerhafter Pastendepots | 2487 | 60 | 25 | 4054 |
| Anzahl Pastendepots mit Fehlerbild Brückenbildung | 12 | 0 | 0 | 66 |
| Anzahl Pastendepots mit Fehlerbild Pastenvolumen zu gering | 2475 | 58 | 25 | 3990 |
| Anzahl Pastendepots mit Fehlerbild Pastenvolumen zu hoch | 0 | 2 | 0 | 2 |

Tabelle 3: Detailanalysen zu den identifizierten Druckfehlern

Vor allem bei der Analyse der Druckfehler der Produkte A und D ist auffällig, dass einzelne Leiterplatten mit einer extremen Anhäufung von Druckfehlern existieren. So kann beispielweise für das Produkt A eine Leiterplatte identifiziert werden, bei der alle 2396 Pastendepots ein zu geringes Pastenvolumen aufweisen. Ursächlich hierfür ist sehr wahrscheinlich ein nicht rechtzeitiges Nachfüllen von Lotpaste in den Schablonendrucker, so dass dem Druckprozess nicht mehr ausreichend Lotpaste zur Verfügung gestanden hat. Aufgrund des systematischen Charakters dieser Fehleranhäufungen und dem Problem, dass ein Großteil der fehlerhaft bedruckten Leiterplatten durch diese Ursache nicht erklärt werden kann, erfolgt im weiteren Verlauf eine Bereinigung der Qualitätsdaten. Alle Leiterplatten mit mehr als zehn fehlerhaften Pastendepots werden deshalb aus der weiterführenden Analyse eliminiert, so dass sich die Leiterplattenanzahl des Produkts A um zwei Leiterplatten und die Leiterplattenanzahl des Produkts D um elf Leiterplatten verringert hat. Die bereinigten Kenngrößen nach der Eliminierung der systematischen Druckfehler ist in Tabelle 4 dargestellt.

| | Produkt A | Produkt B | Produkt C | Produkt D |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Anzahl bedruckter Leiterplatten | 1162 | 530 | 353 | 2722 |
| Anzahl fehlerfrei bedruckter Leiterplatten | 1119 | 488 | 334 | 2568 |
| Anzahl fehlerhaft bedruckter Leiterplatten | 43 | 42 | 19 | 154 |
| First Pass Yield (bezogen auf Leiterplatte) | 96,299 % | 92,075 % | 94,618 % | 94,342 % |
| Anzahl Pastendepots gesamt | 2784152 | 1947220 | 838022 | 7169748 |
| Anzahl fehlerfreier Pastendepots | 2784087 | 1947160 | 837997 | 7169543 |
| Anzahl fehlerhafter Pastendepots | 65 | 60 | 25 | 205 |
| First Pass Yield (bezogen auf Pastendepot) | 99,998 % | 99,997 % | 99,997 % | 99,997 % |
| dpm-Rate (bezogen auf Pastendepot) | 23 | 31 | 30 | 29 |

Tabelle 4: Kenngrößen nach Eliminierung der systematischen Druckfehler

Für die Produkte A und D ergeben sich so bereinigte dpm-Raten, die mit denen der Produkte B und C vergleichbar sind. Obwohl die Anzahl der fehlerhaften Pastendepots der Produkte A und D wesentlich geringer ist, ändert sich der leiterplattenbezogene FPY kaum. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die verbleibenden Druckfehler verteilt auf den fehlerhaft bedruckten Leiterplatten vorzufinden sind. Eine merkliche Verbesserung des Qualitätsniveaus der einzelnen Produkte ist somit vor allem durch die Vermeidung der verbleibenden und vermeintlich zufälligen Druckfehler erzielbar. Eine Übersicht der Verteilung der verbleibenden Druckfehler ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Trotz der Eliminierung der systematischen Druckfehler bleiben Pastendepots mit einem zu geringen Pastenvolumen das mit Abstand häufigste Fehlerbild. Von den insgesamt 355 Druckfehlern über alle Produkte sind 324 Druckfehler diesem Fehlerbild zuzuordnen. Daneben können 27 Pastendepots mit Brückenbildung und 4 Pastendepots mit

einem zu hohen Pastenvolumen identifiziert werden. Während ein zu geringes Pastenvolumen zu einem überwiegenden Teil Aperturen der Chipgröße 0201 betrifft, können alle Druckbrücken den Aperturen der Oblongstrukturen mit einem Rastermaß von 500 µm zugeordnet werden. Für ein zu hohes Pastenvolumen können keine aperturspezifischen Korrelationen hergestellt werden.

| | Produkt A | Produkt B | Produkt C | Produkt D |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Anzahl fehlerhafter Pastendepots | 65 | 60 | 25 | 205 |
| Anzahl Pastendepots mit Fehlerbild Brückenbildung | 12 | 0 | 0 | 15 |
| Anzahl Pastendepots mit Fehlerbild Pastenvolumen zu gering | 53 | 58 | 25 | 188 |
| Anzahl Pastendepots mit Fehlerbild Pastenvolumen zu hoch | 0 | 2 | 0 | 2 |

Tabelle 5: *Detailanalysen zu den identifizierten Druckfehlern nach Eliminierung der systematischen Druckfehler*

2.8 Ableitung des Forschungsbedarfs

Der Schablonendruck von Lotpaste als fehleranfälliger Prozessschritt zur Herstellung elektronischer Baugruppen bietet ein erhebliches technologisches und betriebswirtschaftliches Optimierungspotenzial. Getrieben durch die fortschreitende Miniaturisierung der elektronischen Systeme und der Forderung nach höchsten Qualitätsstandards mit geringsten Fehlerraten in den Fertigungsprozessen steigen die Anforderungen an diesen Prozess stark an. Wie aus der vorangegangenen Qualitätsdatenanalyse eindeutig hervorgeht, können akzeptable First Pass Yields auf Leiterplattenebene nur auf Basis von Druckprozessen mit extrem niedrigen depotbezogenen dpm-Raten erreicht werden. Am Beispiel von Produkt A bedeutet dies, dass für eine leiterplattenbezogene Ausbeute von mindestens 99 % eine depotbezogene dpm-Rate von 4,2 notwendig ist, sofern davon ausgegangen werden kann, dass es zu keinen Fehlerhäufungen auf fehlerhaft bedruckten Leiterplatten kommt. Um derart niedrige dpm-Raten im Schablonendruckprozess zu erreichen, müssen neben den systematischen Druckfehlern aber auch die scheinbar zufälligen Druckfehler konsequent vermieden werden, was ein umfassendes Prozessverständnis voraussetzt.

Durch die Verfügbarkeit geeigneter Systemlösungen zur 3D-Pastendruckinspektion sind die Voraussetzungen geschaffen worden, die Qualitätsleistung des Druckprozesses ganzheitlich und umfassend zu bewerten. Vor diesem Hintergrund sollen die einzelnen Beiträge dieser Arbeit in ihrer Gesamtheit zu einer nachhaltigen Optimierung des Druckprozesses in der Fertigung beitragen.

3 Einsatz der 3D-Pastendruckinspektion zur Bewertung und Optimierung des Schablonendrucks

Zu Beginn der Oberflächenmontagetechnik in der Elektronikproduktion wurde in der Regel auf eine Inspektion der bedruckten Leiterplatten direkt nach dem Schablonendruckprozess verzichtet. Die Qualitätsbewertung des Druckprozesses erfolgte zu diesem Zeitpunkt indirekt durch eine Inspektion und Beurteilung der Fertigungsqualität der kompletten elektronischen Baugruppe nach dem Reflowlöten. Als nachteilig erwies sich bei dieser Vorgehensweise der zeitliche Versatz zwischen den Zeitpunkten der Fehlerentstehung und der Fehleridentifikation, so dass unter Umständen bereits ein großer Teil fehlerhafter Baugruppen produziert wurde, bis geeignete Abhilfemaßnahmen eingeleitet werden konnten. Aufgrund der steigenden Komplexität des Schablonendruckprozesses und dem damit verbundenen Anstieg der Fertigungsfehler wurde mit der Zeit eine Entscheidungsinstanz nach dem Schablonendruckprozess eingerichtet, die auf Basis einer subjektiven Gut-/Schlecht-Bewertung das Prozessergebnis beurteilt. Diese Beurteilung erfolgte in zunehmendem Maß unter Zuhilfenahme eines Mikroskops, da die Strukturen auf einer bedruckten Leiterplatte immer kleiner wurden. Mit der rasanten Zunahme der Rechenleistung von Industrierechnern und der Weiterentwicklung geeigneter Kamerasysteme hielt die Bildverarbeitung Einzug in die Bewertung des Druckergebnisses, so dass zunächst die automatisierte Erfassung und Auswertung zweidimensionaler Kenngrößen einer bedruckten Leiterplatte realisiert werden konnte. Durch die Entwicklung geeigneter optischer Sensoren existieren heutzutage auch Systemlösungen, mit denen die dreidimensionale Geometrie einer bedruckten Leiterplatte erfasst und dreidimensionale Kenngrößen abgeleitet werden können. [61] [63] [84]

Im industriellen Umfeld kommen von der manuellen optischen Inspektion über die automatische 2D-Pasteninspektion bis hin zur umfassenden, automatischen 3D-Pasteninspektion alle Inspektionsarten zum Einsatz [84]. Die Wahl der Inspektionsart in einem Unternehmen hängt dabei im Wesentlichen von der Qualitätsphilosophie, den Lohnkosten, der Baugruppenkomplexität sowie möglichen Kundenforderungen an qualitätssichernde Maßnahmen ab. Bei der manuellen optischen Inspektion erfolgt die Beurteilung der bedruckten Leiterplatten durch die visuelle Begutachtung speziell geschulter Mitarbeiter. Ein wesentlicher Nachteil dieser Inspektionsart stellt die Subjektivität des Inspektionsergebnisses dar. Sowohl die persönliche Eignung des Mitarbeiters als auch dessen aktuelle Leistungsfähigkeit beeinflussen das Inspektionsergebnis maßgeblich. Zudem beschränkt sich die Inspektion auf eine qualitative Erfassung zweidimensionaler Kenngrößen wie Depotposition und bedruckte Fläche. Im Gegensatz zur manuellen optischen Inspektion ermöglicht die automatische optische 2D-Pastendruckinspektion eine objektive Bewertung des Druckergebnisses, da zweidimensionale Qualitätskriterien wie Versatz und Flächenbedruckungsgrad quantitativ erfasst werden können. Eine umfassende Bewertung der Qualitätsleistung des Druckprozesses ist jedoch nur auf Basis

einer automatischen optischen 3D-Pastendruckinspektion möglich, da alle wesentlichen Qualitätsmerkmale wie Transfereffizienz, Flächenbedruckungsgrad, Versatz sowie durchschnittliches und maximales Depothöhenverhältnis bestimmt werden können. [143]

Die 3D-Pastendruckinspektion stellt das Resultat fortwährender Anstrengungen dar, um die Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses umfassend bewerten zu können. Im Rahmen dieses Kapitels werden zunächst verfügbare Systemlösungen zur 3D-Pastendruckinspektion anhand ihrer Messverfahren gegenübergestellt und bewertet, bevor anschließend ein Leitfaden zur Auswahl einer geeigneten Systemlösung vorgestellt wird. Aufbauend darauf werden die Rahmenbedingungen für einen Einsatz der 3D-Pastendruckinspektion im industriellen Umfeld erläutert. Dies umfasst neben der Beschreibung der Vorgehensweise zur Messdatenerzeugung auch den Nachweis der Prüf- und Messmittelfähigkeit sowie eine Analyse der Messabweichungen für das betrachtete System. Des Weiteren werden die Möglichkeiten zur Prozessqualifizierung vor dem eigentlichen Serienanlauf sowie der Einsatz des Pasteninspektionssystems als Prüfmittel in der Fertigung beschrieben und diskutiert. Das Kapitel schließt mit einer technologisch-wirtschaftlichen Bewertung der 3D-Pastendruckinspektion, die einem potenziellen Anwender aufzeigen soll, unter welchen Rahmenbedingungen eine Investition in solch ein kostenintensives System sinnvoll ist.

3.1 Verfügbare Systemlösungen zur 3D-Pastendruckinspektion

In den vergangenen Jahren haben sich enorme technologische Fortschritte bei der Entwicklung kommerziell verfügbarer 3D-Pasteninspektionssysteme erzielen lassen. Vor diesem Hintergrund werden zunächst alternative Messverfahren gegenübergestellt und bewertet, bevor anschließend wesentliche Bewertungskriterien zur Auswahl einer geeigneten Systemlösung in einem Leitfaden zusammengetragen werden. Berücksichtigung finden an dieser Stelle Systeme zur 3D-Inspektion, wohingegen sogenannte 2D- oder 2,5D-Systeme unberücksichtigt bleiben.

3.1.1 Gegenüberstellung und Bewertung alternativer Messverfahren

Die verfügbaren Verfahren zur optischen 3D-Messtechnik unterscheiden sich prinzipiell hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Sensorprinzipien. Grundsätzlich setzt sich ein optischer Sensor aus einem Sender, einem Messobjekt und einem Empfänger zusammen. Das Lichtsignal, das von der Sendeeinheit generiert und versendet wird, erfährt durch das Messobjekt eine Änderung der Amplitude, Phase, Polarisierung oder Richtung. Diese Änderung wird mithilfe des Empfängers erfasst und ausgewertet, so dass Rückschlüsse auf die dreidimensionale Struktur des Messobjekts gezogen werden können [11]. Die optische Antastung stellt eine Möglichkeit zur Unterscheidung unterschiedlicher Sensorprinzipien dar. Während interferometrische Verfahren und Autofokussysteme

me das Prinzip der koaxialen Antastung nutzen, stellen photogrammetrische Verfahren und die Streifenprojektion Triangulationsverfahren dar. Eine Übersicht zur Einordnung optischer Messverfahren sowie die möglichen Grundanordnungen der optischen Antastung sind in [11] anschaulich illustriert.

Für die 3D-Inspektion bedruckter Leiterplatten können prinzipiell die Verfahren Weißlichtinterferometrie, Lasertriangulation und Streifenlichtprojektion zum Einsatz kommen. Eine Gegenüberstellung der einzelnen Messprinzipien sowie der jeweiligen Grundanordnung des optischen Aufbaus ist in Abbildung 13 dargestellt.

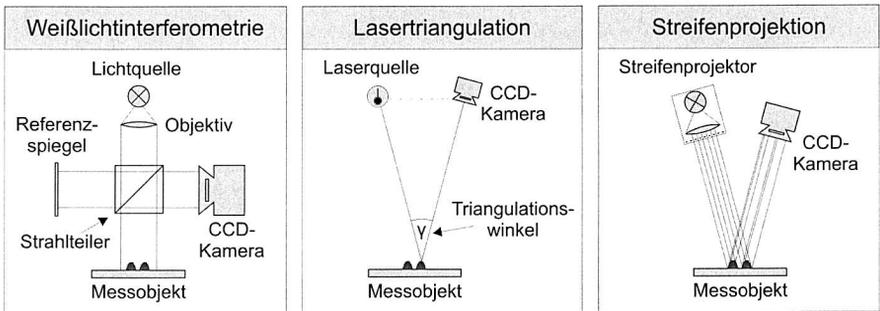


Abbildung 13: Grundlegende Messprinzipien zur optischen 3D-Messtechnik nach [11] [12]

Die Weißlichtinterferometrie stellt ein interferometrisches Messverfahren mit einer koaxialen Antastung des Messobjektes dar. Im Wesentlichen besteht ein Weißlichtinterferometer aus einer Lichtquelle mit einer Kohärenzlänge im μm -Bereich, einem Strahlteiler, einem Referenzspiegel und einer CCD-Kamera mit einem Objektivsystem. Das von der Lichtquelle ausgesandte Weißlicht wird an einem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Während einer der beiden Teilstrahlen auf den Referenzspiegel fällt und von dort reflektiert wird, passiert der andere Teilstrahl den Strahlteiler und fällt auf das Messobjekt. Das von dort reflektierte Licht wird wiederum vom Strahlteiler aufgenommen und in Richtung CCD-Kamera umgelenkt. Für den Fall, dass der zurückgelegte Weg der beiden Teilstrahlen identisch ist, kommt es zu einer konstruktiven Interferenz. Durch die Variation des Abstandes zwischen Referenzspiegel und Strahlteiler beziehungsweise Messobjekt und Strahlteiler können auf diese Weise Informationen über die dreidimensionale Struktur des Messobjektes gewonnen werden. Neben der sehr hohen Messauflösung liegt ein weiterer Vorteil der Weißlichtinterferometrie in der Vermeidung von Abschattungseffekten im Messbereich durch die koaxiale Antastung. Als nachteilig erweist sich hingegen die niedrige Messgeschwindigkeit, da es sich bei der Weißlichtinterferometrie um ein scannendes Verfahren handelt. [11] [12]

Sowohl die Lasertriangulation als auch die Streifenprojektion stellen Triangulationsverfahren auf Basis einer aktiven, strukturierten Beleuchtung dar [11] [42]. Bei der Lasertriangulation wird ein Laserstrahl auf ein Messobjekt projiziert. Das von dort reflektierte Licht wird unter einem Triangulationswinkel auf einer CCD-Kamera abgebildet. Die Höheninformation des Bildpunktes errechnet sich aus der Geometrie des optischen Aufbaus. Die Topographie des Messobjektes ergibt sich folglich aus der sequentiellen Anstastung des zu inspizierenden Bereiches durch den Laserstrahl. Eine anlagentechnische Erweiterung zur Erhöhung der Inspektionsgeschwindigkeit stellt die Abtastung des Messobjektes mittels einer Laserlinie dar, so dass alle relevanten Höheninformationen entlang der Laserlinie in einer einzigen Messung bestimmt werden können. Durch das Verfahren der Laserlinie entlang einer Achse lässt sich somit die dreidimensionale Struktur des Messobjektes ermitteln.

Im Gegensatz zur Lasertriangulation erfolgt bei der weißlichtbasierten Streifenprojektion eine flächenhafte Ausleuchtung des Messobjektes durch einen Streifenprojektor. Dieser projiziert unter einem Triangulationswinkel ein Streifenmuster mit einer ortsabhängigen Intensitätsverteilung auf das Messobjekt. Diese wird von einem flächenhaften Detektor aufgenommen und ausgewertet, so dass Topographieinformationen in dem kompletten Analysebereich in einem Inspektionsschritt erfasst werden können.

Die vorgestellten Verfahren der optischen 3D-Messtechnik weisen spezifische Vor- und Nachteile auf, die im Hinblick auf die dreidimensionale Inspektion bedruckter Leiterplatten grundsätzlich zu beachten sind. Während die Weißlichtinterferometrie eine sehr hohe Messauflösung bis in den Nanometerbereich bietet und aufgrund der konfokalen Anstastung keine Schattenbereiche aufweist, stellt die niedrige Messgeschwindigkeit aufgrund des scannenden Charakters des Messverfahrens ein erhebliches Defizit dar. Im Gegensatz dazu ermöglichen sowohl die Lasertriangulation als auch die weißlichtbasierte Streifenprojektion schnellere Inspektionsgeschwindigkeiten, zeigen aber das Problem der Abschattung von Bereichen, die durch die schräg einfallende Belichtung nicht ausreichend ausgeleuchtet werden können. Eine tabellarische Gegenüberstellung aller wesentlichen Vor- und Nachteile der einzelnen Messverfahren kann [11] entnommen werden.

3.1.2 Leitfaden zur Auswahl einer geeigneten Systemlösung

Die Bewertungskriterien, die in diesem Leitfaden zur Auswahl einer geeigneten Systemlösung für die 3D-Pastendruckinspektion zusammengestellt sind, ermöglichen eine umfassende Beurteilung aktuell verfügbarer Inspektionssysteme. Der Anwender des Leitfadens soll hierdurch in die Lage versetzt werden, alternative Inspektionslösungen ganzheitlich zu bewerten, so dass ihm eine fundierte Investitionsentscheidung auf Basis seiner spezifischen Anforderungen möglich ist. Eine Übersicht wesentlicher Bewertungskriterien ist in Abbildung 14 dargestellt. Grundsätzlich lassen sich diese in unter-

schiedliche Teilbereiche gruppieren. Neben technologischen und wirtschaftlichen Aspekten, welche die Gesamtanlage betreffen, stellen das Messobjekt, das Messverfahren sowie die Software des Pasteninspektionssystems weitere Teilbereiche zur Beurteilung dar.

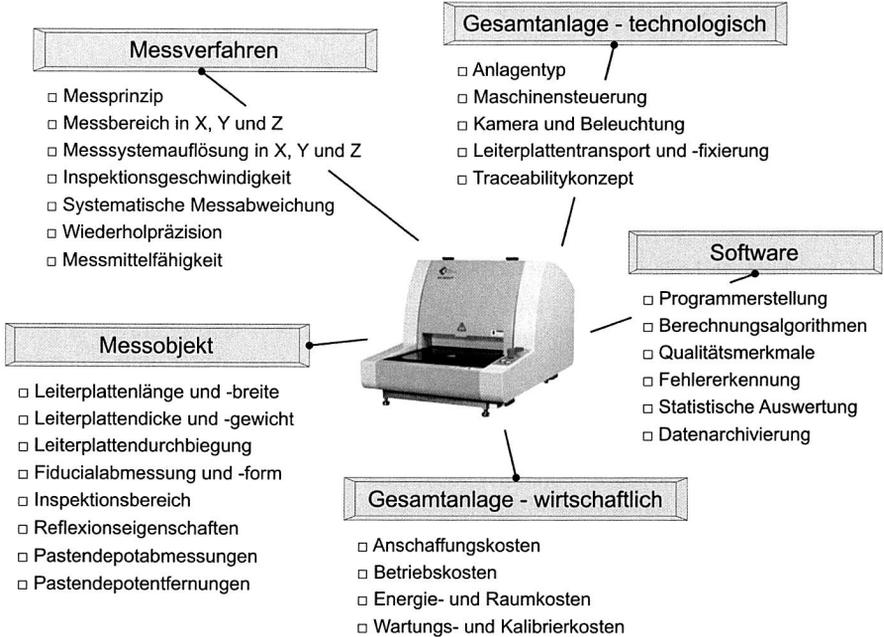


Abbildung 14: Bewertungskriterien für 3D-Pastendruckinspektionssysteme

Im Hinblick auf eine mögliche Anlageninvestition sind aus wirtschaftlicher Sicht alle relevanten Kostenfaktoren zu erfassen. Neben den Anschaffungs- sowie den Energie- und Raumkosten umfasst dies vor allem auch die Wartungs- und Kalibrierkosten, die beim Einsatz eines optischen Mess- und Prüfmittels in regelmäßigen Intervallen anfallen. Aus technologischer Sicht stellen der Anlagentyp, die eingesetzte Maschinensteuerung, das verwendete Kamera- und Beleuchtungssystem, der integrierte Leiterplattentransport, die Leiterplattenfixierung sowie das vorgesehene Traceabilitykonzept wesentliche Unterscheidungsmerkmale für Pasteninspektionssysteme dar. Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung von 3D-Pasteninspektionssystemen ergibt sich durch den Vergleich der Anlagen hinsichtlich der inspizierbaren Messobjekte. Einerseits existieren leiterplattenspezifische Restriktionen, welche die wesentlichen Leiterplatteeigenschaften wie Länge, Breite, Dicke, Gewicht und Durchbiegung betreffen. Andererseits bestehen auch Einschränkungen bezüglich des Inspektionsbereiches, der Reflexionseigen-

schaften der Oberfläche, der Abmessung und Form der Fiducials sowie der Abmessung und Anordnung der Pastendepots.

Den Teilbereichen Messverfahren und Software kommt im Rahmen der Beurteilung wesentliche Bedeutung zu, da die Leistungsfähigkeit von Pasteninspektionssystemen maßgeblich aus den spezifischen Merkmalen dieser beiden Teilbereiche resultiert. Bedingt durch das Messprinzip und den Aufbau des Messsystems ergeben sich Leistungsmerkmale des Messverfahrens, die zur Bewertung herangezogen werden können. Hierzu gehören die Messbereiche und Messsystemauflösungen ebenso wie die Inspektionsgeschwindigkeit, die systematische Messabweichung, die Wiederholpräzision sowie die Messmittelfähigkeit [107]. Hinsichtlich der Anlagensoftware sind das Erstellen von Inspektionsprogrammen, die eingesetzten Berechnungsalgorithmen zur Bestimmung der einzelnen Qualitätsmerkmale, das Erkennen unterschiedlicher Fehlerbilder sowie die Möglichkeiten der statistischen Auswertung und Datenarchivierung zu beurteilen.

3.2 Einsatz der 3D-Pastendruckinspektion im industriellen Umfeld

Im Hinblick auf den Einsatz einer 3D-Pastendruckinspektion des Schablonendruckprozesses sind zunächst einige Fragestellungen zu erörtern. Ausgehend vom Prinzip der Messdatenerfassung kommt vor allem der Bewertung der systematischen Messabweichung sowie der Ermittlung der Mess- und Prüfmittelfähigkeit des Inspektionssystems eine entscheidende Rolle zu. Basierend auf diesen Erkenntnissen können anschließend die Potenziale sowie die Randbedingungen eines Einsatzes im industriellen Umfeld abgeleitet werden. Dies umfasst neben einer Qualifizierung des Druckprozesses vor dem eigentlichen Serienanlauf auch die Nutzung des Inspektionssystems als Prüfmittel in der Serienfertigung.

3.2.1 Prinzip der Messdatenerfassung und -auswertung

Für alle Auswertungen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Druckversuche kommt ein Pasteninspektionssystem der Firma Koh Young zum Einsatz. Dieses basiert auf dem Prinzip der phasenmessenden Streifenprojektion, wobei messprinzipbedingte Abschattungseffekte dadurch vermieden werden können, dass das Messobjekt von zwei unterschiedlichen Richtungen beleuchtet wird. Neben der Darstellung des eingesetzten Inspektionssystems wird in Abbildung 15 die Geometrie der phasenmessenden Streifenprojektion sowie die sich einstellenden Streifenmuster von Beleuchtungseinheit und Messobjekt dargestellt.

Das Messobjekt wird durch eine Beleuchtungseinheit unter dem Projektionswinkel θ_p mit einem Lichtgitter beleuchtet, wobei dieses einen sinusförmigen Intensitätsverlauf mit der Periode P_0 aufweist. In Abhängigkeit der dreidimensionalen Struktur des Messob-

jektet bildet sich das projizierte Streifenmuster auf der Oberfläche ab. Dieses Streifenmuster wird von einer CCD-Kamera erfasst, so dass jedem Kamerapixel ein Intensitätswert zugeordnet werden kann. Im Anschluss daran wird sukzessive das Streifenmuster um ein Viertel der Periode verschoben und ein Abbild des jeweils projizierten Streifenmusters aufgenommen. Basierend auf den insgesamt vier Teilbildern sowie den Intensitätswerten jedes einzelnen Pixels lassen sich aus den geometrischen Verhältnissen der optischen Anordnung die Differenzhöhen in Bezug auf die Referenzebene bestimmen. Im Hinblick auf die theoretischen Grundlagen sowie die zu lösenden Gleichungssysteme sei auf die weiterführende Literatur verwiesen [61] [169] [171].

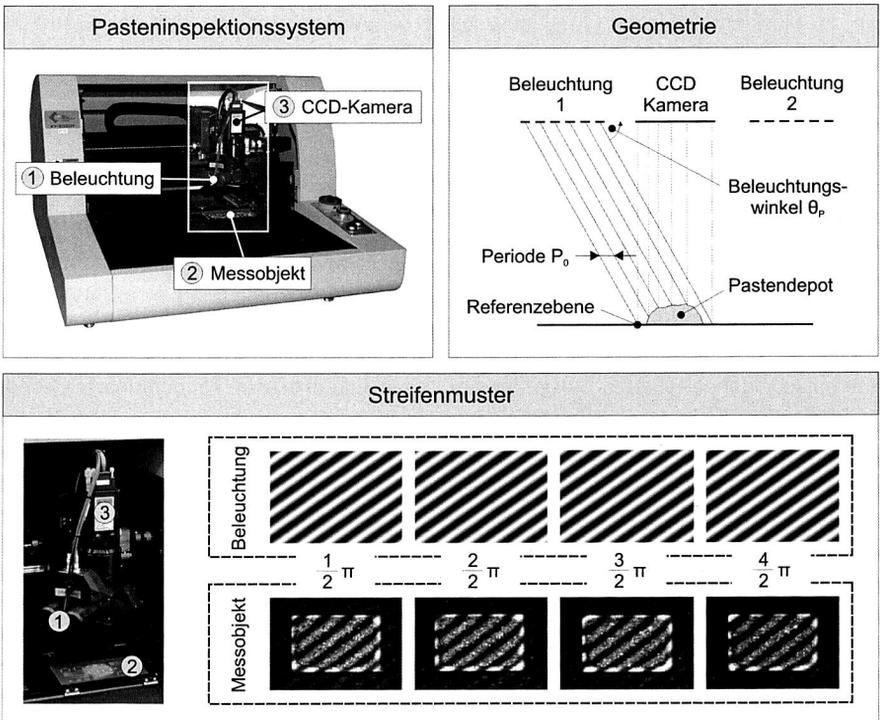


Abbildung 15: Geometrie der phasenmessenden Streifenprojektion sowie Streifenmuster von Beleuchtung und Messobjekt

Bedingt durch die strukturierte Beleuchtung des Messobjektes unter einem speziellen Beleuchtungswinkel kann es zu Abschattungseffekten im Messbereich kommen, so dass für die betreffenden Schattenbereiche keine Höheninformationen ermittelt werden können. Um die Auswirkungen möglicher Schattenbereiche auf das Messergebnis zu eliminieren, wird das Messobjekt mittels einer zweiten Beleuchtungseinheit unter einem

alternativen Beleuchtungswinkel vermessen. Aus den insgesamt acht Teilbildern lassen sich schließlich vollständig schattenfreie, dreidimensionale Rekonstruktionen des Messobjektes generieren. Auf Basis der ermittelten Höhenwerte für jedes einzelne Pixel des Messbereiches können die wesentlichen Kenngrößen eines Pastendepots, die relevanten Qualitätsmerkmale sowie mögliche Fehler des Druckprozesses bestimmt werden. Die prinzipielle Vorgehensweise zur Erfassung und Auswertung der Messdaten wird in Abbildung 16 dargestellt.

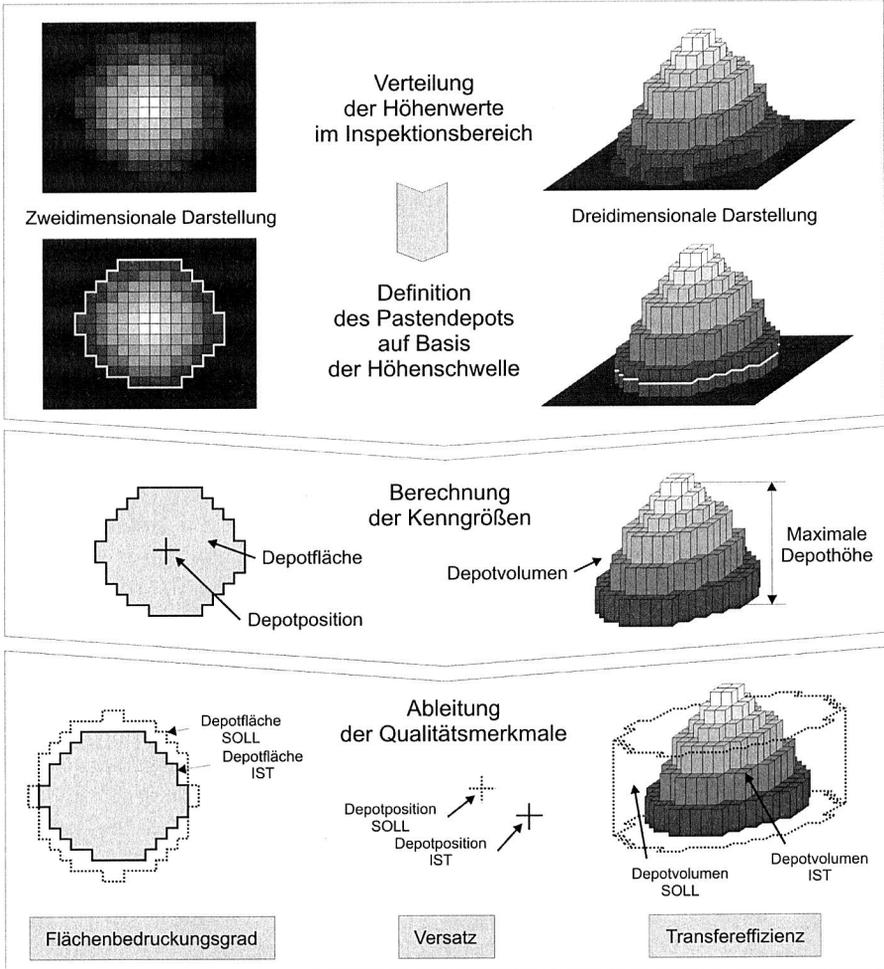


Abbildung 16: Vorgehensweise zur Erfassung und Auswertung der Messdaten des 3D-Pasteninspektionssystems

In einem ersten Schritt erfolgt zunächst die Festlegung einer Höhengschwelle, welche das zu charakterisierende Pastendepot von dessen Umgebung abgrenzt. Im Anschluss daran kann für das definierte Pastendepot das Volumen, die Fläche, die Position sowie die durchschnittliche und die maximale Höhe berechnet werden. Im weiteren Verlauf der Messdatenauswertung werden die errechneten Kenngrößen in Qualitätsmerkmale überführt.

Das beschriebene Vorgehen zur Erfassung und Auswertung der Messdaten liefert in Abhängigkeit der Einstellungen des optischen Messsystems unterschiedliche Inspektionsergebnisse. Eine wesentliche Einflussgröße auf das Messergebnis stellt die einstellbare Höhengschwelle dar, da durch diese definiert wird, welche Pixel des Inspektionsbereiches dem Pastendepot zugehörig sind und somit in die weitere Berechnung der Kenngrößen und Qualitätsmerkmale einbezogen werden. Des Weiteren hängt das Inspektionsergebnis indirekt auch von der Größe des Inspektionsbereiches ab, da das resultierende Nullniveau zur Bestimmung des Depotvolumens durch die Höhenwerte der Pixel im Randbereich beeinflusst wird. Neben diesen beiden Inspektionsparametern existieren weitere Einflussgrößen wie z.B. die Beleuchtungsintensität, die sich grundsätzlich auf das Messergebnis auswirken. Im Rahmen vergleichender Untersuchungen sind diese prinzipiell konstant zu halten, um eine Beeinflussung des Messergebnisses ausschließen zu können.

3.2.2 Nachweis der Prüf- und Messmittelfähigkeit

Im Hinblick auf einen effizienten Einsatz von Prüf- und Messmitteln in der Fertigung stellt der Fähigkeitsnachweis eine wichtige Voraussetzung dar. Nach [34] existieren mehrere Verfahren zum Nachweis der Eignung eines Mess- und Prüfmittels, wobei sich die einzelnen Verfahren hinsichtlich ihrer jeweiligen Zielsetzung unterscheiden. Für den Eignungsnachweis des im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Pasteninspektionssystems sind prinzipiell die Bestimmung der systematischen Messabweichung und der Wiederholpräzision nach Verfahren 1 sowie der Wiederholpräzision ohne Bedienerinfluss nach Verfahren 3 von Interesse.

Die Bestimmung der systematischen Messabweichung, auch Bias genannt, kann grundsätzlich gemäß des in [34] erläuterten Verfahrens 1 erfolgen. Dieses sieht vor, ein Normal beziehungsweise ein Referenzteil mit einem bekannten Referenzwert mehrfach mit Hilfe des Messmittels zu vermessen. Die resultierende systematische Messabweichung ergibt sich aus dem Betrag der Differenz des arithmetischen Mittels der einzelnen Messwerte und dem Referenzwert.

$$|B| = |\bar{x}_g - \bar{x}_m| \quad \text{mit} \quad \bar{x}_g = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Gl. 3}$$

| | |
|---------------|---|
| B_i : | Systematische Messabweichung |
| \bar{x}_g : | Arithmetischer Mittelwert der Einzelmessungen |
| \bar{x}_m : | Referenzwert |
| x_i : | Messwert der Einzelmessung |
| n : | Anzahl der Messungen |

Bei der Ermittlung der systematischen Messabweichung des Pasteninspektionssystems stellt es sich als problematisch dar, dass für die Messgröße Pastendepotvolumen kein geeignetes Normal existiert, von dem der zugehörige Referenzwert bekannt ist. Aus diesem Grund ermitteln Anlagenhersteller die Fähigkeit ihrer Inspektionssysteme mit Hilfe eines homogenen Normals mit bekannten geometrischen Abmessungen und gleichmäßigen Reflexionseigenschaften. Typischerweise handelt es sich dabei um einen idealen Metallquader mit definierten Abmessungen, der sich auf einem planaren Untergrund befindet. Pastendepots weisen hingegen variierende Höhen und unterschiedliche Reflexionseigenschaften auf, wodurch die Bestimmung des Volumens im Vergleich zu einem homogenen Normal erheblich erschwert wird.

Eine alternative Möglichkeit zur Bestimmung der systematischen Messabweichung auf Basis eines homogenen Normals stellt die Erzeugung eines geeigneten Referenzteiles dar. Hierfür ist das Volumen eines Pastendepots mit einer ausreichend hohen Genauigkeit zu bestimmen, so dass der ermittelte Wert als Referenzwert herangezogen werden kann. Zur Ermittlung des Referenzwertes kommt ein hochgenaues Laserscanningmikroskop der Firma Keyence zum Einsatz.

Im Anschluss an die Ermittlung der systematischen Messabweichung können die Qualitätsfähigkeitskenngrößen für das Pasteninspektionssystem errechnet werden [34]. Neben der Standardabweichung der Messwertreihe aus den Wiederholmessungen ist hierfür die Vorgabe einer Toleranzfeldbreite notwendig.

$$c_g = \frac{0,2 * T}{6 * s_g} \quad \text{mit} \quad s_g = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_g)^2} \quad \text{Gl. 4}$$

| | |
|---------|--------------------------------------|
| c_g : | Messmittelfähigkeit |
| T : | Toleranzfeldbreite |
| s_g : | Standardabweichung der Messwertreihe |

$$c_{gk} = \frac{0,1 * T - |B_i|}{3 * s_g} \quad \text{Gl. 5}$$

| | |
|------------|-------------------------------|
| c_{gk} : | Kritische Messmittelfähigkeit |
|------------|-------------------------------|

In Abbildung 17 ist die Vorgehensweise zur Bestimmung der systematischen Messabweichung sowie der kritischen Messmittelfähigkeit für das Pasteninspektionssystem exemplarisch am Beispiel eines Pastendepots des Aperturtyps BGA1,0 illustriert. Die Toleranzfeldbreite resultiert hierbei aus den Toleranzvorgaben für das aufzutragende Pastenvolumen, die typischerweise $\pm 50\%$ bezogen auf das Nominalvolumen bzw. das Volumen der Schablonenapertur betragen. Auf Basis der Schablonendicke von $120\ \mu\text{m}$ und dem Aperturdurchmesser von $420\ \mu\text{m}$ ergibt sich für das Pastendepot des Aperturtyps BGA1,0 ein Aperturvolumen, das unter den genannten Toleranzvorgaben exakt der Toleranzfeldbreite entspricht. Aufgrund der moderaten Toleranzvorgaben ergibt sich eine sehr hohe kritische Messmittelfähigkeit mit einem Wert von 4,66. Das ausreichende Potenzial des Pasteninspektionssystems zeigt sich zudem durch eine fiktive Anpassung der Toleranzvorgaben auf $\pm 30\%$. Diese hat zwar ein Absinken der kritischen Messmittelfähigkeit zur Folge, mit einem Wert von 1,99 liegt die kritische Messmittelfähigkeit jedoch noch weit über dem üblicherweise geforderten Wert von 1,33.

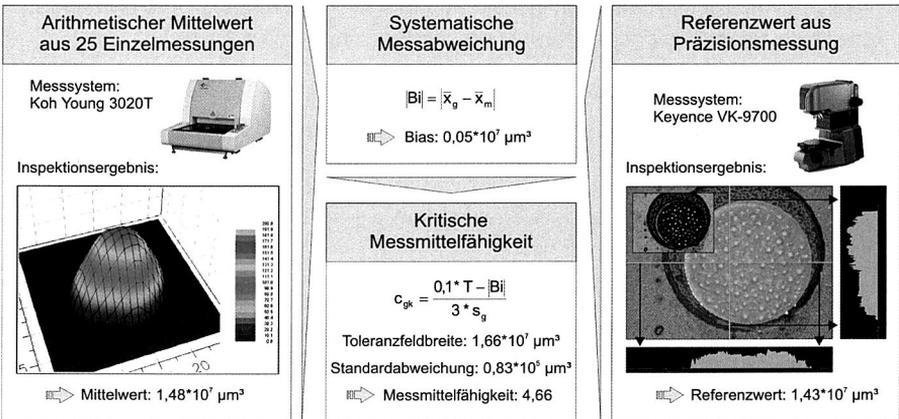


Abbildung 17: Vorgehensweise zur Bestimmung der systematischen Messabweichung sowie der Messmittelfähigkeit des Pasteninspektionssystems am Beispiel eines Pastendepots des Aperturtyps BGA1,0

Dem Nachweis der Messmittelfähigkeit anschließend hat das Verfahren 3 die Bestimmung der Wiederholpräzision des Prüfmittels zur Zielsetzung. Als Sonderfall des Verfahrens 2 wird bei Verfahren 3 davon ausgegangen, dass grundsätzlich kein Bedieneinfluss vorliegt. Hinsichtlich der Auswertung können die Mittelwert-Spannweiten-Methode (ARM: Average and Range Method), die Varianzanalyse (ANOVA: Analysis of Variance) oder die Mittelwert-Standardabweichungsmethode (Differenzenmethode) zum Einsatz kommen. Zur Beurteilung eines automatischen Messsystems eignet sich besonders das Modell der balancierten einfachen Varianzanalyse mit Zufallskomponenten, das einen Spezialfall der Standardabweichungsmethode darstellt. [34]

Die Bestimmung der Wiederholpräzision erfolgt grundsätzlich mehrstufig. Basierend auf den Einzelmessungen der unterschiedlichen Pastendepots werden zunächst der Mittelwert und anschließend die Summe der quadratischen Abweichungen ermittelt. Diese werden daraufhin zu einer Gesamtsumme aufaddiert. Basierend auf der ermittelten Gesamtsumme erfolgt die Berechnung der Messmittelstreuung sowie der Streuung des Messsystems. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Messsystemstreuung, die bei automatischen Messsystemen der Wiederholpräzision bezogen auf die Referenzgröße entspricht, ist in Abbildung 18 dargestellt.

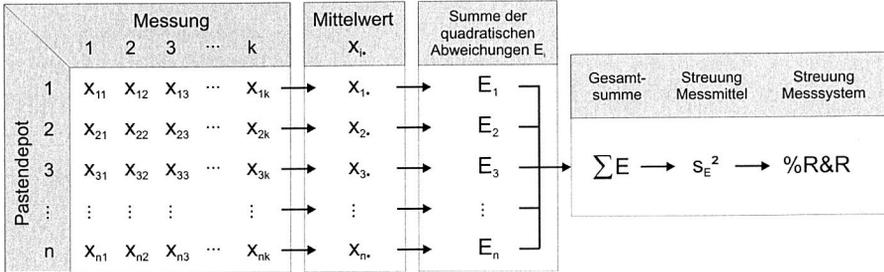


Abbildung 18: Vorgehensweise zur Bestimmung der Messsystemstreuung des Pasteninspektionssystems

Die der Bestimmung der Messsystemstreuung des Pasteninspektionssystems zugrunde liegenden Formeln sind in den folgenden Gleichungen dargestellt und erläutert. Für die Bestimmung der Messsystemstreuung des Pasteninspektionssystems kommt das in Abbildung 70 dargestellte Versuchslayout sowie eine strukturierte Leiterplatte zum Einsatz. Das Versuchslayout beinhaltet ein repräsentatives Aperturspektrum, so dass auch eine aperturspezifische Wiederholpräzision ermittelt werden kann.

$$\sum E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (X_{ij} - X_{i.})^2 \tag{Gl. 6}$$

$\sum E$: Gesamtsumme der quadratischen Abweichungen

X_{ij} : Messwert der Einzelmessung j des Pastendepots i

$X_{i.}$: Mittelwert aller Einzelmessungen des Pastendepots i

k: Anzahl der Einzelmessungen

n: Anzahl der Pastendepots

$$s_E^2 = \frac{1}{n * (k - 1)} \sum E \tag{Gl. 7}$$

s_E^2 : Streuung des Messmittels

$$\%R \& R = \%EV = \frac{EV}{RF} * 100\% = \frac{6 * s_E}{T} * 100\% \quad \text{Gl. 8}$$

%R & R: Streuung des Messsystems

%EV : Wiederholpräzision bezogen auf die Referenzgröße

EV : Wiederholpräzision

RF : Referenzgröße

T : Toleranz

Die Ermittlung der Messsystemstreuung basiert auf 20 Einzelmessungen sowie einer aperturspezifischen Anzahl an Pastendepots. In Tabelle 6 sind die errechneten Messsystemstreuungen für die einzelnen Aperturtypen dargestellt. Die Referenzgröße ergibt sich dabei aus der Multiplikation der Toleranz mit der Bezugsgröße, die dem Volumen der Schablonenapertur entspricht.

| | BGA | | | CR | | | | | QFP | |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 0201 | 0402 | 0603 | 0805 | 1206 | 0,4 | 0,5 |
| Anzahl Messungen | 20 | | | | | | | | | |
| Anzahl Pastendepots | 300 | | | 72 | | | | | 300 | |
| ΣE in μm^3 | 2,81 $*10^{12}$ | 3,95 $*10^{12}$ | 6,43 $*10^{12}$ | 6,00 $*10^{11}$ | 3,54 $*10^{12}$ | 5,67 $*10^{12}$ | 2,85 $*10^{13}$ | 5,81 $*10^{13}$ | 8,02 $*10^{13}$ | 1,54 $*10^{13}$ |
| Anzahl Freiheitsgrade | 5700 | | | 1368 | | | | | 5700 | |
| s_E^2 in μm^3 | 4,92 $*10^8$ | 6,93 $*10^8$ | 1,13 $*10^9$ | 4,39 $*10^8$ | 2,59 $*10^9$ | 4,14 $*10^9$ | 2,08 $*10^{10}$ | 4,25 $*10^{10}$ | 1,41 $*10^{10}$ | 2,70 $*10^9$ |
| Toleranz in % | 50 | | | | | | | | | |
| Bezugsgröße in μm^3 | 2,35 $*10^6$ | 3,68 $*10^6$ | 5,29 $*10^6$ | 1,26 $*10^7$ | 5,76 $*10^7$ | 8,64 $*10^7$ | 1,56 $*10^8$ | 2,69 $*10^8$ | 2,78 $*10^7$ | 3,44 $*10^7$ |
| RF in μm^3 | 1,18 $*10^6$ | 1,84 $*10^6$ | 2,65 $*10^6$ | 6,30 $*10^6$ | 2,88 $*10^7$ | 4,32 $*10^7$ | 7,80 $*10^7$ | 1,34 $*10^8$ | 1,39 $*10^7$ | 1,72 $*10^7$ |
| %R&R | 11,32 | 8,60 | 7,62 | 1,99 | 1,06 | 0,89 | 1,11 | 0,92 | 5,13 | 1,81 |

Tabelle 6: Messsystemstreuungen des 3D-Pasteninspektionssystems für unterschiedliche Pastendepottypen

Wie aus Tabelle 6 ersichtlich ist, liegen alle Messsystemstreuungen mit Ausnahme des Aperturtyps BGA0,5 unterhalb von 10 %, so dass für diese Aperturtypen das Inspektionssystem ohne Einschränkung geeignet ist. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem Grenzwert von 10 % für die Messsystemstreuung nach [34] um eine weiche Grenze handelt und von Großkonzernen auch Grenzwerte von 20 % zum Einsatz kommen, ist die resultierende Messsystemstreuung für den Aperturtyp BGA0,5 mit 11,32 % prinzipiell als unkritisch zu bezeichnen.

3.2.3 Qualifizierung des Schablonendruckprozesses vor dem Serienanlauf

Der Einsatz eines 3D-Pastenspektionssystems ermöglicht die Prozessqualifizierung für den Schablonendruck vor dem Serienanlauf im Rahmen einer vorläufigen Prozessfähigkeitsstudie. Innerhalb der statistischen Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation nach [35] werden bei der vorläufigen Prozessfähigkeitsanalyse wesentliche Einflussgrößen wie die eingesetzten Fertigungsmaterialien und die eingestellten Prozessparameter berücksichtigt, wohingegen Umwelteinflüsse, die in der Regel einen langfristigen Wirkcharakter haben, unberücksichtigt bleiben. Neben der Eignung der eingesetzten Fertigungsmaterialien wie Druckschablone, Lotpaste und Leiterplatte sowie der eingestellten Prozessparameter wie Raketkraft, Rakelgeschwindigkeit und Trenngeschwindigkeit lassen sich im Rahmen der vorläufigen Prozessfähigkeitsstudie auch wichtige Fragestellungen im Hinblick auf den späteren Fertigungsprozess beantworten. Neben der Häufigkeit der Schablonenunterseitenreinigung lässt sich auf diese Weise auch die Wartezeit der Lotpaste auf der Schablone ermitteln, bevor das gesamte Pastenreservoir wieder gewalzt werden muss.

3.2.4 Nutzung der 3D-Pastendruckinspektion als Prüfmittel

Die Integration eines 3D-Pastendruckinspektionssystems in eine Fertigungslinie zur Herstellung elektronischer Baugruppen ermöglicht die Prüfung aller wesentlicher Qualitätsmerkmale einer bedruckten Leiterplatte. Auf diese Weise kann einerseits die Fertigungsqualität der bedruckten Leiterplatten sichergestellt werden, bevor diese einer vermeintlichen Wertschöpfung in den Folgeprozessen unterzogen wird. Andererseits lässt sich auch die Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses jederzeit bestimmen, so dass bei auftretenden Abweichungen korrigierend in den Schablonendruckprozess eingegriffen werden kann.

Im Wesentlichen gliedert sich die 3D-Pastendruckinspektion in vier Teilschritte. An erster Stelle steht die Erfassung der qualitätsrelevanten Kenngrößen für jedes einzelne Pastendepot auf der Leiterplatte. Hierbei handelt es sich um das Depotvolumen, die Depotfläche, die Depotlage auf der Leiterplatte, die durchschnittliche Depothöhe sowie die maximale Depothöhe. Da auf Basis dieser Informationen alleine zunächst keine Qualitätsaussagen über das betreffende Pastendepot getroffen werden können, erfolgt im Anschluss die Ableitung bezogener Qualitätsmerkmale. Hierunter ist die Normierung der ermittelten Kenngrößen auf die schablonen- und aperturspezifischen Gegebenheiten zu verstehen. Auf Basis der einzelnen Qualitätsmerkmale Transfereffizienz, Flächenbedruckungsgrad, Versatz, durchschnittliches Depothöhenverhältnis sowie maximales Depothöhenverhältnis kann im Anschluss der Vergleich des Qualitätsmerkmals mit den festgesetzten Prüfgrenzen durchgeführt und abschließend eine Prüfentscheidung gefällt werden.

Von zentraler Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Festlegung der Prüfgrenzen für die einzelnen Qualitätsmerkmale. Diese Aufgabe obliegt im Unternehmen in der Regel der Qualitätsplanung, kann jedoch sinnvoll nur unter Einbeziehung entsprechender Prozesstechnologen durchgeführt werden. Als problematisch erweist sich an dieser Stelle, dass beinahe kein Erfahrungswissen vorliegt, auf das bei der Festlegung der Prüfgrenzen zurückgegriffen werden kann. Im Rahmen einzelner Veröffentlichungen werden zwar Toleranzgrenzen für das Qualitätsmerkmal Transfereffizienz genutzt, in allen Fällen fehlt jedoch eine fundierte Begründung für die entsprechende Festlegung [83] [150]. Das Fehlen von Wissen ist vor allem darauf zurückzuführen, dass geeignete Pasteninspektionssysteme zur Erfassung aller relevanten Qualitätsmerkmale einer bedruckten Leiterplatte erst seit wenigen Jahren im Markt verfügbar sind.

Neben der Nutzung der 3D-Pastendruckinspektion als Prüfmittel kommt der Festlegung der Prüfgrenzen, also der unteren und oberen Toleranzgrenze für jedes einzelne Qualitätsmerkmal, auch in der Prozessfähigkeitsbeurteilung für den Schablonendruckprozess wesentliche Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund sei an dieser Stelle auf Kapitel 6 dieser Arbeit verwiesen, in dem unter anderem die Prüfgrenzfestlegung für alle Qualitätsmerkmale thematisiert wird. Im Hinblick auf eine sinnvolle Festlegung der Prüfgrenzen für das Qualitätsmerkmal Transfereffizienz sei an dieser Stelle zudem auf Kapitel 5.3 verwiesen. Die dort vorgestellte Untersuchung hat die Bereitstellung optimaler Lotpastenvolumina im Schablonendruckprozess zum Ziel und kann als Grundlage herangezogen werden, um geeignete Prüfgrenzen für das Qualitätsmerkmal Transfereffizienz abzuleiten.

3.3 Technologisch-wirtschaftliche Bewertung der 3D-Pastendruckinspektion

Durch die Verfügbarkeit geeigneter Systeme zur 3D-Pastendruckinspektion existiert die Möglichkeit, die Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses ganzheitlich zu erfassen, zu visualisieren und nachhaltig zu verbessern. Aus technologischer Sicht bietet der Einsatz der 3D-Pastendruckinspektion enormes Optimierungspotenzial für den Schablonendruckprozess und folglich auch für die gefertigten Baugruppen. Gleichwohl ist im betrieblichen Entscheidungsprozess ein Abwägen der technologischen Vorteile sowie der betriebswirtschaftlichen Kosten durchzuführen, um eine potenzielle Investitionsentscheidung zu motivieren [129]. Schließlich sind Anschaffung und Betrieb eines derartigen Inspektionssystems mit erheblichen Kosten verbunden.

Im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsanlagen tragen Inspektionssysteme zur 3D-Pastendruckinspektion prinzipiell nicht zur Wertschöpfung der elektronischen Baugruppe bei. Vor diesem Hintergrund kann der Nachweis der Wirtschaftlichkeit einer möglichen Investition nur über das Potenzial zur Kosteneinsparung geführt werden, das durch den Einsatz in der Fertigung erschlossen werden kann. Im Rahmen einer modifi-

zierten Rentabilitätsrechnung ist dabei die Nettoeinsparung, die sich durch den Einsatz der 3D-Pastendruckinspektion ergibt, in Relation zu dem aufzuwendenden Kapitaleinsatz zu setzen [53]. Übersteigt die Nettoeinsparung den Kapitaleinsatz, so ist aus rein monetärer Sicht eine Investition prinzipiell zu befürworten. [155]

$$\text{Rentabilität} = \frac{\text{Nettoeinsparung}}{\text{Kapitaleinsatz}} \quad \text{Gl. 9}$$

Die Quantifizierung der Nettoeinsparung erweist sich hinsichtlich der Prognose der Rentabilität einer möglichen Investition jedoch als äußerst komplex, da sie von vielen, größtenteils dynamischen Einflussgrößen abhängt. Alle wesentlichen Bestandteile zur Ermittlung von Nettoeinsparung und Kapitaleinsatz sowie wesentliche Einflussgrößen sind in Abbildung 19 dargestellt.

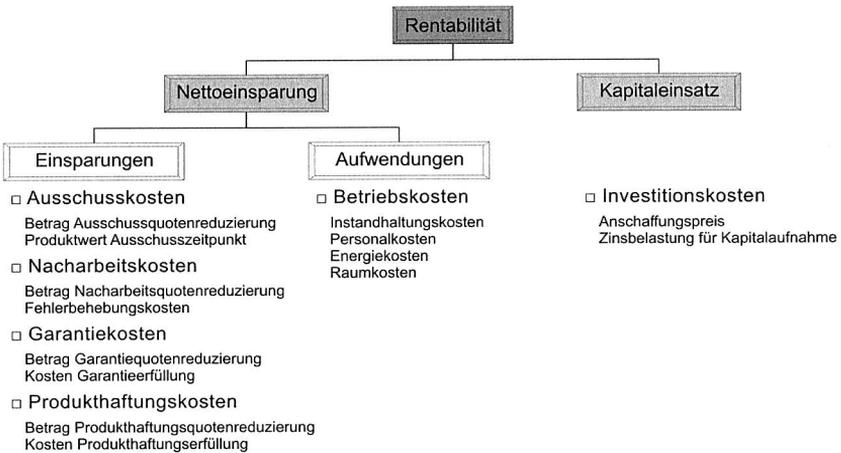


Abbildung 19: Rentabilitätsermittlung auf Basis von Nettoeinsparung und Kapitaleinsatz

Im Wesentlichen beeinflussen Fertigungsstückzahlen, Baugruppenkosten sowie Fehlerhäufigkeit, Fehlerverteilung und Fehlerart in einer Fertigung die Höhe der potenziellen Nettoeinsparung [129]. Grundsätzlich lässt sich eine Nettoeinsparung durch eine Reduzierung der Ausschusskosten, der Nacharbeitskosten sowie der Produkthaftungsbeziehungsweise Garantiekosten erzielen. Der Nettoeinsparung steht der Kapitaleinsatz gegenüber, der für die Anschaffung des Pasteninspektionssystems aufgewendet werden muss. Neben den initialen Anschaffungskosten sowie der aufzubringenden Zinsbelastung verursacht der Betrieb des 3D-Pasteninspektionssystems auch laufende Kosten, die bei der Bestimmung der Nettoeinsparung ebenfalls berücksichtigt werden

müssen. Hierunter fallen Raum- und Energiekosten ebenso wie Aufwendungen für die Instandhaltung sowie die Betreuung des 3D-Pasteninspektionssystems.

Neben den monetären Beweggründen einer möglichen Investition existiert aber auch eine Vielzahl sogenannter imponderabler Faktoren. Unter diesen werden alle Faktoren zusammengefasst, die zwar wertmäßig nicht quantifiziert werden können, bei einer Investitionsentscheidung in jedem Fall aber zu berücksichtigen sind [155]. Im Wesentlichen lassen sich dabei folgende Faktoren identifizieren:

- ❑ Einbindung des 3D-Pastendruckinspektionssystems in das Rückverfolgbarkeitskonzept des Unternehmens mit dem Ziel der Steigerung der Traceability-Tiefe
- ❑ Nutzung des 3D-Pasteninspektionssystems zum Nachweis der Prozessfähigkeit des Schablonendrucks vor Serienanlauf und während der Serienfertigung im Rahmen des Total Quality Management
- ❑ Aneignung eines vertieften Prozesswissens zum Schablonendruck durch den Einsatz der 3D-Pastendruckinspektion
- ❑ Reduzierung von Prozessanlaufzeiten sowie Prozessoptimierung hinsichtlich minimaler Zykluszeiten und minimalem Verbrauch von Reinigungsmedien und Reinigungstüchern im Druckprozess
- ❑ Begegnung steigender Kundenforderungen nach höheren Qualitätsstandards bei reduzierten Fertigungskosten, Sicherung und Ausbau der Konkurrenzfähigkeit sowie Nutzung des 3D-Pastendruckinspektionssystems als Instrumentarium zur Akquise neuer Fertigungsaufträge

Im Hinblick auf eine fundierte Investitionsentscheidung ist also neben den monetär bewertbaren Faktoren eine Reihe von Einflussgrößen zu berücksichtigen, die nur sehr schwer oder teilweise gar nicht quantifiziert werden kann. Vor diesem Hintergrund ist für die Vorbereitung einer Investitionsentscheidung die Zusammenarbeit zwischen operativen und strategischen Bereichen in einem Unternehmen notwendig. Nur so kann sichergestellt werden, dass sich auch die in der Planungsphase einer Investitionsentscheidung prognostizierte Rentabilität tatsächlich einstellt.

4 Eigenschaften und Potenziale innovativer Druckschablonentechnologien

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Komplexität des Druckprozesses in der Elektronikproduktion kommt auch der zum Auftragen von Lotpaste auf eine Leiterplatte eingesetzten Druckschablone eine gesteigerte Bedeutung zu. Diese resultiert aus der Anforderung, einen zuverlässigen Transfer stark variierender Pastenvolumen für ein breites Spektrum an unterschiedlichen Bauelementtypen und -formen auf die Leiterplatte zu ermöglichen. Die Einstellung des bauelementspezifischen Pastenvolumens erfolgt dabei durch die Definition der jeweiligen Aperturöffnungsfläche sowie der Schablonendicke. Aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten sind dem Pastentransfer aber Grenzen gesetzt, so dass hinsichtlich der Schablonengestaltung wichtige Designregeln eingehalten werden müssen. Diese sollen das zuverlässige Füllen der Aperturen mit Lotpaste sowie das zuverlässige Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur ermöglichen.

Die wesentlichen Designrichtlinien, die bei der Gestaltung von Druckschablonen zu berücksichtigen sind, beschreibt die Richtlinie IPC-7525A Stencil Design Guidelines [118]. Das Aspektverhältnis (Aspect Ratio), welches sich aus dem Verhältnis von minimaler Aperturabmessung und Schablonendicke ergibt, sollte einen Wert von 1,5 nicht unterschreiten, um ein zuverlässiges Befüllen der Aperturen mit Lotpaste sicherstellen zu können. Neben dem Aspektverhältnis spielt das Flächenverhältnis (Area Ratio) eine entscheidende Rolle bei der Schablonengestaltung, da hierdurch das Auslösen der Lotpaste aus der Apertur maßgeblich beeinflusst wird. Das Flächenverhältnis, das die Relation von Aperturöffnungsfläche zu Aperturwandungsfläche beschreibt, sollte beispielsweise für eine lasergeschnittene Edelstahlschablone mindestens 0,66 betragen, während für alternative Fertigungstechnologien abweichende Flächenverhältnisse empfohlen werden. So sollte eine geätzte Druckschablone ein Flächenverhältnis von mindestens 0,9 und eine galvanisch aufgebaute Druckschablone ein Flächenverhältnis von mindestens 0,5 aufweisen. Da neben den geometrischen Verhältnissen der Schablonenaperturen aber auch die Beschaffenheit der Lotpaste, und hier vor allem die Größe des Metallpulvers, das Füllen und Auslösen der Lotpaste beeinflusst, findet dieser Sachverhalt in der sogenannten Körnerregel Berücksichtigung. Gemäß Richtlinie soll die Aperturöffnung Platz für mindestens vier bis fünf Pulverpartikel bieten. Die beschriebenen Designrichtlinien für Druckschablonen der IPC-7525A sind in Abbildung 20 visualisiert. Auf Basis der Inhalte der IPC-7525A sollen Anwender der Richtlinie in die Lage versetzt werden, Schablonenlayouts für zuverlässige Druckprozesse abzuleiten.

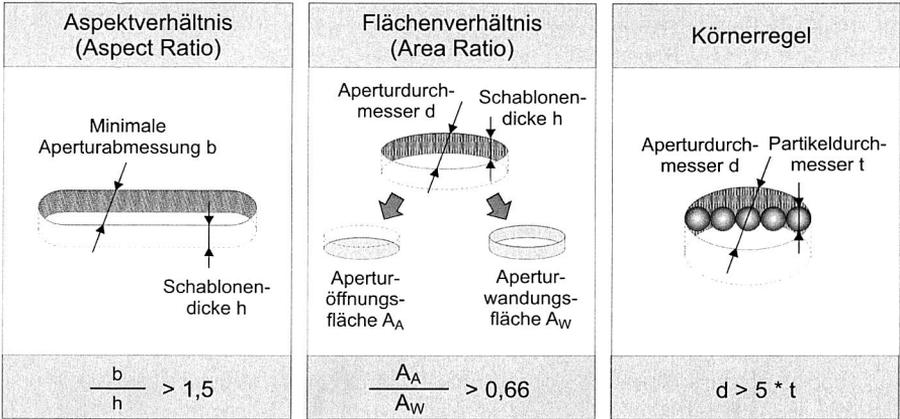


Abbildung 20: Designrichtlinien für Druckschablonen gemäß IPC-7525A [118]

Hinsichtlich der Festlegung der einzelnen Grenzwerte existiert heutzutage jedoch aus mehreren Gründen erhebliches Optimierungspotenzial. Einerseits sind die schablonenspezifischen Richtwerte für das Flächenverhältnis kritisch zu hinterfragen, weil diese lediglich die Herstellungstechnologie berücksichtigen. Während für lasergeschnittene Schablonen ein Flächenverhältnis von mindestens 0,66 empfohlen wird, liegen die Werte für eine geätzte Schablone bei mindestens 0,9 und für eine galvanisch aufgebaute Schablone bei mindestens 0,5. Der Tatsache, dass auch das verwendete Schablonenmaterial sowie das Nachbearbeitungsverfahren das Auslöseverhalten der Lotpaste beeinflusst, wird hingegen keine Rechnung getragen. Dies kann zur Folge haben, dass das realisierbare Flächenverhältnis bei lasergeschnittenen Schablonen unter Umständen auch bis zu 0,5 betragen kann, während das druckbare Flächenverhältnis galvanisch aufgebaute Schablonen teilweise auch lediglich 0,66 sein kann. Andererseits führen technologische Optimierungen auf dem Gebiet der Schablonenmaterialien, der Herstellungstechnologien sowie der Nachbearbeitungsverfahren dazu, dass die Leistungsfähigkeit einzelner Schablonentechnologien in den vergangenen Jahren stark zugenommen hat.

Während die dargestellten Designrichtlinien Aspektverhältnis, Flächenverhältnis und Körnerregel die physikalische Grenze der Druckbarkeit beschreiben und ihre Einhaltung das zuverlässige Füllen der Aperturen sowie das sichere Auslösen der Lotpaste sicherstellen sollen, existieren weitere Empfehlungen für die Gestaltung von Druckschablonen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um folgende Vorgaben [118]:

- Abrunden von rechteckigen Aperturrecken zur Optimierung des Auslöseverhaltens der Lotpaste

- ❑ Teilen von großen Aperturen zur Vermeidung des Ausschöpfens von Lotpaste durch eine eintauchende Rakel während des Befüllens der Aperturen
- ❑ Reduzierung der Aperturabmessungen im Vergleich zu den Padabmessungen auf der Leiterplatte zum Ausgleich der Positioniergenauigkeiten des Schablonendruckers
- ❑ Anpassung der Aperturgeometrie an die spezifischen Bauelementformen (Home Plate-Design, Bow Tie-Design, Oblong-Design, MELF-Design, QFN-Design, Intrinsic Reflow-Design)

Die genannten Empfehlungen stellen alternative Möglichkeiten der Aperturgestaltung dar. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der nachfolgenden Prozessschritte Bestücken und Reflowlöten von besonderer Bedeutung. Potenzielle Baugruppenfehler wie Lotperlen oder Lotbrücken, die während dem Reflowlöten auftreten, sollen durch eine spezifische Anpassung der Aperturgeometrien vermieden werden. Im Fokus der Empfehlungen steht somit nicht die Sicherstellung der prinzipiellen Druckbarkeit, sondern die Minimierung möglicher Prozessfehler innerhalb der SMT-Baugruppenfertigung.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden zunächst alternative Schablonentechnologien gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer wesentlichen Eigenschaften verglichen, bevor anschließend die Einsatzmöglichkeiten von Stufenschablonen zur Erhöhung der Fertigungsflexibilität untersucht und bewertet werden. Die grundlegenden Analysen zur Darstellung der Eigenschaften und Potenziale nanobeschichteter Druckschablonen zur Optimierung des Schablonendruckprozesses vervollständigt Kapitel vier der Arbeit.

4.1 Gegenüberstellung alternativer Schablonentechnologien

Im Wesentlichen können konventionelle SMT-Druckschablonen hinsichtlich der eingesetzten Herstellungstechnologie, dem verwendeten Schablonenmaterial sowie dem abschließenden Nachbearbeitungsverfahren unterschieden werden. Prinzipiell kommen für die Schablonenherstellung die Verfahren Ätzen, Laserschneiden und Galvanoformen zum Einsatz [2] [23] [25] [49] [70] [72] [73] [77] [92] [96]. Während zu Beginn der Oberflächenmontagetechnik in der Elektronikproduktion das Ätzen das bevorzugte Verfahren zur Schablonenherstellung war, hat diese Herstellungstechnologie in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung verloren. Heutzutage werden überwiegend lasergeschnittene und galvanogeformte Druckschablonen eingesetzt, wobei ein Großteil des Marktanteils auf lasergeschnittene Schablonen entfällt. Das Spektrum der verwendeten Schablonenmaterialien reicht von herkömmlichen Edelmetallen mit den weitaus größten Marktanteilen über Nickel und Messing bis hin zu Polymeren oder speziellen Papierwerkstoffen [49] [64] [86]. Als Nachbearbeitungsverfahren werden typischerweise

das mechanische Bürsten, das mechanische Polieren, das Elektropolieren sowie das Beschichten des Trägermaterials mit Nickel eingesetzt [25] [64] [86] [87].

Neben den konventionellen Schablontechnologien, welche auf einer einheitlichen Basisdicke des Schablonenblechs basieren, haben sich aufgrund der gestiegenen Anforderungen an den Druckprozess innovative Schablonenlösungen für spezifische Fragestellungen etabliert. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Stufenschablonen zum Auftragen stark variierender Lotpastenvolumen und Reliefschablonen mit Aussparungen auf der Leiterplattenseite der Schablone [24] [26] [29] [52].

4.1.1 Bewertungskriterien für Druckschablonen

Im Hinblick auf die Auswahl einer geeigneten Schablontechnologie ist eine Vielzahl von technologischen und wirtschaftlichen Bewertungskriterien zu berücksichtigen [49] [92] [122]. Im Folgenden werden diese zunächst in ihrer Gesamtheit in Abbildung 21 dargestellt, bevor bedeutende Kriterien näher erläutert werden.

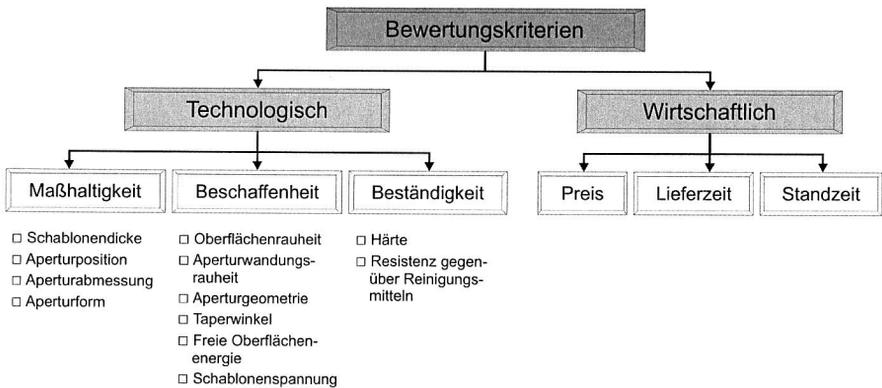


Abbildung 21: Kriterien zur Bewertung von SMT-Druckschablonen

Aus wirtschaftlicher Sicht stellt natürlich der Schablonenpreis ein wichtiges Kriterium zur Bewertung von SMT-Druckschablonen dar. Der Schablonenpreis wird dabei durch das verwendete Basismaterial, die Herstellungstechnologie sowie das Nachbearbeitungsverfahren beeinflusst. Aber auch Lieferzeiten und Standzeiten der Schablone sowie der Platzbedarf zur Lagerung stellen wichtige Bewertungskriterien dar. Aus technologischer Sicht kommt vor allem den Toleranzen der Schablonenfertigung eine große Bedeutung zu. Sowohl die Fertigungstoleranzen hinsichtlich der Schablonendicke als auch der Position, Abmessung und Form jeder einzelnen Apertur spielen eine entscheidende Rolle [4]. Des Weiteren sind die Aperturwandungsrauheit, die freie Oberflächenenergie des Materials, das die Adhäsion zur Lotpaste beeinflusst, der Taperwinkel sowie die Aperturgeometrie von Bedeutung. [49]

4.1.2 Technologisch-wirtschaftliche Bewertung verfügbarer Schablonentechnologien

Das Ätzen hat als Herstellungstechnologie für Druckschablonen in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung verloren. Trotz der Kostenvorteile im Vergleich zu alternativen Fertigungstechnologien wird das Ätzen aufgrund der begrenzten Miniaturisierbarkeit der Aperturen kaum noch eingesetzt. Ursächlich hierfür sind einerseits die Ätzlippe in einer Schablonenapertur und der mögliche Ätzversatz, die beide als Folge des beidseitigen Ätzprozesses das Auslöseverhalten der Lotpaste aus der Apertur verschlechtern. Andererseits besteht bei miniaturisierten Strukturen auch die Gefahr des Unterätzens, so dass ein sauberes Abdichten zwischen Leiterplatte und Druckschablone wesentlich erschwert wird. [13] [75] [85] [86]

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Herstellung von Druckschablonen stellt das Laserschneiden dar. Dabei werden die einzelnen Aperturen mit Hilfe eines gepulsten Laserstrahls selektiv in das Schablonenblech geschnitten. In der Regel kommen kaltgewalzte Edelstahlbleche oder Nickelbleche als Basismaterialien zum Einsatz. In Abhängigkeit des Laserstrahldurchmessers, der heutzutage minimal 20 μm beträgt, und der Schneidgeschwindigkeit ergibt sich eine charakteristische Wandungsrauheit, die das Auslöseverhalten der Lotpaste aus der Apertur beeinflusst. Aufgrund der abnehmenden Energiedichte des Laserstrahls beim Materialdurchgang ist der Materialabtrag auf der Schneidseite etwas höher als auf der Seite, auf welcher der Laserstrahl aus dem Material austritt. Die hieraus resultierende konische Ausprägung der Apertur, die durch den sogenannten Taperwinkel charakterisiert werden kann, verbessert das Auslöseverhalten der Lotpaste aus der Schablone. Die Entstehung des Taperwinkels sowie der Wandungsrauheit werden in Abbildung 22 dargestellt. [13]

Nachgelagerte Prozesse wie das mechanische Bürsten, das Elektropolieren oder das Beschichten haben eine Verbesserung der Schabloneneigenschaften zum Ziel. Das mechanische Bürsten erfolgt durch rotierende Metallbürsten auf der Schablonenoberseite und beschränkt sich auf das Entfernen des Laserschneidgrats auf der Laseraustrittsseite. Durch das Elektropolieren der Schablone in einem Elektrolyten wird hingegen Material von der gesamten Schablonenoberfläche abgetragen, so dass sowohl Laserschneidgrate entfernt als auch Oberflächenrauheiten reduziert werden können. In der Regel erfolgt im Anschluss an eine Elektropolitur eine mechanische Aufrauung der Schablonenoberfläche auf der Rakelseite. Diese ist notwendig, um ein ausreichend gutes Rollen der Lotpaste auf der Rakelseite im Druckprozess zu ermöglichen. Während die Reduzierung der Wandungsrauheit der Schablonenapertur ein besseres Auslöseverhalten der Lotpaste erwarten lässt, hat der Materialabtrag eine Verringerung der Schablonendicke sowie eine Vergrößerung der Aperturen zur Folge. In der Regel erfolgt das Beschichten einer Schablone in einem galvanischen Bad durch das Auftragen von Nickel. Der Materialauftrag hat einerseits die Glättung der Aperturwandung zur Folge,

andererseits verspricht auch die reduzierte Oberflächenenergie des Nickels im Vergleich zu Edelstahl ein besseres Auslöseverhalten. In jedem Fall sind bei einem nachträglichen Beschichten die Verdickung der Schablonenstärke sowie die Verringerung der Aperturabmessungen zu berücksichtigen. [13] [23]

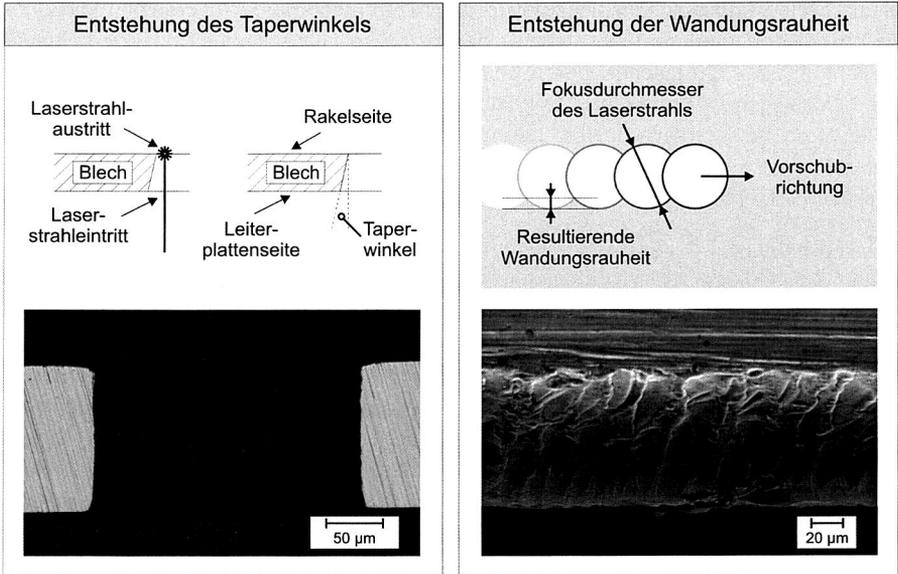


Abbildung 22: Taperwinkel und Wandungsrauheit einer lasergeschnittenen Edelstahlschablone

Im Gegensatz zu Ätz- und Laserschneidtechnik stellt das Galvanoformen ein additives Herstellungsverfahren dar. In einem ersten Schritt wird ein elektrisch leitfähiges Trägermaterial mit einem photosensitiven Lack beschichtet, bevor anschließend der Photolack belichtet und entwickelt wird. Nach dem Entfernen des nicht entwickelten Photolacks verbleibt der entwickelte Photolack als Abbild des zu erzeugenden Schablonenlayouts auf dem elektrisch leitfähigen Trägermaterial. Nach dem Einbringen des elektrisch leitfähigen Trägermaterials in einen Elektrolyten und dem Anlegen einer Spannung zwischen dem Trägermaterial und einer Elektrode erfolgt das Abscheiden von Metallionen an den freien Stellen des Trägermaterials. Typischerweise bestehen galvanisch aufgebaute Schablonen aus Reinnickel oder Nickellegierungen. Hat der Materialauftrag im galvanischen Prozess die geforderte Schablonendicke erreicht, werden Trägermaterial und Photolack entfernt. Das Schablonenblech wird anschließend unter Spannung in einen Rahmen eingeklebt.

Im Vergleich der alternativen Schablonentechnologien weisen die einzelnen Herstellungsverfahren spezifische Vor- und Nachteile auf, die im Folgenden zunächst erläutert und abschließend bewertet werden. Wie aus Abbildung 23 ersichtlich ist, lassen sich durch das Galvanoformen verfahrensbedingt sehr geringe Oberflächenrauheiten in der Schablonenapertur realisieren. Die Wandungsrauheiten lasergeschnittener Schablonen sind hingegen in der Regel etwas größer und werden maßgeblich durch den Laserstrahldurchmesser und die Schneidgeschwindigkeit bestimmt.



Abbildung 23: REM-Aufnahmen der Aperturwandungen unterschiedlicher Schablonentechnologien

Sowohl das Galvanoformen als auch das Laserschneiden ermöglichen die Realisierung einer leicht konischen Öffnungsform der Apertur, so dass das Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur verbessert wird. Hinsichtlich der verfahrensspezifischen Fertigungstoleranzen erweist sich eine Gegenüberstellung und vergleichende Bewertung des Galvanoformens und des Laserschneidens prinzipiell als schwierig. Allgemeingültige Aussagen lassen sich nur schwer ableiten, da die jeweiligen Fertigungstoleranzen weniger von dem eigentlich Herstellungsverfahren, sondern vielmehr von der herstellerabhängigen Prozessführung, dem vorhandenen Prozesswissen und dem verwendeten Ausgangsmaterial beeinflusst werden. In Bezug auf die verfahrensspezifischen Dickentoleranzen zeigen die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, dass lasergeschnittene Schablonen mit $\pm 3\%$ relativ eng toleriert sind, wohingegen galvanisch aufgebaute Schablonen mit $\pm 7\%$ überaus hohe Dickentoleranzen aufweisen. Während die Dickentoleranzen lasergeschnittener Schablonen aus den Fertigungstoleranzen der Blechherstellung resultieren, stellen die hohen Dickentoleranzen galvanisch aufgebaute Schablonen das Ergebnis einer sehr komplexen Prozessführung im galvanischen Auftragsprozess dar. Ursächlich hierfür sind die variierenden Stromdichten in dem Galvanikbad, die zu unterschiedlichen Abscheidungsraten und in der Konsequenz zu schwankenden Schablonendicken führt.

Für die Herstellung lasergeschnittener Schablonen kommen typischerweise Edelstähle, vereinzelt aber auch Nickelbleche, zum Einsatz, wohingegen galvanisch aufgebaute Schablonen in der Regel aus Reinnickel bzw. Nickellegierungen bestehen. Im Vergleich

zu Edelstahl weist Nickel eine höhere Härte auf, so dass prinzipiell längere Standzeiten für den Schabloneinsatz zu erwarten sind. Aufgrund der geringeren freien Oberflächenenergie von Nickel ist zudem mit einem besseren Auslöseverhalten der Lotpaste aus den Schablonenaperturen zu rechnen.

Bedingt durch die sequentielle Fertigung der Aperturen im Laserschneidprozess wird der Schablonenpreis einer lasergeschnittenen Schablone maßgeblich durch die Anzahl der auf der Schablone befindlichen Aperturen bestimmt. Im Gegensatz dazu erfolgt die Aperturrealisierung in dem galvanischen Auftragsprozess parallel, so dass der resultierende Schablonenpreis von der Aperturanzahl unabhängig ist. Vor diesem Hintergrund bietet sich das Galvanoformen vor allem für Schablonen mit sehr hohen Aperturanzahlen an. In der Regel weisen galvanisch aufgebaute Schablonen wesentlich längere Lieferzeiten auf als lasergeschnittene Schablonen.

Im Hinblick auf die Auswahl eines geeigneten Schablonenherstellers und einer geeigneten Schablonentechnologie für eine spezifische Fertigungsaufgabe ist im industriellen Umfeld grundsätzlich ein Kompromiss aus wirtschaftlichen und technologischen Gesichtspunkten zu finden. Eine Hilfestellung zur Auswahl soll die vergleichende Bewertung aus Abbildung 24 darstellen.

| | Beschreibung | Vorteile | Nachteile |
|----------------|--|---|--|
| Ätzen | <ul style="list-style-type: none"> □ Stark rückläufiger Marktanteil in Europa □ Subtraktive Herstellungstechnologie □ Parallele Realisierung der Aperturen, somit Fertigungskosten unabhängig von der Aperturanzahl | <ul style="list-style-type: none"> □ Kostengünstigste Herstellungstechnologie | <ul style="list-style-type: none"> □ Begrenzte Miniaturisierungsfähigkeit (Ätzlippe, Ätzversatz, Unterätzen) □ Einsatz ätzender Substanzen in der Fertigung |
| Laserschneiden | <ul style="list-style-type: none"> □ Größter Marktanteil □ Subtraktive Herstellungstechnologie □ Sequentielle Realisierung der Aperturen, somit Fertigungskosten abhängig von der Aperturanzahl | <ul style="list-style-type: none"> □ Wirtschaftlich bei kleinen bis mittleren Aperturanzahlen □ Schneidprozess gut beherrschbar □ Kurze Lieferzeiten □ Flexibilität | <ul style="list-style-type: none"> □ Nachbearbeitung der Schablone notwendig □ Wärmeeintrag in das Schablonenmaterial □ Wandungsrauheit abhängig von Prozessführung |
| Galvanoformen | <ul style="list-style-type: none"> □ Geringer Marktanteil □ Additive Herstellungstechnologie □ Parallele Realisierung der Aperturen, somit Fertigungskosten unabhängig von der Aperturanzahl | <ul style="list-style-type: none"> □ Wirtschaftlich ab hohen Aperturanzahlen □ Keine Schablonenachbearbeitung notwendig □ Geringe Wandungsrauheiten | <ul style="list-style-type: none"> □ Komplexe Prozessführung im Elektrolyten □ Maßhaltigkeit stark von Prozessführung abhängig □ Lange Lieferzeiten |

Abbildung 24: Vergleichende Bewertung der verfügbaren Herstellungstechnologien

Bei der technologischen Bewertung einer Herstellungstechnologie wird oftmals direkt von der Herstellungstechnologie auf die technologische Leistungsfähigkeit, und hier vor allem auf das realisierbare Flächenverhältnis, der Schablone geschlossen. Die herstellerabhängige Fertigungsqualität, die technologische wie wirtschaftliche Kenngrößen der Schablone gleichermaßen beeinflusst, bleibt dabei jedoch oftmals unberücksichtigt. So ist es auch zu erklären, dass die Designrichtlinien der IPC-7525A zwar Flächenverhältnisse für unterschiedliche Herstellungstechnologien empfehlen, diese aber gleichermaßen mit der Ergänzung relativieren, dass die zugrunde liegende Fertigungsqualität zu Abweichungen im realisierbaren Flächenverhältnis führen kann. Ein Beleg für die Bedeutung der Fertigungsqualität einer Druckschablone findet sich auch in der Analyse und Bewertung publizierter Veröffentlichungen. Es existieren sowohl Veröffentlichungen, die ein besseres Auslöseverhalten galvanisch aufgebauter Nickelschablonen identifiziert haben als auch Publikationen, die ein besseres Auslöseverhalten lasergeschnittener Edelstahlschablonen festgestellt haben. [14] [23] [25] [27] [28] [30] [88] [151]

4.1.3 Aktuelle Ansätze zur Optimierung der Schablonentechnologien

Die fortwährenden Bestrebungen zur Optimierung des Schablonendruckprozesses umfassen auch die eingesetzten Schablonentechnologien. Im Wesentlichen können diesbezüglich international aktuell folgende Aktivitäten identifiziert werden:

- Optimierung bestehender Laserschneidtechnologien und -strategien durch eine Anpassung der Maschinen- und Prozessparameter zur Reduzierung der Wandungsrauheiten in den Schablonenaperturen [30] [97]
- Entwicklung neuartiger Laserschneidtechnologien zur Reduzierung des Wärmeeintrags in das Schablonenblech [92]
- Einsatz sogenannter Fine-Grain-Materialien mit sehr feinkörnigen Werkstoffgefügen zur Reduzierung der resultierenden Wandungsrauheiten in den Aperturen [30] [49]
- Funktionalisierung der Schablonenoberfläche durch eine Plasmabeschichtung, eine Beschichtung mit Polytetrafluorethylen (PTFE bzw. Teflon) oder eine Nano-beschichtung zur Optimierung des Auslöseverhaltens der Lotpaste aus den Schablonenaperturen [24] [54] [81] [95]

Vor allem der Nanobeschichtung zur Funktionalisierung der Schablonenoberfläche wird enormes Potenzial zugerechnet, da die Beschichtung kostengünstig herstellbar ist und eine ausreichende Beständigkeit gegenüber mechanischen und chemischen Einflüssen aufweist. Die Herstellung und Charakterisierung der Nanobeschichtung sowie die sich daraus ergebenden Potenziale für den Schablonendruckprozess sind Gegenstand dieses Kapitels.

4.2 Stufenschablonen zur Erhöhung der Fertigungsflexibilität

Die Fertigung elektronischer Baugruppen mit einem hohen Bauelementmix stellt den Schablonendruckprozess zunehmend vor eine große Herausforderung, weil stark unterschiedliche Pastenvolumina auf eine Leiterplatte aufgetragen werden müssen [108]. Dem Einstellen der Lotpastenmenge über die Aperturöffnung sind dabei Grenzen gesetzt, weil in jedem Fall ein zuverlässiges Befüllen der Apertur und ein sicheres Auslösen der Lotpaste gewährleistet sein müssen. Hieraus ergibt sich ein fertigungstechnischer Konflikt für den Schablonendruckprozess, der anhand eines Beispiels in [59] erläutert wird, und auf Basis einer einheitlichen Schablonendicke nicht gelöst werden kann.

Die Variation der Schablonendicke über den Layoutbereich einer Druckschablone stellt in diesem Zusammenhang eine alternative Lösung dar, um stark variierende Pastenvolumina auf eine Leiterplatte zu applizieren. Obwohl das Prinzip der gestuften Druckschablone bereits seit Beginn der Oberflächenmontagetechnologie in der Elektronikproduktion bekannt ist [77] [85] [86] [137], nimmt diese innovative Technologie immer noch eine Nischenstellung ein. Ursächlich hierfür ist aus technologischer Sicht im Wesentlichen das Fehlen von allgemeingültigen Designempfehlungen für den Schablonenentwurf sowie eine nicht ausreichende Kenntnis des Druckverhaltens von Stufenschablonen [59].

Der Bedarf an stark unterschiedlichen Pastenvolumina auf einer Leiterplatte, der durch die Einführung neuartiger Bauelementtechnologien sowie der zunehmenden Miniaturisierung fortwährend forciert wird, lässt zukünftig einen vermehrten Einsatz der Stufenschablonentechnologie im industriellen Umfeld erwarten. Konsequenterweise ist die Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Stufenschablonen aktuell auch Gegenstand internationaler Forschungsaktivitäten. Die iNEMI (International Electronics Manufacturing Initiative) untersucht beispielweise den Einfluss auf die Transfereffizienz bei variierenden Distanzen zwischen Apertur und Stufensprung [173]. Einen weiteren Beitrag zur Verbreitung der Stufenschablonentechnologie im Markt dürften auch die andauernden Bestrebungen der Schablonenhersteller sein, ihre jeweiligen Produkte fertigungstechnisch zu optimieren und für den Einsatz im Schablonendruckprozess zu qualifizieren.

4.2.1 Herstellungstechnologien für Stufenschablonen

Die spezifischen Eigenschaften einer Stufenschablone hängen im Wesentlichen von der jeweiligen Herstellungstechnologie ab. Grundsätzlich lassen sich die unterschiedlichen Höhenniveaus auf einer gestuften Schablone mittels Ätzen, galvanischem Aufbau, Fräsen oder einer Kombination aus Laserschneiden und Laserschweißen realisieren (siehe Abbildung 25) [13] [29] [60] [68] [80] [85] [90]. Mit den einzelnen Fertigungstechnologien

gehen Vor- und Nachteile einher, die für den jeweiligen Einsatzfall abzuwägen sind. Im Folgenden werden die alternativen Herstellungstechnologien sowie die damit verbundenen Vor- und Nachteile erläutert und bewertet, bevor anschließend die grundlegenden Untersuchungen zur Qualifizierung der Stufenschablonentechnologie auf Basis eines ausgewählten Herstellungsverfahrens durchgeführt werden.

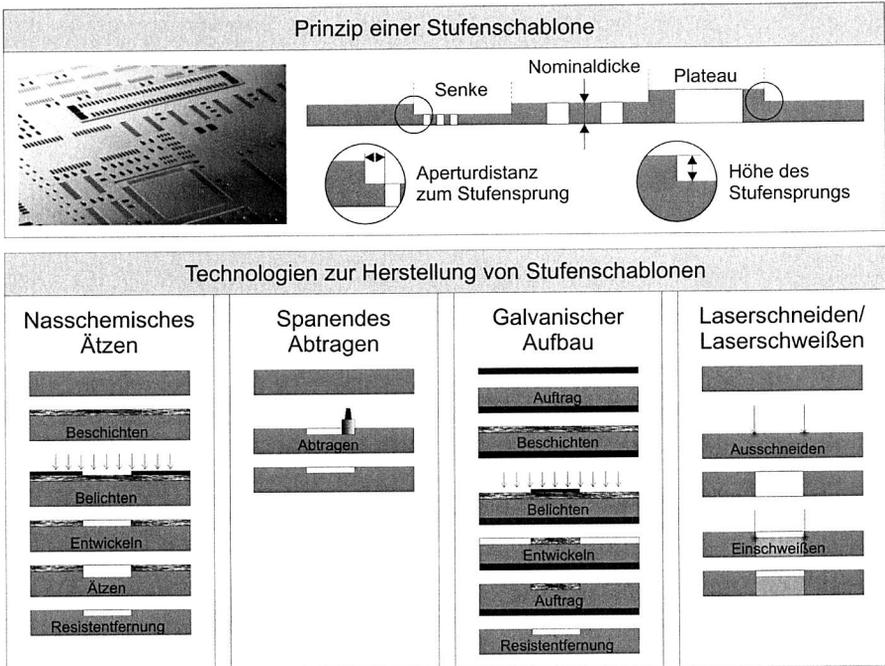


Abbildung 25: Prinzip einer gestuften Druckschablone sowie alternative Verfahren zur Herstellung

Das nasschemische Ätzen stellt eine Möglichkeit zur Herstellung gestufter Druckschablonen dar. Ausgehend von der maximalen Schablonendicke, die im Druckbereich benötigt wird, werden Bereiche mit geringeren Dicken partiell abgeätzt. Hierfür wird die Schablone zunächst mit einem photosensitiven Lack beschichtet, bevor anschließend der Photolack unter Verwendung einer layoutspezifischen Maske belichtet wird. Nach der Lackentwicklung liegen diejenigen Bereiche der Schablone frei, die abgeätzt werden sollen, so dass das verwendete Ätzmedium die Oberfläche angreifen kann. In einem abschließenden Schritt wird der verbleibende Photolack auf der Schablonenoberfläche entfernt. Die Ätztechnik stellt somit eine rein subtraktive Herstellungstechnologie dar, weil verfahrensbedingt nur Vertiefungen in die Schablone eingebracht werden können. Ein wesentlicher Vorteil stufengeätzter Schablonen liegt in den geringen Herstell-

lungskosten, die mit der Ätztechnik verbunden sind [59]. Technologisch hingegen weisen stufengeätzte Schablonen eine Reihe von Nachteilen auf. Das Abätzen einzelner Schablonenbereiche führt zu einer hohen Oberflächenrauheit der Schablone. Dies wirkt sich wiederum negativ auf das Roll- und Abzugsverhalten der Lotpaste aus, so dass teilweise sogar von der Verwendung geschlossener Rakelsysteme oder Stahlraket abgeraten wird [68]. Des Weiteren weisen stufengeätzte Schablonen eine geringere Lebensdauer auf, da die harte Walzhaut des kaltgewalzten Schablonenblechs an der Oberfläche durch den ätztechnischen Eingriff entfernt wird. Hieraus resultiert eine zunehmende Welligkeit der Schablonenoberfläche [90]. Ein weiterer Nachteil des nasschemischen Ätzens liegt in den verfahrensbedingten Fertigungstoleranzen, die zu starken Dickenschwankungen in den realisierten Vertiefungen führen [80]. Dies ist vor allem deshalb kritisch zu bewerten, weil sich in diesen Vertiefungen in der Regel druckkritische Strukturen befinden, die hinsichtlich ihrer Druckbarkeit sensibel auf Schwankungen in der Schablonendicke reagieren. Die metallografische Analyse der Stufensprungausprägung einer geätzten Schablone in Abbildung 26 visualisiert die hohe Oberflächenrauheit einer abgeätzten Stufe, während das weißlichtinterferometrisch aufgenommene Höhenprofil belegt, dass mit einer realen Stufensprunghöhe von etwa 25 μm eine sehr hohe Abweichung von der nominalen Stufensprunghöhe von 50 μm existiert. Die Dicke der ätztechnisch realisierten Senke liegt somit 25 μm über dem eigentlichen Nominalwert.

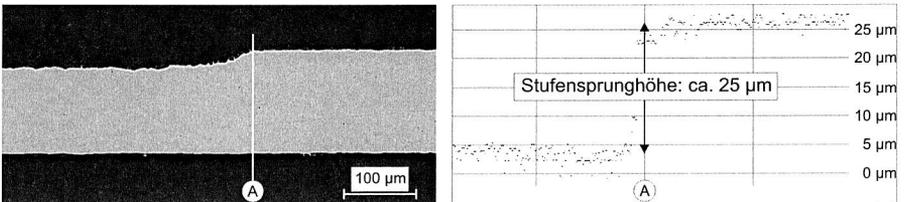


Abbildung 26: Schliff durch einen Stufensprung einer geätzten Stufenschablone (links) und weißlichtinterferometrisch aufgenommenes Höhenprofil über dem Stufenverlauf (rechts)

Ebenso wie das nasschemische Ätzen stellt das spanende Abtragen ein rein subtraktives Verfahren dar, da die einzelnen Vertiefungen partiell in die Schablone gefräst werden. Die Basisdicke der Schablone wird folglich auch von der maximal benötigten Schablonendicke im Druckbereich vorgegeben. Im Gegensatz zum nasschemischen Ätzen lassen sich durch das Tiefenfräsen jedoch wesentlich geringere Dickentoleranzen sowie Oberflächenrauheiten in den Vertiefungen erzielen [80]. Die Schwächung des Schablonenmaterials stellt sich hingegen auch bei dieser Herstellungstechnologie ein und hat eine reduzierte Lebensdauer der Schablone sowie eine gesteigerte Neigung zur Welligkeit der Schablonenoberfläche zur Folge [90].

Der galvanische Aufbau einer Stufenschablone stellt ein rein additives Herstellungsverfahren dar. Als Basis dient ein elektrisch leitfähiger Träger, auf dem in einem galvanischen Prozess zunächst die minimal benötigte Schablonendicke abgeschieden wird. Anschließend werden diejenigen Bereiche, die ihre Enddicke erreicht haben, mittels eines Photoresists abgedeckt. Im weiteren Auftragsprozess werden die freiliegenden Bereiche weiter aufgebaut, bis die Schablone die Maximaldicke erreicht hat. Eine Alternative zu dem vollgalvanischen Aufbau stellt die Verwendung eines Basisblechs als Träger dar, welches die minimale Schablonendicke im Layoutbereich aufweist. In diesem Zusammenhang ist auch oft von einer sogenannten Laminatschablone die Rede [59]. Im Allgemeinen ist der galvanische Herstellungsprozess für Stufenschablonen sehr aufwändig, weil die einzelnen Lagen sehr genau zueinander ausgerichtet sein müssen. Dies resultiert in relativ hohen Herstellkosten und langen Lieferzeiten [90]. Ein weiterer Nachteil dieser Herstellungstechnologie liegt in den hohen Fertigungstoleranzen, die bei der Layoutgestaltung berücksichtigt werden müssen [80]. Im Gegensatz zu den alternativen Verfahren der Stufenschablonenherstellung ist es beim vollgalvanischen Aufbau jedoch möglich, die Realisierung der Aperturöffnungen in den Aufbauprozess zu integrieren. Das nachträgliche Einbringen der Öffnungen durch einen zusätzlichen Prozessschritt entfällt somit. Dies kann vor allem dann von wirtschaftlicher Bedeutung sein, wenn sehr viele Aperturen auf dem Schablonenlayout zu realisieren sind.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Stufenschablonen stellt eine Kombination aus Laserschneiden und Laserschweißen dar. Bei der sogenannten Patchwork-Technologie werden aus einem Basisblech zunächst diejenigen Schablonenbereiche mittels eines Lasers ausgeschnitten, die eine von der Nominaldicke abweichende Schablonendicke aufweisen sollen. In die entstandenen Öffnungen werden anschließend passende Zuschnitte mit spezifischen Blechdicken, sogenannte Patches, eingeschweißt. Mit Hilfe der Patchwork-Technologie lassen sich hinsichtlich der Schablonendicke sehr geringe Fertigungstoleranzen einhalten, weil die einzelnen Patches ebenso wie das Basisblech mit einer sehr geringen Dickentoleranz behaftet sind [80]. Die metallografische Analyse der Stufensprungausprägung einer Patchwork-Schablone in Abbildung 27 zeigt eine etwa 200 µm breite Übergangzone, in der eine kontinuierliche Anpassung der Schablonendicke von der Nominaldicke auf das Senkenniveau erfolgt. Sowohl metallografisch als auch weißlichtinterferometrisch kann eine Stufensprunghöhe von 50 µm identifiziert werden, was der nominalen Stufensprunghöhe entspricht. Vor allem bei sehr feinen Patches ist hinsichtlich der Schablonenhandhabung jedoch zu berücksichtigen, dass mit abnehmender Patchdicke die Festigkeit des Patches in der Schablone abnimmt, so dass ein erhöhtes Risiko besteht, dass feine Patches aus der Schablone ausbrechen können.

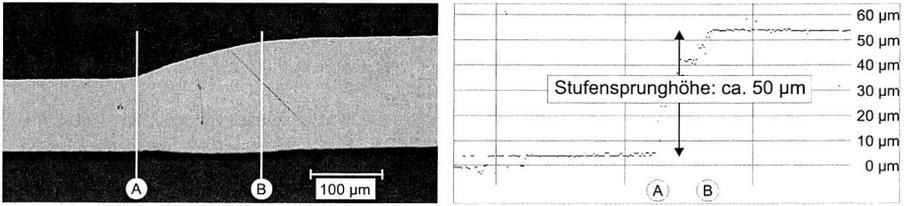


Abbildung 27: Schlicht durch einen Stufensprung einer Patchwork-Schablone (links) und weißlichtinterferometrisch aufgenommenes Höhenprofil über dem Stufenverlauf (rechts)

Ein wesentliches Kriterium zur Auswahl einer Stufenschablonentechnologie stellen neben den fertigungsspezifischen und wirtschaftlichen Randbedingungen vor allem die Designrichtlinien dar, die bei der Schablonengestaltung zu berücksichtigen sind. Die kritischen Bereiche auf einer Stufenschablone, die im Allgemeinen auch Tabuzonen genannt werden, werden durch die einzuhaltenden Mindestabstände senkrecht und parallel zur Rakelrichtung für Aperturen auf Senken- und Plateauniveau definiert (siehe Abbildung 28). Das Anordnen von Aperturen innerhalb dieser Tabuzonen sollte in jedem Fall vermieden werden, da dort aufgrund des Einflusses des Stufensprungs ein sauberes Abziehen der Lotpaste und somit ein stabiler Schablonendruckprozess nicht mehr gegeben ist.

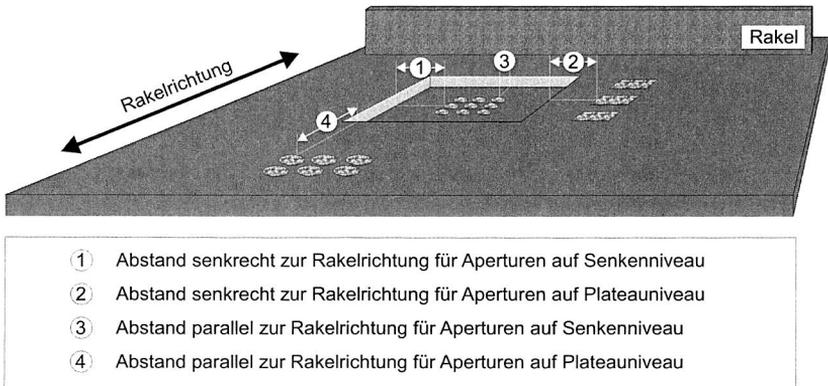


Abbildung 28: Tabuzonen im Stufenbereich zur Gewährleistung eines stabilen Schablonendruckprozesses

Im Hinblick auf die Gestaltung von Stufenschablonen existieren allgemeine Empfehlungen für Layouttabuzonen, die unabhängig von der Schablonenfertigungstechnologie zu berücksichtigen sind. Während Aperturen auf Plateauniveau einen Mindestabstand von 0,65 mm vom Stufensprung aufweisen sollen, sind für Aperturen auf Senkenniveau Abstände von 0,9 mm pro 25 µm Stufensprunghöhe vorzusehen [118]. Der einzuhaltende

Mindestabstand entspricht folglich dem sechsendreißfachen der Stufensprunghöhe, so dass beispielsweise bei einer Stufensprunghöhe von 100 μm eine Tabuzone von 3,6 mm einzukalkulieren ist. Mit einem Mindestabstand von 890 μm bis 1270 μm pro 25,4 μm Stufensprunghöhe für Aperturen auf Senkenniveau werden in [29] Empfehlungen gemacht, die denen in [118] sehr nahe kommen. Eine Unterscheidung zwischen der Lage senkrecht und parallel zur Rakelrichtung wird jeweils nicht vorgenommen.

Dass diese Vorgaben jedoch eher als Orientierungshilfe zu verstehen sind, zeigt sich daran, dass oftmals auch firmenspezifische und somit fertigungsspezifische Designrichtlinien erarbeitet wurden. So werden beispielsweise für geätzte Stufenschablonen Tabuzonen von 2 mm bis 5 mm parallel zur Rakelrichtung und 1 mm pro 25 μm Stufensprunghöhe senkrecht zur Rakelrichtung empfohlen [59]. Layoutempfehlungen für Patchwork-Schablonen sehen für Aperturen auf Senken- und Plateauniveau eine Tabuzone von 200 μm (Stufensprunghöhe 25 μm , 50 μm und 75 μm) beziehungsweise 300 μm (Stufensprunghöhe 100 μm) parallel zur Rakelrichtung vor. Senkrecht zur Rakelrichtung unterscheiden sich hingegen die Tabuzonen für Aperturen auf Senken- beziehungsweise Plateauniveau. Für Aperturen auf Senkenniveau ist senkrecht zur Rakelrichtung eine Tabuzone von 400 μm bei einer Stufensprunghöhe von 25 μm vorzusehen. Mit der Erhöhung des Stufensprungs um jeweils 25 μm ist die Tabuzone von 400 μm um jeweils 200 μm zu erweitern. Für Aperturen auf Plateauniveau beträgt die Tabuzone 100 μm bei einer Stufensprunghöhe von 25 μm , 200 μm bei einer Stufensprunghöhe von 50 μm , 300 μm bei einer Stufensprunghöhe von 75 μm sowie 500 μm bei einer Stufensprunghöhe von 100 μm [113].

Die Tatsache, dass einige Schablonenhersteller keinerlei Angaben zu Gestaltungsrichtlinien machen, und die vorhandenen Gestaltungsrichtlinien zum Teil stark voneinander abweichen, verdeutlicht die Problemstellung, die sich für einen potenziellen Anwender der Stufenschablonentechnologie ergibt. Ein weiteres Defizit stellen die fehlenden Prozessempfehlungen dar, die aus fertigungstechnischer Sicht von besonderer Bedeutung sind, da sich beim Einsatz von Stufenschablonen im Fertigungsprozess zusätzliche Herausforderungen im Vergleich zur planaren Schablonentechnologie ergeben. Diesbezüglich sind vor allem das erschwerte Abzugsverhalten der Lotpaste auf der stufigen Schablonenoberfläche sowie die daraus resultierenden Folgen für den Druckprozess einerseits und das Druckergebnis andererseits zu nennen. In der Gesamtheit liegen hierin die Gründe, warum viele Anwender aktuell den Einsatz von Stufenschablonen in ihrer Fertigung vermeiden.

Im Hinblick auf die Auswahl einer geeigneten Schablonentechnologie für den Serieneinsatz sind neben den rein technologischen Aspekten wie Maßhaltigkeit und Ausprägung des Stufensprungs prinzipiell auch wirtschaftliche Randbedingungen wie Preis und Lieferzeit zu berücksichtigen. Die Analysen der verfügbaren Stufenschablonentechnologien haben gezeigt, dass die Maßhaltigkeit geätzter und galvanisch aufgebaut-

ter Schablonen in der Regel als kritisch zu bewerten ist. Im Falle einer hohen Maßhaltigkeit, wie es für gefräste Stufenschablonen und Patchwork-Schablonen der Fall ist, konnten im Rahmen von Voruntersuchungen keine wesentlichen Unterschiede im Druckverhalten identifiziert werden. Aufgrund der Tatsache, dass eine Patchwork-Schablone eine größere Flexibilität im Vergleich zu einer gefrästen Schablone aufweist, weil sowohl höhere als auch niedrigere Stufen auf Basis einer Standardblechdicke realisiert werden können, kommen im weiteren Verlauf der Untersuchungen Patchwork-Schablonen zum Einsatz.

4.2.2 Schwerpunkte der Untersuchungen

Die aktuellen Defizite aufgreifend besteht die Zielsetzung der durchgeführten Untersuchungen darin, Designempfehlungen für den Entwurf von Stufenschablonen zu erarbeiten und geeignete Prozesseinstellungen zu identifizieren, die einen prozesssicheren Einsatz von Stufenschablonen im industriellen Umfeld ermöglichen. Vor diesem Hintergrund erfolgt zunächst eine Analyse des Abziehverhaltens der Lotpaste auf der stufigen Schablonenoberseite in Abhängigkeit wesentlicher Prozesseinflussgrößen. Während in der planaren Schablonentechnologie ein vollständiges Abziehen der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche durch die geeignete Wahl der Prozessparameter problemlos möglich ist, existieren beim Einsatz von Stufenschablonen Bereiche auf der Schablonenoberfläche, die in dieser Hinsicht kritisch zu bewerten sind. Der Verbleib von Lotpaste im stufennahen Bereich bringt zwei wesentliche Nachteile mit sich. Einerseits trocknet die Lotpaste aufgrund ihrer sehr großen Oberfläche schneller aus, so dass sich die Druckeigenschaften der Lotpaste über die Zeit stark verändern können. Andererseits können Pastenrückstände auf der Schablonenoberfläche auch dazu führen, dass bei druckunkritischen Aperturen im stufennahen Bereich mehr Lotpaste transferiert wird, während bei druckkritischen Aperturen im stufennahen Bereich das Auslösen eher erschwert wird und somit die Transfereffizienz sinkt.

Im Hinblick auf das Abziehverhalten werden in einem ersten Versuchsteil zunächst wesentliche Maschinenparameter variiert. Neben der Rakelgeschwindigkeit (25 mm/s, 50 mm/s, 75 mm/s) und der Rakelkraft (2 N/cm, 3 N/cm, 4 N/cm) handelt es sich dabei um den Rakelwinkel (45°, 60°), das Rakelmaterial (Edelstahl, Kunststoff) sowie den Lotpastentyp (3, 4). Basierend auf einer definierten Parametergrundeinstellung (Rakelgeschwindigkeit 50 mm/s, Rakelkraft 3 N/cm, Rakelwinkel 60°, Rakelmaterial Edelstahl, Lotpastentyp 3) erfolgt die einfaktorielles Variation der Prozessparameter mit dem Ziel, die Sensitivität des Abziehverhaltens vom jeweiligen Prozessparameter zu identifizieren. Die Auswertung der Druckversuche erfolgt durch eine lichtmikroskopische Analyse der Schablonenoberfläche sowie eine Quantifizierung der Pastenrückstände.

Im Rahmen des zweiten Versuchsteils erfolgt die Variation schablonenspezifischer Einflussgrößen, während die Parametereinstellungen bezüglich Rakelgeschwindigkeit, Ra-

kelkraft, Rakelwinkel, Rakelmaterial und Lotpastentyp konstant bleiben. Als schablone-spezifische Einflussgrößen werden in diesem Zusammenhang geometrische Größen bezeichnet, die bei der Gestaltung einer Stufenschablone zu berücksichtigen sind. Neben den absoluten Stufensprunghöhen sind dies vor allem die Aperturabstände zum naheliegenden Stufensprung, aber auch die Stufenbreite sowie der Abstand von zwei nahe aneinander liegenden Stufen. Eine Erläuterung dieser Größen erfolgt auf Basis des in Abbildung 29 dargestellten Versuchslayouts.

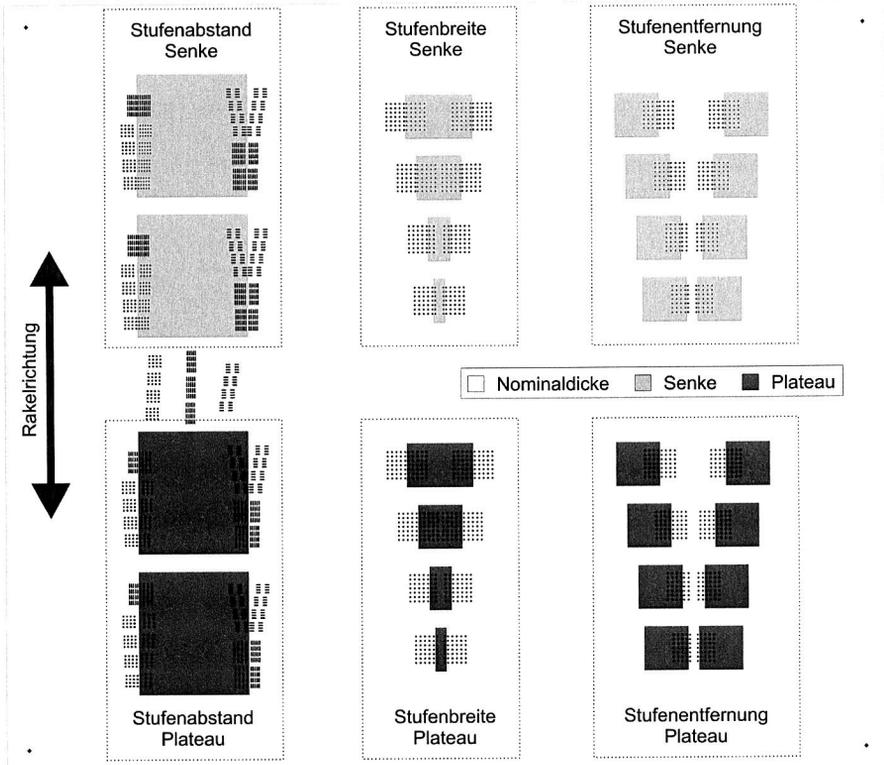


Abbildung 29: Versuchslayout der eingesetzten Stufenschablonen

Das realisierte Versuchslayout, das auf einer Nominaldicke von 150 µm basiert, sieht im oberen Schablonenbereich Senken vor, während sich im unteren Schablonenbereich Plateaus befinden. Die Aufteilung des Layouts in die Teilbereiche Stufenabstand, Stufenbreite und Stufenentfernung ermöglicht die Untersuchung schablone-spezifischer Einflussgrößen. Im Teilbereich Stufenabstand soll die Druckbarkeit von Aperturen in Abhängigkeit des Abstandes vom Stufensprung untersucht werden, während im Teilbe-

reich Stufenbreite die Druckbarkeit von Aperturen in Abhängigkeit der Stufenabmessung analysiert werden soll. Im Teilbereich Stufenentfernung soll die Druckbarkeit von Aperturen in Abhängigkeit der Entfernung zweier nahe aneinander liegender Stufen ausgewertet werden. Die Stufensprunghöhen, die sich zwischen Senke und Nominaldicke beziehungsweise Nominaldicke und Plateau einstellen, betragen 30 µm, 50 µm und 80 µm. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung kommen somit drei Stufenschablonen mit den Dickenkonfigurationen 120 µm/150 µm/180 µm, 100 µm/150 µm/200 µm sowie 70 µm/150 µm/230 µm zum Einsatz.

Die Abmessungen der Aperturformen Kreis und Oblong orientieren sich an den jeweiligen Schablonendicken und sind in Tabelle 7 dargestellt. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse weisen alle Kreisstrukturen ein identisches Flächenverhältnis von 0,7 auf, so dass sich für die unterschiedlichen Schablonendicken auch variierende Kreisdurchmesser ergeben. Die realisierten Oblongstrukturen haben eine an die Schablonendicke angepasste Breite (Schablonendicke plus 100 µm) sowie eine Länge von 1000 µm.

| Aperturform | Schablonendicke | | | | | | |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 70 µm | 100 µm | 120 µm | 150 µm | 180 µm | 200 µm | 230 µm |
| Kreis Durchmesser | 196 µm | 280 µm | 336 µm | 420 µm | 504 µm | 560 µm | 644 µm |
| Oblong Breite x Länge | 170 µm x 1000 µm | 200 µm x 1000 µm | 220 µm x 1000 µm | 250 µm x 1000 µm | 280 µm x 1000 µm | 300 µm x 1000 µm | 330 µm x 1000 µm |

Tabelle 7: Aperturabmessungen in Abhängigkeit der jeweiligen Schablonendicke

Aufgrund der zu erwartenden Wechselwirkung zwischen Rakelrichtung und Oblongorientierung werden die Oblongstrukturen sowohl senkrecht als auch parallel zur Rakelrichtung auf dem Schablonenlayout platziert. Als Bezugsachse für die Nomenklatur dient jeweils die Oblonglänge, so dass ein senkrecht zur Rakelrichtung gelayoutetes Oblong einen rechten Winkel zwischen der Längsachse des Oblongs und der Rakelrichtung bildet. Bei einem parallel zur Rakelrichtung gelayouteten Oblong weisen Oblonglängsachse und Rakelrichtung in die gleiche Richtung.

4.2.3 Auswertung der Druckversuche

Im Rahmen des ersten Versuchsteils zur Charakterisierung des Abziehverhaltens der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche kommt die Stufenschablone mit der Dickenkonfiguration 100 µm/150 µm/200 µm zum Einsatz. Die Bewertung des Abziehverhaltens erfolgt mit Hilfe des optischen Koordinatenmesssystems Werth VideoCheck IP 400 HA. Der Bewertung der Druckbarkeit der Aperturen im zweiten Versuchsteil liegen die drei zur Verfügung stehenden Stufenschablonen mit den spezifischen Dickenkonfigurationen zugrunde. Die unterschiedlichen Aperturtypen des Versuchslayouts werden im

Rahmen der Auswertung mit den Abkürzungen KR (Kreisstrukturen), LX (Oblongstruktur senkrecht zur Rakelrichtung) und LY (Oblongstruktur parallel zur Rakelrichtung) bezeichnet. Für die Quantifizierung des Auslöseverhaltens kommt das Pasteninspektionssystem KY-3020 zum Einsatz.

Abziehverhalten auf der Schablonenoberseite

Das Abziehverhalten der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche und somit der Grad der Verschmutzungsneigung auf der Schablonenoberseite wird durch eine Vielzahl wesentlicher Parameter beeinflusst. In Abbildung 30 ist exemplarisch der Verbleib von Pastenrückständen im stufennahen Bereich, erkennbar an den hellen Reflexionen, in Abhängigkeit der variierten Prozess- und Materialparameter dargestellt.

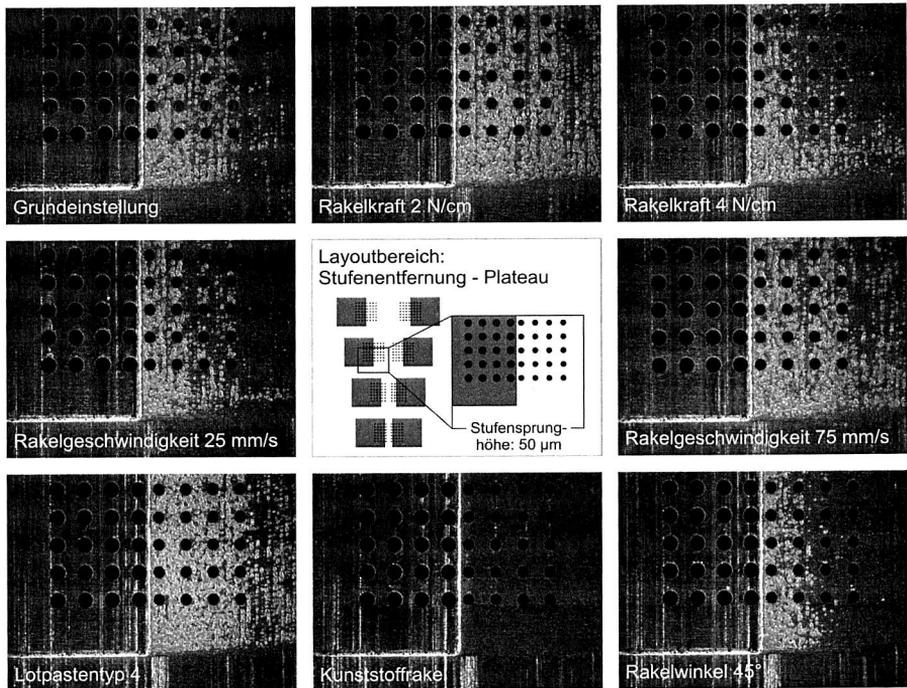


Abbildung 30: Abziehverhalten der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche bei einer Stufensprunghöhe von $50\ \mu\text{m}$ in Abhängigkeit verschiedener Prozess- und Materialparameter

Im Vergleich zu den verbleibenden Pastenrückständen der Grundeinstellung zeigt sich, dass sowohl eine Erhöhung der Rakelkraft als auch eine Verringerung der Rakelgeschwindigkeit ein besseres Abziehen der Lotpaste auf der Schablonenoberseite zur

Folge haben. Während die Verwendung eines höheren Lotpastentyps zu einem Anstieg der Pastenrückstände führt, vermindert eine Reduzierung des Rakelwinkels den Verschmutzungsgrad auf der Schablonenoberseite. Durch den Einsatz eines flexiblen Kunststoffrakels können hingegen Pastenrückstände vollständig vermieden werden.

Druckbarkeit der Aperturen

Die Auswertung der Transfereffizienzen der unterschiedlichen Aperturen auf Nominalniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“ zeigt, dass ein prozesssicheres Drucken der Aperturen unabhängig vom Abstand zum Stufensprung für alle Stufensprunghöhen realisiert werden kann. Wie Abbildung 31 zeigt, lassen sich durchweg Transfereffizienzen zwischen 70 % und 100 % erzielen, so dass von einem stabilen Druckprozess ausgegangen werden kann. Ein Effekt des Abstands zum Stufensprung kann für die analysierten Aperturen nicht nachgewiesen werden, so dass auf eine entsprechende Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird.

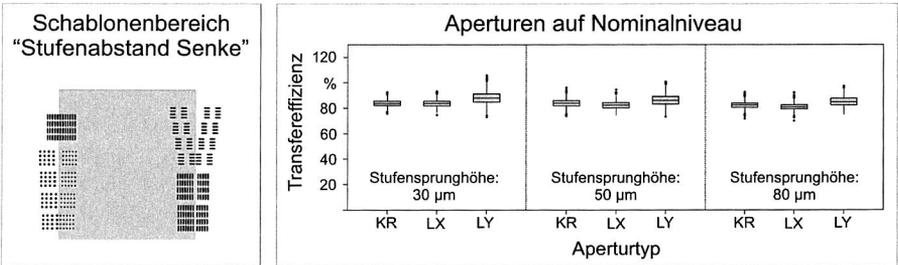


Abbildung 31: Transfereffizienzen der Aperturen auf Nominalniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“ in Abhängigkeit von Aperturtyp und Stufensprunghöhe

Im Gegensatz dazu ergibt sich für die Aperturen auf Senkenniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“, dargestellt in Abbildung 32, mit zunehmender Stufensprunghöhe ein instabiler Druckprozess. Einerseits steigt die Streuung der Transfereffizienzen bei allen Aperturtypen mit zunehmender Stufensprunghöhe enorm an. Andererseits kommt es bei Kreisstrukturen zu einer starken Verringerung der Transfereffizienzen, wohingegen parallel zur Rakelrichtung platzierte Oblongstrukturen sehr hohe Transfereffizienzen aufweisen.

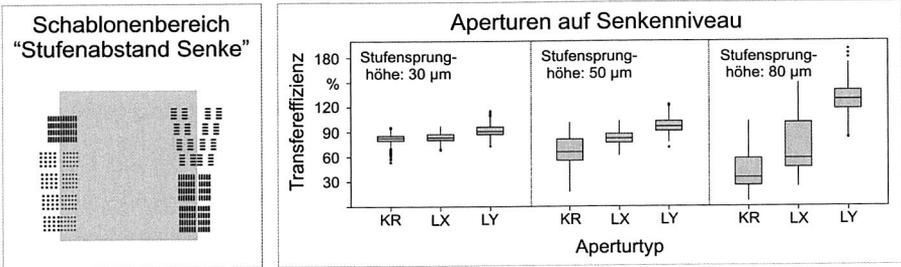


Abbildung 32: Transfereffizienzen der Aperturen auf Senkenniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“ in Abhängigkeit von Aperturtyp und Stufensprunghöhe

Während die Schablonengeometrie im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“ ein sauberes Abziehen der Lotpaste auf dem Nominalniveau jederzeit zulässt und somit ein stabiles Drucken möglich ist, nimmt mit steigender Stufensprunghöhe das Verbleiben von Pastenrückständen auf der Schablonenoberfläche des Senkenniveaus zu (siehe Abbildung 33). Dies hat zur Folge, dass die Kreisstrukturen auf dem Senkenniveau nicht mehr zuverlässig ausgelöst werden können und deshalb die Transfereffizienz sinkt, wohingegen gerade bei den parallel zur Rakelrichtung orientierten Oblongstrukturen auch das Pastenmaterial auf die Leiterplatte transferiert wird, das auf der Schablonenoberfläche verblieben ist. Für die parallel zur Rakelrichtung gelayouteten Oblongstrukturen nimmt somit die Transfereffizienz stark zu.

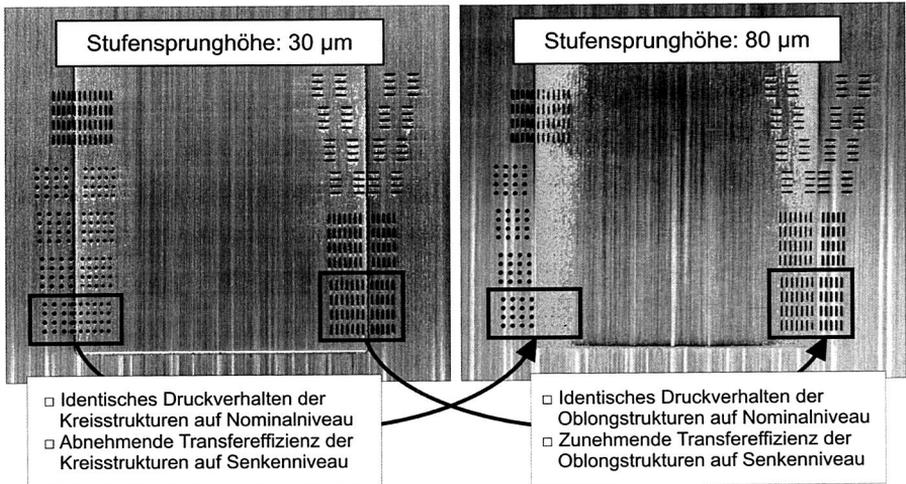


Abbildung 33: Pastenrückstände auf der Schablonenoberseite im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“ in Abhängigkeit der Stufensprunghöhe

Die Auswertung der Transfereffizienzen der Aperturen auf Senkenniveau in Abbildung 34 belegt dies. Während bei den Kreisstrukturen auf Senkenniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“ eine größere Stufensprunghöhe zu einer Verringerung der Transfereffizienzen führt, kommt es bei den parallel zur Rakelrichtung gelayouteten Oblongstrukturen zu einer Überdrückung im stufennahen Bereich mit sehr hohen Transfereffizienzen. In beiden Fällen steigen die Prozessstreuungen durch die Erhöhung der Stufensprunghöhen drastisch an.

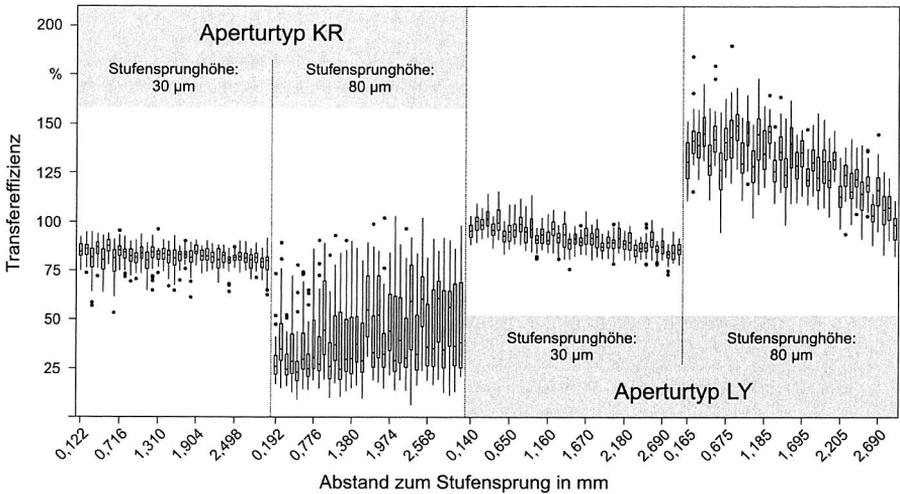


Abbildung 34: Transfereffizienzen der Aperturtypen KR und LY auf Senkenniveau in Abhängigkeit des Abstandes zum Stufensprung sowie der Stufensprunghöhe (Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“)

Für die Aperturen auf Senkenniveau kann prinzipiell ein Effekt des Abstandes zum Stufensprung nachgewiesen werden, der seine Ursache in den verbleibenden Pastenrückständen auf der Schablonenoberfläche hat. In Abhängigkeit des Aperturtyps sowie der auf der Schablonenoberfläche zurückbleibenden Pastenmenge stellt sich der Effekt des Abstandes zum Stufensprung unterschiedlich stark ein. Hinsichtlich der Bewertung des Effekts ist prinzipiell zwischen auslösekritischen und auslöseunkritischen Strukturen zu unterscheiden. Die auf dem Senkenniveau befindlichen Kreisstrukturen des Versuchslayouts verhalten sich auslösekritisch, da es im Bereich zurückbleibender Pastenrückstände auf der Schablonenoberseite zu einem unzureichenden Auslösen und niedrigen Transfereffizienzen kommt. Im Gegensatz dazu stellen die parallel zur Rakelrichtung gelayouteten Oblongstrukturen des Versuchslayouts auslöseunkritische Strukturen dar. Die erhöhte Transfereffizienz liegt hier in dem Transfer des zusätzlichen Lotpastenvolumens begründet. Abbildung 35 stellt auslösekritische und auslöseunkritische Strukturen sowie die zu erwartenden Transfereffizienzen gegenüber.

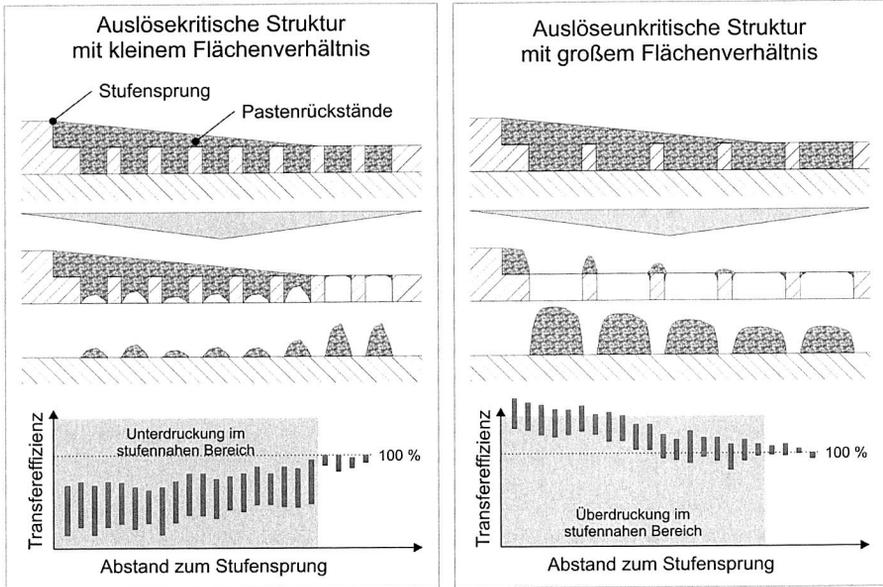


Abbildung 35: Einfluss des Abstands zum Stufensprung bei auslösekritischen und auslöseunkritischen Aperturen auf Senkenniveau

Die Auswertung der Transfereffizienzen der unterschiedlichen Aperturen auf Plateauniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Plateau“ (siehe Abbildung 36) zeigt auch hier, dass der Einfluss des Abstands zum Stufensprung bei Aperturen, die im stufennahen Bereich auf dem höheren Schablonenniveau liegen, vernachlässigt werden kann. Wie aus Abbildung 36 ersichtlich ist, können alle Aperturen mit Transfereffizienzen zwischen 80 % und 100 % prozesssicher gedruckt werden.

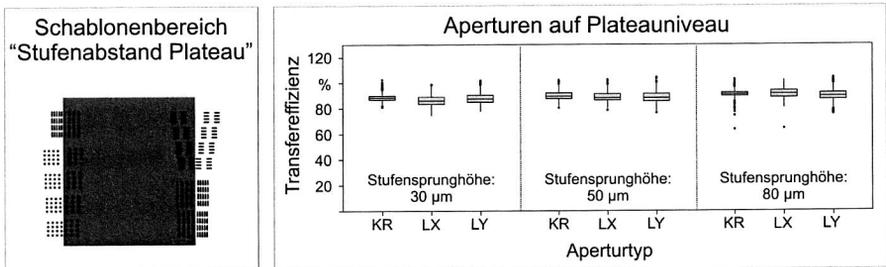


Abbildung 36: Transfereffizienzen der Aperturen auf Plateauniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Plateau“ in Abhängigkeit von Aperturtyp und Stufensprunghöhe

In Abbildung 37 sind die Transfereffizienzen der unterschiedlichen Aperturen auf Nominalniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Plateau“ dargestellt. Die im stufennahen Bereich verbleibenden Pastenrückstände, die hinsichtlich ihrer Größenordnung mit denjenigen auf dem Senkenniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“ vergleichbar sind, haben hier grundsätzlich den gleichen Effekt wie im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“.

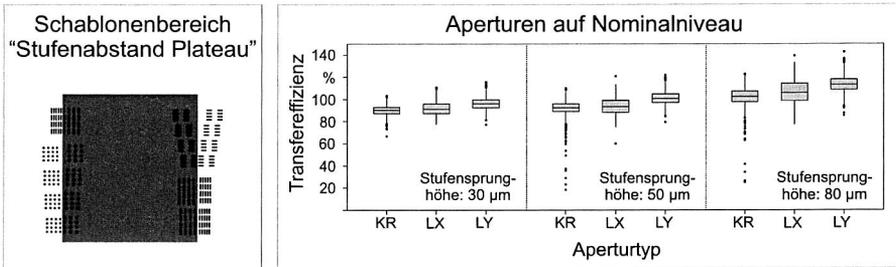


Abbildung 37: Transfereffizienzen der Aperturen auf Nominalniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Plateau“ in Abhängigkeit von Aperturtyp und Stufensprünghöhe

Im Vergleich zu den Transfereffizienzen der Aperturen auf Senkenniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Senke“ ergeben sich jedoch zwei wesentliche Unterschiede. Einerseits handelt es sich bei den Kreisstrukturen auf dem Nominalniveau des Schablonenbereichs „Stufenabstand Plateau“ um weniger auslösekritische Strukturen. Dies hat zur Folge, dass die erzielten Transfereffizienzen mit zunehmend kleineren Abständen zum Stufensprung insgesamt ansteigen (siehe Abbildung 38). Vereinzelt kommt es aber auch hier zu einem unzuverlässigen Auslöseprozess, was sich in geringen Transfereffizienzen zeigt. Andererseits wirken sich die Pastenrückstände, die mit denjenigen des Schablonenbereichs „Stufenabstand Senke“ vergleichbar sind, weniger stark auf die Transfereffizienzen sowie die Prozessstreuungen aus. Dies zeigt sich in Abbildung 38 prinzipiell für alle Aperturtypen. Die Ursache hierfür liegt in dem wesentlich größeren Absolutvolumen der Strukturen auf Nominalniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Plateau“, so dass Schwankungen im transferierten Lotpastenvolumen bezogen auf das Absolutvolumen weniger stark ins Gewicht fallen.

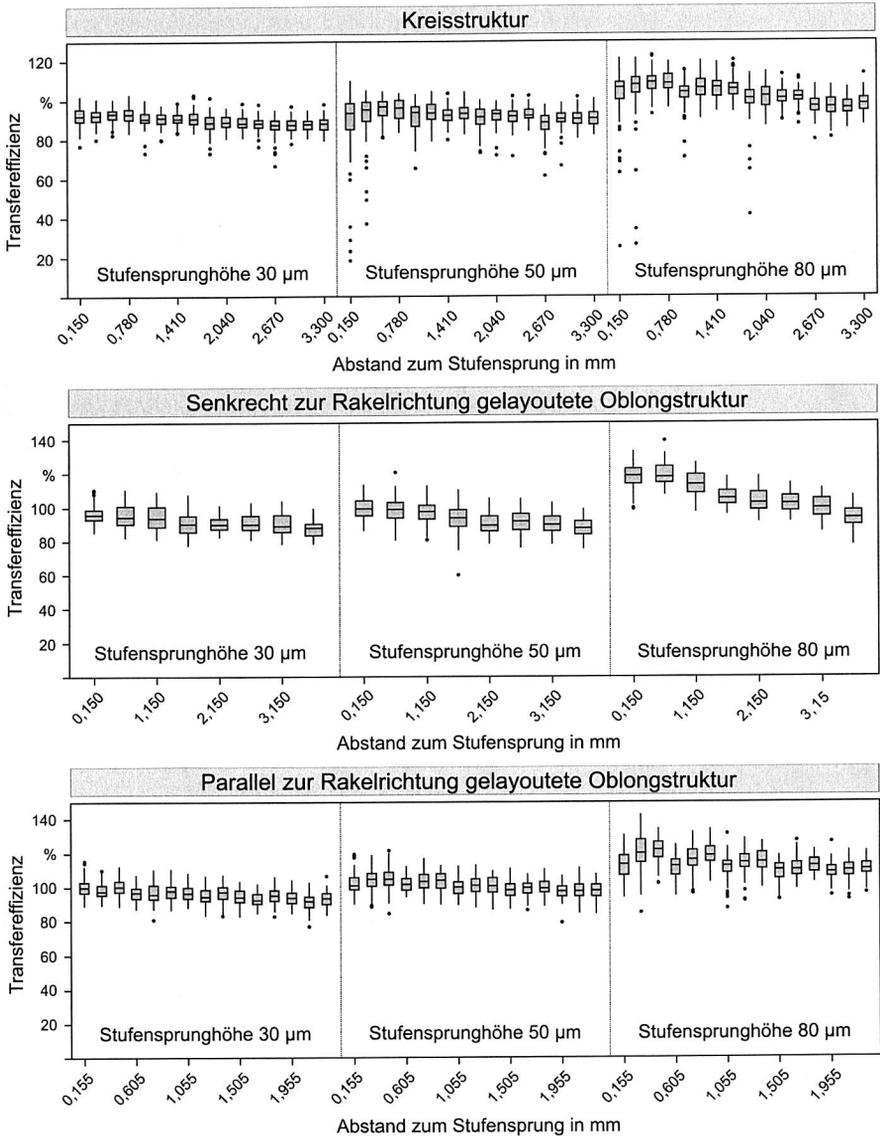


Abbildung 38: Transfereffizienzen der Aperturen auf Nominalniveau im Schablonenbereich „Stufenabstand Plateau“ in Abhängigkeit von Aperturtyp, Stufensprunghöhe und Abstand zum Stufensprung

Bei der Auswertung der beiden Schablonenbereiche „Stufenabstand Senke“ und „Stufenabstand Plateau“ zeigt sich, dass die Druckbarkeit von Aperturen ursächlich von den auf der Schablonenoberseite verbleibenden Pastenrückständen beeinflusst wird. Im Folgenden beschränkt sich demzufolge die Bewertung der Druckbarkeit der Aperturen in den übrigen Schablonenbereichen „Stufenbreite Senke“, „Stufenbreite Plateau“, „Stufenentfernung Senke“ und „Stufenentfernung Plateau“ auf die visuelle Analyse der Pastenrückstände auf der Schablonenoberfläche. Die zugehörigen Auswertungen der Transfereffizienzen in den einzelnen Teilbereichen können dem Anhang entnommen werden.

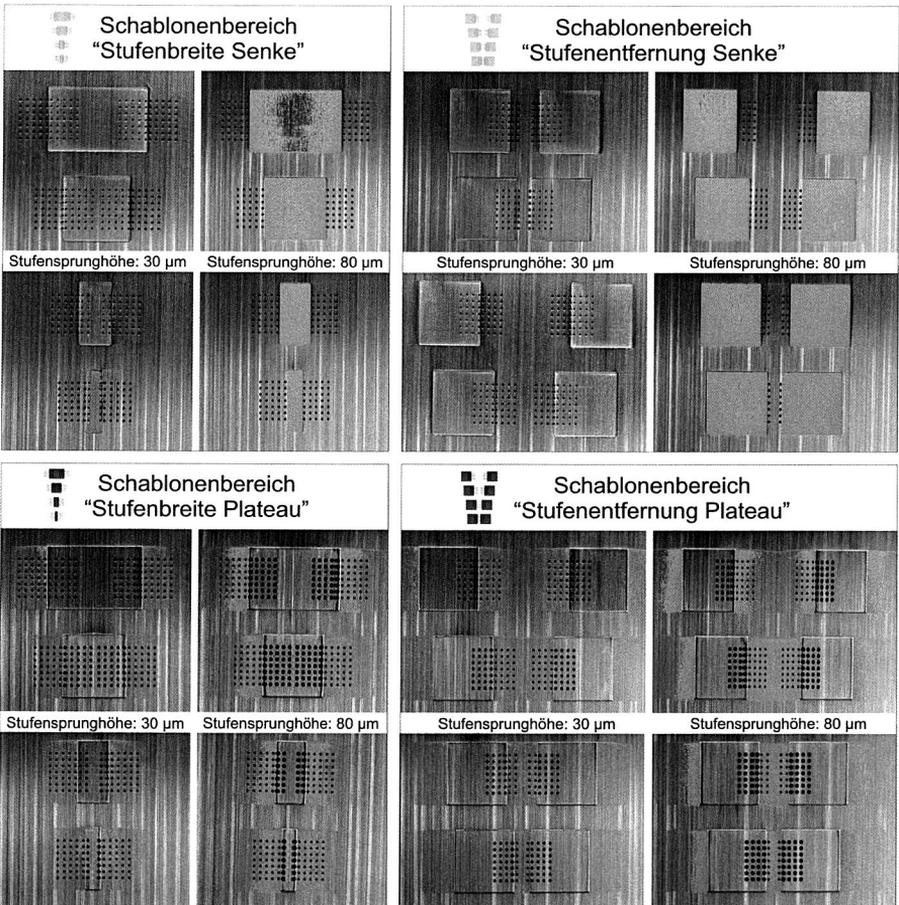


Abbildung 39: Ausprägung der Pastenrückstände auf der Schablonenoberseite in den einzelnen Schablonenbereichen in Abhängigkeit der Stufensprunghöhe

Wie aus Abbildung 39 ersichtlich ist, stellt sich bei einer Stufensprunghöhe von 30 μm grundsätzlich ein sauberes Abziehen der Lotpaste auf der Schablonenoberseite ein. Unabhängig von der Aperturlage auf der Schablone liegen die erzielten Transfereffizienzen über 50 %. Einzige Ausnahme stellen die Aperturen auf Plateauniveau im Schablonenbereich „Stufenentfernung Plateau“ dar. Diese weisen teilweise geringe Transfereffizienzen auf, die sich nicht auf ein schlechtes Auslösen der Paste aufgrund von Pastenrückständen auf der Schablonenoberseite zurückführen lassen. Vielmehr ist für diesen Effekt die Lage einzelner Aperturen direkt in der Schweißnaht des Stufensprungs verantwortlich. Aufgrund der erheblichen Abweichung zwischen dem theoretischen Sollvolumen der Apertur, das der Bestimmung der Transfereffizienz zugrunde liegt, und dem tatsächlichen Aperturvolumen ergeben sich in der Folge zu geringe Transfereffizienzen. Ein Beleg hierfür ist das vollständige Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur, das im Rahmen der Untersuchung beobachtet werden konnte.

Mit zunehmender Stufensprunghöhe verschlechtert sich erwartungsgemäß das Abziehverhalten der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche. Während im Schablonenbereich „Stufenentfernung Senke“ alle Senken (Kantenlänge jeweils 10 mm) vollständig mit Lotpaste belegt sind, zeigt sich erst ab einer Senkenbreite von 15 mm ein partielles Abziehen der Lotpaste auf der Schablonenoberseite in der Senkenmitte. Alle Aperturen auf Senkenniveau weisen in diesen Bereichen eine verminderte Transfereffizienz auf. In den Schablonenbereichen „Stufenbreite Plateau“ und „Stufenentfernung Plateau“ stellt sich bei einer Stufensprunghöhe von 80 μm ein etwa 4 mm breiter Bereich auf Nominalniveau neben dem Stufensprung ein, in dem Pastenrückstände identifiziert werden können. In diesem Bereich lassen sich erhöhte Transfereffizienzen nachweisen, wie aus der Auswertung der Transfereffizienzen im Anhang ersichtlich ist.

4.2.4 Gestaltungsrichtlinien und Prozessempfehlungen für den Einsatz von Stufenschablonen

Durch den Einsatz von Stufenschablonen können im Druckprozess stark variierende Lotpastenvolumen in einem Verfahrensschritt auf eine Leiterplatte aufgetragen werden. Die sich hieraus ergebende Fertigungsflexibilität geht jedoch einher mit gestiegenen Anforderungen an den Entwurf des Schablonenlayouts sowie die Prozessführung im Vergleich zur planaren Schablonentechnologie. Vor allem aufgrund des erschwerten Abziehverhaltens der Lotpaste und dem Verbleiben von Pastenrückständen auf der Schablonenoberfläche sind Anpassungen hinsichtlich der realisierbaren Aperturgrößen sowie der wesentlichen Prozessparameter vorzunehmen, wie aus Abbildung 40 ersichtlich ist.

Im Hinblick auf die Gestaltung der Aperturgrößen von Stufenschablonen können prinzipiell die bekannten Richtlinien der IPC-7525A sowie die im Rahmen dieser Arbeit getroffenen Empfehlungen zum Einsatz kommen, sofern ein vollständiges und zuverlässiges

ges Abziehen der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche sichergestellt werden kann. Für den Fall, dass keine Pastenrückstände auf der Schablonenoberfläche verbleiben, ergeben sich im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede im Druckverhalten der Aperturen im Vergleich zu einer konventionellen Druckschablone. Neben den Aperturen, die einen ausreichend großen Abstand zum nächsten Stufensprung aufweisen, trifft dies vor allem auf Aperturen zu, die sich im stufen nahen Bereich auf dem höheren Schablonenniveau befinden. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse stellt sich dort ein sauberes und vollständiges Abziehen der Lotpaste ein, so dass in diesem Bereich konstante Lotpastenvolumen mit geringer Prozessstreuung transferiert werden können.

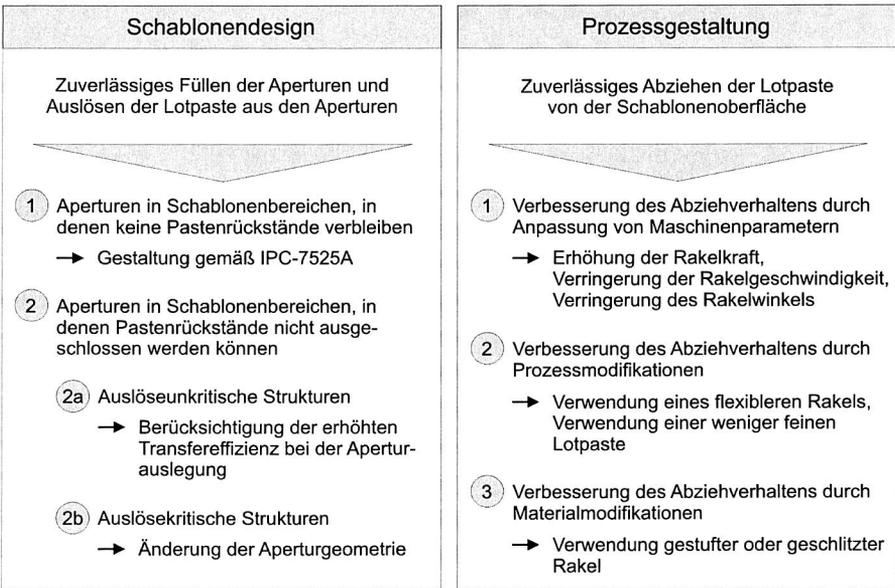


Abbildung 40: Anforderungen an das Schablonendesign und die Prozessauslegung bei dem Einsatz von Stufenschablonen

Für den Fall, dass jedoch das Verbleiben von Pastenrückständen auf der Schablonenoberfläche grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden kann, sind auslösekritische Strukturen prinzipiell zu vermeiden beziehungsweise Anpassungen an den jeweiligen Aperturgeometrien vorzunehmen. Der Gefahr, dass bei auslösekritischen Strukturen zu wenig Lotpaste auf die Leiterplatte transferiert wird, kann durch eine Verbesserung des Auslöseverhaltens begegnet werden. Hierzu ist die Aperturöffnungsfläche zu vergrößern, während die Schablonendicke unter der Randbedingung verringert wird, dass das Aperturvolumen konstant bleibt. Bei auslöseunkritischen Strukturen ist grundsätzlich

immer zu berücksichtigen, dass sich durch die auf der Schablonenoberfläche verbleibenden Pastenrückstände eine erhöhte Transfereffizienz im stufennahen Bereich einstellt.

Neben wesentlichen Geometriegrößen der Schablonengestaltung kommt auch den Prozessparametern des Druckprozesses eine wichtige Bedeutung zu, da das Verbleiben von Pastenrückständen auf der Schablonenoberfläche maßgeblich durch diese beeinflusst wird. Grundsätzlich sind die Maschinenparameter hinsichtlich eines möglichst guten Abziehverhaltens der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche einzustellen. Hierzu trägt im Wesentlichen eine Erhöhung des Rakeldrucks, eine Verringerung der Rakelgeschwindigkeit sowie eine Reduzierung des Rakelwinkels bei. Aber auch der Einsatz eines flexibleren Rakelmaterials sowie eines kleineren Lotpastentyps mit größeren Pulverpartikelgrößen verringern die Verschmutzungsneigung auf der Schablonenoberseite. Des Weiteren kann das Abziehverhalten der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche in Einzelfällen durch den Einsatz von gestuften oder geschlitzten Rakeln verbessert werden.

Im Vergleich zu einer konventionellen Druckschablone ist beim Einsatz einer Stufenschablone des Weiteren mit einer höheren Verflüchtigungsrate der lösemittelhaltigen Bestandteile der Lotpaste zu rechnen, da die Pastenoberfläche aufgrund der Rückstände auf der Schablonenoberfläche stark vergrößert ist. Diesbezüglich ist mit geringeren Standzeiten der Lotpaste auf der Stufenschablone zu rechnen. Vor diesem Hintergrund wird auch empfohlen, eine vollständige Reinigung der Schablonenoberseite nach langen Wartezeiten durchzuführen, um das Einmischen ausgetrockneter Pastenrückstände in die Lotpaste zu verhindern.

4.3 Nanobeschichtete Schablonen zur Optimierung des Druckprozesses

Die Entwicklung multifunktionaler Nanobeschichtungen sowie geeigneter Verfahren zu deren kostengünstigen Applikation haben in den vergangenen Jahren zur Realisierung einer Vielzahl äußerst innovativer technischer Lösungen geführt. Beispielhaft seien an dieser Stelle biologisch aktive Schichten zur Verbesserung der Biokompatibilität von Implantaten, optisch funktionalisierte Oberflächen zur Filterung von UV-Strahlung und mechanische Schutzschichten zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit von Bauteilen genannt [18]. Der Querschnittscharakter, welcher der nasschemischen Nanotechnologie heutzutage zukommt, lässt sich an dem Spektrum der von ihr beeinflussten Industriebereiche erkennen. Anwendungen in der Automobilindustrie, im Bauwesen, in der Fertigung elektronischer und optischer Systeme sowie im Haushalt verdeutlichen den aktuellen Stellenwert und das Potenzial, das diese Technologie bereits heute bietet [1].

Grundlage der nasschemischen Nanotechnologie stellt der sogenannte Sol-Gel-Prozess dar, der sich maßgeblich von herkömmlichen Beschichtungstechnologien und den eingesetzten Beschichtungsmaterialien unterscheidet. Während organische Beschichtungen relativ einfach prozessiert werden können, ist die Beständigkeit der so erzeugten Schichten gegenüber thermischen, chemischen oder mechanischen Einflüssen oftmals unzureichend. Anorganische Beschichtungen hingegen bieten zwar eine wesentlich bessere Beständigkeit, was aber wiederum mit einer sehr aufwändigen und kostenintensiven Prozessierung einhergeht. Das Sol-Gel-Verfahren sowie das zugehörige Beschichtungsmaterial vereinen die materialspezifischen und verarbeitungsspezifischen Vorteile beider Technologien. Zudem lassen sich die Eigenschaften einer Sol-Gel-Beschichtung durch die geeignete Wahl der Ausgangsmaterialien sowie der Prozessführung in einem breiten Maße variieren. Aufgrund der Vielzahl der in sich vereinigenden Vorteile wird der nasschemischen Nanotechnologie in zunehmendem Maße eine Rolle als Schlüsseltechnologie zugeordnet. [6]

Die aufgezeigten Vorteile, welche die nasschemische Nanotechnologie prinzipiell bietet, eröffnen auch in der Elektronikproduktion erhebliches Optimierungspotenzial. So lassen sich beispielsweise Schablonenoberflächen mit einer antiadhäsiven Beschichtung im Sol-Gel-Prozess versehen, um die prozessrelevanten Adhäsionskräfte zwischen einer Lotpaste und einer Schablonenoberfläche zu minimieren. Die Reduzierung der Adhäsionskräfte basiert dabei auf der Anlagerung hydrophober Anteile an der Schablonenoberfläche, so dass sich der sogenannte Lotusblüteneffekt einstellt. Beim Trennen der Leiterplatte von der Schablone kann so mehr Lotpaste auf die Leiterplatte transferiert werden. Während auf der Schablonenunterseite und in den Wandungsflächen der Aperturen die Adhäsionskräfte herabgesetzt werden, darf auf der Schablonenoberseite hingegen keine Nanobeschichtung appliziert werden, da sonst das Rollen der Lotpaste und folglich das Füllen der Aperturen wesentlich erschwert wird. Die Reduzierung der Adhäsionskräfte zwischen der Lotpaste und der Aperturwandung durch die Nanobeschichtung ist in Abbildung 41 dargestellt.

Im Hinblick auf den Einsatz einer nanobeschichteten Druckschablone im Druckprozess ergeben sich eine Reihe von Anforderungen, die von der Beschichtung zu erfüllen sind. Da die makroskopische Gestalt der Schablone sowie der Aperturöffnungen möglichst nicht verändert werden soll, sind entsprechend dünne Schichten auf der Schablone zu realisieren. Des Weiteren muss die Beschichtung eine ausreichende mechanische und chemische Beständigkeit aufweisen, um einen effizienten Einsatz im Fertigungsumfeld zu ermöglichen. Während die mechanische Beständigkeit vor allem die Haftfestigkeit der Beschichtung auf dem Trägermaterial sowie die Abriebfestigkeit umfasst, spielt die chemische Beständigkeit gegenüber alternativen Reinigungsmedien eine wesentliche Rolle. Die Hauptanforderung an die Nanobeschichtung stellt jedoch die Reduzierung der Oberflächenspannung der Schablonenoberfläche dar, so dass aufgrund der ver-

minderten Adhäsionskräfte zwischen Lotpaste und Aperturwand ein höherer Pastentransfer auf die Leiterplatte erzielt werden kann. Weitere Anforderungen an die Nanobeschichtung umfassen geeignete Testverfahren zum Nachweis der Funktionalität der Beschichtung sowie eine möglichst kostengünstige Herstellung der Beschichtung.

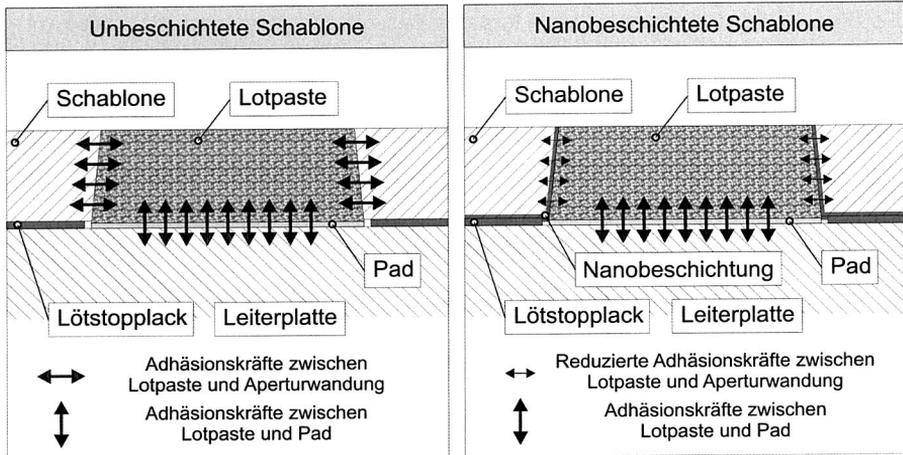


Abbildung 41: Reduzierung der Adhäsionskräfte zwischen Lotpaste und Aperturwand durch die Nanobeschichtung

Nationale und internationale Forschungsaktivitäten zur Optimierung von Schablontechnologien belegen, dass der Beschichtungstechnologie enormes Innovationspotenzial zugesprochen wird [24] [54]. Das Potenzial für den Druckprozess, das sich durch das Beschichten der Schablone erschließen lässt, hängt jedoch sehr stark von dem verwendeten Beschichtungsmaterial, dem eingesetzten Beschichtungsverfahren sowie der Prozessführung im Beschichtungsprozess ab. Patentrechtlich stellt sich die Situation heutzutage derart dar, dass sowohl verfügbare Beschichtungsmaterialien als auch mögliche Beschichtungsverfahren weltweit geschützt sind und exklusive Lizenznehmer nanobeschichtete Druckschablonen vertreiben. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten nanobeschichteten Druckschablonen sind nach einem von der Firma Siemens AG patentierten Verfahren beschichtet [135]. Lizenznehmer dieses patentierten Verfahrens ist die Firma LaserJob GmbH.

4.3.1 Sol-Gel-Verfahren zur Herstellung nanobeschichteter Druckschablonen

Der in Abbildung 42 schematisch dargestellte Sol-Gel-Prozess stellt eine Synthesemethode zur Herstellung sogenannter Nanobeschichtungen ausgehend von flüssigen Ausgangssubstanzen dar. Als Ausgangsmaterialien (Precursoren) kommen hydrolysierbare Alkoxide des Siliciums, sogenannte Silane, zum Einsatz. Die zu erzielenden Schichtei-

genschaften lassen sich durch die Zugabe von organisch modifizierten Silanen und fluorhaltigen Silanen erreichen. Während die organische Silanmodifikation zu dem Aufbau einer kombinierten organisch-anorganischen Netzstruktur mit der gewünschten Beschichtungsduktilität führt, hat der Einbau von fluorhaltigen Silanen in das Netzwerk eine Reduzierung der freien Oberflächenenergie der Beschichtung zur Folge. Aufgrund des organisch-anorganischen Charakters des Beschichtungsmaterials wird dieses oftmals auch als Hybridpolymer bezeichnet. [6] [50]

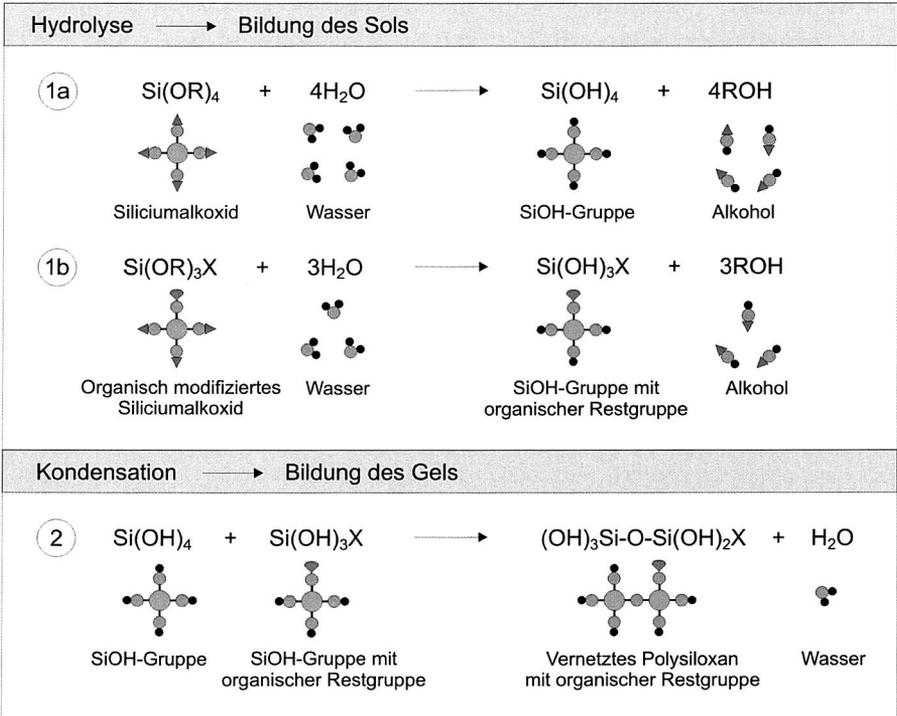


Abbildung 42: Schematischer Ablauf des Sol-Gel-Prozesses mit den beiden Teilschritten Hydrolyse und Kondensation

In einem ersten Reaktionsschritt, der beim Hersteller des Beschichtungsmaterials abläuft, erfolgt die Hydrolyse der Silanverbindungen mit Wasser. Unter Abspaltung von Alkohol bilden sich reaktive Silanole, die mit einer Größe von wenigen Nanometern in der kolloidalen Lösung, dem Sol, vorliegen. Die Eigenschaften der Sole und damit der sich daraus ergebenden Beschichtungen hängen von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Art des Lösungsmittels, die Wassermenge, die Art und Konzentration der eingesetzten Säure oder Base,

die Struktur und Konzentration der Silane, die Reaktionstemperatur sowie das Solalter. [6] [50]

In einem zweiten Reaktionsschritt, der Bildung des Gels, erfolgt die Umsetzung der monomeren und oligomeren Silanole des dünnflüssigen Sols zu Polysiloxanen in einer Kondensationsreaktion. Die ausgezeichnete Haftung der Beschichtung auf dem metallischen Untergrund resultiert aus der Bildung kovalenter Bindungen zwischen Oberfläche und Beschichtungsmaterial aufgrund des Vorhandenseins reaktiver Silanole im flüssigen Beschichtungsstoff. Während der Bildung des organisch-anorganischen Netzwerks, die auch als Gelierung bezeichnet wird, lagern sich die fluorhaltigen Silanole an der Grenzfläche zur Luft an, so dass sich an dieser Stelle eine Hydrophobierung der Beschichtungsoberfläche einstellt. Gegenüber den meisten organischen Lösemitteln weist die Nanobeschichtung eine sehr gute Beständigkeit auf. Lediglich starke Alkalien sind in der Lage, das Beschichtungsmaterial anzugreifen und aufzulösen. In Abbildung 42 sind die beiden ablaufenden Teilschritte des Sol-Gel-Prozesses schematisch und vereinfacht dargestellt. [6] [50]

Der Prozess der Schablonenbeschichtung schließt sich als Nachbearbeitungsverfahren der herkömmlichen Schablonenfertigung an und gliedert sich im Wesentlichen in die Teilschritte Vorbehandlung, Sprühapplikation, Trocknung und Einbrennen [81]. Nach dem Reinigen der Schablone wird das dünnflüssige Sol auf die Schablonenoberfläche aufgesprüht. Geeignete Prozessparameter der Sprühapplikation stellen dabei sicher, dass das Sol vollflächig auf die Leiterplattenseite der Druckschablone und auf die Aperturwandungen aufgetragen wird. Die Rakelseite der Druckschablone wird hingegen nicht beschichtet, um hierdurch nicht das Rollverhalten der Lotpaste zu verschlechtern. Der Solapplikation schließt sich das Trocknen und Einbrennen der Nanobeschichtung auf der Schablone an.

4.3.2 Charakterisierung der Beschichtungseigenschaften

Durch die Pigmentierung des Beschichtungsmaterials kann das Vorhandensein der Nanobeschichtung auf der Oberfläche der Druckschablone bereits optisch problemlos nachgewiesen werden. Die Unterschiede im optischen Erscheinungsbild zwischen einer unbeschichteten und einer nanobeschichteten Edelstahloberfläche sind in Abbildung 43 visualisiert. Während sich auf der unbeschichteten Edelstahloberfläche die Konturen des Walzvorganges in Form von Riefen eindeutig abzeichnen, sind diese Strukturen auf der nanobeschichteten Edelstahloberfläche kaum noch wahrnehmbar.

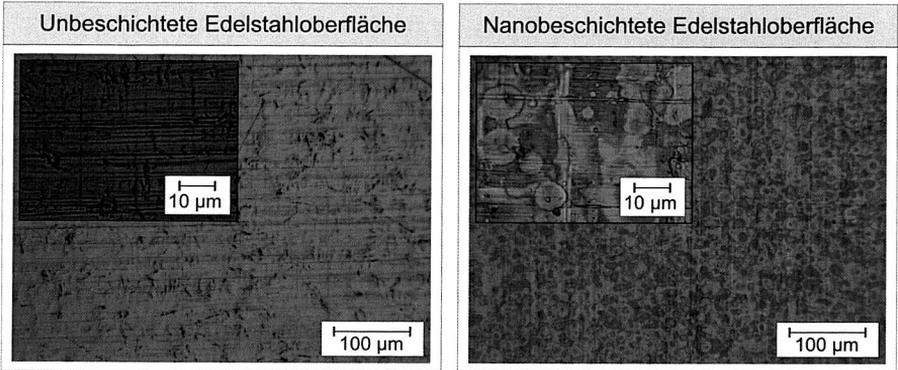


Abbildung 43: Lichtmikroskopisches Erscheinungsbild einer unbeschichteten und einer nanobeschichteten Edelstahloberfläche

Neben dem lichtmikroskopischen Nachweis eignet sich grundsätzlich auch ein Schnelltest auf Benetzung der Schablonenoberfläche sehr gut, um das Vorhandensein der Nanobeschichtung sowie deren Wirksamkeit zu überprüfen. Der Schnelltest basiert dabei auf der Ausbildung eines hohen Kontaktwinkels zwischen der antiadhäsiven Oberfläche der nanobeschichteten Schablone und einem Testmedium. In Abbildung 44 ist das Benetzungsverhalten eines Permanentmarkers auf einer unbeschichteten und einer nanobeschichteten Schablonenoberfläche dargestellt.

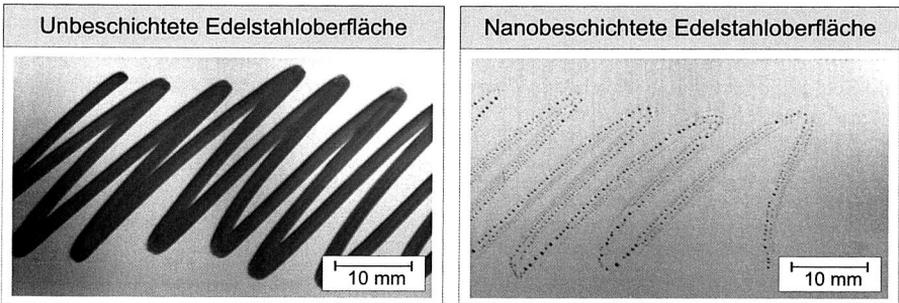


Abbildung 44: Unterschiede in der Benetzung auf der unbeschichteten und der nanobeschichteten Schablonenoberfläche [147]

Während die unbeschichtete Schablonenoberfläche eine gute Benetzung des Permanentmarkers aufweist, zeigt sich auf der nanobeschichteten Schablonenoberfläche eine sehr schlechte Benetzung mit einer tropfenförmigen Ausbildung der Testflüssigkeit. Diese Beobachtung kann prinzipiell als Nachweis der Wirksamkeit der Nanobeschichtung angesehen werden.

Die metallografische Analyse der im Sol-Gel-Prozess realisierten Nanobeschichtung belegt, dass sehr dünne Schichten auf der Schablonenoberfläche aufgetragen werden können. Wie aus Abbildung 45 ersichtlich ist, beträgt die Trockenschichtdicke im Analysebereich etwa 1,5 μm . Neben dem Schlibbild visualisiert Abbildung 45 das Prinzip der Hydrophobierung der Schablonenoberfläche durch die Anlagerung der fluorhaltigen Silanole an der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Luft im Gelierungsprozess.

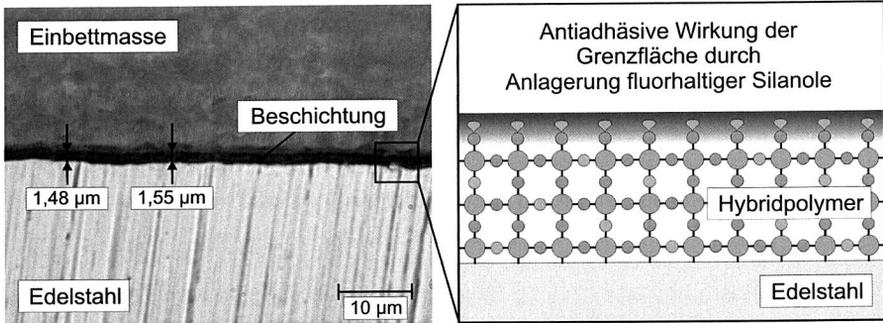


Abbildung 45: Metallografische Bestimmung der Schichtdicke sowie schematischer Aufbau der Nanobeschichtung

Neben der metallografischen Analyse stellt die energiedispersive Röntgenfluoreszenzspektroskopie (EDX) eine weitere Möglichkeit zum Nachweis der Nanobeschichtung dar. Dieses Verfahren ermöglicht die Bestimmung der Dicke und der Zusammensetzung von Schichten. Das Prinzip einer EDX basiert auf der Auswertung der Röntgenfluoreszenzstrahlung, auch Sekundärstrahlung genannt, die ein Messobjekt beim Beschuss mit primärer Röntgenstrahlung aussendet. Die Spektren der ausgesendeten Sekundärstrahlung entsprechen dabei den elementaren Bestandteilen der Beschichtung, so dass Rückschlüsse auf die Schichtzusammensetzung gezogen werden können. Das Verfahrensprinzip sowie wesentliche Vor- und Nachteile der EDX sind in [15] dargestellt. Durchgeführte EDX-Analysen beim Schablonenhersteller belegen, dass die Sol-Gel-Prozessierung in der Lage ist, eine vollflächige Beschichtung der Aperturwandungen zu erzielen [81].

Der Nachweis der Oberflächenfunktionalisierung durch die Nanobeschichtung kann ebenfalls über eine Kontaktwinkelmessung und eine anschließende Bestimmung der freien Oberflächenenergie geführt werden. Hierfür kommt im Rahmen der durchgeführten Messungen das Kontaktwinkelmessgerät MobileDrop der Firma Krüss zum Einsatz. Der Bestimmung der freien Oberflächenenergie liegt das Verfahren nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble zugrunde [112]. Dieses liefert als Ergebnis den dispersiven und polaren Anteil der Oberflächenspannung einer Oberfläche. Im Wesentlichen basiert das Verfahren auf der Bestimmung der Kontaktwinkel zwischen einem Festkörper, des-

sen Oberflächenspannung ermittelt werden soll, und zweier Flüssigkeiten. Grundvoraussetzung ist in diesem Zusammenhang, dass die dispersiven und polaren Anteile der Oberflächenspannung der beiden Flüssigkeiten bekannt sind. In der Regel werden Wasser und n-Hexadekan als Testflüssigkeiten bei der Kontaktwinkelmessung verwendet.

Die antiadhäsive Wirkung der Nanobeschichtung steht in direktem Zusammenhang zur Benetzbarkeit der Schablonenoberfläche mit dem Flussmittel der Lotpaste. Zur Beschreibung der Benetzbarkeit einer Oberfläche eignet sich die Methode des liegenden Tropfens. Es handelt sich dabei um ein optisches Verfahren, in dem der Kontaktwinkel zwischen einem Flüssigkeitstropfen und einem Festkörper im 3-Phasenpunkt von Gasphase, Flüssigkeit und Festkörper bestimmt wird. Der sich einstellende Kontaktwinkel ist das Ergebnis des Kräftegleichgewichtes zwischen der freien Oberflächenenergie des Festkörpers, der Oberflächenspannung der Flüssigkeit und der Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Flüssigkeit (siehe Abbildung 46). Während ein kleiner Kontaktwinkel für eine gute Benetzbarkeit der Oberfläche steht (Abbildung 46 links), sinkt mit zunehmendem Kontaktwinkel die Benetzbarkeit (Abbildung 46 rechts). Im Hinblick auf die nanobeschichtete Schablonenoberfläche ist somit mit einem erhöhten Kontaktwinkel im Vergleich zu einer unbeschichteten Schablonenoberfläche zu rechnen.

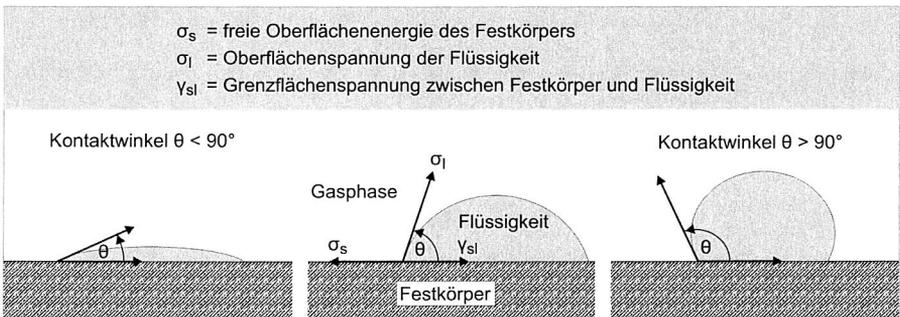


Abbildung 46: Kräftegleichgewicht im 3-Phasenpunkt von Gasphase, Flüssigkeit und Festkörper nach der Methode des liegenden Tropfens

Das Kräftegleichgewicht im 3-Phasenpunkt von Gasphase, Flüssigkeit und Festkörper wird durch die Youngsche Gleichung wie folgt beschrieben:

$$\sigma_s = \gamma_{sl} + \sigma_l \cdot \cos \Theta \quad \text{Gl. 10}$$

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Grenzflächenspannung stellt die Gleichung nach Owens und Wendt dar:

$$\gamma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2\left(\sqrt{\sigma_s^D * \sigma_l^D} + \sqrt{\sigma_s^P * \sigma_l^P}\right) \quad \text{Gl. 11}$$

Neben den bekannten Größen γ_{sl} , σ_s und σ_l beinhaltet die Formel auch die dispersen und polaren Anteile der Oberflächenspannung der Flüssigkeit sowie die dispersen und polaren Anteile der freien Oberflächenenergie des Festkörpers. Durch die Kombination der Young'schen Gleichung und der Gleichung nach Owens und Wendt lässt sich folgende Formel ableiten:

$$\frac{(1 + \cos \Theta) * \sigma_l}{2\sqrt{\sigma_l^D}} = \sqrt{\sigma_s^P} * \sqrt{\frac{\sigma_l^P}{\sigma_l^D}} + \sqrt{\sigma_s^D} \quad \text{Gl. 12}$$

Diese Formel stellt die Basis zur Berechnung der Oberflächenenergie eines Festkörpers nach dem Verfahren von Owens, Wendt, Rabel und Kaelble dar. Da es sich bei dieser Gleichung um eine Geradengleichung der allgemeinen Form $y = m * x + t$ handelt, genügt es, zwei Punkte auf der Geraden zu bestimmen, um die Geradensteigung m sowie den Ordinatenabschnitt t und somit den polaren und dispersen Anteil der freien Oberflächenenergie des Festkörpers zu ermitteln. Die Lösung des Gleichungssystems mit zwei Unbekannten erfolgt durch die Bestimmung der sich einstellenden Kontaktwinkel auf der Schablonenoberfläche unter Verwendung zweier Testflüssigkeiten mit bekannten dispersen und polaren Anteilen der Oberflächenspannung. Als Testflüssigkeiten kommen in der Regel Wasser mit einer Oberflächenspannung von 72,8 mN/m (21,8 mN/m disperser Anteil, 51,0 mN/m polarer Anteil) und n-Hexadekan mit einer Oberflächenspannung von 27,6 mN/m (27,6 mN/m disperser Anteil) zum Einsatz.

Während der Kontaktwinkel, der sich zwischen einem Wassertropfen und der unbeschichteten Schablonenoberfläche einstellt, etwa 48,1° beträgt, liegt der Kontaktwinkel unter Verwendung von n-Hexadekan als Testflüssigkeit bei gerade einmal 1,8°. Auf Basis dieser Kontaktwinkel ergibt sich eine freie Oberflächenenergie der unbeschichteten Schablonenoberfläche von 53,3 mN/m (27,6 mN/m disperser Anteil, 25,7 mN/m polarer Anteil). Im Gegensatz dazu liegen die Kontaktwinkel bei der nanobeschichteten Schablonenoberfläche bei 110,2° (Testflüssigkeit Wasser) beziehungsweise 63,2° (Testflüssigkeit n-Hexadekan). Hieraus resultiert eine freie Oberflächenenergie der nanobeschichteten Schablonenoberfläche von 15,2 mN/m (14,5 mN/m disperser Anteil, 0,7 mN/m polarer Anteil). In Abbildung 47 sind die sich einstellenden Kontaktwinkel für eine unbeschichtete und eine nanobeschichtete Schablonenoberfläche unter Verwendung von Wasser als Testflüssigkeit dargestellt.

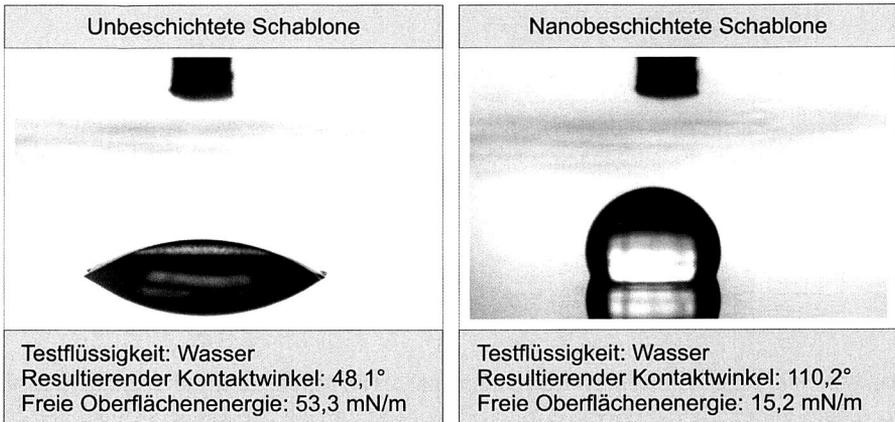


Abbildung 47: Ausbildung der Kontaktwinkel auf einer unbeschichteten und einer beschichteten Schablonenoberfläche [147]

Mit einer freien Oberflächenenergie der nanobeschichteten Schablonenoberfläche von $15,2 \text{ mN/m}$ liegt die antiadhäsive Wirkung in der Größenordnung der freien Oberflächenenergie einer elektropolierten und plasmabeschichteten Schablonenoberfläche [54].

4.3.3 Potenziale für den Schablonendruckprozess

Die Funktionalisierung der Schablonenoberfläche an den Aperturwänden und auf der Leiterplattenseite der Schablone durch die Nanobeschichtung führt zu einer Reduzierung der Adhäsionskräfte zwischen Druckschablone und Lotpaste. Hierdurch soll einerseits das Auslösen der Lotpaste aus den Aperturen erleichtert werden, so dass weniger Pastenrückstände in den Aperturen verbleiben und eine höhere Transfereffizienz erzielt werden kann. Andererseits soll das Anhaften von Pastenrückständen auf der Leiterplattenseite der Druckschablone reduziert werden. Die sich hieraus ergebenden Potenziale für den Druckprozess werden im Folgenden durch geeignete Druckversuche dargestellt und bewertet.

Das im Rahmen der Druckversuche eingesetzte Testlayout, das in Abbildung 48 visualisiert ist, hat zum Ziel, die Unterschiede im Druckverhalten einer unbeschichteten und einer nanobeschichteten Druckschablone aufzuzeigen. Vor diesem Hintergrund verfügt das Testlayout über ein breites Aperturspektrum, das ausgehend von druckunkritischen Geometrien über den druckkritischen Bereich bis hin zu Aperturen reicht, die nicht gedruckt werden können. Neben realen Strukturen existieren auch fiktive Druckgeometrien, die sich zur Bewertung des Druckverhaltens prinzipiell gut eignen. Insgesamt existieren sieben Strukturbereiche, in denen geometriespezifische Einflussgrößen variiert

werden. Zum Einsatz kommen eine unbeschichtete sowie eine nanobeschichtete Edelstahl-schablone (lasergeschnitten, mechanisch gebürstet) mit einer Schablonendicke von jeweils 150 μm . Alle relevanten Prozessparameter der Druckversuche sowie wesentliche Randbedingungen können dem Anhang entnommen werden.

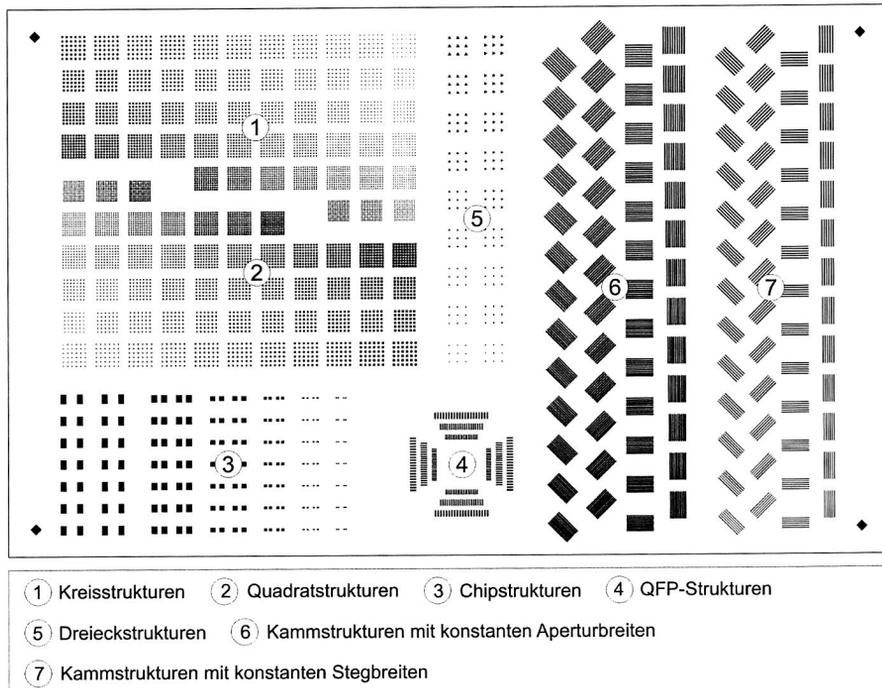


Abbildung 48: Testlayout mit unterschiedlichen Strukturbereichen zur Untersuchung der Potenziale nanobeschichteter Druckschablonen

Druckbarkeit der Kammstrukturen

Die Bewertung der Druckbarkeit von Kammstrukturen stellt eine einfache Möglichkeit dar, um die Druckeignung unterschiedlicher Lotpasten, alternativer Druckschablonen oder variierender Druckparameter beurteilen zu können [161]. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen kommen diese Strukturen zur Beurteilung des Effekts der Nanobeschichtung zum Einsatz. Grundsätzlich ist bei der Auswertung zwischen den Kammstrukturen des Strukturbereichs 6 (konstante Aperturbreiten) und des Strukturbereichs 7 (konstante Stegbreiten) zu unterscheiden. Alle Kammstrukturen des Strukturbereichs 6 weisen eine konstante Aperturbreite von 220 μm auf, wohingegen die Breite der Stege zwischen den einzelnen Aperturen beginnend von 200 μm in 10 μm Schritten

bis zu einer Stegbreite von 80 µm abnimmt. Im Gegensatz dazu beträgt die Stegbreite des Strukturbereichs 7 konstant 250 µm, wobei die Aperturbreite von 220 µm in 10 µm Schritten bis 100 µm abnimmt. Alle Strukturen der Bereiche 6 und 7 liegen in vier unterschiedlichen Orientierungen vor (0°, 45°, 90° und 135°).

Hinsichtlich der Auswertung sind die gedruckten Kammstrukturen auf ihre Fehlerfreiheit hin zu bewerten, wobei fehlerfrei gedruckte Kammstrukturen weder Druckbrücken noch offene Kämmen aufweisen [148] [149]. In Abbildung 49 sind exemplarisch fehlerhaft und fehlerfrei gedruckte Kammstrukturen des Strukturbereichs 6 unter Verwendung der beiden Schablonentechnologien für den 1. und den 10. Druck gegenübergestellt.

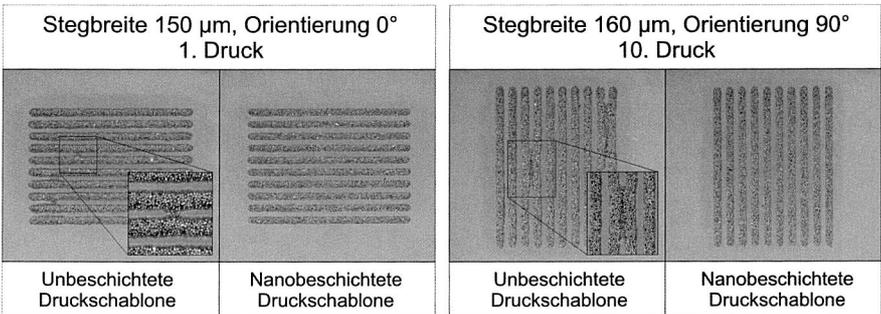


Abbildung 49: Gegenüberstellung fehlerhaft und fehlerfrei gedruckter Kammstrukturen des Strukturbereichs 6

Wie die Auswertung der Kammstrukturen des Strukturbereichs 6 aller bedruckter Leiterplatten zeigt, lassen sich unter Verwendung nanobeschichteter Druckschablonen grundsätzlich 10 µm bis 30 µm feinere Linienauflösungen drucken. Ursächlich hierfür ist die reduzierte Adhäsion zwischen Schablonenoberfläche und Lotpaste. Diese hat zur Folge, dass beim Trennvorgang von Leiterplatte und Druckschablone kaum Lotpaste um die Aperturkante umgelenkt wird und auf der Schablonenunterseite verbleibt. Einerseits führt dies dazu, dass vor allem zu Beginn einer Druckserie die Bildung von Lotpastenbrücken unterhalb von schmalen Schablonenstegen beim Trennvorgang zwischen Leiterplatte und Druckschablone reduziert wird. Andererseits kann mit zunehmender Druckanzahl das Drucken von Lotpastenbrücken aufgrund eines nicht planaren Aufliegens der Schablone auf der Leiterplatte stark verringert werden. Die druckbare Linienauflösung korreliert somit direkt mit dem Anhaften von Pastenresten an der Schablonenunterseite.

Im Vergleich zu einer unbeschichteten Druckschablone lassen sich unter Verwendung einer nanobeschichteten Druckschablone wesentlich feinere Strukturauflösungen realisieren. Aber auch im Vergleich zu einer elektropolierten Edelstahlschablone oder einer galvanisch hergestellten Nickelschablone zeigt sich diesbezüglich das enorme Potenzial

der Nanobeschichtung. Während Kammstrukturen mit einer Apertur- und Stegbreite von 200 μm bei einer Schablonendicke von 127 μm im Rahmen einer Druckserie mit 25 Drucken ohne Reinigung der Schablonenunterseite fehlerfrei gedruckt werden können, kommt es bei den alternativen Schablonentechnologien bereits nach dem 6. Druck zu Brückenbildung bei dieser Strukturgröße [148] [149].

Druckbarkeit der QFP-Strukturen

Das in Abbildung 48 dargestellte Testlayout beinhaltet in Strukturbereich 4 Aperturen für QFP-Bauelemente mit den Rastermaßen 500 μm , 400 μm und 300 μm , wobei die realisierten Aperturabmessungen den Richtlinien aus [118] entsprechen. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den Aperturen um Teststrukturen handelt, die das Potenzial einer nanobeschichteten Druckschablone aufzeigen sollen. Hierin liegt auch der Unterschied zwischen der empfohlenen Schablonendicke aus [118] und der realisierten Schablonendicke von 150 μm für die QFP-Strukturen mit den Rastermaßen 400 μm und 300 μm begründet.

Bei der Auswertung der QFP-Strukturen aller bedruckten Leiterplatten zeigt sich, dass unter Verwendung einer nanobeschichteten Druckschablone alle Strukturgrößen des Strukturbereichs 4 ohne Brückenbildung druckbar sind. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Verwendung einer unbeschichteten Druckschablone bei dem Rastermaß 300 μm ab dem 3. Druck und bei dem Rastermaß 400 μm ab dem 9. Druck zu Brückenbildung. Verantwortlich hierfür ist die unterschiedliche Verschmutzungsneigung der Schablonenunterseite, die bereits bei den Kammstrukturen zu Unterschieden in der druckbaren Linienauflösung geführt hat. Die Visualisierung der Schablonenunterseite nach dem 5. Druck, dargestellt in Abbildung 50, bestätigt dieses unterschiedliche Verhalten in signifikanter Weise. Während die unbeschichtete Druckschablone große Mengen an Pastenrückständen auf der Unterseite und in den Rundungen der Oblongstrukturen aufweist, können keine Pastenrückstände auf der nanobeschichteten Druckschablone identifiziert werden.

Das Potenzial der nanobeschichteten Druckschablone für die Druckbarkeit von QFP-Strukturen zeigt sich auch im Vergleich zu einer elektropolierten Edelstahlschablone oder einer galvanisch aufgebauten Nickelschablone. Unter Verwendung einer nanobeschichteten Druckschablone (Schablonendicke 127 μm) können QFP-Strukturen mit den Rastermaßen 500 μm , 400 μm und 300 μm ohne Reinigung der Schablonenunterseite über 25 Drucke fehlerfrei gedruckt werden. Im Gegensatz dazu treten bei den alternativen Schablonentechnologien Druckbrücken bereits nach dem 5. Druck (QFP 400 μm) beziehungsweise dem 2. Druck (QFP 300 μm) auf. [148]

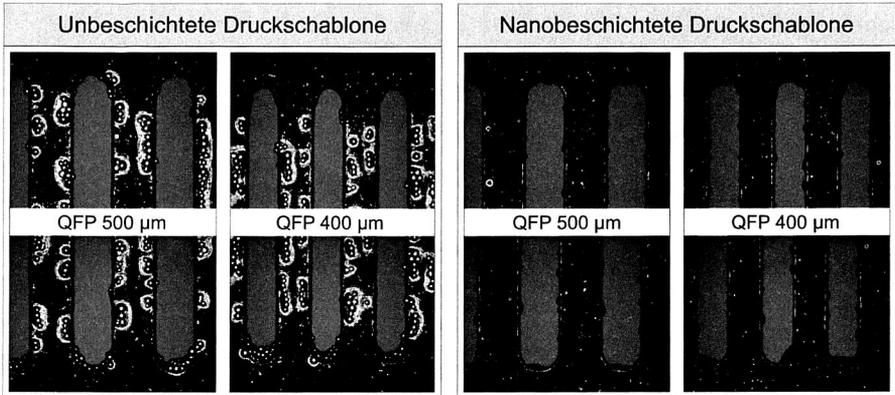


Abbildung 50: Unterseite einer unbeschichteten und einer nanobeschichteten Druckschablone im Bereich zweier QFP-Strukturen nach dem 5. Druck

Die Bildung von Druckbrücken bei den betrachteten QFP-Strukturen stellt eine direkte Folge des Überdrückens der Pastendepots dar. Ursächlich hierfür ist das nicht mehr planare Aufliegen der Schablone auf der Leiterplatte aufgrund der anhaftenden Pastenrückstände auf der Schablonenunterseite. Unter Verwendung einer nanobeschichteten Druckschablone lässt sich der Effekt des Überdrückens erheblich reduzieren, so dass im Vergleich zu einer unbeschichteten Druckschablone Pastendepots mit einer geringeren Abweichung bezüglich Sollvolumen (Transfereffizienz = 100 %) und Sollhöhe (Pastendepothöhe = 150 µm) realisiert werden können. Ein Beleg hierfür ist die Gegenüberstellung der Transfereffizienzen und Pastendepothöhen für die QFP-Strukturen mit den Rastermaßen 500 µm und 400 µm in Abbildung 51.

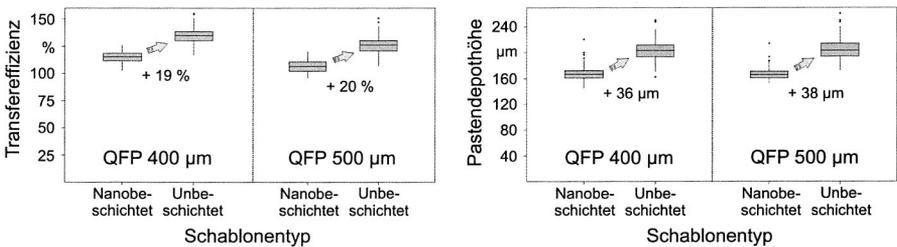


Abbildung 51: Unterschiede in der Transfereffizienz und Pastendepothöhe zwischen nanobeschichteter und unbeschichteter Druckschablone als Folge des Effekts der Überdruckung

Im Hinblick auf die Transfereffizienz bewirkt der Effekt der Überdruckung einen Anstieg um etwa 20 %, wohingegen die Höhen der Pastendepots um 35 µm bis 40 µm zunehmen. Beide Zahlenwerte lassen sich plausibel dadurch begründen, dass eine Lage des

verwendeten Lotpastentyps 3 an der Schablonenunterseite anhaftet. Neben der Erhöhung der Transfereffizienzen und Pastendepothöhen durch den Effekt der Überdrückung führt das Anhaften von Pastenrückständen auf der Schablonenunterseite aber auch zu einer Zunahme der Prozessstreuungen. Während für eine QFP-Struktur mit Rastermaß 400 µm unter Verwendung einer nanobeschichteten Druckschablone stabile Transfereffizienzen von 100 % bis 110 % über eine Druckanzahl von 16 Drucken realisiert werden können, liegen die Transfereffizienzen bei einer unbeschichteten Druckschablone über die gleiche Anzahl von Drucken hingegen in einem Bereich zwischen 100 % und 140 % [82].

Druckbarkeit der Kreisstrukturen

Im Gegensatz zur Bewertung der Druckbarkeit von Kammstrukturen und QFP-Strukturen steht bei der Auswertung der Druckbarkeit der Kreisstrukturen nicht das Anhaften von Pastenrückständen auf der Schablonenunterseite im Fokus, sondern das Auslösen der Lotpaste aus druckkritischen Kreisstrukturen mit kleinen Flächenverhältnissen. Hierfür sind in dem Strukturbereich 1 des Testlayouts Kreisstrukturen mit variierenden Rastermaßen und Aperturdurchmessern vorgesehen. Die Durchmesser der kreisförmigen Aperturen reichen von 400 µm in 25 µm Schritten bis hinunter zu 150 µm, so dass sich auf Basis der Schablonendicke von 150 µm Flächenverhältnisse von 0,67 bis 0,25 ergeben.

In Abbildung 52 sind die Transfereffizienzen der Kreisstrukturen unter Verwendung der nanobeschichteten und der unbeschichteten Druckschablone für die Lotpastentypen 3 und 4 dargestellt. Durch den Einsatz einer nanobeschichteten Druckschablone kann im druckkritischen Bereich wesentlich mehr Lotpaste auf die Leiterplatte transferiert werden, was sich in Form von höheren Transfereffizienzen äußert. Unabhängig von dem gewählten Lotpastentyp ergeben sich für Flächenverhältnisse zwischen 0,67 und 0,54 etwa 10 % bis 15 % höhere Transfereffizienzen. Neben der Erhöhung der Transfereffizienzen können durch den Einsatz nanobeschichteter Druckschablonen signifikant geringere Prozessstreuungen innerhalb der einzelnen Aperturgruppen realisiert werden.

Die Reduzierung der Adhäsionskräfte zwischen Lotpaste und Schablonenoberfläche durch die Nanobeschichtung führt zu einem verbesserten Auslöseverhalten. An den Aperturwandungsflächen einer nanobeschichteten Druckschablone bleiben kaum Pastenrückstände zurück, wie Abbildung 53 eindeutig belegt. Hierdurch lassen sich prinzipiell Strukturen mit kleineren Flächenverhältnissen im Schablonendruckprozess realisieren. Dieses Potenzial zeigt sich auch im Vergleich zu elektropolierten Edelstahlschablonen oder galvanisch aufgebauten Nickelschablonen [145] [148]. In Anbetracht der erzielten Transfereffizienzen aus Abbildung 52 erscheinen für nanobeschichtete Druckschablonen grundsätzlich Flächenverhältnisse von 0,50 (Lotpastentyp 3) beziehungsweise 0,46 (Lotpastentyp 4) realisierbar.

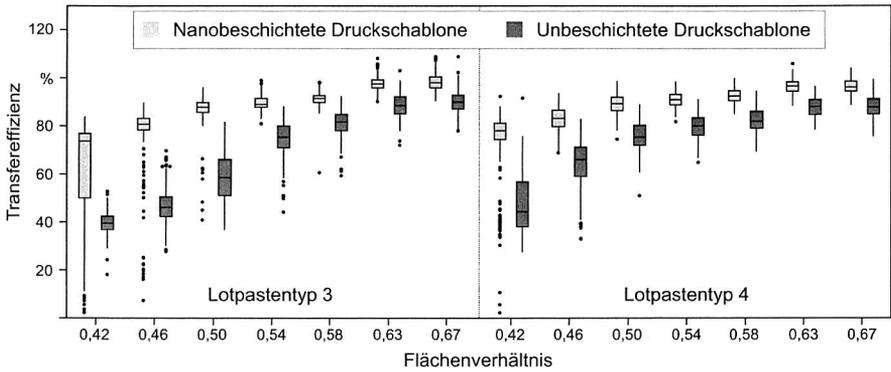


Abbildung 52: Unterschiede in der Transfereffizienz zwischen nanobeschichteter und unbeschichteter Druckschablone als Folge des besseren Auslöseverhaltens [147]

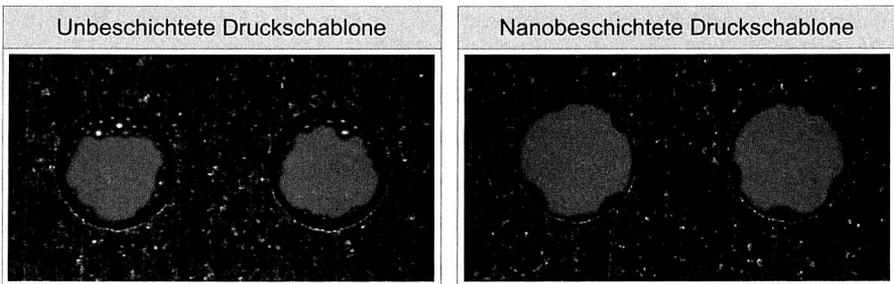


Abbildung 53: Unterseite einer unbeschichteten und einer nanobeschichteten Druckschablone im Bereich von Kreisstrukturen mit Flächenverhältnissen von 0,63 nach dem 5. Druck (Lotpastentyp 4)

Während das in Abbildung 48 dargestellte Testlayout zum Nachweis des Potenzials nanobeschichteter Druckschablonen grundsätzlich ausreicht, ist hinsichtlich der Ableitung von geeigneten Designrichtlinien ein angepasstes Versuchslayout mit einer feineren Teilung des Flächenverhältnisses notwendig. Das weiterentwickelte Testlayout weist ebenfalls eine Schablonendicke von 150 μm auf und beinhaltet 48 Aperturgruppen mit jeweils 49 kreisförmigen Aperturen, die in einer 7 x 7-Matrix (Rastermaß 1 mm) angeordnet sind. Ausgehend von einem Flächenverhältnis von 0,80 nehmen die Flächenverhältnisse von Aperturgruppe zu Aperturgruppe in Schritten von 0,01 ab. Das kleinste realisierte Flächenverhältnis beträgt folglich 0,33. Zum Einsatz kommen eine unbeschichtete und eine nanobeschichtete Edelstahlschablone (lasergeschritten, mechanisch gebürstet). Die wesentlichen Prozessparameter und Randbedingungen der durchgeführten Druckversuche können wiederum dem Anhang entnommen werden. Im

Vergleich zu der vorherigen Untersuchung erfolgt jedoch eine Anpassung der für den Füllvorgang der Aperturen relevanten Prozessparameter Raketwinkel, Raketkraft und Raketgeschwindigkeit. Hierdurch soll ein zuverlässiges Befüllen der Aperturen sichergestellt werden, das bei Aperturen mit kleinen Flächenverhältnissen zunehmend an Bedeutung gewinnt.

In Abbildung 54 sind die unter Verwendung des weiterentwickelten Testlayouts für beide Schablonentypen erzielten Transfereffizienzen dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Darstellung auf Flächenverhältnisse zwischen 0,33 und 0,60 beschränkt. Grundsätzlich zeigen sich auch hier das bessere Auslöseverhalten sowie die geringere Prozessstreuung der nanobeschichteten Druckschablone im Vergleich zur unbeschichteten Druckschablone. Die Bewertung des Auslöseverhaltens der Lotpaste anhand der Pastenrückstände, die in der Aperturwandung verbleiben, bestätigt diese Beobachtung. Während kaum Pastenrückstände in der Aperturwandung einer nanobeschichteten Druckschablone nachgewiesen werden können, führt das schlechtere Auslösen der Lotpaste bei einer unbeschichteten Schablone zu einem ungenügenden Pastentransfer bei kleinen Flächenverhältnissen. Diese Beobachtung ist in Abbildung 55 visualisiert.

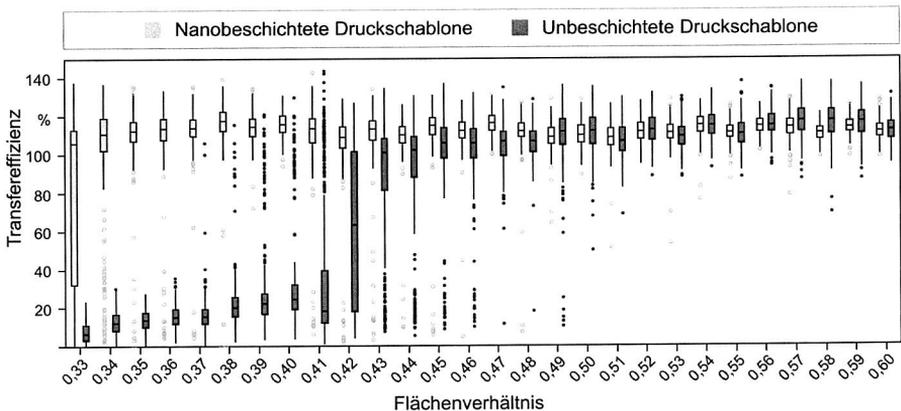


Abbildung 54: Transfereffizienzen der nanobeschichteten und unbeschichteten Druckschablone im Bereich von Flächenverhältnissen zwischen 0,33 und 0,60 unter Verwendung des Lotpastentyps 4

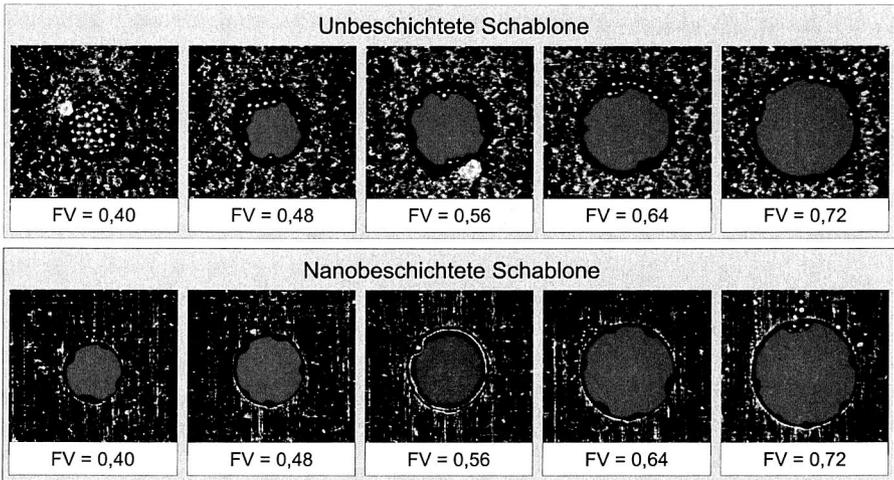


Abbildung 55: Auslöseverhalten der Lotpaste aus den Aperturen einer unbeschichteten und einer nanobeschichteten Druckschablone bei unterschiedlichen Flächenverhältnissen (FV)

Im Vergleich zu Abbildung 52 fällt zunächst auf, dass sich in Abbildung 54 ein signifikanter Unterschied in den Transfereffizienzen beider Schablontechnologien erst für Flächenverhältnisse nachweisen lässt, die kleiner als 0,48 sind. Eine weitere Auffälligkeit stellen die hohen Transfereffizienzen dar, die unter Verwendung der nanobeschichteten Druckschablone bis hinunter zu Flächenverhältnissen von 0,35 erzielt werden können. Beide Beobachtungen sind auf die Anpassung der wesentlichen Prozessparameter zurückführbar. Durch die Verkleinerung des Rakelwinkels, die Erhöhung der Rakelkraft sowie die Verringerung der Rakelgeschwindigkeit lassen sich auslöse- und füllkritische Aperturen besser mit Lotpaste befüllen, so dass letztendlich auch ein größeres Pastenvolumen auf die Leiterplatte transferiert werden kann. Dies gilt jedoch nur für den Fall, dass das Pastenvolumen auch aus der Apertur ausgelöst werden kann. In der Folge verschiebt sich der Unterschied zwischen den beiden Schablontechnologien hin zu kleineren Flächenverhältnissen.

Trotz der stabil hohen Transfereffizienzen der nanobeschichteten Druckschablone bis hinunter zu Flächenverhältnissen von 0,35 treten ab einem Flächenverhältnis von 0,48 vereinzelt Ausreißer mit sehr geringen Transfereffizienzen auf. Diese haben ihre Ursache in einem unzureichenden Füllvorgang, wie aus Abbildung 56 ersichtlich ist. Der Vergleich des auf die Leiterplatte transferierten Pastenvolumens mit den Pastenanhaftungen in der Schablonenapertur belegt, dass die Apertur nicht vollständig mit Lotpaste gefüllt werden konnte. Bedingt durch die partielle Füllung der Apertur reißt das Pasten-

depot während des Trennvorgangs kohäsiv, so dass ein Großteil der Lotpaste in der Schablonenapertur verbleibt.

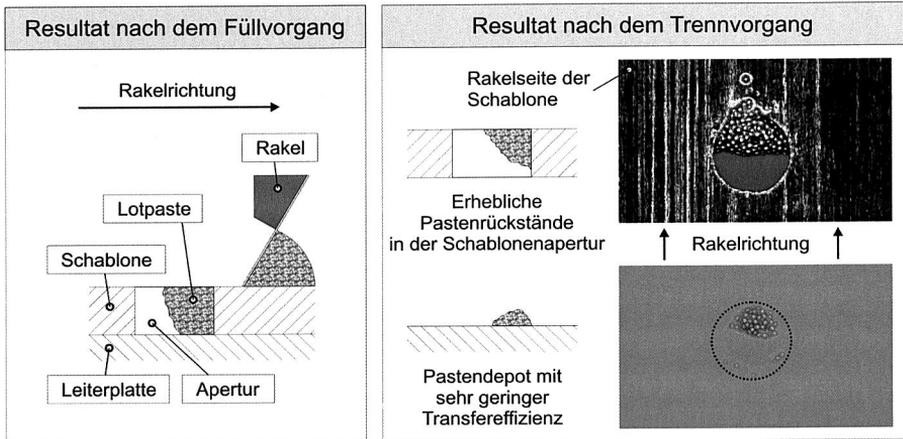


Abbildung 56: Partielle Aperturfüllung als Ursache für das Auftreten von Ausreißern in der Transfereffizienz

Während die technologische Leistungsfähigkeit einer unbeschichteten Schablone bei Flächenverhältnissen zwischen 0,44 und 0,48 erreicht zu sein scheint, weil sich die Lotpaste nicht mehr aus der Schablonenapertur auslösen lässt, erscheinen weitaus kleinere Flächenverhältnisse unter Verwendung einer nanobeschichteten Druckschablone prinzipiell realisierbar. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein zuverlässiges Befüllen der Aperturen, das bei sehr kleinen Flächenverhältnissen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Eine entscheidende Einflussgröße auf den Füllvorgang stellt die Beschaffenheit der Aperturwandung dar. Wie im Rahmen durchgeführter Druckversuche festgestellt werden konnte, lassen sich Aperturen mit sehr kleinen Flächenverhältnissen immer dann zuverlässig befüllen, wenn diese frei von Pasten- und Flussmittlrückständen sind. Dies zeigt sich auch im Rahmen weiterführender Untersuchungen, bei denen die Aperturwandungen vor jedem Druckzyklus durch eine Vakuumreinigung der Schablonenunterseite vollkommen von Rückständen befreit werden.

Wie aus Abbildung 57 ersichtlich ist, treten bei der nanobeschichteten Druckschablone keinerlei Ausreißer im Bereich von Flächenverhältnissen zwischen 0,36 und 0,48 auf. Dies ist auf das zuverlässige Befüllen der Schablonenaperturen zurückzuführen. Auf Basis dieser Auswertung erscheinen auch Flächenverhältnisse von 0,36 prinzipiell realisierbar. Die aperturgetreue Ausprägung der Pastendepots bis hinunter zu Flächenverhältnissen von 0,36, dargestellt in Abbildung 58, belegt das Potenzial der nanobeschichteten Druckschablone. Mit beinahe senkrecht ansteigenden Depotflanken sowie

eines sehr gleichmäßigen Höhenniveaus kann eine kegelförmige Depotausprägung, wie sie typischerweise bei alternativen Schablontechnologien und sehr kleinen Flächenverhältnissen auftritt, vollständig vermieden werden.

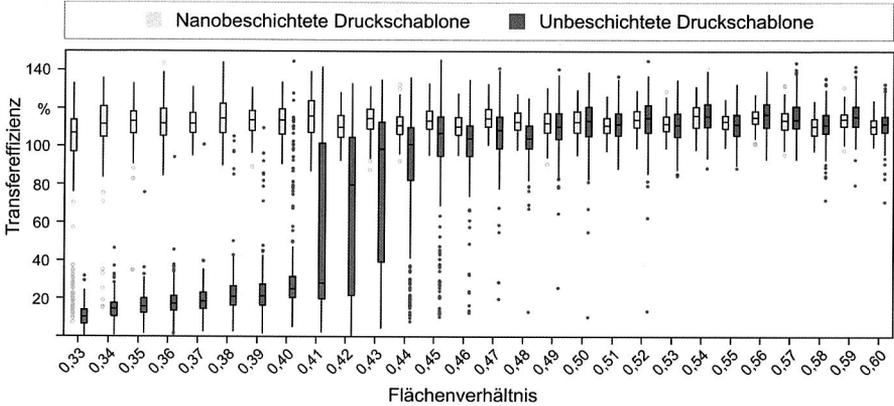


Abbildung 57: Transfereffizienzen der nanobeschichteten und unbeschichteten Druckschablone im Bereich von Flächenverhältnissen zwischen 0,33 und 0,60 unter Verwendung einer Lotpaste des Typs 4 [147]

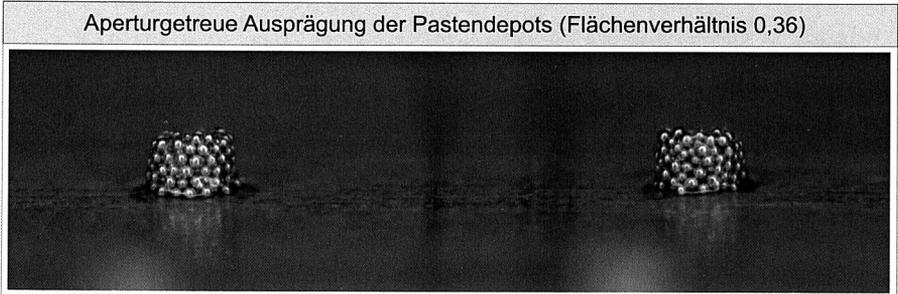


Abbildung 58: Perspektivische Darstellung zweier repräsentativer Pastendepots unter Verwendung einer nanobeschichteten Druckschablone und einer Lotpaste des Typs 4 [147]

4.3.4 Gestaltungsrichtlinien und Prozessempfehlungen für den Einsatz nanobeschichteter Druckschablonen

Die aufgezeigten Potenziale, die sich durch den Einsatz nanobeschichteter Druckschablonen für den Schablonendruckprozess ergeben, erlauben eine Erweiterung der aktuell gültigen Designrichtlinien der IPC-7525A. Das Flächenverhältnis als wohl wichtigste Gestaltungsvorgabe lässt sich unter Verwendung einer nanobeschichteten

Druckschablone bis auf einen Wert von 0,36 reduzieren. Neben einer geeigneten Lotpaste setzt dies vor allem auch einen optimal eingestellten Druckprozess voraus. Bezüglich der Beeinflussung des Auslöseverhaltens der Lotpaste aus der Schablonenapertur durch pastenspezifische oder prozessspezifische Eigenschaften sei an dieser Stelle auf Kapitel 5 dieser Arbeit verwiesen. Im Hinblick auf einen stabilen Druckprozess im industriellen Umfeld wird in jedem Fall empfohlen, das zuverlässige Auslösen der spezifischen Lotpaste aus der nanobeschichteten Schablonenapertur für den installierten Druckprozess zu evaluieren. Neben dem Flächenverhältnis kann auch das Aspektverhältnis an das optimierte Druckverhalten der nanobeschichteten Druckschablone angepasst werden. Aspektverhältnisse von 1,0 sind grundsätzlich möglich, wie die Druckbarkeit der QFP-Strukturen mit Rastermaß 300 μm zeigt.

Im Vergleich zu alternativen Schablonentechnologien bietet der Einsatz einer nanobeschichteten Druckschablone die Möglichkeit, die Häufigkeit der Schablonenunterseitenreinigung drastisch zu reduzieren [82]. Für das Entfernen minimaler Pastenrückstände auf der Schablonenunterseite durch die druckerintegrierte Schablonenunterseitenreinigung reicht in der Regel ein Vakuum-Trocken-Reinigungszyklus aus. Im Falle ange trockneter Pastenrückstände auf der Schablonenunterseite und in den Schablonenaperturen empfiehlt sich ein Nass-Vakuum-Trocken-Reinigungszyklus. Hierbei ist darauf zu achten, dass das auf die Schablone aufgetragene Reinigungsmedium auch vollständig durch das Reinigungstuch wieder aufgenommen wird. Aufgrund der schlechten Benetzung des Reinigungsmediums auf der Schablonenoberfläche und der damit verbundenen lokalen Medienkonzentration in Form von Tropfenbildung bedarf es hier gegebenenfalls einer längeren Verweilzeit des Reinigungstuchs auf der Schablonenunterseite im Trockenschritt. Sowohl für die druckerintegrierte Reinigung als auch für die Reinigung der Schablone in einer Schablonenreinigungsanlage eignen sich grundsätzlich alle wässrigen Reiniger, die hierfür üblicherweise zum Einsatz kommen. Stark alkalische Reiniger hingegen, die auch zur Entfernung von Flussmittelrückständen nach dem Reflowlöten zum Einsatz kommen, greifen die Nanobeschichtung an und führen zu einem Verlust der antiadhäsiven Wirkung.

4.3.5 Zusammenfassende Bewertung nanobeschichteter Druckschablonen

Durch die Minimierung der freien Oberflächenenergie einer nanobeschichteten Schablonenoberfläche können die wirkenden Adhäsionskräfte zwischen Lotpaste und Schablone erheblich reduziert werden. Im Vergleich zu alternativen Schablonentechnologien ergibt sich hieraus eine Vielzahl technologischer Vorteile für den Schablonendruckprozess [82] [145] [148]. Das verbesserte Auslöseverhalten der Lotpaste beim Trennen der Leiterplatte von der Schablone sowie die reduzierte Verschmutzungsneigung auf der Schablonenunterseite wirken sich überaus positiv auf den Druckprozess aus. Aus technologischer Sicht ergibt sich durch den Einsatz nanobeschichteter Druckschablonen im Wesentlichen folgendes Potenzial für den Druckprozess:

- Drucken miniaturisierter Strukturen durch die Reduzierung der realisierbaren Flächen- und Aspektverhältnisse bei der Schablonengestaltung
- Minimierung der qualitätsrelevanten Prozessstreuungen aller Qualitätsmerkmale eines Pastendepots
- Optimierung des Initial- bzw. Andruckverhaltens nach der druckerintegrierten Schablonenreinigung

Neben den technologischen Vorteilen ergibt sich auch aus wirtschaftlicher Sicht enormes Potenzial, das den Mehrkosten der Nanobeschichtung gegenübergestellt werden muss. Einerseits kann durch die reduzierte Verschmutzungsneigung auf der Schablonenunterseite die Häufigkeit der Schablonenunterseitenreinigung reduziert werden. Hieraus resultiert eine Produktivitätssteigerung für den Druckprozess sowie das Einsparen von Reinigungsmedien wie Reiniger und Reinigungstücher. Des Weiteren können Maschinenstillstandzeiten aufgrund des Nachfüllens von Reiniger und Reinigungstücher verringert werden.

Die Standzeit einer nanobeschichteten Druckschablone ist grundsätzlich mit derjenigen einer unbeschichteten Druckschablone zu vergleichen. Hinsichtlich der mechanischen Beständigkeit weist die Nanobeschichtung eine ausreichende Härte und Duktilität auf, um den Anforderungen des Schablonendruckprozesses gerecht zu werden. Die Analyse der druckrelevanten Beschichtungseigenschaften von nanobeschichteten Druckschablonen im Feld belegt die über eine Vielzahl an Druckzyklen gleichbleibenden Beschichtungseigenschaften. Auch die chemische Beständigkeit ist über die Lebensdauer einer nanobeschichteten Druckschablone gegeben, sofern keine stark alkalischen Reiniger mit der Nanobeschichtung in Kontakt kommen.

Grundsätzlich kann durch den Einsatz nanobeschichteter Druckschablonen die Fehlerhäufigkeit im Schablonendruckprozess reduziert werden, so dass Ausschusskosten und Nacharbeitskosten gesenkt werden können. In welchem Maße dies zutrifft, hängt einerseits von der Komplexität der gefertigten Baugruppe, also dem zu druckenden Layout, ab, andererseits aber auch von der Beherrschung des Druckprozesses. Im Einzelfall ist der Nachweis der Rentabilität der Beschichtungskosten über die existierenden Fehlerkosten zu führen. Eine weitere Möglichkeit der Amortisierung ergibt sich, wenn durch die Erhöhung des Durchsatzes im Schablonendruckprozess der Linientakt der Fertigung erhöht werden kann. Letztendlich ist bei der Entscheidung für oder gegen eine nanobeschichtete Druckschablone immer auch die Komplexität des gefertigten Baugruppenspektrums zu berücksichtigen.

5 Steigerung der Baugruppenzuverlässigkeit durch spezifische Optimierungen des Schablonendrucks

Die Zuverlässigkeit einer elektronischen Baugruppe steht in direktem Zusammenhang zur Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieses Kapitels zunächst wesentliche Einflussgrößen auf den Druckprozess identifiziert sowie deren Auswirkungen auf das Druckergebnis quantifiziert. Im Anschluss daran wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Bestimmung von Designrichtlinien für SMT-Druckschablonen vorgestellt. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels stellt die Bereitstellung bauelementspezifisch optimaler Pastenvolumen dar, was insbesondere für das anschließende Kapitel 6 zum Thema Prozessfähigkeitsbeurteilung von enormer Bedeutung ist, da dort die Toleranzgrenzen für die einzelnen Qualitätsmerkmale benötigt werden. In ihrer Gesamtheit haben die aufgezeigten Ansätze und Untersuchungsergebnisse die Optimierung des Schablonendruckprozesses zum Ziel.

5.1 Identifizierung wesentlicher Einflussfaktoren und Quantifizierung deren Auswirkungen auf die Fertigungsqualität

Die Komplexität des Schablonendruckprozesses resultiert aus der Vielzahl der wirkenden Einflussfaktoren sowie der großen Anzahl an Wechselwirkungen. Beispielhaft sei an dieser Stelle der Einfluss einer Leiterplattentopklemmung im Schablonendrucker auf die Transfereffizienzen unterschiedlicher Aperturtypen genannt [104] [143]. In ausreichender Entfernung der Aperturtypen von dem Leiterplattenrand lassen sich Pastendepots mit konstanten Transfereffizienzen realisieren. Im randnahen Bereich kommt es aufgrund der Leiterplattentopklemmung jedoch zu einem Absprung zwischen Leiterplatte und Schablone. Dieser hat zur Folge, dass es bei füllunkritischen Aperturen zu einer Überdruckung und folglich zu höheren Transfereffizienzen kommt, während bei füllkritischen Aperturen kein vollständiger Durchstieg der Lotpaste erzielt werden kann und somit die Transfereffizienzen stark abnehmen. Die Ursache für das Auftreten komplexer Mehrfachwechselwirkungen liegt hier in der Tatsache begründet, dass der Pastendurchstieg bei füllkritischen Aperturen im Randbereich wesentlich von dem hydrodynamischen Fülldruck abhängt, der wiederum eine Funktion des Rakelwinkels, der Rakelkraft und der Lotpastenviskosität darstellt. Da der hydrodynamische Fülldruck als Prozessparameter jedoch nicht erfasst werden kann und somit unbekannt bleibt, erweist sich die richtige Interpretation der Versuchsergebnisse oftmals als äußerst schwierig.

Im Folgenden werden die Auswirkungen wesentlicher Einflussgrößen auf das Druckergebnis quantifiziert und bewertet. Dies umfasst neben Lotpasten- und leiterplattenspezifischen Einflussgrößen auch die Beeinflussung des Druckergebnisses durch Schablonen und Rakeln, wesentliche Maschinenparameter sowie die gewählte Prozessführung.

5.1.1 Bewertung des Auslöseverhaltens alternativer Lotpasten

Dem Auslöseverhalten einer Lotpaste während des Trennvorgangs zwischen Leiterplatte und Druckschablone kommt im Hinblick auf das transferierte Lotpastenvolumen im Schablonendruckprozess besondere Bedeutung zu. Lotpastenspezifische Eigenschaften wie der Pulvertyp, der Metallgehalt oder auch die Viskosität spielen bei diesem Teilprozess eine entscheidende Rolle. Wesentliche Unterschiede im Auslöseverhalten alternativer Lotpasten sind dabei in der Regel nur bei druckkritischen Strukturen zu erkennen, so dass das entworfene und in Abbildung 59 dargestellte Schablonenlayout dies entsprechend berücksichtigt. Die Realisierung von Flächenverhältnissen von 1,00 bis hinunter zu 0,33 stellt sicher, dass neben druckunkritischen Strukturen und nicht druckbaren Strukturen immer auch Aperturen vorhanden sind, die sich im druckkritischen Bereich befinden. So ist es möglich, quantifizierbare Unterschiede im Auslöseverhalten zwischen den einzelnen Lotpasten herauszuarbeiten. Eine wesentliche Voraussetzung stellt in diesem Zusammenhang das vollständige Füllen der Aperturen dar, da Vergleiche hinsichtlich des Auslöseverhaltens nur bei identischen Ausgangssituationen gestattet sind. Sichergestellt wird dies durch eine geeignete Prozessführung mit moderaten Rakelgeschwindigkeiten im Füllprozess.

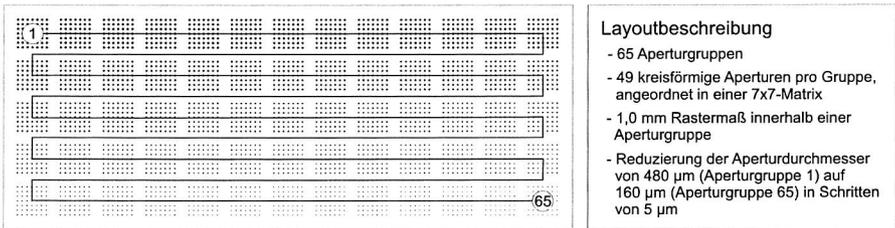


Abbildung 59: Layout der lasergeschnittenen, mechanisch gebürsteten Edelstahl-schablone (Schablonendicke 120 µm) zur Quantifizierung des Auslöseverhaltens alternativer Lotpasten

Im Rahmen der Druckversuche zur Bewertung des Auslöseverhaltens kommen verschiedene Lotpasten mit unterschiedlichen Eigenschaften zum Einsatz. Grundsätzlich unterscheiden sich diese in der Partikelgröße, dem Metallgehalt, der Viskosität sowie dem Flussmittelsystem. Eine Übersicht der verwendeten Lotpasten gibt Tabelle 8. Die Vorgehensweise bei der Durchführung der Druckversuche, die eingesetzten Materialien und Anlagen sowie die gewählten Druck- und Inspektionsparameter können dem Anhang entnommen werden.

Während das Versuchslayout Flächenverhältnisse von 1,00 bis hinunter zu 0,33 vorsieht, beschränkt sich die Auswertung der Versuchsdaten sowie die Darstellung der Transfereffizienzen in den folgenden Abbildungen lediglich auf Flächenverhältnisse in dem Bereich zwischen 0,50 und 0,80. Der Grund hierfür liegt einerseits darin, dass bei

kleineren Flächenverhältnissen zunehmend Ausreißer in den Transfereffizienzen auftreten, die auf ein unzureichendes Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur zurückzuführen sind. Dies hat zur Folge, dass die Verteilung der Messdaten für ein Flächenverhältnis stark von der Normalverteilung abweicht. Andererseits lassen sich pastenspezifische Einflüsse bei größeren Flächenverhältnissen nicht mehr signifikant nachweisen, da die betreffenden Aperturen hinsichtlich des Füllens und AuslöSENS der Lotpaste zunehmend als unkritisch zu bezeichnen sind.

| Bezeichnung Lotpaste | Partikelgröße in μm | Metallgehalt in % | Viskosität in Pa*s | Flussmittel-system | Legierung |
|----------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------|
| L1 | 25-45 | 87,00 | 106,3 | F640 | SnAg4Cu0,5 |
| L2 | 25-45 | 88,50 | 109,6 | F640 | SnAg3Cu0,5 |
| L3 | 25-45 | 89,25 | 129,1 | F640 | SnAg3Cu0,5 |
| L4 | 25-45 | 90,00 | 133,5 | F640 | SnAg3Cu0,5 |
| L5 | 20-38 | 89,00 | 138,8 | F640 | SnAg3Cu0,5 |
| L6 | 10-25 | 89,00 | k.A. | F645 | SnAg3Cu0,5 |
| L7 | 25-45 | 89,25 | 125,7 | F640 | SnAg4Cu0,5 |
| L8 | 25-45 | 89,00 | 140,0 | F823 | SnAg3,5 |
| L9 | 25-45 | 87,50 | 188,0 | F620 | SnAg4Cu0,5 |
| L10 | 25-45 | 89,25 | k.A. | F640*2 | SnAg3Cu0,5 |
| L11 | 25-45 | 89,25 | k.A. | F640*3 | SnAg4Cu0,5 |

Tabelle 8: Wesentliche Eigenschaften der im Rahmen der Druckversuche eingesetzten Lotpasten

Für alle untersuchten Lotpasten lässt sich in den betrachteten Flächenverhältnisbereichen eine Normalverteilung der erzielten Messdaten identifizieren, so dass im weiteren Verlauf der Auswertung die Signifikanz des Lotpasteneinflusses durch eine Varianzanalyse untersucht werden kann. Während der Einfluss des Faktors Flächenverhältnis auf die Transfereffizienz bekannt ist und an dieser Stelle der Arbeit nicht weiter untersucht werden soll, beschränkt sich die folgende Auswertung auf die Analyse der einzelnen Eigenschaften des Faktors Lotpaste.

Einfluss des Metallgehaltes

Die Lotpasten L1, L2, L3 und L4 weisen unterschiedliche Metallgehalte auf, wohingegen die Partikelgrößen und Flussmittelsysteme der Lotpasten identisch sind. Bedingt durch den unterschiedlichen Metallgehalt ergeben sich unterschiedliche Pastenviskositäten, die ebenfalls einen Einfluss auf das Druckergebnis haben. Mit zunehmendem Metallgehalt und zunehmender Pastenviskosität sinkt einerseits die Rollgeschwindigkeit der Lotpaste auf der Druckschablone, so dass grundsätzlich das Füllen der Aperturen er-

schwert wird. Andererseits steigt mit zunehmendem Metallgehalt auch das Risiko, dass Lotpaste vollständig an den Rakeln anhaftet und so für den folgenden Druckzyklus nicht mehr zur Verfügung steht. Eine signifikante Beeinflussung der durchgeführten Druckversuche durch die beiden beschriebenen Effekte kann durch die Wahl geeigneter Versuchsparameter ausgeschlossen werden.

Wie aus dem Haupteffektediagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L1, L2, L3 und L4 in Abbildung 60 ersichtlich ist, kann unter Verwendung eines Metallgehaltes von 89,25 % im Rahmen der Druckversuche grundsätzlich die höchste Transfereffizienz erzielt werden. Sowohl höhere als auch niedrigere Metallgehalte haben vor allem bei zunehmend kleineren Aperturen mit geringeren Flächenverhältnissen eine verminderte Transfereffizienz zur Folge.

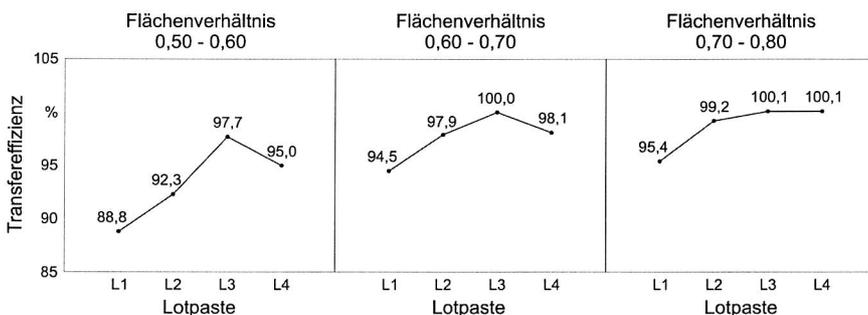


Abbildung 60: Haupteffektediagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L1, L2, L3 und L4 für die Flächenverhältnissbereiche von 0,50 bis 0,60, von 0,60 bis 0,70 und von 0,70 bis 0,80

Ursächlich für die verminderte Transfereffizienz bei der Erhöhung des Metallgehalts von 89,25 % auf 90,00 % ist die höhere Partikeldichte in der Schablonenapertur, die zu einem erschwerten Auslösen der Lotpaste und folglich zu vermehrten Pastenrückständen in der Schablonenapertur führt. In Abbildung 61 sind exemplarisch repräsentative Schablonenaperturen sowie die darin verbleibenden Pastenrückstände dargestellt, die sich unter Verwendung der Lotpasten L3 und L4 ergeben. Eine Reduzierung des Metallgehaltes von 89,25 % auf 88,50 % beziehungsweise 87,00 % führt ebenso zu einer Verringerung der Transfereffizienz. Eine mögliche Ursache hierfür stellt die verminderte Pastenviskosität dar, die sich bei niedrigeren Metallgehalten in der Lotpaste einstellt. Geringe Pastenviskositäten werden in der Literatur als wesentliche Einflussgröße dafür genannt, dass das Pastengefüge während des Auslösevorgangs an dem Punkt der maximalen Stressbelastung einreißt und die Lotpaste nicht vollständig auf die Leiterplatte transferiert werden kann [45]. Die Analyse der in den Schablonenaperturen verbleibenden Pastenrückstände der Lotpasten L1 und L2, in Abbildung 61 dargestellt anhand von drei ausgewählten Aperturen, stützt diese Theorie.

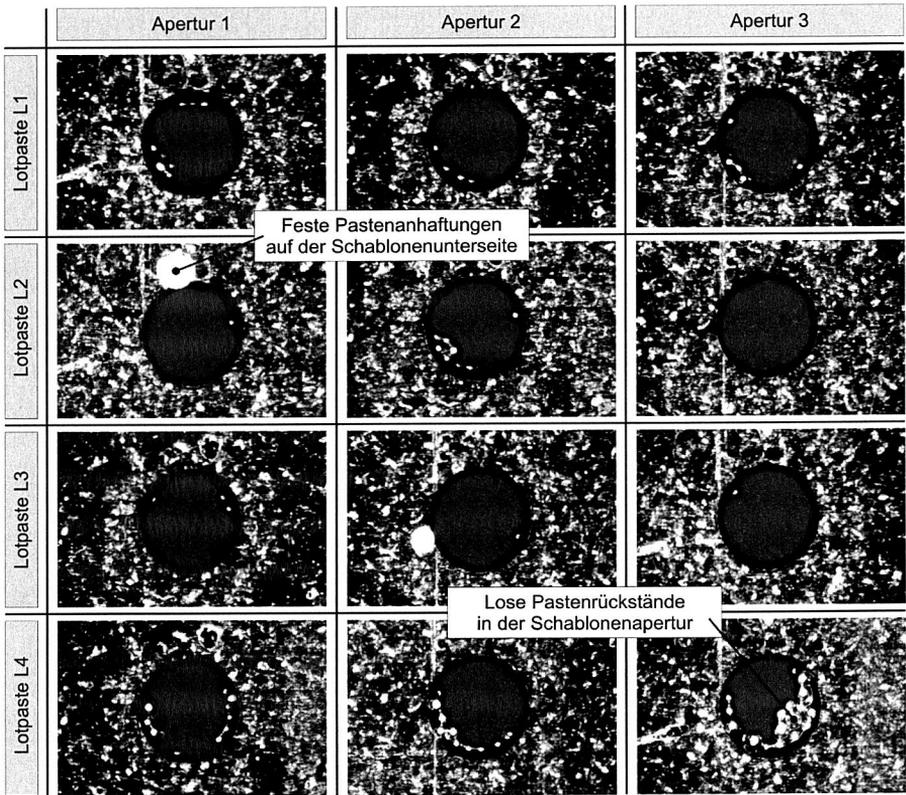


Abbildung 61: Pastenrückstände der Lotpasten L1, L2, L3 und L4 in ausgewählten Schablonenaperturen mit einem Flächenverhältnis von 0,50

Einfluss der Pulverpartikelgröße

Primär unterscheiden sich die Lotpasten L3, L5 und L6 hinsichtlich der Partikelgröße der verwendeten Metallpulver, auch wenn die Lotpasten L5 und L6 aufgrund der geringeren Partikelgröße einen um 0,30 % geringfügig reduzierten Metallgehalt sowie die Lotpaste L6 ein leicht angepasstes Flussmittelsystem aufweisen. Das in Abbildung 62 dargestellte Haupteffektdiagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L3, L5 und L6 belegt, dass sich mit zunehmend kleineren Partikeldurchmessern höhere Transfereffizienzen im druckkritischen Bereich erzielen lassen. Durchschnittlich liegen die Transfereffizienzen des Lotpastentyps 4 mit Pulverpartikelgrößen zwischen 20 µm und 38 µm im Vergleich zu Lotpastentyp 3 mit Pulverpartikelgrößen zwischen 25 µm und 45 µm um etwa 4 % höher.

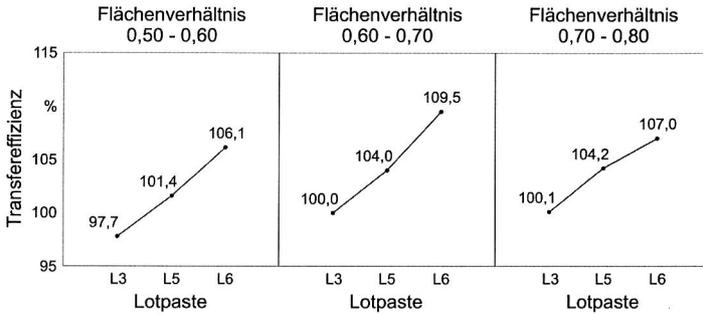


Abbildung 62: Haupteffektdiagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L3, L5 und L6 für die Flächenverhältnisbereiche von 0,50 bis 0,60, von 0,60 bis 0,70 und von 0,70 bis 0,80

Einfluss des Flussmittelsystems

Die Lotpasten L7, L8 und L9 unterscheiden sich hinsichtlich des verwendeten Flussmittelsystems. Während für die Lotpaste L7 ein konventionelles Flussmittelsystem mit moderaten Nassklebekräften zum Einsatz kommt, weisen die Lotpasten L8 und L9 angepasste Flussmittelsysteme mit wesentlich höheren Nassklebekräften auf. Die Erhöhung der Nassklebekräfte führt im Rahmen der Druckversuche zu einer deutlichen Reduzierung der Transfereffizienzen im druckkritischen Bereich, wie aus dem Haupteffektdiagramm in Abbildung 63 ersichtlich ist. Zwischen der Lotpaste L7 mit der geringsten Nassklebekraft und der Lotpaste L9 mit der höchsten Nassklebekraft betragen die Unterschiede in den Transfereffizienzen durchgängig etwa 10 %.

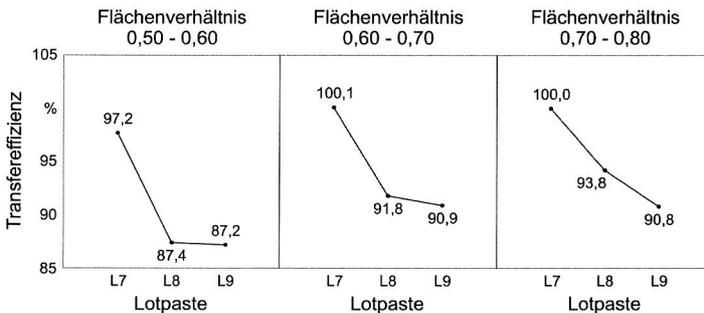


Abbildung 63: Haupteffektdiagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L7, L8 und L9 für die Flächenverhältnisbereiche von 0,50 bis 0,60, von 0,60 bis 0,70 und von 0,70 bis 0,80

Die Analyse der in den Schablonenaperturen verbleibenden Pastenrückstände der Lotpasten L7, L8 und L9 belegt den enormen Einfluss des Flussmittelsystems bezie-

ungsweise der Nassklebekraft auf das Auslöseverhalten. Während unter Verwendung von Lotpaste L7 nur vereinzelt Pastenrückstände in den Schablonenaperturen verbleiben, führen die hohen Nassklebekräfte der Lotpasten L8 und L9 zu wesentlich stärkeren Pastenanhaftungen in den Schablonenaperturen. Die repräsentative Darstellung der in den Schablonenaperturen verbleibenden Pastenrückstände der einzelnen Lotpasten in Abbildung 64 belegt dies.

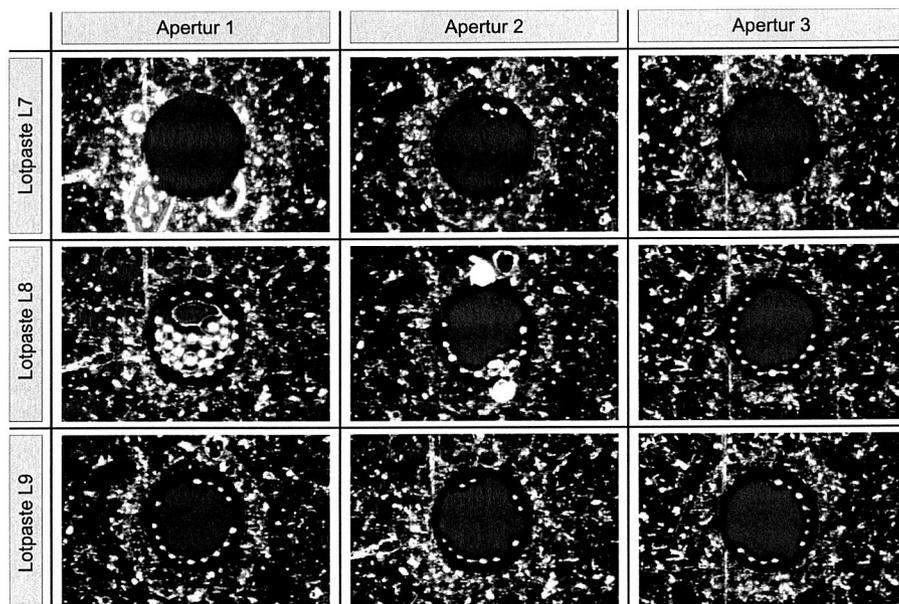


Abbildung 64: Pastenrückstände der Lotpasten L7, L8 und L9 in Schablonenaperturen mit einem Flächenverhältnis von 0,50

Des Weiteren ist auffällig, dass die Lotpaste L8 sehr stark zu Pastenanhaftungen auf der Schablonenunterseite neigt, wohingegen die Lotpaste L9 keinerlei Pastenrückstände auf der Schablonenunterseite aufweist. Dieser Unterschied ist möglicherweise auf den unterschiedlichen Metallgehalt der beiden Lotpasten zurückzuführen.

Einfluss des Verdickeranteils

Die Lotpasten L7, L10 und L11 weisen identische Pulverpartikelgrößen, Metallgehalte und Flussmittelsysteme auf und unterscheiden sich lediglich hinsichtlich ihres jeweiligen Verdickeranteils. Während der Verdickeranteil von Lotpaste L7 im Vergleich der drei Lotpasten am geringsten ist, weist Lotpaste L11 den größten Verdickeranteil auf. Wie aus dem Haupteffektdiagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L7, L10 und

L11 in Abbildung 65 ersichtlich ist, hat der geringste Verdickeranteil der Lotpaste L7 auch die geringsten Transfereffizienzen zur Folge. Im Gegensatz dazu wirken sich die unterschiedlichen Verdickeranteile der Lotpasten L10 und L11 weniger stark auf die erzielten Transfereffizienzen aus.

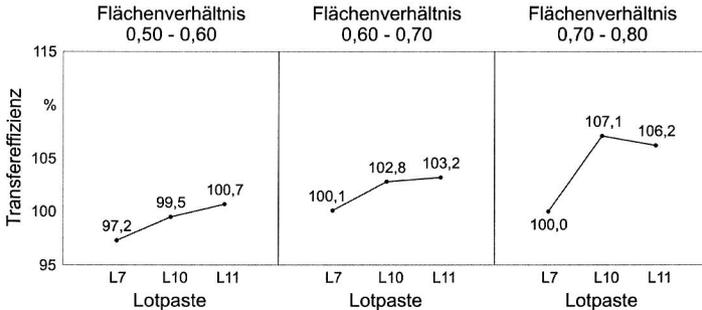


Abbildung 65: Haupteffektdiagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L7, L10 und L11 für die Flächenverhältnisbereiche von 0,50 bis 0,60, von 0,60 bis 0,70 und von 0,70 bis 0,80

Durch die Erhöhung des Verdickeranteils in einer Lotpaste können die resultierenden Lotpastenviskositäten angehoben werden, so dass im druckkritischen Bereich grundsätzlich höhere Transfereffizienzen erzielt werden können. Die Analyse der in den Schablonenaperturen verbleibenden Pastenrückstände der Lotpasten L7 und L10 belegen, dass die Anhebung des Verdickeranteils zu einem besseren Auslöseverhalten der Lotpaste L10 im Vergleich zu Lotpaste L7 führt. Eine weitere Anhebung des Verdickeranteils führt hingegen zu keiner mess- und belegbaren Verbesserung des Auslöseverhaltens, wie die Transfereffizienzen der Lotpasten L10 und L11 sowie die Bewertung der in den Schablonenaperturen verbleibenden Pastenrückstände zeigt.

Einfluss der Charge

Im Hinblick auf die druckspezifischen Eigenschaften weisen die Lotpasten L3 und L7 mit Ausnahme der sehr geringen Viskositätsunterschiede identische Eigenschaften auf, so dass anhand der beiden Lotpasten prinzipiell der Einfluss variierender Lotpastenchargen analysiert werden kann. Das in Abbildung 66 dargestellte Haupteffektdiagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L3 und L7 belegt, dass im druckkritischen Bereich keine signifikanten Unterschiede im Auslöseverhalten der beiden Lotpasten existieren.

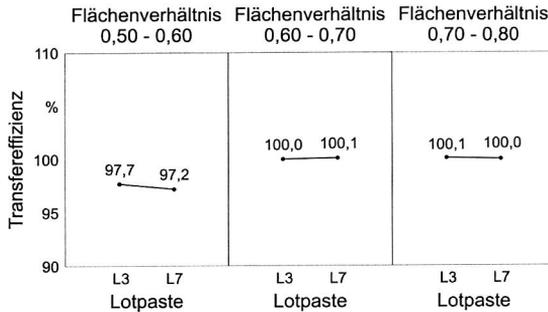


Abbildung 66: Haupteffektediagramm für die Transfereffizienzen der Lotpasten L3 und L7 für die Flächenverhältnissbereiche von 0,50 bis 0,60, von 0,60 bis 0,70 und von 0,70 bis 0,80

Aus dem Vergleich der Transfereffizienzen der Lotpasten L3 und L7 kann hinsichtlich der drucktechnischen Verarbeitungseigenschaften der Lotpasten auf eine sehr gute Chargenkonstanz geschlossen werden.

5.1.2 Einfluss leiterplattenspezifischer Eigenschaften auf das transferierte Lotpastenvolumen

Der Leiterplatte als Einflussfaktor auf das Druckergebnis kommt mit der anhaltenden Miniaturisierung elektronischer Baugruppen zunehmend Bedeutung zu [7]. Sowohl das Befüllen der Aperturen als auch das Auslösen der Lotpaste aus den Schablonenaperturen hängt maßgeblich von der Planarität des Substrates, der Registrierung von Schablonen- zu Leiterplattenlayout sowie der Topographie der Leiterplatte ab. Das letztendlich transferierte Lotpastenvolumen und somit die qualitätsrelevante Transfereffizienz werden hierbei vor allem durch die Höhendifferenz zwischen Padebene und Ebene der Schablonenunterseite als bedeutendem Prozessparameter beeinflusst. Die in Abbildung 67 illustrierten Druckszenarien verdeutlichen den Einfluss der resultierenden Höhendifferenz auf das Druckergebnis. Während im Idealzustand ein vollständiges Füllen der Apertur (siehe auch Abbildung 6) und ein vollständiges Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur (siehe auch Abbildung 8) zu einer Transfereffizienz von 100 % führt, kann mit zunehmender Höhendifferenz einerseits die resultierende Transfereffizienz steigen, da durch den Absprung zusätzliche Lotpaste auf die Leiterplatte aufgetragen wird. Dies setzt jedoch voraus, dass die Geometrie der Schablonenapertur sowie die Lotpasteneigenschaften trotz der erschwerten Auslösebedingungen ein vollständiges Auslösen der Lotpaste zulassen. Andererseits besteht aber auch die Gefahr, dass mit zunehmendem Höhenunterschied die resultierenden Transfereffizienzen fallen. Eine mögliche Ursache stellt der zu geringe hydrodynamische Fülldruck dar, der nicht mehr ausreicht, um die Lotpaste zuverlässig durch die Schablonenapertur auf die Padoberfläche zu transportieren. In der Folge ergeben sich partiell gefüllte Aperturen, bei denen

die Lotpaste nur teilweise oder gar nicht bis auf die Padoberfläche durchsteigt, so dass nach dem Auslösen sehr wenig bis keine Lotpaste auf der Leiterplatte verbleibt. Eine weitere mögliche Ursache stellen die ungünstigen Kraftverhältnisse beim Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur dar. Trotz eines vollständigen Pastendurchstieges besteht die Möglichkeit, dass das Pastendepot bei auslösekritischen Aperturen an dem Punkt der maximalen Stressbelastung einreißt (siehe auch Abbildung 7) und so ein wesentlicher Anteil der Lotpaste in der Apertur verbleibt. Aus der Vielzahl der Einflussgrößen resultiert auch die Komplexität, die sich hinsichtlich der Bewertung des Einflusses der Höhendifferenz auf das Druckergebnis ergibt.

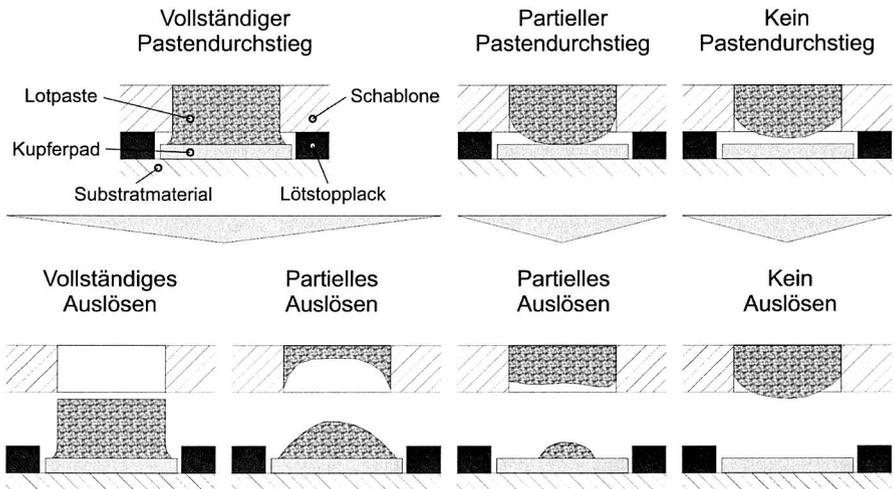


Abbildung 67: Beeinflussung des Füllens der Aperturen sowie des AuslöSENS der Lotpaste durch die Höhendifferenz zwischen Padebene und Ebene der Schablonenunterseite

Welche Höhendifferenz sich im realen Druckprozess zwischen der Padebene und der Ebene der Schablonenunterseite tatsächlich einstellt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Eine wesentliche Einflussgröße stellt in diesem Zusammenhang die mögliche Überhöhung des Lötstopplacks gegenüber den zu bedruckenden Pads dar. Wie aus dem in Abbildung 68 dargestellten Beispiel einer BGA-Struktur ersichtlich ist, beträgt der durch einen 3D-Laserscan ermittelte Höhenunterschied zwischen Lötstopplackebene und Padebene etwa 28 µm. Dieser Höhenunterschied führt zu einer Überdrückung der Pastendepots mit zu hohen Transfereffizienzen, solange die Prozessbedingungen ein vollständiges Befüllen der Aperturen ermöglichen. Kommt es hingegen nur zu einem partiellen Befüllen der Aperturen, sinken die resultierenden Transfereffizienzen.

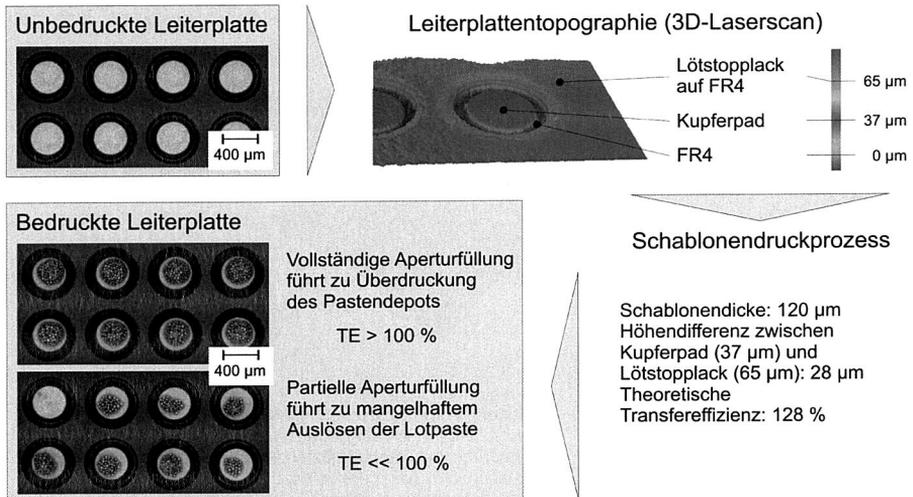


Abbildung 68: Überhöhung des Lötstopplacks gegenüber der Kupferlage der Leiterplatte führt bei BGA-Pastendepots zu einem instabilen Druckprozess mit zu hohen beziehungsweise zu geringen Transfereffizienzen

In welchem Maße die gedruckten Pastendepots tatsächlich einer Überdruckung mit zu hohen Transfereffizienzen unterliegen, hängt neben der Höhendifferenz auf der Leiterplatte auch maßgeblich von der Schablonendicke des zugrunde liegenden Druckprozesses ab. In Abbildung 69 verdeutlicht diesen Zusammenhang der Druckprozess für 01005-Pastendepots. Der über die Kupferlage verlaufende Lötstopplack weist gegenüber der Kupferlage eine Überhöhung von etwa 16 µm auf. Absolut gesehen liegt in diesem Fall die Überhöhung mit 16 µm im Vergleich zu dem Beispiel aus Abbildung 68 mit 28 µm wesentlich niedriger. Unter Berücksichtigung der eingesetzten Schablonendicken ergeben sich für beide Druckanwendungen jedoch ähnliche theoretische Transfereffizienzen.

Neben der Überhöhung des Lötstopplacks gegenüber den zu bedruckenden Anschlusspads existieren weitere Einflussgrößen, die zu Höhendifferenzen zwischen der Padebene und der Ebene der Schablonenunterseite führen können. Hierzu gehören einerseits nicht vollständig oder fehlerhaft ausgehärtete Lötstopplacke, die in der Folge aufgrund von Blasenbildung sehr unebene Oberflächen ausweisen. Andererseits kann es auch bei dem Verschließen von Durchkontaktierungen mit Lötstopplack, dem sogenannten Pluggen, zu einer lokalen Überhöhung des Lötstopplacks kommen, so dass ein planares und vollständiges Aufliegen der Druckschablone auf der Leiterplatte verhindert wird. Aber auch Verschmutzungspartikel auf der Leiterplattenoberfläche oder stark variierende Lötstopplackdicken aufgrund einer unzureichenden Prozessführung bei der Lei-

terplattenherstellung können sich bei kritischen Druckprozessen signifikant auf das Druckergebnis auswirken [146].

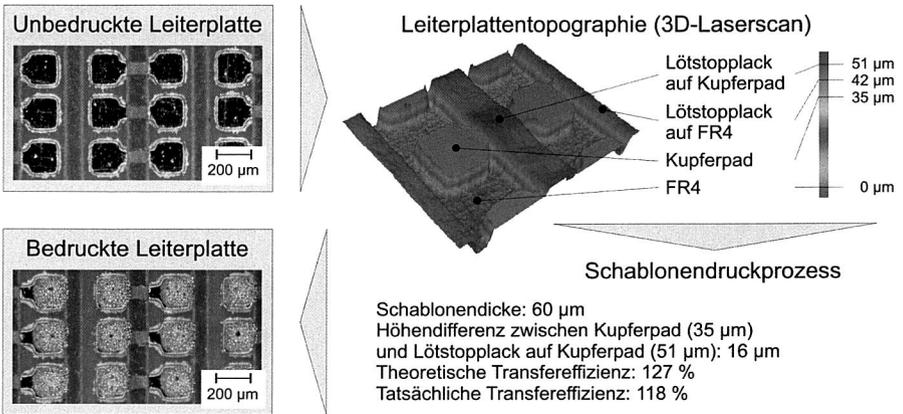


Abbildung 69: Überdruckung von 01005-Pastendepots aufgrund der Überhöhung des Lötstopplacks auf der Kupferlage gegenüber den zu bedruckenden Anschluss pads

5.1.3 Auswirkungen wesentlicher Maschinenparameter auf die Druckqualität

Die Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses wird maßgeblich durch die Einstellung der Maschinenparameter Rakelkraft, Rakelgeschwindigkeit und Trenngeschwindigkeit bestimmt. In der Regel erfolgt im industriellen Umfeld die Festlegung der Maschinenparameter durch erfahrene Maschinenbediener. Deren Aufgabe ist es, sowohl aus technologischer als auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht optimale Prozesseinstellungen zu finden. Hieraus erwächst sich ein Zielkonflikt, der oftmals nur sehr schwer zu lösen ist. Während aus betriebswirtschaftlicher Sicht möglichst hohe Rakel- und Trenngeschwindigkeiten zur Minimierung der Zykluszeiten des Druckprozesses sowie möglichst niedrige Rakelkräfte zur Minimierung des Schablonenverschleißes von Interesse sind, sind aus technologischer Sicht die Bestrebungen gegenläufig, da hohe Rakelkräfte und niedrige Rakelgeschwindigkeiten das Befüllen der Aperturen sowie niedrige Trenngeschwindigkeiten das Auslösen der Lotpaste fördern. In welchem Maße die Maschinenparameter die Druckqualität beeinflussen, wird im Rahmen der folgenden Untersuchung am Beispiel eines komplexen Schablonenlayouts verdeutlicht.

Das in Abbildung 70 dargestellte Versuchslayout befindet sich auf einer lasergeschnittenen, mechanisch gebürsteten und 120 µm dicken Edelstahlschablone. Das Layout beinhaltet unterschiedliche BGA-Strukturen mit den Rastermaßen 1,0 mm, 0,8 mm und 0,5 mm, zwei QFP-Strukturen mit den Rastermaßen 0,5 mm und 0,4 mm sowie unter-

schiedliche Chip-Strukturen. Die Abmessungen der gelayouteten Schablonenaperturen, die Rahmenbedingungen der Druckversuche sowie die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung können dem Anhang entnommen werden.

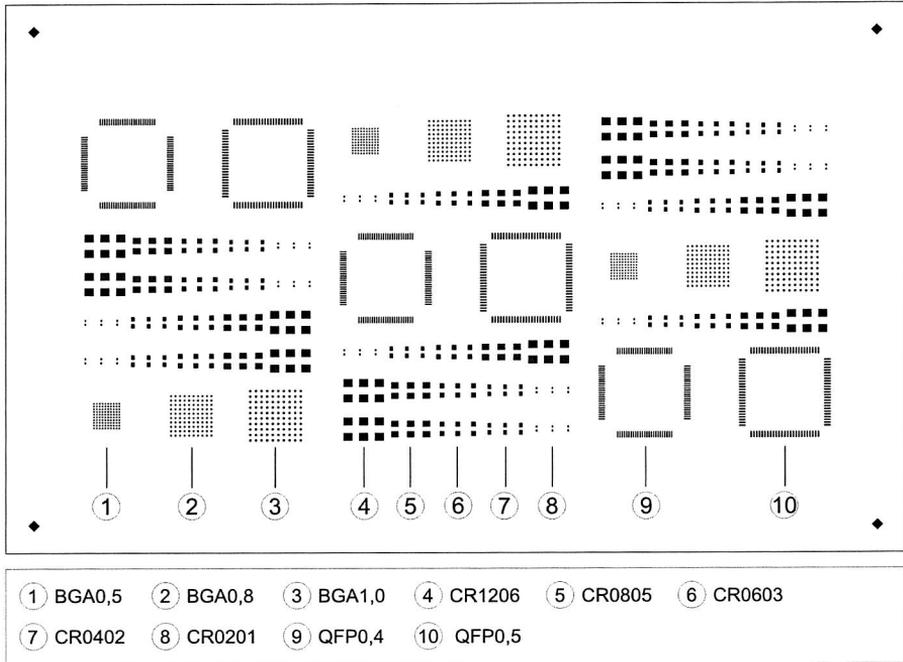


Abbildung 70: Versuchslayout der lasergeschnittenen, mechanisch gebürsteten Edelstahlschablone (Schablonendicke 120 µm) zur Quantifizierung der Einflüsse variierender Prozessparameter auf die Druckqualität

Im Rahmen der Druckversuche erfolgt eine einfaktorielles Variation der Maschinenparameter. Als Grundeinstellung kommt eine Rakelgeschwindigkeit von 50 mm/s, eine Rakelkraft von 2,5 N/cm und eine Trenngeschwindigkeit von 3 mm/s zum Einsatz.

Rakelgeschwindigkeit

Wie die in Abbildung 71 dargestellte Auswertung der Transfereffizienzen der einzelnen Strukturen belegt, nimmt mit zunehmender Rakelgeschwindigkeit die Transfereffizienz über alle Strukturbereiche grundsätzlich ab. Im Vergleich zu einer Rakelgeschwindigkeit von 25 mm/s liegen die Transfereffizienzen des betrachteten Strukturspektrums bei einer Rakelgeschwindigkeit von 100 mm/s um bis zu 15 % niedriger. Zudem führt das Überschreiten einer kritischen Rakelgeschwindigkeit zu einem zunehmend instabilen Druckprozess, da vermehrt Transfereffizienzen unterhalb von 50 % auftreten.

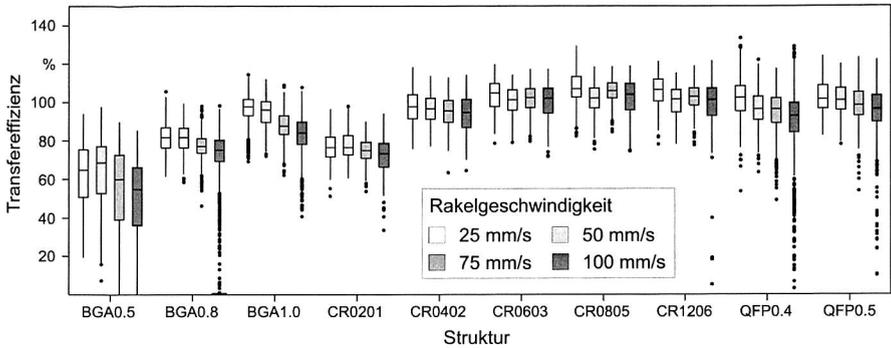


Abbildung 71: Transfereffizienzen der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Rakelgeschwindigkeiten

Ursächlich für die abnehmenden Transfereffizienzen sowie die zunehmenden Prozessinstabilitäten bei höheren Rakelgeschwindigkeiten ist das schlechtere Füllverhalten der Aperturen. Die zu der Befüllung der Schablonenapertur zur Verfügung stehende Zeit reicht bei hohen Rakelgeschwindigkeiten nicht mehr aus, um die Apertur vollständig mit Lotpaste zu füllen. Hieraus resultieren partiell gefüllte Aperturen, die nach dem Trennvorgang zwischen Leiterplatte und Schablone zu Pastendepots mit zu geringen Transfereffizienzen und zu geringen Flächenbedruckungsgraden führen. Dies belegt auch die Auswertung der Flächenbedruckungsgrade, die in Abbildung 72 dargestellt ist.

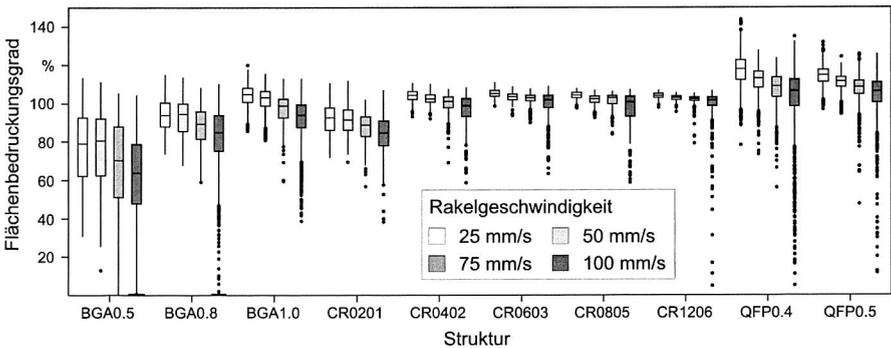


Abbildung 72: Flächenbedruckungsgrade der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Rakelgeschwindigkeiten

Während vor allem bei füllkritischen Strukturen wie QFP-Strukturen oder BGA-Strukturen mit kleinen Flächenverhältnissen eine hohe Rakelgeschwindigkeit zu einer partiellen Aperturfüllung und folglich zu niedrigen Transfereffizienzen und Flächenbedruckungsgraden führt, kann bei zu hohen Rakelgeschwindigkeiten ein weiterer Effekt

beobachtet werden, der vor allem bei füllunkritischen Strukturen auftritt. Trotz ausreichender Transfereffizienzen weisen einzelne Pastendepots der Struktur CR1206 auffällig niedrige Flächenbedruckungsgrade auf, die nur durch eine starke Überhöhung des Pastendepots zu erklären sind. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 73 dargestellt.

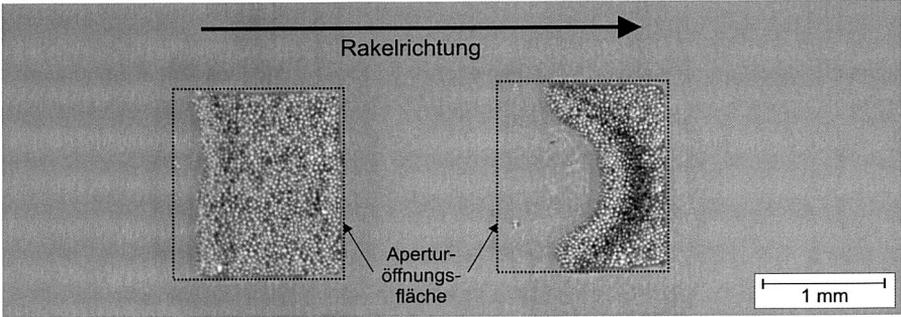


Abbildung 73: Pastendepots der Struktur CR1206 mit ausreichenden Transfereffizienzen, jedoch zu niedrigen Flächenbedruckungsgraden

Tatsächlich kommt es bei besagten Strukturen zu einer starken Überhöhung der Pastendepots, so dass zwar ausreichende Transfereffizienzen, aber zu geringe Flächenbedruckungsgrade die Folge sind. Wie der Darstellung der maximalen Pastendepothöhen in Abbildung 74 entnommen werden kann, betrifft diese Überhöhung vor allem die Strukturen CR1206 und CR0805 mit maximalen Pastendepothöhen von bis zu 450 µm.

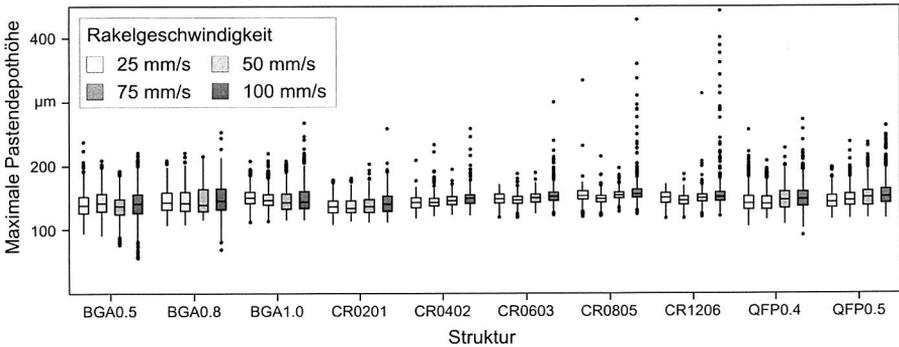


Abbildung 74: Maximale Pastendepothöhen der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Rakelgeschwindigkeiten

Verantwortlich für dieses Phänomen ist der enorme Staudruck, der sich bei hohen Rakelgeschwindigkeiten direkt vor der Rakel bildet. Dieser führt beim Überfahren vor allem großflächiger Aperturen dazu, dass die Lotpaste in der Apertur vor der Rakel herge-

schofen und nicht über der Apertur abgesichert wird. Das beschriebene Phänomen wirkt sich vor allem bei großflächigen Aperturen aus, kann prinzipiell aber für das gesamte Strukturspektrum nachgewiesen werden. Mit zunehmender Raketelgeschwindigkeit steigen folglich auch die maximalen Pastendepothöhen der Pastendepots an.

Der Effekt der Raketelgeschwindigkeit auf die Transfereffizienzen, Flächenbedruckungsgrade und maximalen Pastendepothöhen der Pastendepots ist Abbildung 75 in einem Haupteffektediagramm dargestellt. Aus diesem wird ersichtlich, dass eine Erhöhung der Raketelgeschwindigkeit zu einer Verringerung der Transfereffizienzen und Flächenbedruckungsgrade führt, während die maximalen Pastendepothöhen zunehmen.

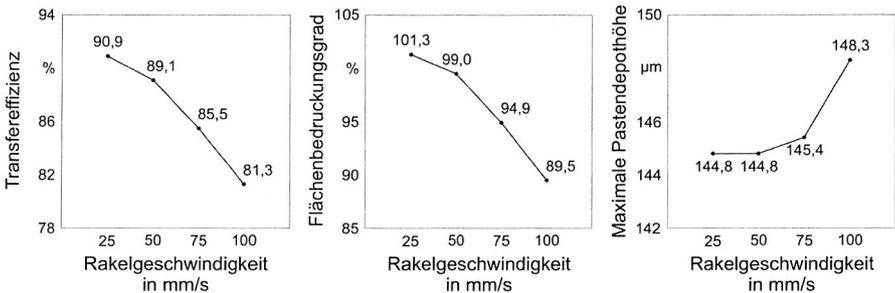


Abbildung 75: Haupteffektediagramm für die Transfereffizienzen, Flächenbedruckungsgrade und maximalen Pastendepothöhen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Raketelgeschwindigkeiten

Rakelkraft

Wie aus der Darstellung der Transfereffizienzen der einzelnen Strukturen in Abbildung 76 ersichtlich ist, treten bei einer Rakelkraft von 1,5 N/cm vor allem bei den Strukturen QFP0,4 und QFP0,5 vereinzelt Pastendepots mit sehr geringen Transfereffizienzen auf. Durch eine Erhöhung der Rakelkraft auf 2,5 N/cm beziehungsweise 3,5 N/cm lassen sich diese Ausreißer in den Transfereffizienzen der Pastendepots beider QFP-Typen verringern beziehungsweise vollständig eliminieren.

Die Ursache hierfür liegt in der Änderung des hydrodynamischen Fülldrucks über der Schablonenapertur, der das Füllverhalten der Aperturen maßgeblich beeinflusst. Mit zunehmender Rakelkraft verringert sich der tatsächliche Winkel, der sich zwischen dem Rakelblatt und der Schablonenoberfläche einstellt. Diese Winkelreduzierung bei höheren Rakelkräften hat eine Erhöhung des hydrodynamischen Fülldrucks zur Folge, so dass füllkritische Strukturen besser gefüllt werden können.

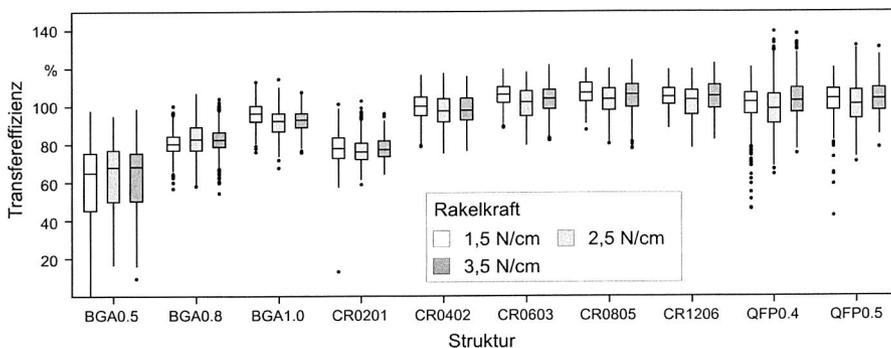


Abbildung 76: Transfereffizienzen der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Rakekräfte

Das verbesserte Füllverhalten zeigt sich auch bei der Auswertung der Flächenbedruckungsgrade der einzelnen Strukturen, dargestellt in Abbildung 77. Vor allem bei den Pastendepots der beiden QFP-Typen lassen sich die Aperturen mit zunehmender Rakekraft nachweislich besser befüllen, was anhand der Reduzierung der Anzahl an Pastendepots mit geringen Flächenbedruckungsgraden zu erkennen ist.

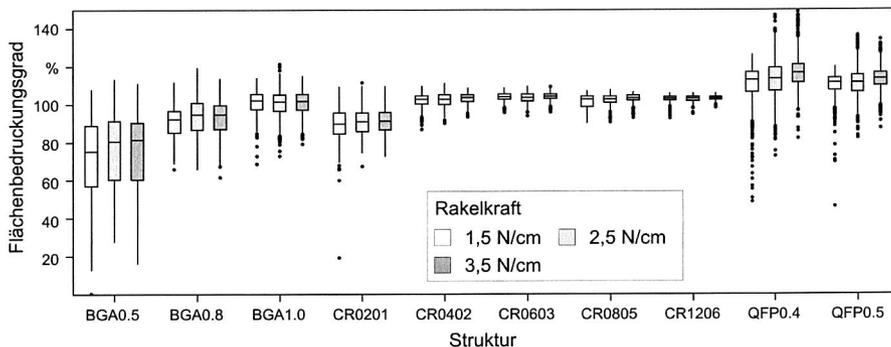


Abbildung 77: Flächenbedruckungsgrade der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Rakekräfte

Des Weiteren hat eine Erhöhung der Rakekraft auch eine Reduzierung der Pastendepots mit auffallend hohen Pastendepothöhen zur Folge, wie aus Abbildung 78 ersichtlich ist. Bedingt durch die höhere Rakekraft scheint ein besseres Abscheren der Lotpaste über der Schablonenapertur stattzufinden, so dass eine gleichmäßigere Topographie des Pastendepots erzielt werden kann.

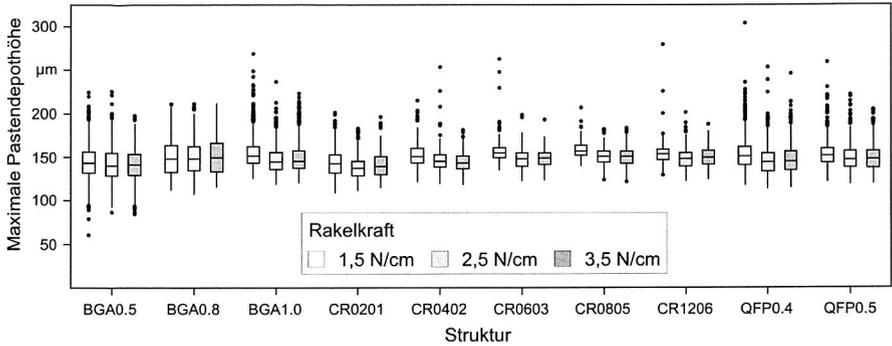


Abbildung 78: Maximale Pastendepthöhen der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Rakekräfte

Im Gegensatz zu der Rakegeschwindigkeit hat die Variation der Rakekraft im Rahmen der Untersuchungen einen weniger starken Einfluss auf die wesentlichen Depotmerkmale Transfereffizienz, Flächenbedruckungsgrad und maximale Pastendepthöhe. Ein Grund hierfür ist sicherlich die mit 50 mm/s recht moderate Rakegeschwindigkeit, die prinzipiell ein zuverlässiges Befüllen der Aperturen ermöglicht. Dennoch lassen sich aus der Darstellung der Haupteffekte in Abbildung 79 grundlegende Zusammenhänge ableiten.

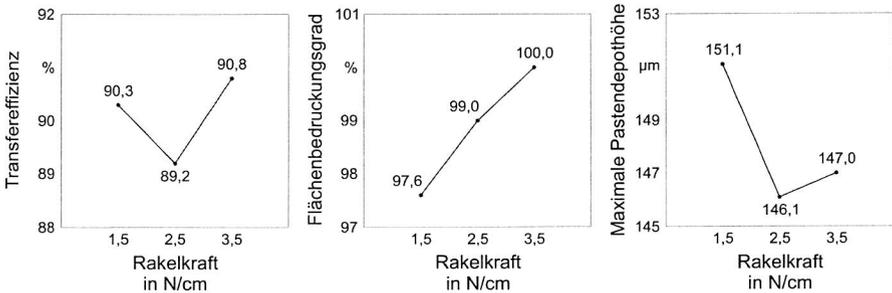


Abbildung 79: Haupteffektediagramm für die Transfereffizienzen, Flächenbedruckungsgrade und maximalen Pastendepthöhen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Rakekräfte

Mit zunehmender Rakekraft steigen die Flächenbedruckungsgrade der Pastendepots, da sich die Schablonenaperturen grundsätzlich besser befüllen lassen. Dass dieser Effekt nicht mit einer durchgängig steigenden Transfereffizienz bei höheren Rakekräften einhergeht, hängt damit zusammen, dass bei einer Rakekraft von 1,5 N/cm noch kein zuverlässiges Abscheren der Lotpaste über der Schablonenapertur stattfindet. Die in diesem Fall auf dem Pastendepot vereinzelt zurückbleibenden Pastenrück-

stände haben eine erhöhte Transfereffizienz sowie eine erhöhte maximale Pastendepthöhe bei dieser Rakelkraft zur Folge.

Trenngeschwindigkeit

Durch eine Erhöhung der Trenngeschwindigkeit kommt es vor allem bei den größeren Chipstrukturen sowie den QFP-Strukturen zu einer Erhöhung der Transfereffizienzen, wie aus Abbildung 80 ersichtlich ist. Eine Analyse der in den Schablonenaperturen verbleibenden Pastenrückstände belegt jedoch nicht, dass es aufgrund der erhöhten Trenngeschwindigkeit zu einem besseren Auslösen der Pasten kommt. Vielmehr können bei höheren Trenngeschwindigkeiten vermehrt Pastenrückstände auf der Schablonenunterseite identifiziert werden, die dazu führen, dass die Druckschablone in den folgenden Druckzyklen nicht mehr vollständig aufliegt und so vermehrt Lotpaste auf die Leiterplatte transferiert wird.

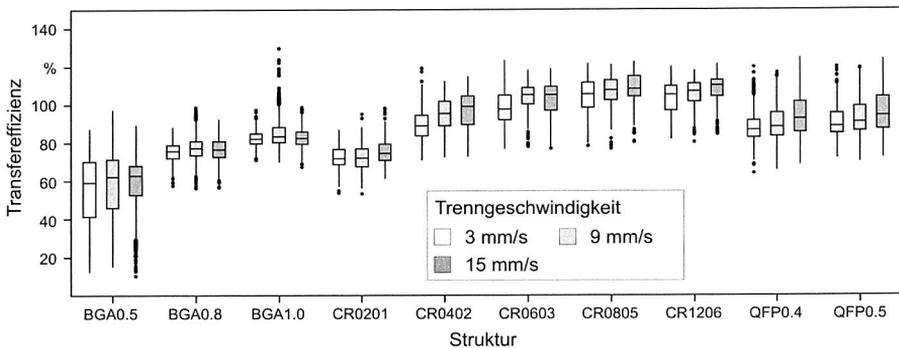


Abbildung 80: Transfereffizienzen der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Trenngeschwindigkeiten

Hierfür sprechen auch die ansteigenden Flächenbedruckungsgrade, die sich bei den betreffenden Strukturen mit zunehmender Trenngeschwindigkeit nachweisen lassen. Aus der Darstellung der Flächenbedruckungsgrade in Abbildung 81 wird offenkundig, dass vor allem die QFP-Strukturen diesem Effekt unterliegen. Bedingt durch das Anhaften von Pastenrückständen auf der Schablonenunterseite kommt es vor allem bei QFP-Strukturen zu einer Überdruckung mit erhöhten Transfereffizienzen und Flächenbedruckungsgraden.

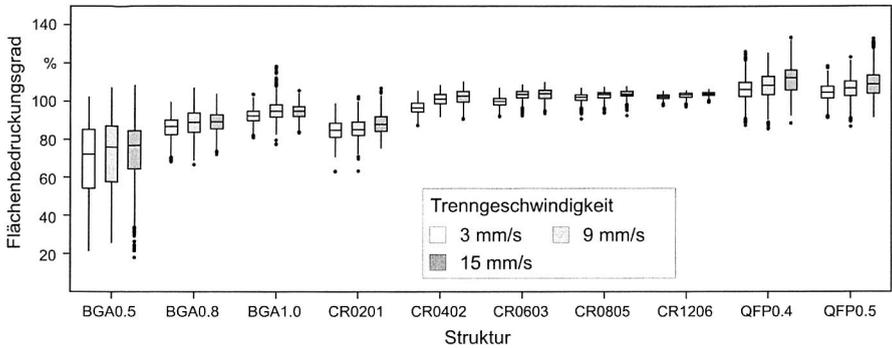


Abbildung 81: Flächenbedruckungsgrade der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Trenngeschwindigkeiten

Ein signifikanter Einfluss der an der Schablonenunterseite anhaftenden Pastenrückstände auf die maximalen Pastendepothöhen bei unterschiedlichen Trenngeschwindigkeiten lässt sich hingegen nicht nachweisen. Die in Abbildung 82 dargestellten maximalen Pastendepothöhen belegen dies.

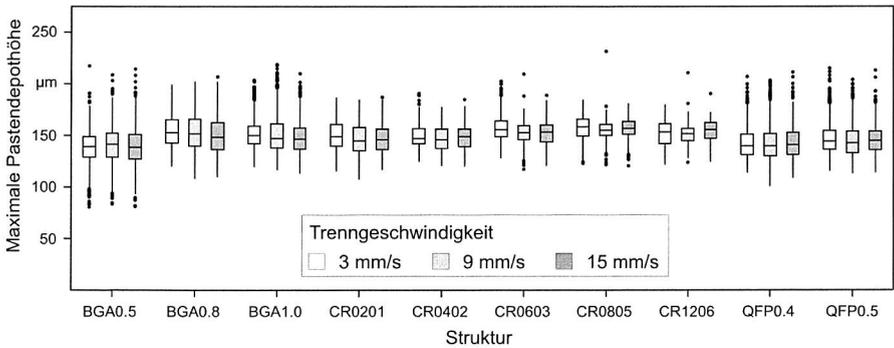


Abbildung 82: Maximale Pastendepothöhen der einzelnen Strukturen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Trenngeschwindigkeiten

Zusammenfassend kann der Einfluss der Trenngeschwindigkeit auf die wesentlichen Depotmerkmale in dem in Abbildung 83 dargestellten Haupteffektediagramm visualisiert werden. Mit zunehmender Trenngeschwindigkeit kommt es zu einem Anstieg der Transfereffizienzen und der Flächenbedruckungsgrade, während die maximalen Pastendepothöhen leicht abfallen. Als Hauptursache ist an dieser Stelle das zunehmende Anhaften von Pastenrückständen auf der Schablonenunterseite bei höheren Trenngeschwindigkeiten zu nennen, welches zu einem zusätzlichen Absprung zwischen Druckschablone

und Leiterplatte und in der Folge zu einer Überdruckung des Pastendepots mit zunehmender Druckzyklenzahl führt.

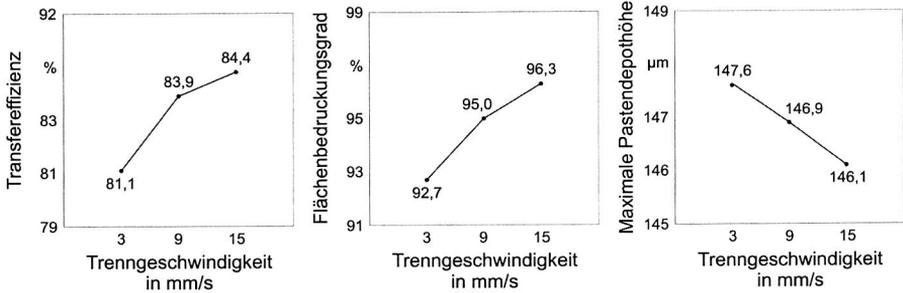


Abbildung 83: Haupteffektdiagramm für die Transfereffizienzen, Flächenbedruckungsgrade und maximalen Pastendepothöhen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Trenngeschwindigkeiten

5.1.4 Einfluss der Prozessführung auf die Fertigungsqualität

Die Prozessführung ist für den Schablonendruckprozess von enormer Bedeutung, da diese das Prozessergebnis wesentlich beeinflusst. In der industriellen Fertigung liegt es oftmals in der Verantwortung des Maschinenbedieners, den Schablonendruckprozess in geeigneter Weise zu führen, woraus sich auch die Abhängigkeit des Prozessergebnisses von der Qualifikation und Erfahrung des Maschinenbedieners ergibt. Als wesentliche Elemente der Prozessführung können grundsätzlich folgende Einzelpunkte identifiziert werden:

- Menge der im Druckprozess eingesetzten Lotpaste sowie Häufigkeit des Nachfüllens von Lotpaste zum Ausgleich des Pastenverbrauches
- Vorgehensweise beim Anfahren des Druckprozesses zu Fertigungsbeginn sowie nach längeren Warte- oder Stillstandzeiten
- Art und Weise der druckerintegrierten Reinigung der Schablonenunterseite sowie Häufigkeit der Schablonenunterseitenreinigung

Die im Schablonendruckprozess eingesetzte Lotpastenmenge beeinflusst sowohl das Rollverhalten der Lotpaste und somit den resultierenden hydrodynamischen Fülldruck über der Schablonenapertur als auch die Neigung der Lotpaste zu einem Anhaften an den Rakeln. Im Falle einer zu geringen Lotpastenmenge kommt es einerseits zu einem schlechteren Füllverhalten, so dass Aperturen mit kleinen Flächenverhältnissen nicht mehr zuverlässig gefüllt werden können. Andererseits haftet die Lotpaste in zunehmendem Maße an den Rakeln an, so dass nach dem Druckrichtungswechsel keine Lotpaste

mehr für den Druckprozess zur Verfügung steht. Verstärkt wird dieser Effekt durch das zusätzliche Altern der Lotpaste im Prozessraum.

Neben der Menge der im Druckprozess eingesetzten Lotpaste kommt der Vorgehensweise zum Anfahren des Druckprozesses zu Fertigungsbeginn sowie nach Warte- oder Stillstandzeiten besondere Bedeutung zu. Die Anfahrstrategie beinhaltet dabei einerseits, ob und wenn ja, auf welche Weise die Lotpaste auf den anstehenden Druckprozess vorbereitet wird. Andererseits kann aber auch das Drucken des Initialdruckes mit angepassten Maschinenparametern (z.B. höhere Raketkraft, reduzierte Raketgeschwindigkeit oder doppeltes Überakkeln) als Bestandteil der Anfahrstrategie gesehen werden. Vor allem nach längeren Ruhephasen und dem daraus resultierenden Viskositätsanstieg in der Lotpaste kommt es gerade in der Anlaufphase vermehrt zu Druckproblemen. Abbildung 84 verdeutlicht dies anhand der identifizierten Transfereffizienzen der Aperturtypen CR0201 des in Abbildung 70 dargestellten Versuchslayouts.

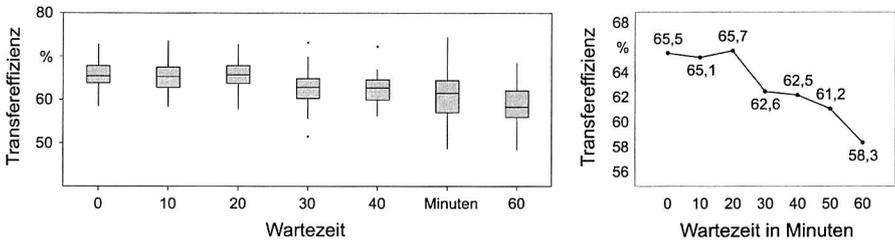


Abbildung 84: Boxplot (links) und Haupteffektdiagramm (rechts) der Transfereffizienzen des Aperturtyps CR0201 im Initialdruck in Abhängigkeit der Wartezeiten

Mit zunehmender Wartezeit sinkt der Mittelwert der Transfereffizienzen im Initialdruck ab (siehe Abbildung 84 rechts). Zudem treten bei höheren Wartezeiten vermehrt Pastendepots mit Transfereffizienzen von etwa 50 % sowie größere Streuungen auf (siehe Abbildung 84 links), so dass der Druckprozess mit zunehmender Wartezeit als kritisch einzustufen ist.

Aber auch der druckerintegrierten Reinigung im Schablonendruckprozess kommt hinsichtlich einer stabilen Prozessführung wesentliche Bedeutung zu. Die Aufgabe der Schablonenunterseitenreinigung besteht prinzipiell in der zuverlässigen Entfernung von Pastenrückständen auf der Schablonenunterseite sowie in den Aperturen. Werden in einem Druckprozess die Reinigungsintervalle zu groß gewählt, kann es grundsätzlich zu verschiedenen Effekten kommen. Einerseits besteht die Möglichkeit, dass lose Pastenanhaftungen auf der Schablonenunterseite in den folgenden Druckzyklen zwischen die Druckschablone und die Leiterplatte geraten. Bedingt durch die überfahrende Rakel kann es so zu einer Partikeldeformation und gegebenenfalls zu einer Kaltverschwei-

ßung auf der Schablonenunterseite kommen. Das feste Anhaften hat einen zusätzlichen Höhenunterschied zwischen der Ebene der Schablonenunterseite und der Padebene zur Folge, so dass grundsätzlich die in Kapitel 5.1.2 erläuterten Effekte eintreten können. Andererseits führt aber auch schon das lose Anhaften von Pastenrückständen auf der Schablonenunterseite zu erhöhten Transfereffizienzen und Flächenbedeckungsgraden sowie einem erhöhten Risiko für Brückenbildung, vor allem bei QFP-Strukturen [148]. Ein weiterer Effekt, der durch die druckerintegrierte Reinigung der Schablonenunterseite maßgeblich beeinflusst wird, ist das sogenannte Clocking. Hierzu kann es kommen, wenn Pastenrückstände, die in den Schablonenaperturen verbleiben, nicht rechtzeitig aus den Aperturen entfernt werden. Während zur Vermeidung der beschriebenen Effekte die Reinigungsintervalle möglichst klein zu halten sind, erschwert vor allem das Initialdruckverhalten nach einer Schablonenunterseitenreinigung das konstante und zuverlässige Auftragen von Lotpaste auf die Leiterplatte. Zur Verdeutlichung visualisiert Abbildung 85 das Initialdruckverhalten der Aperturtypen CR0201 des in Abbildung 70 dargestellten Versuchslayouts.

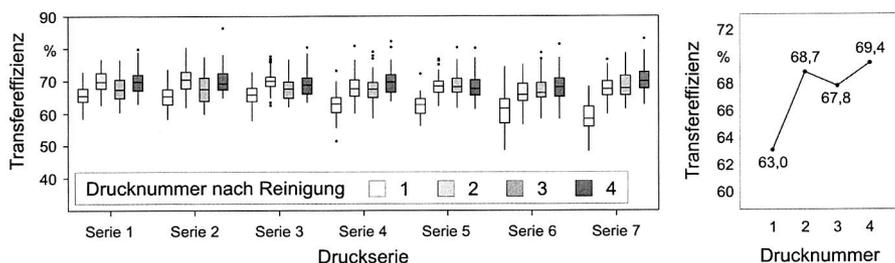


Abbildung 85: *Boxplot (links) und Haupteffektdiagramm (rechts) der Transfereffizienzen des Aperturtyps CR0201 in Abhängigkeit der Schablonenunterseitenreinigung*

Wie aus der Darstellung ersichtlich ist, liegen die Transfereffizienzen des Initialdrucks deutlich unterhalb der Transfereffizienzen der Folgedrucke. Dies ist vor allem auf das erschwerte Füllen der Schablonenaperturen mit Lotpaste zurückzuführen, da sich im Falle einer rückstandsfreien Aperturwandung eine wesentlich höhere Gleitreibung zwischen der in die Apertur einlaufenden Lotpaste und der Aperturwandung ergibt. Vor allem sehr kleine Aperturen lassen sich deshalb im Initialdruck nicht vollständig füllen, so dass geringere Transfereffizienzen die Folge sind.

Ein weiteres Element der Prozessführung stellt der bis zu einer Schablonenapertur zurückgelegte Rakelweg dar, da sich dieser wesentlich auf die zu dem Füllzeitpunkt herrschenden Füllbedingungen auswirkt. Bedingt durch den Viskositätsabfall in der Lotpaste entlang des Rakelweges können füllkritische Strukturen mit zunehmendem Rakelweg besser befüllt werden. Oftmals wird dieser Einfluss auf die Rakelrichtung oder aber auf

die Aperturlage auf dem Schablonenlayout zurückgeführt, ohne dabei auf die eigentliche Ursache näher einzugehen. Dies verdeutlicht auch Abbildung 86. Die Druckbarkeit der druckkritischen BGA0,5-Strukturen des in Abbildung 70 dargestellten Versuchslayouts wird vordergründig im Wesentlichen durch die Rakelrichtung bestimmt. Während die zentral gelegene BGA0,5-Struktur Transfereffizienzen aufweist, die kaum von der Rakelrichtung abhängig sind, unterliegen die im Randbereich befindlichen BGA0,5-Strukturen einem signifikanten Einfluss der Rakelrichtung.

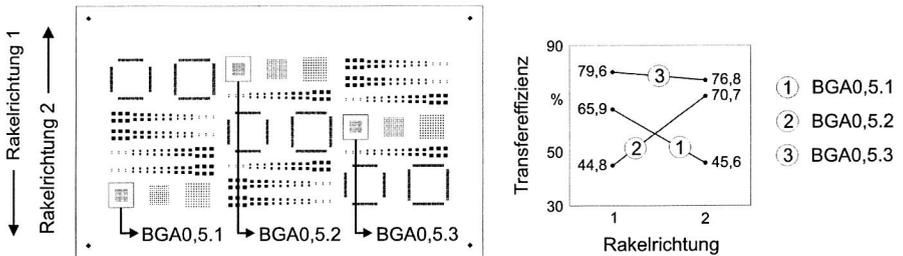


Abbildung 86: Einfluss der Aperturlage auf dem Schablonenlayout auf das Druckergebnis

Ursächlich für diesen Effekt ist das schlechtere Füllverhalten derjenigen BGA0,5-Strukturen, die zu Beginn des jeweiligen Rakelzuges zu füllen sind. Somit ergeben sich reduzierte Transfereffizienzen für die Strukturen des Bereiches BGA0,5.1 für die Rakelrichtung 2 bzw. für die Strukturen BGA0,5.2 für die Rakelrichtung 1.

Aber auch auf der Schablonenoberfläche sporadisch verbleibende Pastenrückstände können das Druckergebnis wesentlich beeinflussen. Während Pastenrückstände auf der Schablonenoberfläche bei druckunkritischen Strukturen zu einem erhöhten Pastentransfer führen, können diese bei druckkritischen Strukturen zu einem zu geringen Pastenvolumen führen. Ein Beispiel hierfür illustriert Abbildung 87.

Dem Druckprozess liegt das in Abbildung 59 dargestellte Versuchslayout zugrunde. Die auf der Schablonenoberfläche verbleibende Lotpaste stellt eine Ursache von Pastenanhaftungen auf der Rakelrückseite dar, die sich während des Rakelvorgangs von der Rakelrückseite lösen und auf der Schablonenoberfläche verbleiben. Hierdurch wird das Auslösen der Lotpaste erschwert, so dass sich trotz des eigentlich unkritischen Flächenverhältnisses von 0,89 Pastendepots mit sehr geringen Transfereffizienzen ergeben.

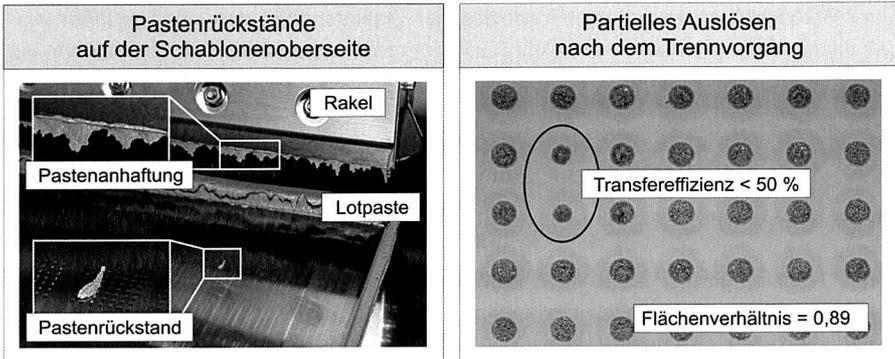


Abbildung 87: Partielles Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenapertur als Folge eines unzureichenden Abziehverhaltens auf der Schablonenoberfläche

5.2 Ganzheitlicher Ansatz zur Bestimmung von Designrichtlinien für Druckschablonen

Die Gestaltung einer Druckschablone erfolgt in der Regel unter Berücksichtigung der Empfehlungen aus [118], wobei oftmals auch Erfahrungswissen des Herstellers in den Schablonenentwurf mit einfließt. Gerade aber bei sehr kleinen Schablonenstrukturen, bei denen das Flächenverhältnis als limitierender Faktor des Auslösen der Lotpaste berücksichtigt werden muss, kommt es in der industriellen Fertigung immer wieder zu Problemen, weil die Lotpaste nicht zuverlässig aus der Schablonenapertur ausgelöst werden kann. Neben den zu geringen Transfereffizienzen der Pastendepots als direkte Folge des unzureichenden Auslösen erhöht sich durch Pastenrückstände in den Schablonenaperturen auch das Risiko des Zusetzens der Aperturen.

Im Hinblick auf eine zuverlässige Festlegung des Flächenverhältnisses einer Druckschablone ergibt sich für die aktuellen Empfehlungen aus [118] aus mehreren Gründen Optimierungspotenzial. Einerseits stellt die Zuordnung eines realisierbaren Flächenverhältnisses zu einer spezifischen Schablonenherstellungstechnologie unter Vernachlässigung der Fertigungsqualität der Schablone ein erhebliches Defizit dar, wie bereits in Kapitel 4.1.2 erläutert wurde. Andererseits führen auch technologische Weiterentwicklungen der verfügbaren Schablonenherstellungsverfahren sowie die Bereitstellung neuer Schablonentechnologien dazu, dass zunehmend kleinere Flächenverhältnisse realisiert werden können. Des Weiteren bleiben die fertigungsspezifischen Toleranzen der Schablonenherstellung als wesentliche Einflussgröße bei der Schablonengestaltung vollkommen unberücksichtigt.

Das aktuelle Optimierungspotenzial aufgreifend wird im Folgenden eine Vorgehensweise zur Identifikation geeigneter Flächenverhältnisse verschiedener Druckschablonen

unter Berücksichtigung schablonenspezifischer Eigenschaften dargestellt. Hierfür wird das tatsächliche Auslöseverhalten auf Basis der realen Aperturgeometrien bestimmt, so dass bei der Schablonengestaltung auch Fertigungstoleranzen der Schablonenherstellung berücksichtigt werden können.

5.2.1 Vorgehensweise zur Ermittlung der realen Auslösecharakteristik

Mit der Entwicklung geeigneter Pasteninspektionssysteme ist es möglich, den Zusammenhang zwischen dem Flächenverhältnis einer Schablonenapertur und der realisierbaren Transfereffizienz exakt zu bestimmen. Dieser Zusammenhang beschreibt die Leistungsfähigkeit einer Druckschablone in Kombination mit einer Lotpaste. Mit zunehmendem kleinerem Flächenverhältnis sinkt die Transfereffizienz, während die Standardabweichung der aufgetragenen Pastenvolumen ansteigt. Dieser Zusammenhang ist exemplarisch in Abbildung 88 dargestellt.

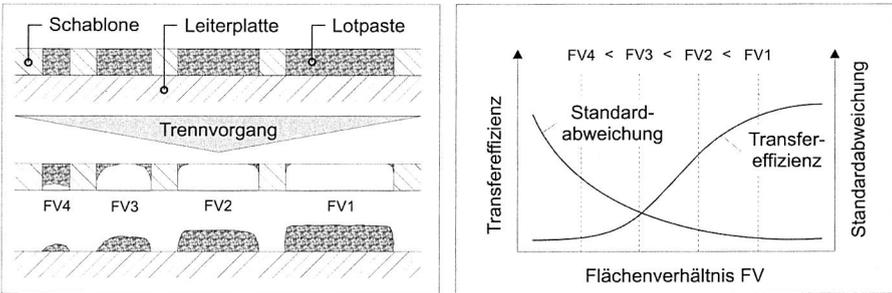


Abbildung 88: Zusammenhang zwischen dem Flächenverhältnis einer Schablonenapertur und der realisierbaren Transfereffizienz nach [14]

Basiert die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Flächenverhältnis und Transfereffizienz auf Grundlage der Schablonengerberdaten, also der nominalen Schablonengeometrie, wie es üblicherweise der Fall ist, so werden Fertigungstoleranzen der Schablonenherstellung an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Abweichungen der realen Schablonengeometrie von der nominalen Schablonendicke und der nominalen Aperturgeometrie führen zu einer Differenz zwischen dem nominalen und dem realen Flächenverhältnis.

Neben dem Flächenverhältnis ist aber auch die Transfereffizienz direkt von diesen Abweichungen betroffen, da ihrer Berechnung das nominale Aperturvolumen zugrunde liegt. Folglich ergibt sich also auch ein Unterschied zwischen der nominalen und der realen Transfereffizienz, der bei der Ermittlung des tatsächlichen Auslöseverhaltens einer Druckschablone berücksichtigt werden muss. Aus der Berücksichtigung der realen Schablonengeometrie resultiert somit ein korrigierter Verlauf der Transfereffizienz über dem Flächenverhältnis, wie er in Abbildung 89 schematisch dargestellt ist.

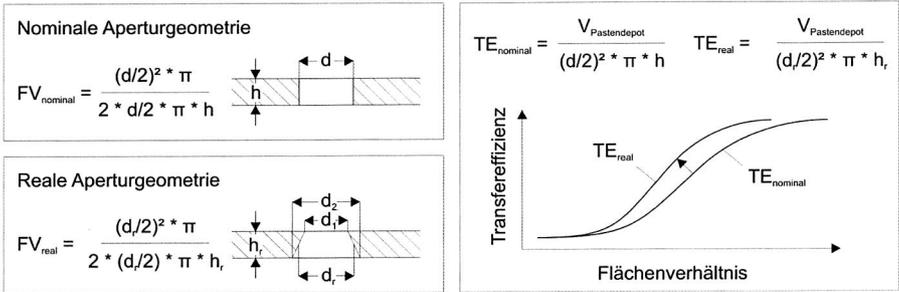


Abbildung 89: Korrektur des Zusammenhangs zwischen Flächenverhältnis und Transfereffizienz auf Basis der realen Aperturgeometrien

Im Wesentlichen ergibt sich für die Ermittlung der tatsächlichen Auslösecharakteristik einer Druckschablone ein zweigeteiltes Vorgehen, das in Abbildung 90 dargestellt ist. Innerhalb des Pasteninspektionssystems erfolgt zunächst die Bestimmung der nominalen Transfereffizienz in Abhängigkeit des nominalen Flächenverhältnisses. Die Ermittlung dieses Zusammenhangs basiert dabei auf den Gerberdaten der Schablone, so dass Abweichungen von der nominalen Schablonengeometrie zunächst unberücksichtigt bleiben.

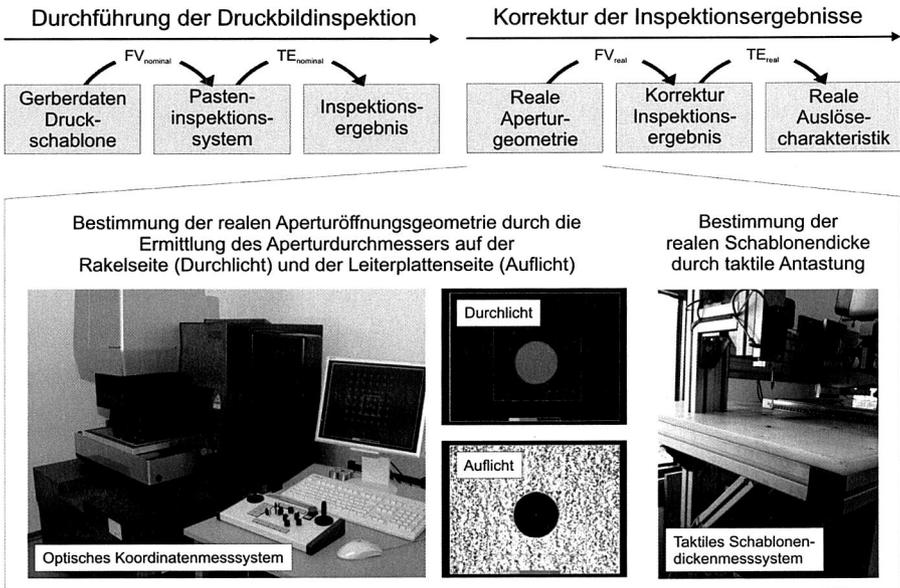


Abbildung 90: Vorgehensweise zur Ermittlung des tatsächlichen Auslöseverhaltens einer Druckschablone

In einem zweiten Schritt wird anschließend das reale Flächenverhältnis bestimmt, indem mit Hilfe eines optischen Koordinatenmesssystems die reale Aperturöffnung und mit Hilfe einer taktilen Antastung die reale Schablonendicke ermittelt wird. Basierend auf diesen Informationen erfolgen die Berechnung des realen Flächenverhältnisses sowie die Ermittlung der realen Transfereffizienz. [145]

Die Formel zur Berechnung der realen Transfereffizienz einer Druckschablone lässt sich auf Basis der nominalen Transfereffizienz sowie der nominalen und realen Aperturgeometrie wie folgt herleiten:

$$TE_{\text{no min al}} = \frac{V_{\text{Pastendepot}}}{V_{\text{Apertur no min al}}} = \frac{V_{\text{Pastendepot}}}{r_{\text{no min al}}^2 * \pi * h_{\text{no min al}}} \quad \text{Gl. 13}$$

- $TE_{\text{no min al}}$: nominale Transfereffizienz
- $V_{\text{Pastendepot}}$: Pastendepotvolumen
- $V_{\text{Apertur no min al}}$: nominales Aperturvolumen
- $r_{\text{no min al}}$: nominaler Aperturradius
- $h_{\text{no min al}}$: nominale Schablonendicke

$$TE_{\text{real}} = \frac{V_{\text{Pastendepot}}}{V_{\text{Apertur real}}} = \frac{V_{\text{Pastendepot}}}{r_{\text{real}}^2 * \pi * h_{\text{real}}} \quad \text{Gl. 14}$$

- TE_{real} : reale Transfereffizienz
- $V_{\text{Apertur real}}$: reales Aperturvolumen
- r_{real} : realer Aperturradius
- h_{real} : reale Schablonendicke

$$TE_{\text{real}} = TE_{\text{no min al}} * \left(\frac{r_{\text{no min al}}^2 * h_{\text{no min al}}}{r_{\text{real}}^2 * h_{\text{real}}} \right) \quad \text{Gl. 15}$$

Die dargestellte Vorgehensweise erlaubt die Ermittlung des tatsächlichen Auslöseverhaltens einer Druckschablone, so dass auf Basis der von einem Hersteller angegebenen Fertigungstoleranzen ein robustes und zuverlässiges Schablonenlayout abgeleitet werden kann. Des Weiteren besteht aber auch die Möglichkeit, unterschiedliche Schablonentechnologien und -herstellungsverfahren hinsichtlich ihres Auslöseverhaltens zu bewerten und miteinander zu vergleichen.

5.2.2 Berücksichtigung herstellerepezifischer Fertigungstoleranzen bei der Schablonenauslegung

Die Fertigungstoleranzen bei der Schablonenherstellung spielen vor allem bei Druckprozessen eine entscheidende Rolle, bei denen ein druckkritisches Layout mit sehr kleinen Flächenverhältnissen zum Einsatz kommt. Das Abweichen der realen von der nominalen Aperturgeometrie wirkt sich direkt auf das reale Flächenverhältnis sowie die reale Transfereffizienz aus und kann zu Druckproblemen führen, wenn es zu einer Verringerung des realen Flächenverhältnisses kommt und dieses unter einen für die Schablonentechnologie kritischen Wert fällt. Zu einer Reduzierung des realen im Vergleich zu dem nominalen Flächenverhältnis führen eine größere reale Schablonendicke sowie eine kleinere reale Öffnungsfläche der Schablonenapertur. [145]

Das folgende Beispiel soll die Bedeutung der herstellerepezifischen Fertigungstoleranzen für einen robusten und zuverlässigen Druckprozess verdeutlichen. Ermöglicht die Schablonentechnologie eines Herstellers das zuverlässige Drucken eines Flächenverhältnisses von 0,60, so können theoretisch kreisförmige Aperturen mit einem Durchmesser von 288 μm in einer 120 μm dicken Schablone realisiert werden. Unter Zugrundelegung einer Schablonendickentoleranz von $\pm 5\%$ sowie einer Durchmesser-toleranz der Apertur von $\pm 10\ \mu\text{m}$ besteht die Möglichkeit, dass die Schablonendicke 126 μm und der Durchmesser der Schablonenapertur 278 μm beträgt. Das hieraus resultierende Flächenverhältnis weist in diesem Fall nur noch einen Wert von lediglich 0,55 auf, so dass mit erheblichen Druckproblemen zu rechnen ist.

In der Konsequenz ist es hinsichtlich der Schablonengestaltung für einen robusten und zuverlässigen Druckprozess somit notwendig, die herstellerepezifischen Fertigungstoleranzen bei der Festlegung der minimalen Flächenverhältnisse für das Schablonendesign zu berücksichtigen. Wie aus Abbildung 91 ersichtlich ist, muss anhand der realen Auslösecharakteristik der Druckschablone zunächst das kritische Flächenverhältnis identifiziert werden.

Als kritisches Flächenverhältnis wird dabei das minimale Flächenverhältnis bezeichnet, bei dem alle Pastendepots ein definiertes Bewertungskriterium erfüllen. Im Falle von Abbildung 91 sieht das Bewertungskriterium eine Mindesttransfereffizienz von 50 % vor. Basierend auf dem kritischen Flächenverhältnis ist anschließend das Flächenverhältnis zu berechnen, welches sich im ungünstigsten Fall bei der vollkommenen Ausnutzung der Fertigungstoleranzen des Herstellers ergibt. Das minimale Flächenverhältnis für das Schablonendesign ist folglich also immer größer als das kritische Flächenverhältnis. Je größer die herstellerepezifischen Fertigungstoleranzen sind, desto größer ist auch die Abweichung zwischen dem kritischen Flächenverhältnis und dem Flächenverhältnis für das Schablonendesign.

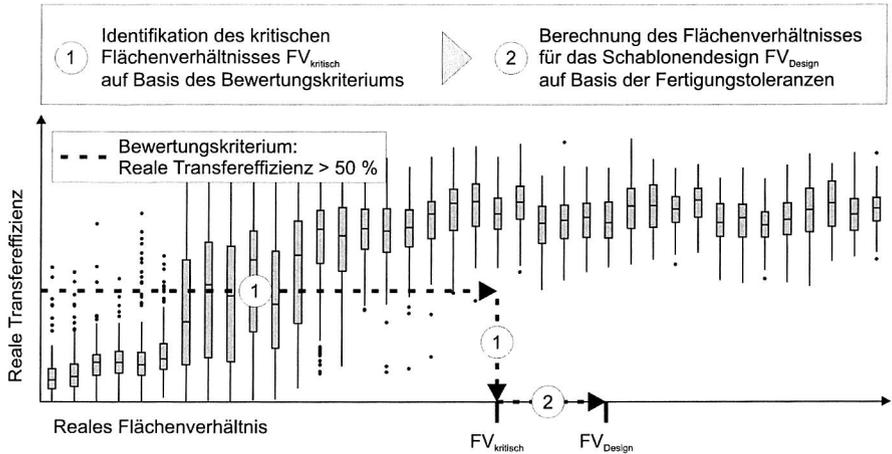


Abbildung 91: Bestimmung eines Flächenverhältnisses für das Schablonendesign auf Basis der realen Auslösecharakteristik einer Druckschablone unter Berücksichtigung der herstellungsspezifischen Fertigungstoleranzen

Die Formel zur Berechnung des Flächenverhältnisses für das Schablonendesign lässt sich auf Basis der Fertigungstoleranzen sowie des kritischen Flächenverhältnisses wie folgt herleiten:

$$FV_{kritisch} = \frac{r_{kritisch}}{2 * h_{kritisch}} \quad \text{Gl. 16}$$

$FV_{kritisch}$: kritisches Flächenverhältnis

$r_{kritisch}$: kritischer Aperturradius

$h_{kritisch}$: kritische Schablonendicke

$$FV_{Design} = \frac{r_{Design}}{2 * h_{Design}} \quad \text{Gl. 17}$$

FV_{Design} : Flächenverhältnis für das Schablonendesign

r_{Design} : Aperturradius für das Schablonendesign

h_{Design} : Schablonendicke für das Schablonendesign

$$r_{Design} = (1 + T_{Aperturradius}) * r_{kritisch} \quad \text{Gl. 18}$$

$T_{Aperturradius}$: Fertigungstoleranz Aperturradius

$$h_{\text{Design}} = (1 - T_{\text{Schablonendicke}}) * h_{\text{kritisch}} \quad \text{Gl. 19}$$

$T_{\text{Schablonendicke}}$: Fertigungstoleranz Schablonendicke

$$FV_{\text{Design}} = \frac{(1 + T_{\text{Aperturradius}})}{(1 - T_{\text{Schablonendicke}})} * FV_{\text{kritisch}} \quad \text{Gl. 20}$$

Auf Basis eines kritischen Flächenverhältnisses von 0,60 sowie herstellerspezifischer Fertigungstoleranzen von 3 % für den Aperturradius und 5 % für die Schablonendicke ergibt sich beispielsweise ein Flächenverhältnis für das Schablonendesign von 0,65. Wird dem Schablonendesign ein minimales Flächenverhältnis von 0,65 zugrunde gelegt, so ist folglich sichergestellt, dass das kritische Flächenverhältnis auch im ungünstigsten Fall nicht unterschritten wird.

5.2.3 Bewertung des realen Auslöseverhaltens verschiedener DruckschablONENTEchnologien

Im Folgenden werden die realen Auslösecharakteristiken verschiedener Schablonentechnologien nach der in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt und miteinander verglichen. Das den Druckversuchen zugrunde liegende Schablonenlayout ist in Abbildung 92 dargestellt. Zur Auswertung kommen Kreisstrukturen mit Flächenverhältnissen zwischen 0,70 und 0,33.

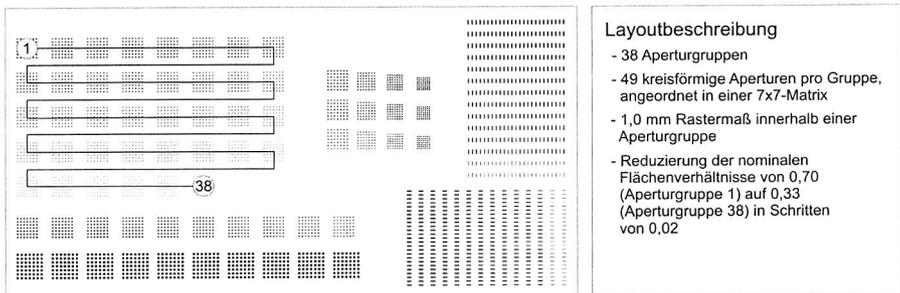


Abbildung 92: Versuchslayout der eingesetzten DruckschablONENTEchnologien (Schablonendicke 120 µm) zur Quantifizierung der realen Auslösecharakteristik

Eine Übersicht der im Rahmen der Druckversuche eingesetzten Druckschablonen sowie deren wesentliche Eigenschaften ist in Tabelle 9 dargestellt. Insgesamt werden fünf Schablonen von unterschiedlichen Herstellern untersucht und hinsichtlich ihrer Auslösecharakteristik bewertet.

| Bezeichnung Druckschablone | Herstellungstechnologie | Schablonenmaterial | Nachbearbeitungsverfahren |
|----------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------|
| S1 | Laserschneiden | Edelstahl | Mechanisches Bürsten |
| S2 | Laserschneiden | Edelstahl | Elektropolieren |
| S3 | Galvanoformen | Nickel | entfällt |
| S4 | Laserschneiden | Edelstahl | Nanobeschichten |
| S5 | Galvanoformen | Nickel | entfällt |

Tabelle 9: *Überblick der im Rahmen der Druckversuche eingesetzten Druckschablonen sowie wesentliche Eigenschaften*

Die Vorgehensweise bei der Durchführung der Druckversuche sowie die Rahmenbedingungen sind im Anhang ebenso dargestellt wie die realen Auslösecharakteristiken der einzelnen Schablonen, anhand derer die kritischen Flächenverhältnisse ermittelt werden. Unter Zugrundelegung einer Mindesttransfereffizienz von 50 % können für die einzelnen Schablonen die kritischen Flächenverhältnisse 0,513 (S1), 0,520 (S2), 0,541 (S3), 0,462 (S4) und 0,538 (S5) identifiziert werden. Neben den kritischen Flächenverhältnissen eignen sich aber auch die Streuungen der Transfereffizienzen zur Beurteilung des realen Auslöseverhaltens. Während die Leistungsfähigkeit der nanobeschichteten Druckschablone S4 anhand des kleinen kritischen Flächenverhältnisses sowie der sehr geringen Streuungen der Transfereffizienzen nachgewiesen werden kann, weisen die alternativen Schablonentechnologien eine etwa vergleichbare Leistungsfähigkeit auf. Weder die identifizierten kritischen Flächenverhältnisse, noch die Messwertstreuungen der Druckschablonen S1, S2, S3 und S5 lassen darauf schließen, dass es signifikante Unterschiede im Auslöseverhalten der Lotpaste aus den Schablonenaperturen gibt. Der qualitative Vergleich der in den Aperturen verbleibenden Pastenrückständen der einzelnen Schablonen, dargestellt in Abbildung 93, belegt dies. Im Gegensatz zu der nanobeschichteten Druckschablone S4 weisen alle Schablonenaperturen, unabhängig von der Herstellungstechnologie, dem Schablonenmaterial oder dem Nachbearbeitungsverfahren, Pastenanhaftungen an den Aperturwandungen auf.

Welche Bedeutung der Vergleich der Leistungsfähigkeit einzelner Druckschablonen auf Basis der realen Auslösecharakteristik hat, ist in Abbildung 94 dargestellt. Das Haupteffektdiagramm für die nominale Transfereffizienz der Schablonen S1 bis S5 verleitet zu der Schlussfolgerung, dass Schablone S5 das beste Auslöseverhalten aller Druckschablonen aufweist, während Schablone S3 eine auffällig geringe Transfereffizienz besitzt. Tatsächlich unterscheiden sich die realen Transfereffizienzen der Schablonen S1, S2, S3 und S5 aber nicht signifikant, wie aus dem Haupteffektdiagramm für die realen Transfereffizienzen ersichtlich ist. Ursächlich hierfür sind die zum Teil starken Abweichungen der realen von der nominalen Aperturgeometrie. Mit 112 μm weist Schablone S3 eine wesentlich geringere reale Schablonendicke auf, so dass die reale Transfereffizienz im Vergleich zu der nominalen Transfereffizienz bedeutend höher

liegt. Im Gegensatz dazu liegen die realen Aperturdurchmesser von Schablone S5 über den nominalen Aperturdurchmessern, so dass es zu einer Korrektur der realen Transfereffizienz nach unten kommt.

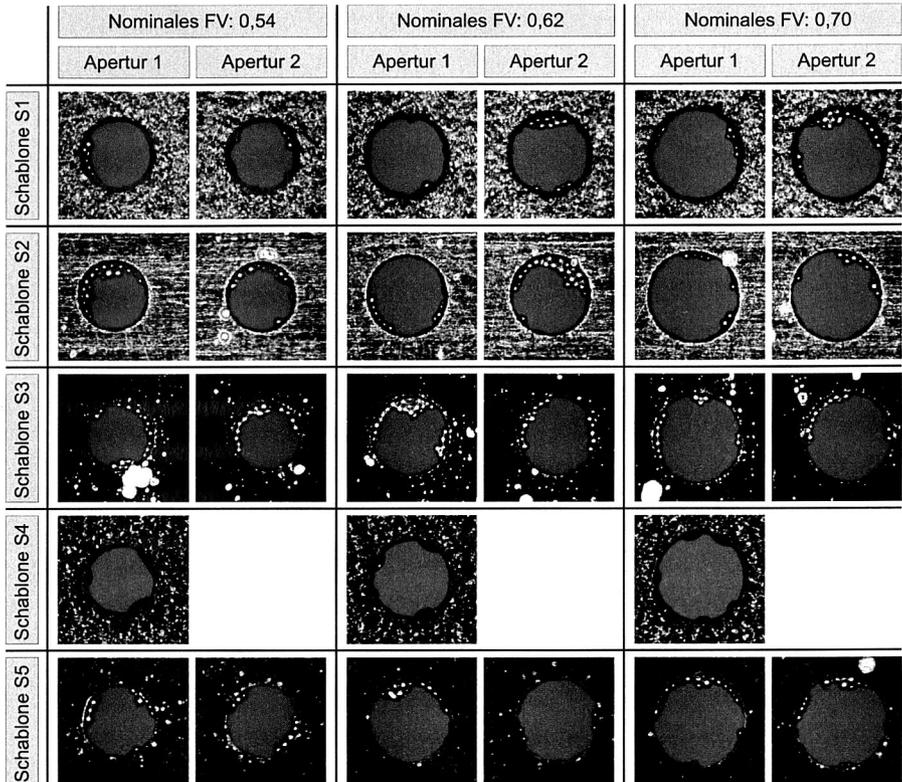


Abbildung 93: Qualitativer Vergleich der in den Aperturen verbleibenden Pastenrückstände der Schablonen S1 bis S5

Wie aus Abbildung 94 ersichtlich ist, kann eine vergleichende Bewertung des Auslöseverhaltens unterschiedlicher Druckschablonen nur auf Basis der realen Auslösecharakteristik erfolgen, da ansonsten falsche Schlussfolgerungen gezogen werden können. Während das Potenzial der nanobeschichteten Druckschablone aus der vergleichenden Bewertung ersichtlich wird, existieren keine signifikanten Unterschiede im Auslöseverhalten der alternativen Schablonentechnologien. Weder das bessere Auslöseverhalten der beiden galvanisch aufgebauten Nickelschablonen, noch das bessere Auslösen der Lotpaste durch das Elektropolieren der Schablone können im Rahmen der durchgeführten Druckversuche belegt werden.

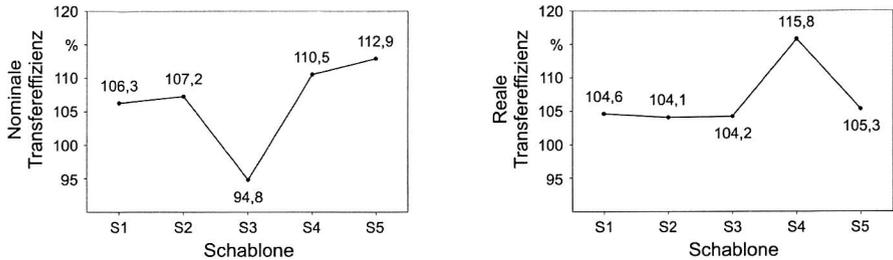


Abbildung 94: Haupteffektediagramm für die nominalen sowie die realen Transfereffizienzen der Schablonen S1 bis S5 im Bereich realer Flächenverhältnisse zwischen 0,5 und 0,7

Hinsichtlich eines zuverlässigen Schablonenentwurfs ist es ratsam, eine Mindesttransfereffizienz von 50 % als Bewertungskriterium zur Identifikation eines kritischen Flächenverhältnisses vorzusehen. Von abweichenden Bewertungskriterien, die beispielsweise auf die mittlere Transfereffizienz abzielen, wird hingegen dringend abgeraten, da diese mögliche Ausreißer in den Transfereffizienzen nicht ausreichend berücksichtigen.

5.3 Experimentelle Ermittlung bauelementspezifischer Prozessfenster für das aufzutragende Pastenvolumen im Druckprozess

Dem im Schablonendruckprozess bauelementspezifisch aufgetragenen Lotpastenvolumen kommt im Hinblick auf eine zuverlässige Funktion der Lötstelle eine entscheidende Bedeutung zu. Während zu geringe Lotpastenvolumen zu Lötstellen mit verminderten mechanischen Festigkeiten oder offenen Lötstellen führen, stellen Lotbrücken oder Lotperlen die Folge eines zu großen Lotpastenvolumens dar [77] [83] [128] [162]. Aber auch komplexere Fehlerbilder in der Oberflächenmontagetechnik wie die Grabsteinbildung bei zweipoligen Bauelementen oder der Head-In-Pillow-Defekt (HIP) bei BGA-Komponenten werden durch Abweichungen von der idealen Lotpastenmenge prinzipiell begünstigt [86] [158]. Aus dem in Abbildung 95 schematisch dargestellten Zusammenhang zwischen dem aufgetragenen Lotpastenvolumen und der Fehlerrate in der Oberflächenmontagetechnik kann ein bauelementspezifisches Prozessfenster für das zu applizierende Lotpastenvolumen abgeleitet werden. Von großer Wichtigkeit sind in diesem Zusammenhang die bauelementspezifischen Toleranzgrenzen USG (Untere Spezifikationsgrenze) und OSG (Obere Spezifikationsgrenze), welche das Prozessfenster für das aufzutragende Pastenvolumen definieren.

Während die Hersteller elektronischer Bauelemente sowie einzelne Designrichtlinien zumindest Empfehlungen für das bauelementspezifisch aufzutragende Pastenvolumen geben, fehlen im Allgemeinen Angaben zu volumenbezogenen Toleranzgrenzen, die für die Festlegung eines Prozessfensters grundsätzlich notwendig sind. Vereinzelt kommen

in der Literatur zwar volumenbezogene Toleranzgrenzen beispielsweise bei der Berechnung von Prozessfähigkeitsindizes zum Einsatz, jedoch handelt es sich hierbei um festgelegte Werte, denen keine experimentelle Untersuchung zugrunde liegt [168]. Durchgeführte Untersuchungen, welche die Quantifizierung der Auswirkungen eines variierenden Lotpastenvolumens auf die Qualität und Zuverlässigkeit von Lötstellen zum Ziel hatten, eignen sich zur Identifikation von Toleranzgrenzen hingegen nur bedingt. Dies liegt einerseits daran, dass die direkte Korrelation zwischen Pastenvolumen und Qualitäts- beziehungsweise Zuverlässigkeitsmerkmal nicht gegeben ist und im Rahmen der Analysen nur einzelne Qualitäts- und Zuverlässigkeitsaspekte einer Lötstelle berücksichtigt wurden. Andererseits reicht die gewählte Klassifizierung der Volumenwerte in vier Gruppen (<35 %, 35 % bis 70 %, 70 % bis 100 %, >120 %) nicht aus, um geeignete Toleranzgrenzen ableiten zu können [128].

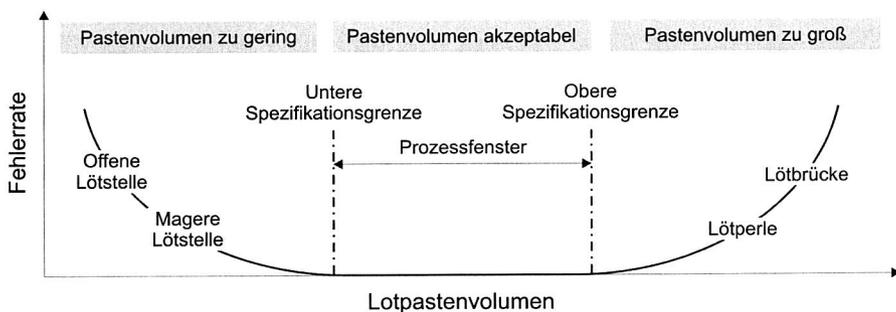


Abbildung 95: Zusammenhang zwischen dem Lotpastenvolumen und der Fehlerrate in der Oberflächenmontagetechnik

Die dargestellten Defizite aufgreifend liegt die Zielsetzung der durchgeführten Untersuchung in der experimentellen Ermittlung bauelementspezifischer Prozessfenster für das im Schablonendruckprozess aufzutragende Pastenvolumen. Hierzu werden im Druckprozess zunächst die bereitgestellten Pastenvolumina mit Hilfe von Stufenschablonen für ein repräsentatives Bauelementspektrum variiert. Nach dem Bestücken der Bauelemente und dem Reflowlöten werden die aufgebauten Testbaugruppen hinsichtlich bekannter Fehlerbilder analysiert, so dass die Baugruppenqualität bewertet werden kann. Im Anschluss daran erfolgt eine beschleunigte Alterung der Baugruppen im Temperaturschocktest, um die Auswirkungen unterschiedlicher Lotpastenvolumina auf die mechanische Festigkeit der Lötstelle bewerten zu können. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt die Festlegung der bauelementspezifischen Toleranzgrenzen sowie die Ableitung des Prozessfensters für das aufzutragende Lotpastenvolumen. Des Weiteren können die identifizierten Toleranzgrenzen als Prüfgrenzen für die linienintegrierte 3D-Pastendruckinspektion sowie als Toleranzgrenzen zur Ermittlung geeigneter Prozessfähigkeitsindizes genutzt werden.

5.3.1 Versuchsplanung

Für die Ermittlung bauelementspezifischer Prozessfenster für das aufzutragende Pastenvolumen wird zunächst ein repräsentatives Bauelementspektrum ausgewählt, welches Zweipoler ebenso enthält wie QFP- und BGA-Bauelementtypen. Im Anschluss daran erfolgt eine sinnvolle Stufung der zu analysierenden Volumenvariationen. Ausgehend von einem spezifischen Nominalvolumen, welches aus den Vorgaben zu der Schablonendicke und der Aperturöffnungsfläche resultiert und im weiteren Verlauf als Volumenstufe 100 % bezeichnet wird, werden die abweichenden Volumenstufen berechnet. Während die Volumenstufen der Zweipoler von 50 % bis 150 % in 10 %-Schritten variiert werden, beschränken sich die Volumenstufen der QFP- und BGA-Typen auf die Werte 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 100 %, 115 % und 130 %. Auf Basis dieser Definition erfolgt der Leiterplatten- und Schablonenentwurf unter Verwendung von gestuften Druckschablonen. Die Bereitstellung der unterschiedlichen Pastenvolumina für die einzelnen Volumenstufen wird dabei über die Anpassung der Schablonendicke sowie der Aperturöffnungsfläche ermöglicht.

Für die Fertigung der Baugruppen kommen konventionelle Anlagen der SMT zum Einsatz. Zum Nachweis der gewünschten Variation im aufgetragenen Pastenvolumen werden nach dem Schablonendruckprozess alle Leiterplatten mit Hilfe des 3D-Pasteninspektionssystems inspiziert und die ermittelten Pastenvolumina ausgewertet. Nach dem Aufbau der Baugruppen werden die Lötstellen lichtmikroskopisch und röntgentechnologisch bewertet, um mögliche Fehlerbilder wie offene oder magere Lötstellen, Lotperlen oder Lotbrücken zu identifizieren. Des Weiteren erfolgt die Bestimmung des Durchgangswiderstands zum Nachweis der Funktionsfähigkeit aller Lötstellen.

Der Qualitätsbewertung im Initialzustand, also nach dem Reflowlöten, schließt sich die beschleunigte Alterung der Baugruppen im Temperaturschocktest (-40 °C/+125 °C, 15 Minuten Haltezeit) und die Bewertung der Zuverlässigkeit an. Hierfür werden zyklisch elektrische Funktionstests durchgeführt, um die Ausfallzeitpunkte der einzelnen Proben zu ermitteln. Neben den nichtzerstörenden Prüfverfahren kommen aber auch zerstörende Prüfverfahren zum Einsatz, um die Abnahme der mechanischen Lötstellenfestigkeit bei variierenden Lotpastenvolumina zu quantifizieren. Die im Rahmen der Untersuchung verwendeten Chipwiderstände werden in einem herkömmlichen Schertest geprüft, während die Anschlussbeinchen der eingesetzten QFP-Bauelemente einem Abzugstest unter einem definierten Abzugswinkel unterzogen werden.

Bauelementspektrum

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung kommt ein repräsentatives Bauelementspektrum zum Einsatz. Neben Chipwiderständen mit unterschiedlichen Gehäuseabmessungen (CR1206, CR0805, CR0603, CR0402) in 0 Ohm-Ausführung umfasst das Bauelementspektrum auch jeweils zwei QFP- und zwei BGA-Typen mit einer integrier-

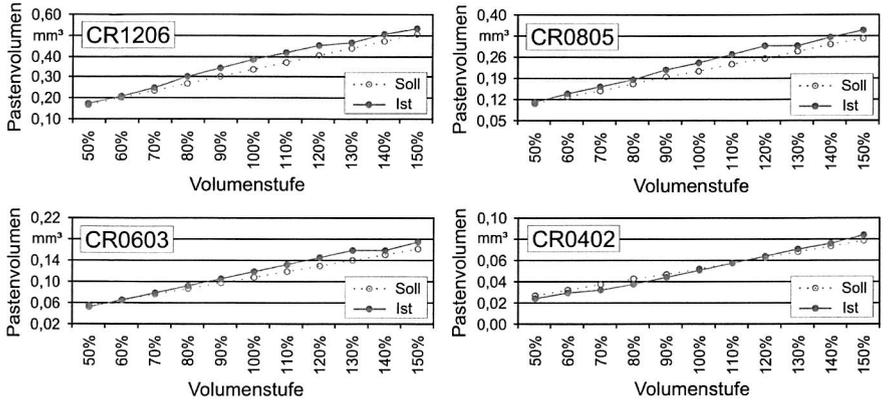
ten Daisy-Chain-Verdrahtung. Die Gehäuseabmessungen der beiden QFP-Typen betragen 14 mm x 14 mm. Das QFP-Bauelement mit der Bezeichnung „LQFP128-14mm-.4mm“ weist 128 Anschlüsse bei einem Rastermaß von 0,4 mm auf, während das QFP-Bauelement mit der Bezeichnung „LQFP64-14mm-.8mm“ ein Rastermaß von 0,8 mm und 64 Anschlüsse besitzt. Sowohl Chipwiderstände als auch QFP-Bauelemente weisen eine verzinnete Anschlussmetallisierung auf. Im Gegensatz zu den beiden QFP-Bauelementen unterscheiden sich die beiden BGA-Bauelemente auch hinsichtlich ihrer jeweiligen Gehäuseabmessungen. Während das kleinere BGA-Bauelement 84 Anschlüsse mit einem Rastermaß von 0,5 mm bei einer Gehäuseabmessung von 7 mm x 7 mm besitzt (Bezeichnung: „CTBGA84-.5mm-7mm“), verfügt das größere BGA-Bauelement über 160 Anschlüsse in einem Rastermaß von 1,0 mm bei Gehäuseabmessungen von 15 mm x 15 mm (Bezeichnung: „PBGA160-1.0mm-15mm“). Beide BGA-Bauelementtypen weisen bleifreie Balls mit einer Zinn-Silber-Kupfer-Legierung (Sn96.5Ag3Cu0.5) auf.

Leiterplatten- und Schablonenentwurf

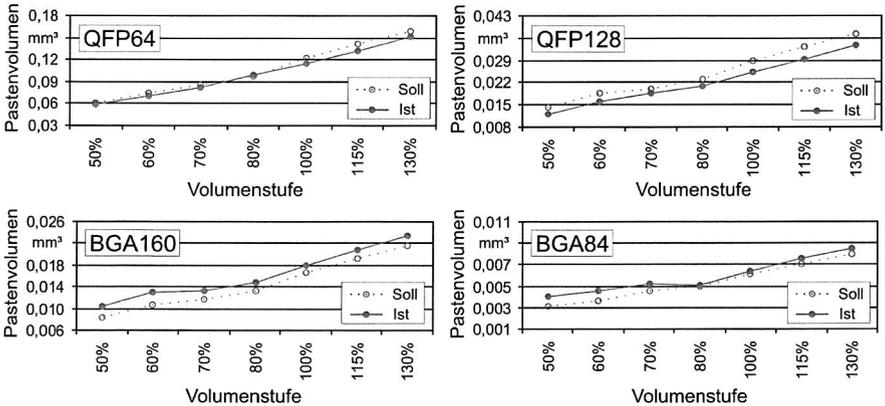
Das Leiterplattendesign orientiert sich im Wesentlichen an den Vorgaben der Richtlinie IPC-SM-782A [120]. Alle relevanten GeometrieKennwerte für die Anschlussflächen der einzelnen Bauelementtypen sind im Anhang dargestellt. Die Aussparungen in dem realisierten Lötstopplack sind umlaufend größer als das jeweilige Anschlusspad gestaltet, so dass es sich folglich um sogenannte NSMD-Pads (Non Solder Mask Defined Pads) handelt. Im Rahmen der Untersuchung kommen Leiterplatten mit Abmessungen von 160 mm x 100 mm x 1,5 mm und einem chemisch-Zinn-Oberflächenfinish zum Einsatz. Das Leiterplattenlayout berücksichtigt die Möglichkeit des elektrischen Tests der einzelnen Bauelemente. Der Entwurf des Schablonenlayouts erfolgt in Anlehnung an die Vorgaben aus [118] und unter Berücksichtigung der gewählten Padgrößen für das Leiterplattenlayout. Ausgehend von der Volumenstufe 100 % werden die alternativen Volumenstufen mit den variierenden Pastenvolumina durch eine Anpassung der Schablonendicke sowie eine Modifikation der Aperturöffnungsfläche erreicht. Eine Übersicht zu den verwendeten Schablonendicken, den gewählten Öffnungsflächen der Aperturen und den sich hieraus ergebenden Pastenvolumina ist ebenfalls im Anhang dargestellt.

5.3.2 Quantifizierung der applizierten Lotpastenvolumen

Im Rahmen der durchgeführten Pastendruckinspektion der bedruckten Leiterplatten wird überprüft, in welchem Maße der realisierte Schablonenentwurf das Auftragen variierender Lotpastenvolumina ermöglicht. In Abbildung 96 ist der Vergleich zwischen den Soll- und den Istwerten der applizierten Pastenvolumen für die verschiedenen Bauelementtypen und die realisierten Volumenstufen dargestellt. Aufgrund der sehr geringen Standardabweichungen innerhalb der einzelnen Volumenstufen wird auf eine Darstellung der Standardabweichungen verzichtet.



| Volumenstufe | | 50 % | 60 % | 70 % | 80 % | 90 % | 100 % | 110 % | 120 % | 130 % | 140 % | 150 % |
|--------------|--------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bauelement | CR1206 | 52 % | 62 % | 74 % | 89 % | 101 % | 114 % | 124 % | 134 % | 138 % | 151 % | 158 % |
| | CR0805 | 52 % | 64 % | 75 % | 87 % | 101 % | 112 % | 125 % | 138 % | 138 % | 152 % | 163 % |
| | CR0603 | 49 % | 61 % | 72 % | 85 % | 97 % | 110 % | 122 % | 133 % | 147 % | 146 % | 163 % |
| | CR0402 | 46 % | 55 % | 60 % | 71 % | 83 % | 96 % | 110 % | 123 % | 136 % | 145 % | 159 % |



| Volumenstufe | | 50 % | 60 % | 70 % | 80 % | 100 % | 115 % | 130 % |
|--------------|--------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Bauelement | QFP64 | 48 % | 58 % | 68 % | 81 % | 94 % | 108 % | 123 % |
| | QFP128 | 43 % | 56 % | 65 % | 73 % | 88 % | 102 % | 118 % |
| | BGA160 | 63 % | 78 % | 79 % | 88 % | 108 % | 125 % | 141 % |
| | BGA84 | 64 % | 73 % | 83 % | 82 % | 103 % | 122 % | 138 % |

Abbildung 96: Soll-Ist-Vergleich der aufgetragenen Pastenvolumen für die einzelnen Volumenstufen sowie tatsächlich aufgetragenes Pastenvolumen bezogen auf die jeweilige 100%-Volumenstufe

Wie aus den Soll-Ist-Vergleichen der aufgetragenen Pastenvolumina für die verschiedenen Volumenstufen ersichtlich ist, eignet sich das realisierte Schablonenlayout zum Auftragen variierender Lotpastenvolumina auf der Leiterplatte. Das Auftreten von geringfügigen Abweichungen zwischen den Soll- und den Istwerten der Pastenvolumina ist für den Schablonendruckprozess nicht außergewöhnlich und hat seine Ursache in einer Vielzahl von Einflussgrößen, die an dieser Stelle der Arbeit nicht näher erläutert werden sollen. Dass zwischen den Volumenstufen 60 % und 70 % des BGA160 und den Volumenstufen 70 % und 80 % des BGA84 kein signifikanter Unterschied im applizierten Pastenvolumen identifiziert werden kann, hat seine Ursache in der Fertigung der im Rahmen der Untersuchung eingesetzten Stufenschablone. Während der Schablonenentwurf eine Schablonendicke von 70 µm für die Volumenstufe 60 % des BGA160 und die Volumenstufe 70 % des BGA84 vorsieht, musste fertigungstechnisch auf eine Schablonendicke von 75 µm zurückgegriffen werden.

Die Quantifizierung der aufgetragenen Lotpastenvolumina für die einzelnen Volumenstufen der eingesetzten Bauelemente zeigt, dass gezielt variierende Pastenvolumina realisiert werden können. Während im weiteren Verlauf der Auswertung stets Bezug auf die jeweilige Volumenstufe genommen wird, ermöglichen die Ergebnisse der Volumenquantifizierung eine eindeutige Korrelation zwischen den qualitäts- und zuverlässigkeitsrelevanten Merkmalen der Lötstelle und den real aufgetragenen Pastenvolumina.

5.3.3 Bewertung der Lötstellenqualität und -zuverlässigkeit

Im Rahmen der Qualitäts- und Zuverlässigkeitsbewertung werden die Auswirkungen der variierenden Pastenvolumina auf die Lötstellen der einzelnen Bauelementtypen analysiert. Neben der Beurteilung der Lötstelle im Ausgangszustand, also nach dem Reflowlöten, beinhaltet dies auch eine Analyse der Lötverbindung nach beschleunigter Alterung. Die Darstellung der Ergebnisse gliedert sich dabei in die eingesetzten Bauelementgruppen Chipwiderstände, QFP-Bauelemente und BGA-Bauelemente.

Chipwiderstände CR1206, CR0805, CR0603 und CR0402

Im Ausgangszustand beinhaltet die optische Beurteilung der gelöteten Chipwiderstände das Erfassen von Grabsteinbildung sowie das Auftreten von Lotperlen. Während an keinem der 80 Chipwiderstände pro Chipgröße und Volumenstufe das Fehlerbild Grabsteinbildung auftritt, können in Abhängigkeit des aufgetragenen Pastenvolumens und der Bauelementgröße Lotperlen identifiziert werden. Die relative Häufigkeit des Auftretens von Lotperlen ist für die jeweiligen Chipgrößen und die einzelnen Volumenstufen in Abbildung 97 dargestellt.

Neben der relativen Häufigkeit des Auftretens von Lotperlen sind in Abbildung 97 drei gelötete Chipwiderstände CR1206 der Volumenstufen 50 %, 100 % und 150 % dargestellt, die exemplarisch das Fehlerbild Lotperlenbildung visualisieren. Die in Flussmittel

eingebetteten Lotperlen haften nach dem Reflowlöten an der langen, nicht metallisierten Bauelementkante an. Die Ursache für das Auftreten von Lotperlen ist Lotpaste, die sich nach dem Bestückvorgang unterhalb des Bauelementes befindet und während des Reflowprozesses durch das benetzungsbedingte Absenken des Bauelementes nicht mehr vollständig auf die Anschlussflächen zurückfließen kann. Ein Teil des schmelzflüssigen Lots wird dabei durch den absenkenden Bauelementkörper verdrängt und tritt an der Bauelementkante aus, wo das Lot in Form einer Lotperle erstarrt [13].

Durch diesen Effekt lässt sich auch der Einfluss der Chipgröße auf die Lotperlenbildung erklären. Wie aus Abbildung 97 ersichtlich ist, weist die Chipgröße CR1206 im Rahmen dieser Untersuchung die größte Neigung zu Lotperlenbildung auf. Während für die Chipgröße CR1206 bereits bei der Volumenstufe 80 % Lotperlen identifiziert werden können, treten bei der Chipgröße CR0402 die ersten Lotperlen erst bei der Volumenstufe 140 % auf. Eine Analyse der geometrischen Gegebenheiten an den jeweiligen Lötstellen zeigt, dass bei dem realisierten Leiterplattenlayout mit zunehmender Chipgröße die Metallisierungsfläche des Bauelementes in Richtung Padzentrum wandert. Dies hat einerseits zur Folge, dass durch das Bestücken der größeren Chipwiderstände wesentlich mehr Lotpaste unter dem Bauelementkörper verdrängt werden muss. Andererseits nimmt auch der Anteil der unmetallisierten Bauelementfläche zu, der nach dem Bestücken mit der Lotpaste in Berührung kommt, grundsätzlich von dieser aber nicht benetzt werden kann.

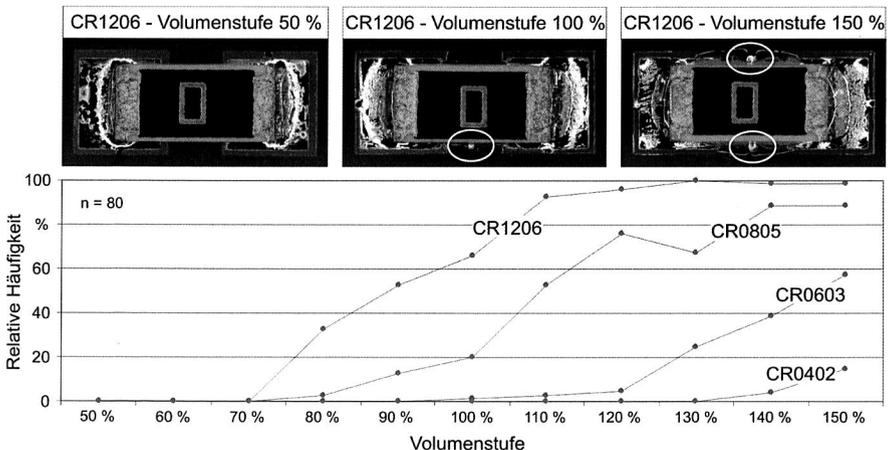


Abbildung 97: Lotperlenbildung an den Chipwiderständen CR1206, CR0805, CR0603 und CR0402 in Abhängigkeit von der Chipgröße und der Volumenstufe

Ein weiteres Lötstellenmerkmal stellt die Meniskenausprägung dar. Abbildung 98 visualisiert die Lötstellenausprägung der Chipgrößen CR1206 und CR0402 für die Volumen-

stufen 50 %, 100 % und 150 % im Ausgangszustand. Für die Volumenstufe 50 % kommt es lediglich zu einer Teilbenetzung der Anschlussfläche auf der Leiterplatte und einer durchweg stark konkaven Ausprägung des Lötmeniskus. Der Anstieg des Lotes reicht auf etwa 50 % bis 75 % der Bauteilhöhe. Mit zunehmendem Lotpastenvolumen kommt es zu einer weniger stark konkaven Ausprägung des Lötmeniskus und einem Anstieg des Lotes bis zur vollständigen Bauteilhöhe. Zudem resultiert aus dem größeren Pastenvolumen eine leichte Erhöhung des zuverlässigkeitsrelevanten Lotspaltes zwischen Anschlussfläche und Bauelementmetallisierung.

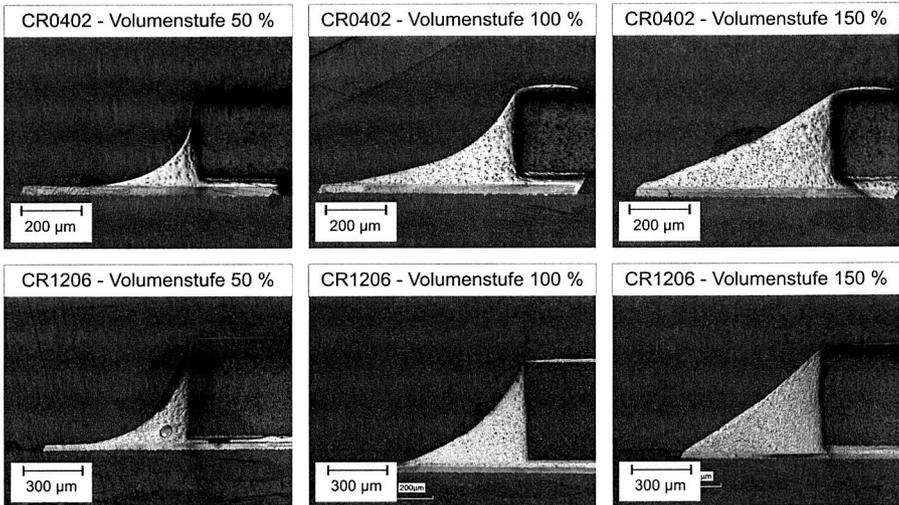


Abbildung 98: Lötstellenausbildung der Chipwiderstände CR1206 und CR0402 im Ausgangszustand für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 150 %

Während die Funktionsfähigkeit aller Lötstellen im Ausgangszustand durch einen niederohmigen Übergangswiderstand gegeben ist, weisen drei von 16 Lötstellen der Chipgröße CR1206 für die Volumenstufe 50 % einen hochohmigen Übergangswiderstand nach 1000 Temperaturschockzyklen auf, so dass diese als ausgefallen zu bewerten sind. Alle übrigen Lötstellen sind niederohmig und können als elektrisch intakt eingestuft werden.

Die metallografische Analyse der Lötstellen nach 1000 Temperaturschockzyklen, dargestellt in Abbildung 99, belegt eine enorme Rissausprägung in der Lötverbindung der Chipgröße CR1206 für die Volumenstufe 50 %. Diese Rissausprägung stellt die Fehlerursache für die identifizierten Ausfälle dar und resultiert aus der zyklisch in die Lötstelle eingeleiteten mechanischen Belastung in Folge der wirkenden thermomechanischen Wechselbeanspruchung [21]. Wie aus dem Vergleich der Volumenstufen 50 %, 100 %

und 150 % für die Chipgröße CR1206 ersichtlich ist, nimmt mit zunehmendem Pastenvolumen die mechanische Festigkeit der Lötstelle und folglich die Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Risseinleitung und -fortsetzung zu. Des Weiteren ist zu erkennen, dass das Auftreten von Rissen in der Lötstelle auch mit zunehmend kleinerer Chipgröße abnimmt. Ursächlich hierfür ist die geringere Kräfteinleitung in die Lötstelle, die sich in Folge der reduzierten Bauteilabmessungen ergibt. Keine der im Rahmen der Untersuchung metallografisch analysierten Menisken der unterschiedlichen Volumenstufen der Chipgröße CR0402 weisen nach 1000 Temperaturschockzyklen Risse in der Lötstelle auf.

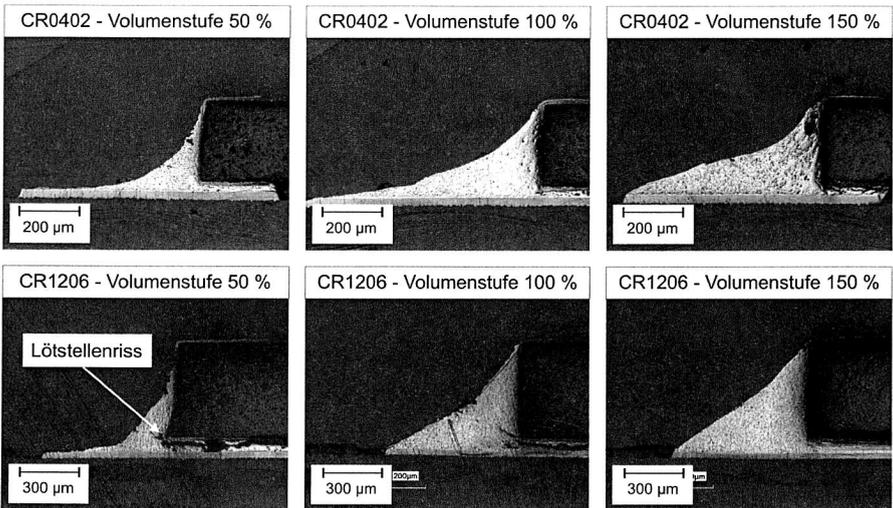


Abbildung 99: Lötstellenausbildung der Chipwiderstände CR1206 und CR0402 nach 1000 Temperaturschockzyklen für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 150 %

Neben der metallografischen Analyse und der Beurteilung der elektrischen Funktionalität eignen sich auch Schertests zur Untersuchung der Zyklenbeständigkeit einer Lötstelle. Bei dem zerstörenden Prüfverfahren wird die Scherkraft bestimmt, die notwendig ist, um einen Chipwiderstand in einer definierten Weise aus der Lötstelle zu scheren. Die ermittelten Scherkraftverläufe für die einzelnen Chipgrößen und die verschiedenen Volumenstufen sind für den Ausgangszustand, nach 500 und nach 1000 Temperaturschockzyklen in Abbildung 100 dargestellt. Die in der Grafik angezeigten Mittelwerte und Standardabweichungen basieren auf 16 Einzelmessungen.

Mit der Zunahme des Pastenvolumens steigen die resultierenden Scherkräfte und folglich auch die mechanischen Festigkeiten für alle betrachteten Chipgrößen. Bezogen auf

die jeweilige 100 % Volumenstufe beträgt im Initialzustand die Spannweite zwischen den minimalen und den maximalen Scherkräften einer Chipgröße zwischen 34 % (CR0402) und 56 % (CR0603). Aber auch nach 500 beziehungsweise 1000 Temperaturschockzyklen hängt die resultierende Scherkraft in signifikanter Weise von dem aufgetragenen Pastenvolumen ab. Erwartungsgemäß steigen die absolut ermittelten Scherkräfte mit zunehmender Chipgröße an, während eine beschleunigte Alterung im Temperaturschocktest zu einer Reduzierung der mechanischen Festigkeit und somit der Scherkräfte führt. Mit einer mittleren Scherkraft von etwa 17 N weist die Volumenstufe 50 % der Chipgröße CR1206 nach 1000 Temperaturschockzyklen noch etwa 27 % der Ausgangsfestigkeit auf. Dies ist vor allem auf die enorme Rissausbildung in der Lötstelle zurückzuführen, die auch die Ursache der auftretenden elektrischen Ausfälle darstellt. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass auch die Volumenstufe 60 % der Chipgröße CR1206 nach 1000 Temperaturschockzyklen erhebliche Risse aufweist, da die mittlere Scherkraft mit etwa 18 N ebenfalls nur noch 28 % des Initialwertes besitzt. Bei allen übrigen Varianten lassen sich Scherkräfte nach 1000 Temperaturschockzyklen identifizieren, die mindestens 35 % ihres ursprünglichen Wertes betragen.

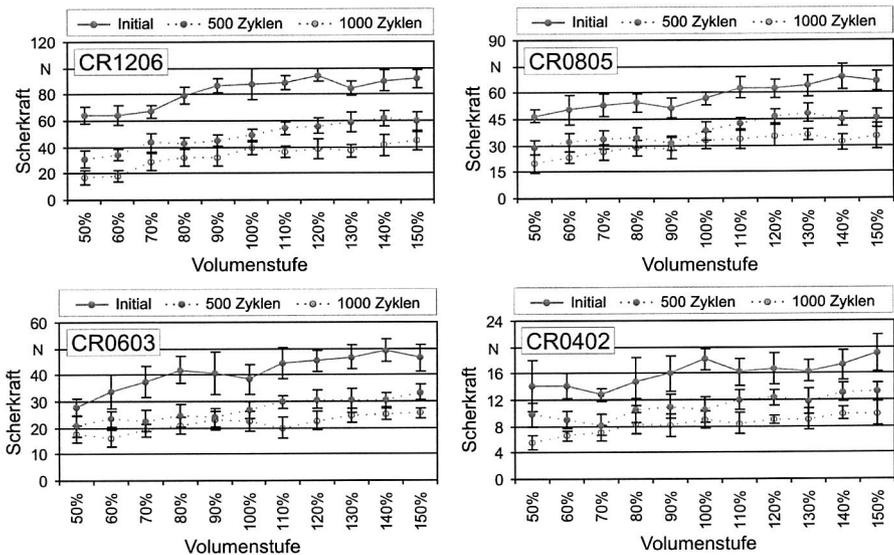


Abbildung 100: Scherwerte der Chipwiderstände CR1206, CR0805, CR0603 und CR0402 für die einzelnen Volumenstufen im Ausgangszustand sowie nach 500 und 1000 Temperaturschockzyklen

QFP64 und QFP128

Im Rahmen der Lötstellenbewertung im Ausgangszustand nach [119] sind alle Lötstellen für alle Volumenstufen als zulässig zu bezeichnen. Es treten keinerlei Lotperlen oder Lotbrücken an den Bauelementanschlüssen auf. Zwischen dem Lot und dem Leiterplattenpad beziehungsweise dem Gullwinganschluss des QFP stellt sich eine sehr gute Benetzung ein. Elektrische Widerstandsmessungen belegen, dass alle Lötstellen niederohmig sind, so dass offene Lötstellen grundsätzlich ausgeschlossen werden können.

In Abbildung 101 ist die Lötstellenausbildung des Bauelements QFP128 im Ausgangszustand für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 130 % dargestellt. Zunächst ist ersichtlich, dass bei allen drei Volumenstufen ein Teil des Lotes am Gullwing bis zum Bauelementgehäuse aufsteigt. Ursächlich für dieses nach [119] eher unerwünschte Verhalten ist die ausgezeichnete Benetzungsfähigkeit der Gullwingmetallisierung. Je größer die zur Verbindungsbildung zur Verfügung stehende Lotpastenmenge ist, desto größer ist auch die am Gullwing aufsteigende Lotmenge. Des Weiteren zeigt sich der Einfluss der Lotpastenmenge auch an der Ausbildung der Lotferse, die mit zunehmendem Lotpastenvolumen stärker ausgeprägt ist und am Gullwing höher aufsteigt.

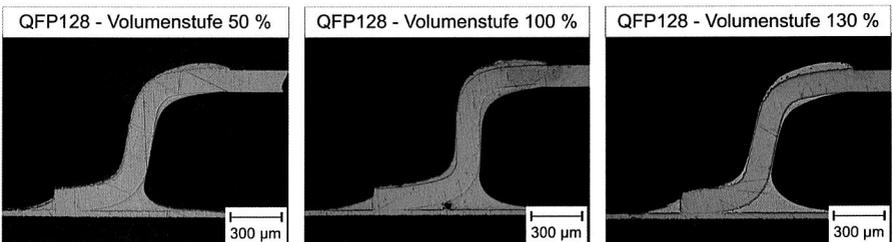


Abbildung 101: Lötstellenausbildung des Bauelements QFP128 im Ausgangszustand für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 130 %

Während das Absolvieren von 1500 Temperaturschockzyklen zu keinem nennenswerten Anstieg der Durchgangswiderstände der Lötstellen und somit auch zu keinem elektrischen Versagen führt, zeigen durchgeführte Zugtests keine wesentliche Minderung der mechanischen Lötstellenfestigkeit der beiden QFP-Typen für die einzelnen Volumenstufen. Ursächlich hierfür ist die federnde Wirkung der Gullwinganschlüsse, so dass ein Großteil der durch thermische Wechselbelastung induzierten mechanischen Spannungen im Gullwinganschluss aufgenommen wird. Die ermittelten Zugkräfte für die einzelnen Volumenstufen im Ausgangszustand sowie nach 750 und 1500 Temperaturschockzyklen sind für beide QFP-Typen in Abbildung 102 dargestellt.

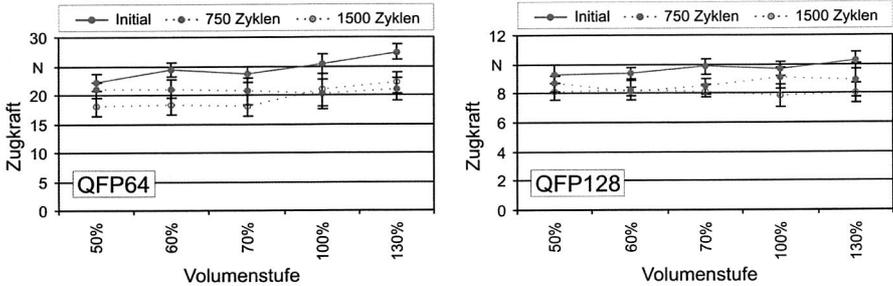


Abbildung 102: Zugkräfte der Anschlussbeinchen der Bauelemente QFP64 und QFP128 für die einzelnen Volumenstufen im Ausgangszustand sowie nach 750 und 1500 Temperaturschockzyklen

Im Gegensatz zu den Chipwiderständen haben variierende Lotpastenvolumen bei den beiden QFP-Typen einen wesentlich geringeren Einfluss auf die mechanische Festigkeit der Lötstelle. So liegen die Unterschiede zwischen den Volumenstufen 50 % und 130 % sowohl im Initialzustand als auch nach 750 beziehungsweise 1500 Temperaturschockzyklen bei maximal 20 %. Die hervorragende Zyklenbeständigkeit von Gullwinglötstellen, die sich nahezu unabhängig von der realisierten Volumenstufe darstellt, zeigt sich auch in Abbildung 103.

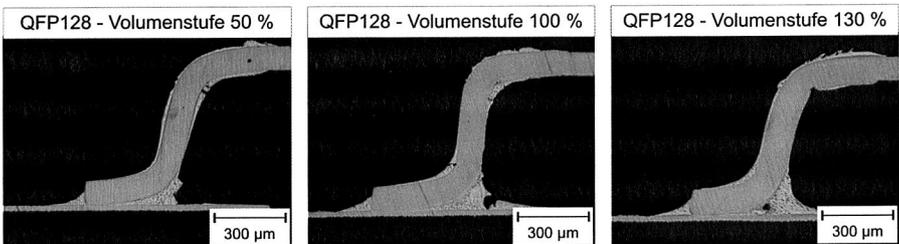


Abbildung 103: Lötstellenausbildung des Bauelements QFP128 nach 1500 Temperaturschockzyklen für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 130 %

Obwohl teilweise zerklüftete Lotoberflächen auf die durchgeführte Belastung der Lötstelle im Temperaturschocktest hinweisen, haben sich keinerlei Risse in den Lötverbindungen der verschiedenen Volumenstufen unterhalb des Gullwinganschlusses gebildet.

BGA160 und BGA84

Im Ausgangszustand treten für beide BGA-Typen weder Lötbrücken oder Lotperlen, nachgewiesen durch röntgentechnologische Untersuchungen, noch offene Lötstellen, nachgewiesen durch elektrische Widerstandsmessungen, auf. Metallografische Untersuchungen weisen auf eine zuverlässig ausgebildete Lötstellenform hin. In Abbildung

104 ist die Lötstellenausbildung der beiden BGA-Typen für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 130 % dargestellt. Messungen zur Quantifizierung des Stand-Off belegen, dass mit zunehmendem Lotpastenvolumen auch der Stand-Off geringfügig ansteigt. Im Fall des BGA160 beträgt der Unterschied im Stand-Off zwischen den Volumenstufen 50 % und 130 % etwa 40 μm . Bezogen auf den Gesamt-Stand-Off der Volumenstufe 100 % entspricht dies etwa 10 %. Ursächlich für diesen Höhenunterschied sind die zur Verbindungsbildung zur Verfügung stehenden Lotpastenvolumina. Unter Einbeziehung des Ballvolumens des BGA160 mit einem nominellen Balldurchmesser von 500 μm ergibt sich für die Volumenstufe 100 % ein Gesamtlotvolumen von $82,07 \times 10^6 \text{ mm}^3$. Während das Gesamtlotvolumen der Volumenstufe 130 % mit $87,03 \times 10^6 \text{ mm}^3$ etwa 6 % über dem Volumen der Volumenstufe 100 % liegt, beträgt das Gesamtlotvolumen der Volumenstufe 50 % gerade einmal $73,76 \times 10^6 \text{ mm}^3$ und liegt damit etwa 10 % unter dem Volumen der Volumenstufe 100 %. Im Gegensatz zu dem BGA160 sind die Höhenunterschiede des BGA84 mit etwa 10 μm zwischen den Volumenstufen 50 % und 130 % nicht ganz so stark ausgeprägt.

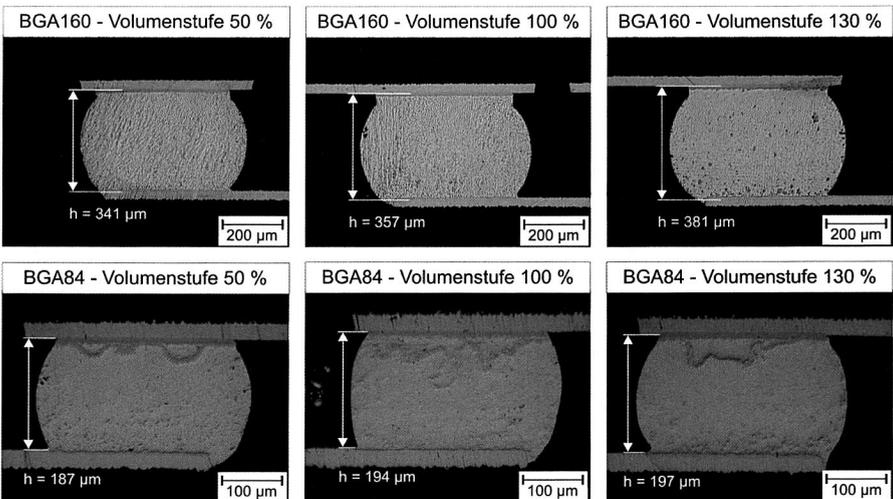


Abbildung 104: Ausbildung der Lötstellen sowie Messung des Stand-Offs der Bauelemente BGA160 und BGA84 für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 130 % im Ausgangszustand

Ein Einfluss des Pastenvolumens auf die Zyklenbeständigkeit der Lötstellen lässt sich nach dem Absolvieren von 1500 Temperaturschockzyklen nicht nachweisen, da aufgrund der zu geringen thermomechanischen Beanspruchung der Lötstelle keine elektrischen Ausfälle aufgetreten sind. Die Lötstellen des BGA160 weisen in der metallografischen Analyse nach 1500 Temperaturschockzyklen kaum Risse auf, wohingegen in den

Lötstellen des BGA84 leiterplattenseitig erste Risse in den Lötstellen zu erkennen sind. Die Lötstellenausbildung der beiden BGA-Typen nach 1500 Temperaturschockzyklen für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 150 % wird in Abbildung 105 illustriert.

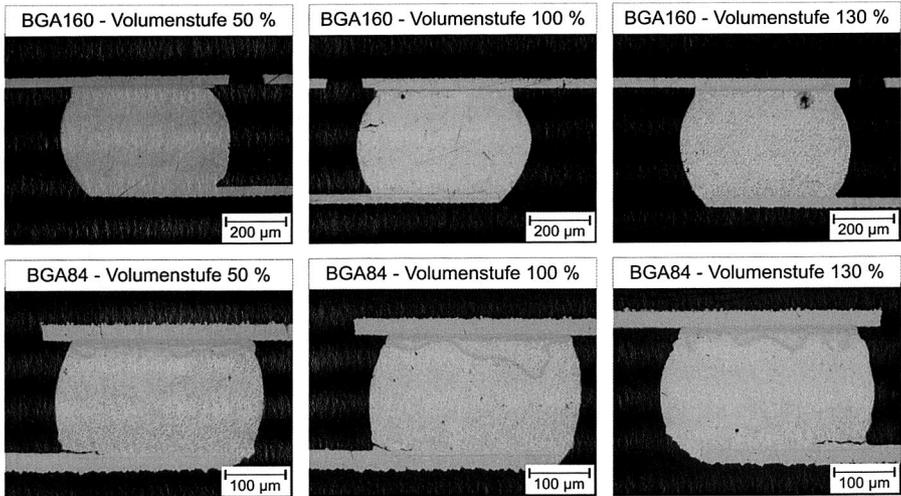


Abbildung 105: Ausbildung der Lötstellen der Bauelemente BGA160 und BGA84 für die Volumenstufen 50 %, 100 % und 150 % nach 1500 Temperaturschockzyklen

Eine Weiterführung der beschleunigten Alterung bis zu insgesamt 3000 Temperaturschockzyklen führt bei beiden BGA-Typen zu ersten Bauelementausfällen aufgrund von bauelementseitigen Rissen in der Lötstelle. Obwohl tendenziell BGA-Bauelemente der geringeren Volumenstufe eine höhere Ausfallhäufigkeit ausweisen, lässt sich ein signifikanter Einfluss des Pastenvolumens im Rahmen der durchgeführten Untersuchung nicht nachweisen. Insgesamt liegt die Ausfallhäufigkeit für alle Volumenstufen und beide BGA-Typen nach 3000 Temperaturschockzyklen jeweils unterhalb von 20 %.

5.3.4 Definition bauelementspezifischer Prozessfenster für das aufzutragende Pastenvolumen

Auf Basis der Bewertung der Lötstellenqualität sowie der Lötstellenzuverlässigkeit können bauelementspezifische Prozessfenster für das aufzutragende Pastenvolumen definiert werden. Die Festlegung der oberen und unteren Toleranzgrenze für das aufzutragende Pastenvolumen hängt dabei maßgeblich von den spezifischen Anforderungen an die elektronische Baugruppe ab. Unter Zugrundelegung einer Zyklenbeständigkeit von mindestens 1000 Temperaturschockzyklen (-40 °C/+125 °C, 15 Minuten Haltezeit) und einer lotperlenfreien Lötstelle können für die im Rahmen der Untersuchung eingesetzt

ten Bauelemente die in Tabelle 10 angegebenen unteren und oberen Toleranzgrenzen für das aufzutragende Pastenvolumen identifiziert werden:

| Bauelement | USG (Volumenstufe) | USG (Volumen real) | OSG (Volumenstufe) | OSG (Volumen real) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| CR1206 | 60 % | 62 % | 70 % | 74 % |
| CR0805 | 50 % | 52 % | 70 % | 75 % |
| CR0603 | 50 % | 49 % | 90 % | 97 % |
| CR0402 | 50 % | 46 % | 130 % | 136 % |
| QFP64 | 50 % | 48 % | 130 % | 123 % |
| QFP128 | 50 % | 43 % | 130 % | 118 % |
| BGA160 | 50 % | 63 % | 130 % | 141 % |
| BGA84 | 50 % | 64 % | 130 % | 138 % |

Tabelle 10: Festlegung bauelementspezifischer Prozessfenster für das aufzutragende Pastenvolumen

Bei der Analyse der identifizierten Prozessfenster fallen zunächst die sehr engen Prozessfenster der Bauelemente CR1206 und CR0805 auf. Diese haben ihre Ursache in der niedrigen oberen Toleranzgrenze, die sich als Folge der Lötperlenbildung im Rahmen der Untersuchung ergibt. Aufgrund der Tatsache, dass die identifizierten Prozessfenster das Ergebnis des realisierten Leiterplatten- und Schablonenlayouts darstellen, ist für diese beiden Bauelemente eine Überarbeitung des Layouts dringend angeraten. Durch eine Robustheitssteigerung gegenüber Lotperlenbildung lässt sich auf diese Weise das resultierende Prozessfenster erheblich ausweiten. Im Gegensatz zu den Chipwiderständen weisen sowohl die QFP-Bauelemente als auch die BGA-Bauelemente ausreichend große Prozessfenster auf. Die Toleranzgrenzen werden jeweils von den kleinsten beziehungsweise größten Volumenstufen vorgegeben, da weder qualitätsrelevante noch zuverlässigkeitsrelevante Einflüsse bei der Festlegung zu berücksichtigen sind. Vor dem Hintergrund der im Rahmen der Untersuchung gewählten Volumenstufen ist prinzipiell davon auszugehen, dass eine Erweiterung der Volumenstufen auch zu einem größeren Prozessfenster führt. Bei der Übernahme der Toleranzgrenzen in die linienintegrierte Prüfung ist in jedem Fall zu berücksichtigen, dass die identifizierten Toleranzgrenzen für das Pastenvolumen das Ergebnis einer singulären Variation darstellen. Zusätzliche Einflüsse wie beispielsweise der Druckversatz oder auch der Bestückversatz, die sich ebenfalls signifikant auf die Qualität und Zuverlässigkeit auswirken, sind im Rahmen der Untersuchung unberücksichtigt geblieben.

6 Konzept zur Beurteilung der Prozessfähigkeit des Schablonendrucks

Die Statistische Prozesslenkung (SPC: Statistical Process Control) stellt in der industriellen Fertigung und Produktion ein wichtiges Instrumentarium dar, um der anhaltenden Forderung nach einer ständigen Qualitätsverbesserung der Produkte und Erzeugnisse nachzukommen. Vor allem dem vollzogenen Wandel im Qualitätsdenken der vergangenen 20 Jahre hat die SPC ihren heutigen Stellenwert zu verdanken. Während früher die Einhaltung von Grenzwerten als Qualität definiert wurde, hat sich heutzutage die Anschauung durchgesetzt, dass mit jeder Abweichung vom Zielwert Einbußen in der Qualität einhergehen [101]. Den vollzogenen Paradigmenwechsel veranschaulicht Abbildung 106.

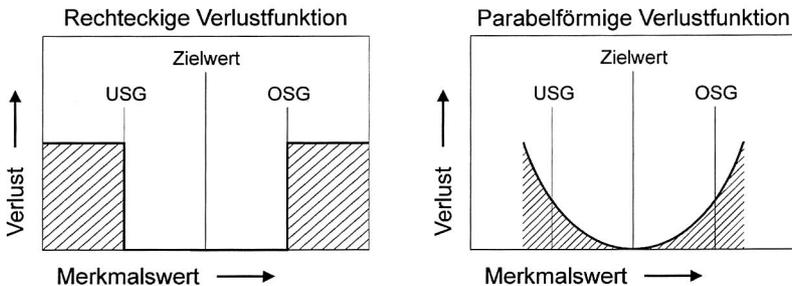


Abbildung 106: Rechteckige (Gut-Schlecht-Denken) und parabelförmige (Taguchi) Verlustfunktion

Der rechteckigen Verlustfunktion liegt der Ansatz zugrunde, dass gefertigte Teile, deren Merkmalswerte sich innerhalb der unteren und oberen Spezifikationsgrenzen (USG, OSG) befinden, das gleiche Maß an Qualität aufweisen. Eine Unterscheidung, ob ein Merkmalswert sehr nahe am Zielwert oder aber an der Spezifikationsgrenze liegt, findet nicht statt. Ein auf der rechteckigen Verlustfunktion basierendes Qualitätsdenken hat somit lediglich die Einhaltung der Spezifikationsgrenzen zum Ziel. Vor diesem Hintergrund ist auch die Rede vom sogenannten „Gut-Schlecht-Denken“. Im Gegensatz dazu liegt der parabelförmigen Verlustfunktion der Ansatz zugrunde, dass jede Abweichung vom Zielwert mit einem Qualitätsverlust einhergeht. Die nach seinem Erfinder Taguchi benannte parabelförmige Verlustfunktion führt in der Fertigung dazu, dass Prozesse möglichst auf den Zielwert zentriert und hinsichtlich ihrer Streuung minimiert werden sollten, um das Maß an Qualitätsverlust zu minimieren. [35]

Vor allem für die Elektronikproduktion bietet der Einsatz der SPC oder einzelner Elemente daraus erhebliches Optimierungspotenzial [83] [91] [166]. Die Gründe hierfür liegen in der Komplexität und der Verkettung der einzelnen Fertigungsschritte in der Ober-

flächenmontagetechnik [48]. Qualitativ hochwertige elektronische Baugruppen lassen sich nur unter der Prämisse fertigen, dass die Merkmalswerte des Produkts nach jedem Prozessschritt auf den Zielwert zentriert und mit einer möglichst geringen Streuung realisiert sind. Andernfalls kann das Aufsummieren von qualitätsrelevanten Abweichungen entlang der Prozesskette unter Umständen zu Fertigungsfehlern führen. Dies zeigt Abbildung 107 exemplarisch am Beispiel des Prozessfehlers Head-In-Pillow.

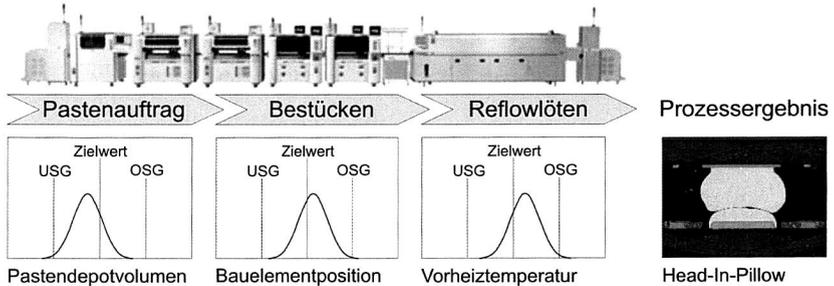


Abbildung 107: Geringfügige Prozessschwankungen in den einzelnen Fertigungsprozessen können sich aufsummieren und die Ursache komplexer Fertigungsfehler darstellen

Als Head-In-Pillow-Defekt wird ein Prozessfehler bezeichnet, bei dem es trotz des Aufschmelzens des Lotballs eines BGA sowie des im Schablonendruck aufgetragenen Pastendepots zu keiner zuverlässigen Lötstellenausbildung kommt. Während der elektrische Test der betroffenen Baugruppen in der Fertigung oftmals noch erfolgreich absolviert wird, kommt es aufgrund der zyklischen Wechselbelastung im Feld zu Frühausfällen. Hieraus resultiert auch die besondere Bedeutung dieses Prozessfehlers für die Qualitätssicherung. Die Ursachen für den Head-In-Pillow-Defekt sind vielfältig und betreffen die eingesetzten Materialien ebenso wie die verwendeten Fertigungsprozesse. Neben den in Abbildung 107 exemplarisch genannten Einflussgrößen Pastendepotvolumen, Bauelementposition und Vorheiztemperatur, die als Qualitätsmerkmale der einzelnen Fertigungsprozesse von Bedeutung sind, existieren eine Vielzahl weiterer Einflussgrößen [158]. Die Komplexität, die sich im Zusammenhang mit dem Head-In-Pillow-Defekt ergibt, resultiert aus den zahlreichen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussgrößen. Während das singuläre Auftreten der Abweichung eines qualitätsrelevanten Merkmals oftmals noch nicht zu einem Head-In-Pillow-Defekt führt, kann sich die Fehlerneigung durch das zusätzliche Wirken weiterer Abweichungen enorm verstärken. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Zielwertzentrierung und Streuungsminimierung der einzelnen Qualitätsmerkmale zunehmend an Bedeutung.

Innerhalb der SPC stellt die Beurteilung von Maschinen und Fertigungsprozessen auf Basis von Fähigkeitsindizes ein wesentliches Element dar. Der Einsatz von Qualitätsfä-

higkeitsindizes im industriellen Umfeld orientiert sich dabei an der Qualifikationsphase, in der diese zum Tragen kommt. In diesem Zusammenhang ist prinzipiell die Kurzzeitfähigkeit, die vorläufige Prozessfähigkeit sowie die Langzeitprozessfähigkeit zu unterscheiden. Die Kurzzeitfähigkeit oder auch Maschinenfähigkeit kommt häufig bei der Inbetriebnahme einer Maschine zum Einsatz. Ziel ist es, die prinzipielle Eignung der Fertigungsmaschine für den Produktionsprozess nachzuweisen. Dies setzt voraus, dass die Beeinflussung des Prozessergebnisses durch wichtige Einflussgrößen wie Mensch, Material oder auch Mitwelt vollständig ausgeschlossen werden kann. Da diese Voraussetzung jedoch häufig nicht gegeben ist, wird oftmals auch eine vorläufige Prozessfähigkeit ermittelt, die vor dem eigentlichen Serienanlauf durchgeführt wird. Alle wesentlichen Einflussgrößen werden zwar bei dieser Analyse berücksichtigt, kommen aber aufgrund der zeitlich begrenzten Datenaufnahme nur in begrenztem Maße zum Tragen. Die Langzeitprozessfähigkeit, die oftmals auch lediglich Prozessfähigkeit genannt wird, kommt hingegen in der Serienfertigung zum Einsatz. Sie berücksichtigt möglichst alle wirkenden Einflüsse auf das Prozessergebnis, indem entsprechend lange Datenerhebungszeiträume angesetzt werden. [35] [74]

Die Beurteilung der Prozessfähigkeit des Schablonendruckprozesses auf der Basis geeigneter Qualitätsfähigkeitsindizes bietet eine Vielzahl von Vorteilen [144] [164] [165]. Im Wesentlichen sind dies:

- Quantifizierung der Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses im Rahmen spezifischer Kunden-/Lieferanten-Vereinbarungen
- Quantifizierbarer Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Optimierung des Schablonendruckprozesses
- Vergleichbarkeit verschiedener Schablonendruckprozesse hinsichtlich ihrer Qualitätsleistung
- Vertiefung des technologischen Verständnisses für den Schablonendruckprozess

Mit der Entwicklung geeigneter 3D-Pasteninspektionssysteme sind die Voraussetzungen geschaffen worden, die Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses ganzheitlich zu bewerten. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieses Kapitels eine Strategie zur Prozessfähigkeitsbeurteilung auf der Basis geeigneter Fähigkeitsindizes vorgestellt und anhand realer Fertigungsdaten validiert.

6.1 Grundlegende Schritte einer Prozessfähigkeitsanalyse

Eine Prozessfähigkeitsanalyse stellt einen mehrstufigen Prozess dar, an dessen Anfang die Definition der Qualitätsmerkmale steht. Als Qualitätsmerkmal wird eine Produkteigenschaft definiert, die Aussagen bezüglich der Produktqualität zulässt. In der Regel ist

die Festlegung der Qualitätsmerkmale in einem Unternehmen Aufgabe der Qualitätsplanung. Die Definition der abnahmerelevanten Qualitätsmerkmale ist bereits in der Produktplanung vorzusehen. Von Bedeutung ist hier einerseits die Vollständigkeit, es dürfen also keine wichtigen Qualitätsmerkmale eines Produktes unberücksichtigt bleiben. Des Weiteren ist zu klären, ob es sich um quantitative oder qualitative Merkmale handelt. Quantitative Merkmale werden in kontinuierliche oder diskrete Merkmale unterschieden. In einem weiteren Schritt ist die Eignung für den Prüfprozess nachzuweisen, da eine Prozessfähigkeitsanalyse nur mit Hilfe eines fähigen Messverfahrens durchgeführt werden darf. Im folgenden Schritt ist eine ausreichend große Stichprobe aus dem Prozess zu entnehmen und zu vermessen. Empfehlungen zu der Stichprobenentnahme und Stichprobenfrequenz sind in [35] dargestellt. Wichtig ist, dass es sich dabei um eine repräsentative Stichprobe handelt, so dass die gewonnenen Stichprobenwerte Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zulassen. Im nächsten Schritt erfolgen die Ergebnisdarstellung sowie die Berechnung der Qualitätsregelkarten. Hier ist grundsätzlich zwischen einem qualitätsfähigen und einem nicht qualitätsfähigen Prozess zu unterscheiden. Im Anschluss daran werden die zutreffenden Verteilungszeitmodelle bzw. Prozessmodelle ausgewählt, deren Stabilität beurteilt, sowie die anwendbaren Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Prozessfähigkeitsindizes nach DIN ISO 21747 identifiziert. Ziel ist es dabei, geeignete Prozessmodelle zu identifizieren, welche die Realität ausreichend genau beschreiben. Auf Basis der ermittelten Berechnungsvorschriften werden anschließend die Qualitätsfähigkeitsindizes berechnet. [167]

6.2 Defizite verfügbarer Ansätze zur Prozessfähigkeitsbeurteilung

Aktuell verfügbare Ansätze zur Prozessfähigkeitsbeurteilung des Schablonendrucks weisen eine Reihe von Nachteilen auf, die einem sinnvollen Einsatz in der Elektronikfertigung und somit einer weiten Verbreitung in der Industrie entgegen stehen [62] [106] [110] [150] [152]. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um folgende Defizite:

- ❑ Vernachlässigung bedeutender Qualitätsmerkmale wie Transfereffizienz oder Depottopographie durch die Beschränkung auf zweidimensionale Messgrößen
- ❑ Einsatz ungeeigneter Messsysteme zur Erfassung der einzelnen Qualitätsmerkmale
- ❑ Irrtümliche Annahme normalverteilter Qualitätsmerkmale sowie Verwendung ungeeigneter Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Fähigkeitskenngrößen
- ❑ Fehlen von Vorgaben für die Stichprobenentnahme
- ❑ Verwendung nicht repräsentativer Prozessdaten bei der Fähigkeitsberechnung durch die Beschränkung auf kurze Datenerfassungszeiträume

Die Prozessfähigkeitsbeurteilung des Schablonendrucks auf Basis der zweidimensionalen Messgrößen Versatz und Flächenbedruckungsgrad wird diesem komplexen Prozess nicht gerecht, da weitere wesentliche Qualitätsmerkmale wie die Transfereffizienz oder auch die Depottopographie unberücksichtigt bleiben. Neben dem Einsatz ungeeigneter Messsysteme zur Erfassung der Qualitätsmerkmale stellt vor allem die Verwendung falscher Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Qualitätsfähigkeitskenngrößen ein Defizit dar. Die Berechnung der Prozessfähigkeit auf Basis von Schätzwerten für die Prozessstreuung und die Prozesslage setzt voraus, dass es sich bei den Qualitätsmerkmalen um normalverteilte Größen handelt. Im Allgemeinen liegt jedoch keine Normalverteilung der einzelnen Qualitätsmerkmale vor. Das Fehlen von Vorgaben zur Stichprobenentnahme hat zur Folge, dass die Prozessfähigkeitsberechnung oftmals auf Basis nicht repräsentativer Prozessdaten durchgeführt wird. Das Ziel, mit Hilfe geeigneter Vorgaben zur Stichprobenentnahme den zu untersuchenden Schablonendruckprozess über einen angemessen langen Zeitraum unter normalen Serienbedingungen zu charakterisieren, wird dadurch erheblich erschwert.

6.3 Konzept zur Prozessfähigkeitsbeurteilung des Schablonendruckprozesses

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Prozessfähigkeitsanalyse für den Schablonendruckprozess dargestellt. Zunächst erfolgt die Definition der relevanten Qualitätsmerkmale sowie der zugehörigen Toleranzgrenzen, bevor anschließend die Grundüberlegungen zur Festlegung der Stichprobenentnahme erläutert werden. Auf Basis der repräsentativen Prozessdaten werden anschließend die relevanten Prozessmodelle identifiziert sowie die zugehörigen Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Qualitätsfähigkeitskenngrößen vorgestellt.

6.3.1 Definition der relevanten Qualitätsmerkmale und deren Toleranzgrenzen

Grundsätzlich können für die Prozessfähigkeitsbeurteilung des Schablonendruckprozesses die in Kapitel 2.5 abgeleiteten Qualitätsmerkmale einer bedruckten Leiterplatte herangezogen werden. Neben den Versätzen in x-Richtung (VE x) und y-Richtung (VE y) handelt es sich dabei um das maximale Depothöhenverhältnis (MDHV), das durchschnittliche Depothöhenverhältnis (DDHV), den Flächenbedruckungsgrad (FBG) sowie die Transfereffizienz (TE).

Bei der Festlegung der Toleranzgrenzen für die einzelnen Qualitätsmerkmale durch die Qualitätsplanung ergibt sich die Schwierigkeit, dass die Anforderungen an die weitere Verarbeitbarkeit in den Folgeprozessen sowie den Einsatz im Feld nur sehr schwierig auf die zu erfüllenden Eigenschaften der bedruckten Leiterplatte zurückgeführt werden können. Beispielhaft sei an dieser Stelle das Fehlerbild der sogenannten Hundeohren genannt. Während die partielle Überhöhung von Pastendepots vor allem bei QFP-

Strukturen als Ergebnis des Druckprozesses im Allgemeinen unerwünscht ist, weil dadurch das Risiko zu Brückenbildung nach dem Reflowlöten erhöht sein soll, existieren keinerlei Untersuchungen, ab welcher Überhöhung tatsächlich mit einer höheren Fehlerrate zu rechnen ist. Dies macht die Festlegung von Toleranzgrenzen für das maximale Depothöhenverhältnis zum heutigen Zeitpunkt eigentlich unmöglich.

Welche Toleranzgrenzen für die einzelnen Qualitätsmerkmale tatsächlich sinnvoll sind, hängt maßgeblich von dem zu druckenden Layout sowie dem späteren Einsatzbereich der elektronischen Baugruppe ab. Dabei reichen die Empfehlungen für die Transfereffizienz beispielweise von 80 % (USG) und 120 % (OSG) beziehungsweise 70 % (USG) und 130 % (OSG) in [83] bis zu 60 % (USG) und 140 % (OSG) in [139] und [150]. Größtenteils werden jedoch in der Industrie Toleranzgrenzen für das Qualitätsmerkmal Transfereffizienz von 50 % (USG) und 150 % (OSG) angewandt. Sowohl für den Flächenbedruckungsgrad als auch für das durchschnittliche und maximale Depothöhenverhältnis existieren in der Literatur keine Empfehlungen für geeignete Toleranzgrenzen. Hinsichtlich des Versatzes in x- und y-Richtung stellen nach [171] -50 µm (USG) und +50 µm (OSG) geeignete Toleranzgrenzen dar.

6.3.2 Festlegung von Stichprobenentnahme und -häufigkeit

Grundsätzlich ist die Beurteilung der Qualitätsfähigkeit des Druckprozesses auf Basis einer Stichprobenprüfung ebenso möglich wie auf Basis einer 100 %-Prüfung. Im Falle einer Stichprobenprüfung stellt die Repräsentativität der entnommenen Stichproben eine Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Prozessfähigkeitsbeurteilung dar. Bei der Festlegung der Entnahmestrategie ist deshalb sicherzustellen, dass die entnommenen Stichproben die Grundgesamtheit möglichst genau charakterisieren. Grundsätzlich sollte somit darauf geachtet werden, dass alle fertigungsrelevanten Schwankungen der Prozesseinflussgrößen und die sich daraus ergebenden Streuungen im Prozessergebnis bei der Definition der Entnahmestrategie berücksichtigt werden.

Die Definition der Entnahmestrategie hat im Einzelfall von einem Prozessexperten vor Ort zu erfolgen, da nur dieser die spezifischen Randbedingungen der installierten Fertigung kennt. Neben den allgemeinen Empfehlungen zur Festlegung der Stichprobenentnahme und -häufigkeit in [35] existieren weitere Einflussgrößen auf den Druckprozess, die unbedingt berücksichtigt werden sollten, sofern sie auf die jeweilige Fertigung zu treffen. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um folgende Faktoren:

- Schablonenunterseitenreinigung und Rakelrichtung
- Schablonen- und Rakelverschleiß
- Warte- und Stillstandzeiten in der Produktion

- ❑ Lotpastenwechsel und Nachfüllen von Lotpaste
- ❑ Einsatz verschiedener Leiterplatten- und Lotpastenchargen sowie mehrerer Lotpastengebinde
- ❑ Bedienung des Schablonendruckers durch unterschiedliche Maschinenbediener in verschiedenen Arbeitsschichten
- ❑ Betrieb des Schablonendruckers zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten

Bei der Entnahme der einzelnen Stichproben aus dem zu analysierenden Druckprozess ist prinzipiell darauf zu achten, dass die relevanten Prozessmerkmale, unter denen das Prozessergebnis zustande gekommen ist, festgehalten werden. Nur so ist eine spätere Korrelation von Prozessergebnissen und Einflussgrößen möglich, so dass geeignete Optimierungsmaßnahmen für den Druckprozess abgeleitet werden können.

6.3.3 Identifikation der relevanten Verteilungszeitmodelle

Im Anschluss an die Definition der Entnahmestrategie und der Gewinnung der repräsentativen Prozessdaten aus dem Schablonendruckprozess sind die für die einzelnen Qualitätsmerkmale zutreffenden Verteilungszeitmodelle nach [117] zu ermitteln. Grundsätzlich unterscheiden sich die in Abbildung 108 dargestellten Verteilungszeitmodelle hinsichtlich ihrer Lage und Streuung sowie der Verteilungsart der Momentanverteilung und der resultierenden Gesamtverteilung.

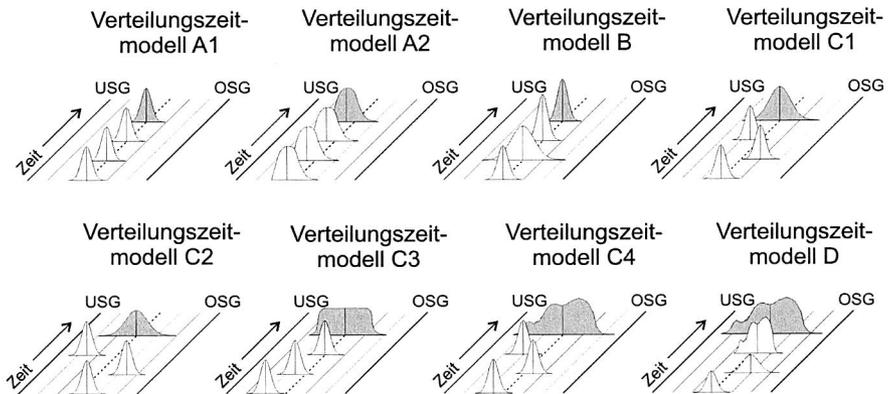


Abbildung 108: Verteilungszeitmodelle nach DIN ISO 21747:2007-03 [117]

Das Verteilungszeitmodell A1 beschreibt den idealisierten Fertigungsprozess, bei dem die Lage und die Streuung der einzelnen Momentanverteilungen konstant sind. Sowohl die einzelnen Momentanverteilungen als auch die resultierende Gesamtverteilung stel-

len Normalverteilungen dar. In der Realität weichen Fertigungsprozesse jedoch mehr oder weniger stark von dieser Idealvorstellung ab, so dass alternative Verteilungszeitmodelle einen realen Fertigungsprozess gegebenenfalls besser beschreiben. Das Verteilungszeitmodell D beispielsweise wird dadurch charakterisiert, dass sich die Lage und die Streuung der Momentanverteilungen zufällig und systematisch ändern und die Momentanverteilungen sowie die resultierende Gesamtverteilung eine beliebige Form annehmen.

Eine Zuordnung der Prozessdaten der einzelnen Qualitätsmerkmale zu den Verteilungszeitmodellen erfolgt in der Regel mit Hilfe von Histogrammen und Wahrscheinlichkeitsnetzen. Die im Folgenden zur Identifikation der relevanten Verteilungszeitmodelle für die einzelnen Qualitätsmerkmale herangezogenen Qualitätsdaten stammen aus einer realen Baugruppenfertigung und umfassen 10 bedruckte Leiterplatten mit insgesamt 46.800 Pastendepots.

Qualitätsmerkmal Transfereffizienz

Das in Abbildung 109 dargestellte Histogramm visualisiert die absolute Häufigkeit der ermittelten Transfereffizienzen. Trotz der scheinbar gaußförmigen Verteilung der Transfereffizienzen handelt es sich bei der resultierenden Gesamtverteilung nicht um eine Normalverteilung, wie aus der Darstellung der Transfereffizienzen in dem entsprechenden Wahrscheinlichkeitsnetz ersichtlich ist. Vor allem an den Rändern der Verteilung kommt es zu starken Abweichungen, so dass auch statistische Standardverfahren wie der Anderson-Darling-Test belegen, dass den analysierten Daten keine Normalverteilung zugrunde liegt.

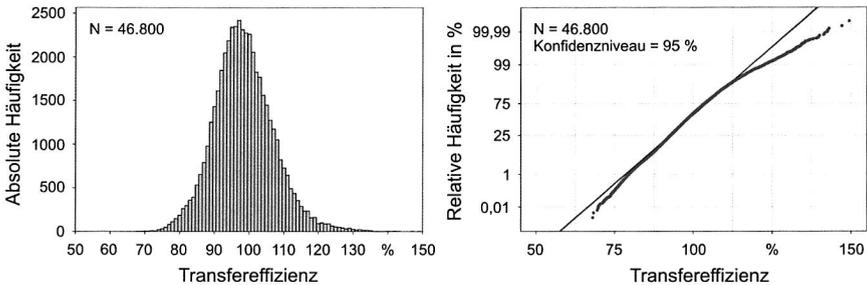


Abbildung 109: Histogramm (links) und Wahrscheinlichkeitsnetz (rechts) der ermittelten Transfereffizienzen

Eine weiterführende Analyse belegt, dass auch die Momentanverteilungen der Transfereffizienzen der einzelnen Leiterplatten nicht normalverteilt sind [144]. Wie aus dem in Abbildung 110 dargestellten Wahrscheinlichkeitsnetz ersichtlich ist, sind hierfür wiederum diejenigen Daten verantwortlich, die sich an den Rändern der jeweiligen Momen-

tanverteilungen befinden. Zudem variieren die Lage und die Prozessstrebungen der einzelnen Momentanverteilungen. Während Stichprobe 5 beispielsweise einen Median von 105,6 % und eine Prozessstrebung von 54,67 % ($Q_{0,99865} - Q_{0,00135}$) aufweist, betragen bei Stichprobe 7 die Werte 93,1 % (Median) und 58,21 % (Prozessstrebung).

Dass die Momentanverteilungen der Transfereffizienzen für die einzelnen Stichproben von einer Normalverteilung abweichen, hat seine Ursache vor allem in der Abhängigkeit der Transfereffizienzen von der jeweiligen Größe und Form der Aperturen sowie der Orientierung und Lage der Aperturen auf der Schablone. Während die Transfereffizienzen von Aperturen, die im Druckprozess identischen Füll- und Auslösebedingungen unterliegen, in der Regel normalverteilt sind, weicht die resultierende Momentanverteilung der Transfereffizienzen aller Pastendepots auf einer Leiterplatte durch das Vorhandensein unterschiedlicher Aperturtypen von einer Normalverteilung ab.

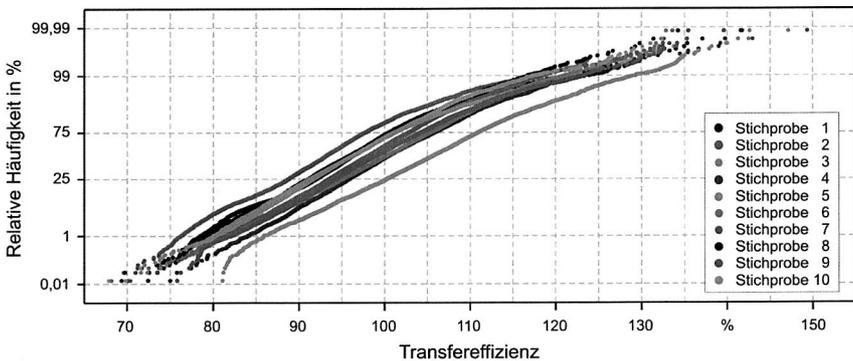


Abbildung 110: Wahrscheinlichkeitsnetz der ermittelten Transfereffizienzen für die einzelnen Leiterplatten

Diesen Sachverhalt illustriert anschaulich Abbildung 111, in der die Transfereffizienzen von vier unterschiedlichen Aperturtypen der Stichprobe 4 in einem Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt sind. Neben dem grafischen Nachweis belegen auch rechnerische Testverfahren (Anderson-Darling-Test), dass sich die Verteilungen der Transfereffizienzen der einzelnen Aperturtypen gut durch eine Normalverteilung beschreiben lassen.

Die Verteilungsform der Momentanverteilung für das Qualitätsmerkmal Transfereffizienz hängt somit maßgeblich von dem jeweils zu analysierenden Schablonenlayout ab. Unter Zugrundelegung der Bewertungskriterien aus [117] ist das Qualitätsmerkmal Transfereffizienz folglich prinzipiell den zeitabhängigen Verteilungszeitmodellen C4 oder D zuordenbar, je nachdem, ob die Streuungen der Momentanverteilungen konstant sind oder sich zufällig und systematisch ändern. Für den Sonderfall, dass ein Baugruppenlayout aus lediglich einem Aperturtyp mit einer normalverteilten Momentanverteilung

der Transfereffizienzen existiert, kann das Qualitätsmerkmal Transfereffizienz auch dem zeitabhängigen Verteilungszeitmodell C1 zugeordnet werden.

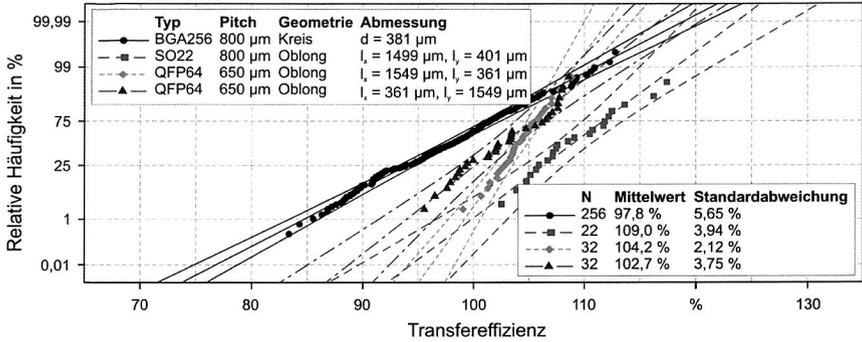


Abbildung 111: Wahrscheinlichkeitsnetz der Transfereffizienzen für ausgewählte Aperturen der Stichprobe 4

Qualitätsmerkmal Flächenbedeckungsgrad

Wie aus dem Histogramm der ermittelten Flächenbedeckungsgrade in Abbildung 112 sowie durchgeführter statistischer Tests ersichtlich ist, weicht auch dieses Qualitätsmerkmal stark von einer Normalverteilung ab. Neben der zweigipfligen Verteilungsform weist die Verteilungsdarstellung in dem zugehörigen Wahrscheinlichkeitsnetz wiederum vor allem an den Rändern Abweichungen von der Normalverteilung auf.

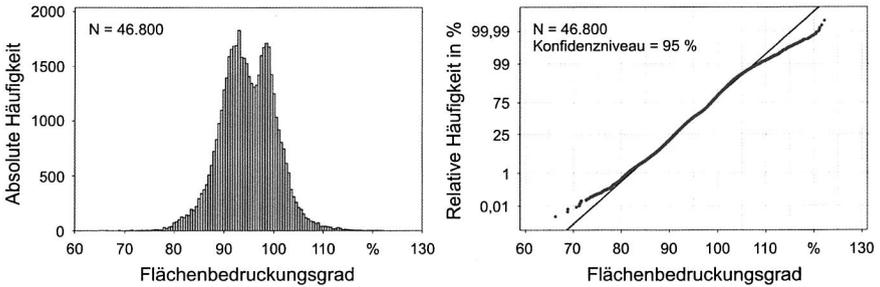


Abbildung 112: Histogramm (links) und Wahrscheinlichkeitsnetz (rechts) der ermittelten Flächenbedeckungsgrade

Die weiterführende Analyse der einzelnen Momentanverteilungen der Flächenbedeckungsgrade für die untersuchten Stichproben belegt, dass auch diese von einer Normalverteilung abweichen. Zudem variieren die einzelnen Momentanverteilungen hinsichtlich ihrer Lage und ihrer Prozessstreuung, so dass in Analogie zu dem Qualitätsmerkmal Transfereffizienz eine Zuordnung zu dem Verteilungszeitmodell D empfohlen wird.

Qualitätsmerkmal Versatz

In Abbildung 113 sind die Histogramme und Wahrscheinlichkeitsnetze der ermittelten Versätze in x-Richtung und y-Richtung dargestellt. Während die in den Histogrammen dargestellte Häufigkeitsverteilung eine gaußförmige Normalverteilung suggeriert, können durch die visualisierten Wahrscheinlichkeitsnetze an den Rändern der Verteilung wiederum starke Abweichungen von einer Normalverteilung identifiziert werden. Des Weiteren fallen die zum Teil extremen Versätze in x-Richtung und y-Richtung auf, die unter Berücksichtigung sinnvoller Toleranzgrenzen zur Folge hätten, dass dieser Druckprozess nicht qualitätsfähig ist.

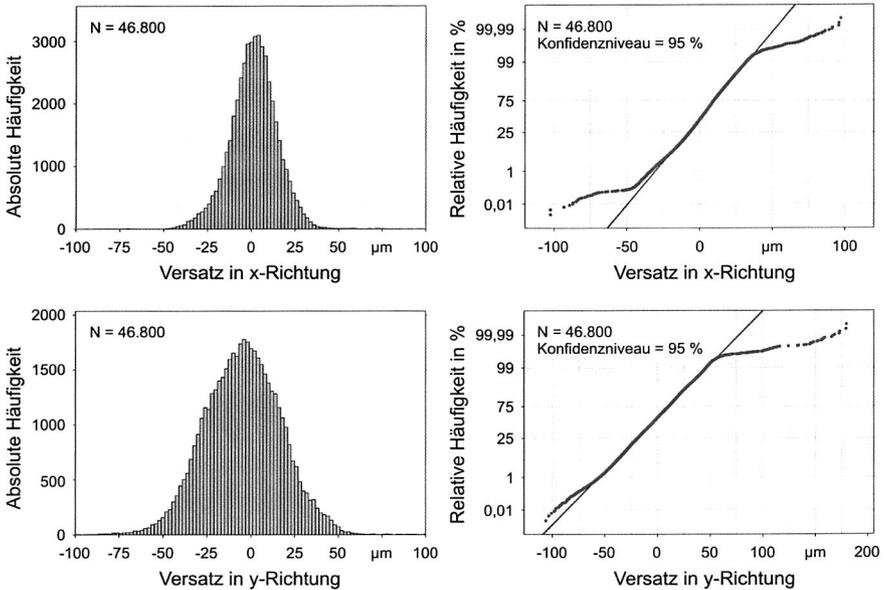


Abbildung 113: Histogramm (links) und Wahrscheinlichkeitsnetz (rechts) der ermittelten Versätze in x- und y-Richtung

Die Ursache für das Auftreten dieser Extremwerte in den Prozessdaten liegt in der Vorgehensweise zur Versatzermittlung eines Pastendepots innerhalb des Pasteninspektionssystems. Als Versatz eines Pastendepots in x- und y-Richtung wird dabei die Distanz zwischen dem Flächenschwerpunkt der Schablonenapertur und dem Flächenschwerpunkt des Pastendepots angegeben, wie bereits in Abbildung 16 erläutert wurde. Da der Flächenschwerpunkt eines gedruckten Pastendepots jedoch nicht immer geeignet ist, um den Druckversatz zu bestimmen, zeigt sich am Beispiel der in Abbildung 73 dargestellten Pastendepots. Aufgrund des nicht vollständigen Bedruckens der Depotfläche verschiebt sich der Flächenschwerpunkt des Pastendepots, so dass

Rückschlüsse über den tatsächlichen Druckversatz nicht mehr zulässig sind. Der Berechnungsalgorithmus zur Ermittlung des Druckbildversatzes ist somit nur für Pastendepots geeignet, bei denen das Pastendepot vollständig bedruckt ist. Vor diesem Hintergrund werden in Abbildung 114 die Versätze aller Pastendepots in x- und y-Richtung in einem Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt, die eine Transfereffizienz und einen Flächenbedruckungsgrad zwischen 98 % und 102 % aufweisen.

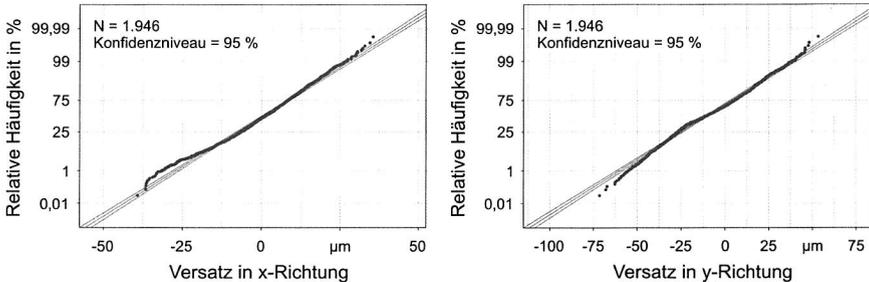


Abbildung 114: Wahrscheinlichkeitsnetz der ermittelten Versätze in x- und y-Richtung für alle Pastendepots mit Transfereffizienzen zwischen 98 % und 102 % und Flächenbedruckungsgraden zwischen 98 % bis 102 %

Wie aus Abbildung 114 ersichtlich ist, lassen sich durch diese Vorgehensweise die extremen Ausreißer in den Prozessdaten zwar eliminieren, die resultierenden Verteilungen der Prozessdaten weichen dennoch von einer Normalverteilung ab. Vor diesem Hintergrund werden auch die Verteilungen des Qualitätsmerkmals Versatz dem Verteilungszeitmodell D zugeordnet, wobei aufgrund der Vorgehensweise zur Bestimmung des Druckversatzes kritisch zu hinterfragen ist, inwiefern sich dieses Qualitätsmerkmal tatsächlich für eine Prozessfähigkeitsbeurteilung eignet.

Qualitätsmerkmal durchschnittliches Depothöhenverhältnis

Wie aus dem Histogramm sowie dem Wahrscheinlichkeitsnetz in Abbildung 115 ersichtlich ist, weist auch das durchschnittliche Depothöhenverhältnis eine starke Abweichung von einer Normalverteilung auf. Dies deckt sich mit bereits durchgeführten Analysen, die zu dem Schluss gekommen sind, dass die Pastendepothöhen auf einer bedruckten Leiterplatte nicht normalverteilt sind [9]. Somit ist auch die Verteilung dieses Qualitätsmerkmals dem Verteilungszeitmodell D zuzuordnen.

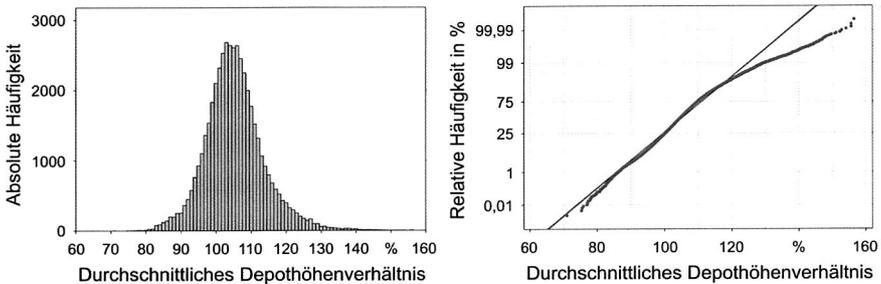


Abbildung 115: Histogramm (links) und Wahrscheinlichkeitsnetz (rechts) der ermittelten durchschnittlichen Depothöhenverhältnisse

Qualitätsmerkmal maximales Depothöhenverhältnis

Das Histogramm sowie das zugehörige Wahrscheinlichkeitsnetz der ermittelten maximalen Depothöhenverhältnisse sind in Abbildung 116 dargestellt und belegen, dass auch dieses Qualitätsmerkmal nicht normalverteilt ist. In der Folge ist auch diese Verteilung grundsätzlich dem Verteilungszeitmodell D zuzuordnen.

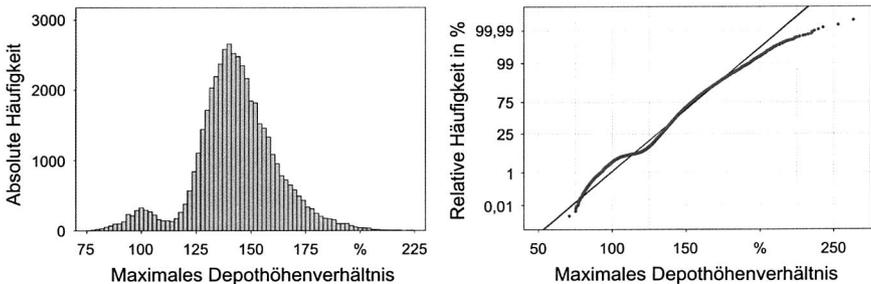


Abbildung 116: Histogramm (links) und Wahrscheinlichkeitsnetz (rechts) der ermittelten maximalen Depothöhenverhältnisse

Wie aus den bisherigen Ausführungen ersichtlich ist, wird die jeweilige Verteilung der einzelnen Qualitätsmerkmale maßgeblich durch das zu analysierende Schablonenlayout beeinflusst. Dennoch können die Verteilungszeitmodelle A1, A2 und B grundsätzlich ausgeschlossen werden, da die Verteilungslage der einzelnen Momentanverteilungen schwankt. Aufgrund der universellen Einsetzbarkeit des Verteilungszeitmodells D wird die Verwendung dieses Verteilungszeitmodells sowie der sich daraus ergebenden Berechnungsmethoden für die Prozessfähigkeitsindizes empfohlen, da hiermit grundsätzlich alle Druckprozesse unabhängig von dem eingesetzten Schablonenlayout beschrieben werden können.

6.3.4 Berechnung der Qualitätsfähigkeitskenngrößen

Im Anschluss an die Identifikation der relevanten Verteilungszeitmodelle für die einzelnen Qualitätsmerkmale sind die jeweiligen Qualitätsfähigkeitskenngrößen zu berechnen. Als Qualitätsfähigkeitskenngröße wird dabei im Allgemeinen der Zahlenwert verstanden, der sich aus dem Verhältnis von Toleranzfeldbreite zu Prozessstreuung ergibt [35]. Während die Toleranzfeldbreite aus der Festlegung der oberen und unteren Toleranzgrenze resultiert, ist die jeweilige Prozessstreuung auf Basis des identifizierten Verteilungszeitmodells zu bestimmen. Typische Kenngrößen zur Darstellung der Qualitätsfähigkeit stellen die Prozessfähigkeit c_p (auch Prozessleistung oder Prozesspotenzial genannt) und die kritische Prozessfähigkeit c_{pk} (auch Prozessfähigkeit genannt) dar. Der Unterschied zwischen den beiden Fähigkeitskenngrößen liegt darin begründet, dass bei der kritischen Prozessfähigkeit c_{pk} auch die Prozesslage berücksichtigt wird, wohingegen die Prozessfähigkeit c_p lediglich eine Aussage über die potenzielle Fähigkeit des Prozesses ermöglicht und die Prozesslage unberücksichtigt lässt [35].

Für die Berechnung der Prozessfähigkeitsindizes stehen gemäß [117] prinzipiell vier Verfahren zur Verfügung, die sich hinsichtlich der Vorgehensweise zur Bestimmung der Prozessstreuung unterscheiden. Neben dem allgemeinen geometrischen Verfahren M1 existieren die Verfahren M2 und M3, bei denen die zusätzlichen Streuungen mit berücksichtigt werden, sowie das Verfahren M4, bei dem die Über- und Unterschreitungsanteile der Verteilung in die Berechnung der Indizes mit einbezogen werden. Das allgemeine geometrische Verfahren M1, dem in der industriellen Praxis die größte Bedeutung zukommt, unterteilt sich zudem in weitere Untervarianten $M1_{1,d}$ mit unterschiedlichen Vorschriften zur Berechnung der Prozesslage und der Prozessstreuung. Neben der Erläuterung der einzelnen Berechnungsmethoden wird in [35] die Eignung der einzelnen Berechnungsverfahren für die jeweiligen Verteilungszeitmodelle diskutiert und bewertet.

Grundsätzlich können für das Verteilungszeitmodell D, welchem die Verteilungen aller Qualitätsmerkmale zugeordnet werden können, die Berechnungsverfahren $M1_{1,5}$ und $M1_{1,6}$ zum Einsatz kommen. Bei beiden Verfahren erfolgt die Schätzung der Prozesslage über die Bestimmung des arithmetischen Mittelwertes über alle Werte der Prozessanalyse, weshalb der Index I des Berechnungsverfahrens $M1_{1,d}$ auch den Wert 1 annimmt. Alternative Vorgehensweisen zur Abschätzung der Prozesslage bleiben aufgrund ihres geringen Stellenwertes in der Praxis hier unberücksichtigt. Hinsichtlich der Abschätzung der Prozessstreuung unterscheiden sich die beiden Berechnungsverfahren $M1_{1,5}$ und $M1_{1,6}$ dahingehend, dass das Verfahren $M1_{1,5}$ die Spannweite (also die Differenz aus Maximal- und Minimalwert der Verteilung) nutzt, wohingegen das Verfahren $M1_{1,6}$ die Prozessstreuung aus dem 99,865 %-Punkt und dem 0,135 %-Punkt der Verteilung bestimmt. Die Berechnung der Qualitätsfähigkeitsindizes gemäß der beiden Methoden $M1_{1,5}$ und $M1_{1,6}$ erfolgt nach folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned}
 M1_{1,5}: \quad c_p &= \frac{OSG - USG}{X_{\max} - X_{\min}}, \\
 c_{pk} &= \min \left\{ \frac{OSG - \hat{\mu}}{X_{\max} - \hat{\mu}}, \frac{\hat{\mu} - USG}{\hat{\mu} - X_{\min}} \right\}
 \end{aligned} \tag{Gl. 21}$$

$$\begin{aligned}
 M1_{1,6}: \quad c_p &= \frac{OSG - USG}{Q_{0,99865} - Q_{0,00135}}, \\
 c_{pk} &= \min \left\{ \frac{OSG - \hat{\mu}}{Q_{0,99865} - \hat{\mu}}, \frac{\hat{\mu} - USG}{\hat{\mu} - Q_{0,00135}} \right\}
 \end{aligned} \tag{Gl. 22}$$

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| OSG : | Obere Spezifikationsgrenze |
| USG : | Untere Spezifikationsgrenze |
| X_{\max} : | Maximalwert der Verteilung |
| X_{\min} : | Minimalwert der Verteilung |
| $\hat{\mu}$: | Schätzwert für die Prozesslage |
| $Q_{0,99865}$: | 99,865 %-Punkt der Verteilung |
| $Q_{0,00135}$: | 0,135 %-Punkt der Verteilung |

Im Vergleich zu Verfahren M1_{1,6} weist das Verfahren M1_{1,5} den Nachteil auf, dass es sehr sensibel auf Ausreißer in den Prozessdaten reagiert. Aus diesem Grund wird das Verfahren M1_{1,5} in der Literatur auch nur eingeschränkt zur Prozessfähigkeitsbeurteilung empfohlen [35]. Da die Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses in der Regel jedoch maßgeblich durch die Prozesswerte im Randbereich der jeweiligen Verteilung charakterisiert wird, soll dieses Verfahren im weiteren Verlauf der Analysen mit berücksichtigt und diskutiert werden. Die Berechnungsverfahren M2 und M3, die sich prinzipiell auch für das Verteilungszeitmodell C4 eignen, spielen an dieser Stelle eine eher untergeordnete Rolle.

6.4 Validierung des entwickelten Konzeptes zur Prozessfähigkeitsbeurteilung

Im Folgenden wird anhand von realen Qualitätsdaten aus einer Serienfertigung die Eignung des entwickelten Konzeptes zur Prozessfähigkeitsbeurteilung analysiert und bewertet. Die Auswertung basiert dabei auf den Inspektionsdaten von insgesamt 25 bedruckten Leiterplatten mit jeweils 4.680 Pastendepots, so dass für die Prozessfähigkeitsanalyse insgesamt 117.000 Pastendepots zur Verfügung stehen.

Während der Berechnung der Prozessfähigkeitsindizes von Transfereffizienz, Flächenbedruckungsgrad sowie durchschnittlichem und maximalem Depothöhenverhältnis alle 117.000 Pastendepots zugrunde liegen, erfolgt die Bestimmung der Prozessfähig-

keitsindizes der Versätze in x- und y-Richtung aufgrund der in Kapitel 6.3.3 aufgeführten Gründe auf Basis gefilterter Prozessdaten. Insgesamt 4.390 Pastendepots weisen Transfereffizienzen und Flächenbedruckungsgrade zwischen 98 % und 102 % auf und kommen somit im Rahmen der Prozessfähigkeitsanalyse zum Einsatz. Neben der Anzahl der zur Berechnung zur Verfügung stehenden Pastendepots N sind in Tabelle 11 auch die Spezifikationsgrenzen OSG und USG für die einzelnen Qualitätsmerkmale angegeben. Die Festlegung der im Rahmen dieser Analyse verwendeten Spezifikationsgrenzen basiert dabei vor allem auf Expertenwissen, so dass bei der Durchführung einer Prozessfähigkeitsstudie für einen alternativen Druckprozess die Toleranzgrenzen diskutiert und gegebenenfalls angepasst werden müssen. Des Weiteren werden in Tabelle 11 die wesentlichen Kenngrößen der einzelnen Verteilungen für die Qualitätsmerkmale sowie die errechneten Qualitätsfähigkeitsindizes angegeben, die sich unter Verwendung der beiden Berechnungsverfahren $M1_{1,5}$ und $M1_{1,6}$ ergeben.

| | TE | FBG | VE_x | VE_y | DDHV | MDHV |
|---------------------|---------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| N | 117.000 | 117.000 | 4.390 | 4.390 | 117.000 | 117.000 |
| OSG | 150 % | 140 % | 50 μm | 50 μm | 150 % | 250 % |
| USG | 50 % | 60 % | -50 μm | -50 μm | 50 % | 0 % |
| $\hat{\mu}$ | 100,2 % | 95,0 % | 2,4 μm | -2,9 μm | 105,5 % | 142,6 % |
| X_{max} | 155,1 % | 125,3 % | 41,8 μm | 53,8 μm | 148,0 % | 241,3 % |
| X_{min} | 66,8 % | 65,7 % | -66,1 μm | -77,5 μm | 67,8 % | 67,8 % |
| $Q_{0,99865}$ | 126,3 % | 111,9 % | 38,5 μm | 59,4 μm | 129,8 % | 197,5 % |
| $Q_{0,00135}$ | 74,0 % | 78,1 % | -33,7 μm | -65,2 μm | 81,3 % | 87,8 % |
| $c_p (M1_{1,5})$ | 1,13 | 1,34 | 0,93 | 0,76 | 1,25 | 1,44 |
| $c_{pk} (M1_{1,5})$ | 0,91 | 1,19 | 0,76 | 0,63 | 1,05 | 1,09 |
| $c_p (M1_{1,6})$ | 1,91 | 2,37 | 1,39 | 0,80 | 2,06 | 2,28 |
| $c_{pk} (M1_{1,6})$ | 1,91 | 2,07 | 1,32 | 0,76 | 1,83 | 1,96 |

Tabelle 11: Wesentliche Kenngrößen der durchgeführten Prozessfähigkeitsstudie

Am Beispiel der errechneten Prozessfähigkeitsindizes des Qualitätsmerkmals Transfereffizienz zeigen sich die grundlegenden Unterschiede zwischen den Berechnungsverfahren $M1_{1,5}$ und $M1_{1,6}$. Während das Berechnungsverfahren $M1_{1,6}$ Prozessfähigkeitsindizes von 1,91 für c_p und c_{pk} liefert, liegen die Prozessfähigkeitsindizes unter Verwendung des Verfahrens $M1_{1,5}$ mit 1,13 für den c_p und 0,91 für den c_{pk} wesentlich niedriger. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Ausreißer in den Transfereffizienzen unter Verwendung des Berechnungsverfahrens $M1_{1,6}$ im Vergleich zu Berechnungsverfahren $M1_{1,5}$ wesentlich weniger stark ins Gewicht fallen.

Unter Berücksichtigung der tatsächlich vorliegenden Verteilung der Transfereffizienzen eignet sich das Berechnungsverfahren $M_{1,6}$ wesentlich besser zur Beschreibung des analysierten Druckprozesses. Von den insgesamt 117.000 Pastendepots liegen die Transfereffizienzen von 3 Pastendepots außerhalb der Spezifikationsgrenzen, was einer Fehlerquote von etwa 26 dpm und einem zugehörigen Sigma-Level von etwa 5,5 entspricht. Die sich aus dem errechneten Prozessfähigkeitsindex von 1,91 ergebende theoretische Fehlerquote sowie das zugehörige Sigma-Level kommen dabei unter Zuhilfenahme der in der Theorie üblicherweise berücksichtigten Lageverschiebung des Prozessmittelwertes um maximal $1,5\sigma$ den realen Werten sehr nahe [166]. Der Einsatz des Berechnungsverfahrens $M_{1,6}$ bringt aber auch die Gefahr mit sich, dass es zu einer Fehleinschätzung des Druckprozesses kommen kann, weil bei der Berechnung der Qualitätsfähigkeitsindizes einzelne Ausreißer in den Prozessdaten nicht ausreichend berücksichtigt werden. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund kritisch zu bewerten, dass der Schablonendruckprozess durch Ausreißer in den Prozessdaten geprägt ist und diese die Qualitätsleistung des Druckprozesses maßgeblich beeinflussen. Neben der Angabe des mit Hilfe des Berechnungsverfahrens $M_{1,6}$ errechneten Prozessfähigkeitsindizes wird deshalb zur Beurteilung der Qualitätsleistung des Schablonendruckprozesses auch die Angabe der Pastendepotanzahl empfohlen, die außerhalb der Spezifikationsgrenzen liegt. Nur so liefert die Prozessfähigkeitsanalyse eine umfassende Aussage über die Qualitätsleistung des Druckprozesses.

Während sich die ermittelten Prozessfähigkeitsindizes der Qualitätsmerkmale Transfereffizienz, Flächenbedruckungsgrad, durchschnittliches und maximales Depothöhenverhältnis gut zur Beschreibung der Qualitätsleistung des Druckprozesses eignen, können die für die Versätze in x- und y-Richtung errechneten Prozessfähigkeitsindizes nur bedingt zu Qualitätsaussagen herangezogen werden. Ursächlich für die niedrigen Prozessfähigkeitsindizes ist die bereits beschriebene Vorgehensweise bei der Ermittlung der Versatzwerte. Diese wirkt sich vor allem auf die Versatzwerte in y-Richtung aus, da der Flächenschwerpunkt eines gedruckten Pastendepots erheblich von der jeweiligen Rakelrichtung abhängt.

Neben der Vorgehensweise zur Bestimmung der Qualitätsfähigkeitsindizes ist auch deren Bewertung für den Schablonendruckprozess zu hinterfragen. Die heutzutage allgemein geforderten c_{pk} -Werte von 1,33 sind auf den komplexen Schablonendruckprozess nicht übertragbar, weil die aus einem c_{pk} -Wert von 1,33 resultierende Fehlerquote von 6.210 dpm zu immens hohen Ausschusskosten im Druckprozess führen würde. Am Beispiel der betrachteten Baugruppe mit 4.680 Pastendepots wird deutlich, dass eine Fehlerquote von 6.210 dpm und die sich daraus ergebende Wahrscheinlichkeit für ein fehlerfrei gedrucktes Pastendepot von 99,379 % dazu führen würde, dass die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerfrei bedruckte Baugruppe verschwindend gering werden würde. Vor diesem Hintergrund sollte ein Prozessfähigkeitsindex von 2,0 gefordert wer-

den, der bei einer Fehlerquote von 3,4 dpm für die Beispielbaugruppe mit 4.680 Pastendepots eine theoretische Ausbeute von 98,4 % zur Folge hat.

Die vorgestellte Strategie zur Beurteilung der Prozessfähigkeit des Schablonendruckprozesses ermöglicht die Quantifizierung der Qualitätsleistung auf Basis geeigneter Prozessfähigkeitsindizes. Bei der Durchführung einer Prozessfähigkeitsstudie sind dabei alle wesentlichen Informationen anzugeben, die für die richtige Beurteilung der Prozessfähigkeitsindizes von Bedeutung sind. Im Einzelnen handelt es sich dabei um folgende Angaben:

- Anzahl der aus dem Druckprozess entnommenen Leiterplatten sowie Anzahl der Pastendepots, die der Prozessfähigkeitsanalyse zugrunde liegen
- Einflussgrößen auf den Druckprozess, die bei der Festlegung der Stichprobenentnahmestrategie berücksichtigt wurden
- Erläuterung der Stichprobenentnahmestrategie (Entnahmehäufigkeit, Zeit und Dauer der Stichprobenentnahme)
- Ausgewertete Qualitätsmerkmale und angewendete Berechnungsverfahren
- Indizes für Prozessfähigkeit und kritische Prozessfähigkeit sowie Anzahl der Pastendepots, die sich außerhalb der Spezifikation befinden

Bei der Durchführung einer Prozessfähigkeitsstudie für den Druckprozess ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass die errechneten Fähigkeitsindizes eine Aussage über die Qualitätsleistung des Druckprozesses ermöglichen, Aussagen über die Qualität des gefertigten Produktes jedoch nur bedingt möglich sind. Dies bedeutet, dass trotz hoher Prozessfähigkeitsindizes im Schablonendruckprozess Fehler auf der gefertigten Baugruppe nicht ausgeschlossen werden können, die ihre Ursache im Druckprozess haben, wohingegen niedrige Prozessfähigkeitsindizes nicht zwangsläufig zu hohen Fehlerraten in der Baugruppenfertigung führen müssen.

7 Zusammenfassung

Die Integration leistungsfähiger elektronischer Systeme in komplexe Produktlösungen stellt den Schlüssel für vielfältige Innovationen in unterschiedlichen Marktsegmenten in Deutschland dar. Die zunehmende Fertigungskomplexität sowie der gestiegene Kostendruck bei der Herstellung dieser elektronischen Baugruppen sind dabei grundlegende Herausforderungen, denen sich Elektronikfertiger im globalen Umfeld in Zukunft verstärkt stellen müssen. Vor diesem Hintergrund kommt der Beherrschung der einzelnen Fertigungsprozesse immer größere Bedeutung zu.

In der Oberflächenmontagetechnik weist vor allem der Schablonendruckprozess enormes Optimierungspotenzial auf, da dieser für einen Großteil aller Fertigungsfehler in der Prozesskette verantwortlich ist. Die Ursache hierfür liegt einerseits in der Komplexität des Druckprozesses mit seiner Vielzahl an Einflussgrößen und existenten Wechselwirkungen. Andererseits stellte aber auch das Fehlen geeigneter Inspektionssysteme für den Pastendruckprozess ein großes Problem dar, so dass eine nachhaltige Optimierung des Druckprozesses bisher nicht möglich war. Durch die Verfügbarkeit geeigneter 3D-Pasteninspektionssysteme zur ganzheitlichen Bewertung bedruckter Leiterplatten stehen nun seit wenigen Jahren Systemlösungen zur Verfügung, mit Hilfe derer der Pastendruckprozess grundlegend analysiert werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Aspekte des Schablonendruckprozesses sowie der Pastendruckinspektion untersucht und bewertet. Die Zielsetzung lag dabei in der nachhaltigen Optimierung des Druckprozesses durch das Schaffen eines erweiterten Prozessverständnisses. Aufbauend auf der Einordnung des Druckprozesses in die Oberflächenmontagetechnik wurde zunächst die Eignung des im Rahmen der Arbeit eingesetzten 3D-Pasteninspektionssystems nachgewiesen. Sowohl die ermittelte systematische Messabweichung als auch die resultierende Messsystemstreuung haben eine ausreichende Prüf- und Messmittelfähigkeit zur Folge, so dass diese Systemlösung im Rahmen der Arbeit eingesetzt werden kann.

Die durchgeführten Untersuchungen zu den Stufenschablonen und den nanobeschichteten Druckschablonen beleuchten das enorme Potenzial für den Druckprozess, welches sich durch den Einsatz innovativer Schablonentechnologien ergibt, zeigen aber auch auf, worauf bei der Schablonenauslegung und der Prozessgestaltung prinzipiell zu achten ist. Der Maßhaltigkeit von Stufenschablonen, die stark von der jeweiligen Herstellungstechnologie abhängt, sowie dem Abzugsverhalten der Lotpaste auf der Schablonenoberfläche kommt bei dem Einsatz von Stufenschablonen besondere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass auf der Schablonenoberfläche verbleibende Pastenrückstände bei auslöseunkritischen Strukturen zu einer Erhöhung der Transfereffizienzen führen, wohingegen die Transfereffizienzen auslösekritischer Strukturen mit kleinen Flächenverhältnissen drastisch sinken, weil die Lotpaste

nicht mehr zuverlässig aus der Schablonenapertur ausgelöst werden kann. Die Untersuchungen zu den nanobeschichteten Druckschablonen belegen, dass durch die reduzierten Adhäsionskräfte zwischen Lotpaste und Aperturwandung das Flächenverhältnis signifikant reduziert werden kann. Dies setzt jedoch voraus, dass durch die Wahl der Maschinenparameter ein zuverlässiges Befüllen der Aperturen gewährleistet ist. Unter Verwendung eines Lotpastentyps 4 konnten so im Rahmen der Druckversuche Flächenverhältnisse von 0,36 zuverlässig gedruckt werden.

Neben den Druckschablonen existiert eine Vielzahl weiterer Einflussgrößen, deren Auswirkungen auf den Schablonendruckprozess grundlegend quantifiziert wurden. So konnte beispielweise aufgezeigt werden, dass der zunehmende Höhenunterschied zwischen Lötstopplackebene und Padebene bei auslöseunkritischen Strukturen zu einer Erhöhung der Transfereffizienz führt, wohingegen es bei auslösekritischen Strukturen mit kleinen Flächenverhältnissen zu reduzierten Transfereffizienzen kommen kann. Des Weiteren wurde eine Vorgehensweise zur Bestimmung von Designrichtlinien für Druckschablonen entwickelt, welche die realen Schablonendimensionen berücksichtigt. Die Anwendung dieser Vorgehensweise hat dabei zu dem Ergebnis geführt, dass sich die im Rahmen der Untersuchung eingesetzten konventionellen Schablonentechnologien hinsichtlich des Auslöseverhaltens der Lotpaste bei Aperturen mit kleinen Flächenverhältnissen kaum unterscheiden. Dies lässt den Schluss zu, dass nicht primär die Herstellungstechnologie einer Druckschablone, sondern vielmehr die Fertigungsqualität entscheidenden Einfluss auf das Auslöseverhalten einer Lotpaste hat.

Abschließend wurde ein Konzept zur Beurteilung der Prozessfähigkeit des Schablonendrucks auf Basis geeigneter Qualitätsfähigkeitsindizes entwickelt und anhand von realen Qualitätsdaten aus einer Serienfertigung validiert. Die Vorgehensweise berücksichtigt dabei die Fehleranfälligkeit des Druckprozesses und die Bedeutung der Ausreißer in den Prozessdaten, da vor allem diese die Qualitätsleistung des Druckprozesses maßgeblich beeinflussen.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten konnte so ein erheblicher Beitrag zur Optimierung des Schablonendruckprozesses von Lotpaste in der Aufbau- und Verbindungstechnik für elektronische Baugruppen geleistet werden. Durch die konsequente Nutzung des vorgestellten Optimierungspotenzials in den Unternehmen können somit einerseits technologisch herausfordernde Druckprozesse für hochinnovative Produkte in der Fertigung etabliert werden. Andererseits lassen sich aber auch die Prozessfehlerraten aktueller Druckprozesse signifikant reduzieren, so dass den globalen Forderungen nach qualitativ hochwertigen Produkten bei zunehmend geringeren Fertigungskosten besser entsprochen werden kann.

8 Summary

The integration of high-performance electronic systems into complex product solutions is the key factor for many innovations in different market segments in Germany. The increasing manufacturing complexity and the higher cost pressure in the production of electronic devices are fundamental challenges for global electronics manufacturers. Therefore, the control of manufacturing processes is more and more important.

Especially the stencil printing process offers enormous potential for optimization. This process step is responsible for a large number of manufacturing defects in the surface mount technology. On the one hand, this is because of the complexity of the printing process with the variety of influences and existing interactions. On the other hand, a sustainable optimization of the printing process was not possible yet because of the missing of suitable inspection systems. The availability of adequate three dimensional paste inspection systems enables a holistic evaluation of printed circuit boards since a few years. Due to this benefit, the stencil printing process can be fundamentally analyzed.

In this work, various aspects of the stencil printing process and the paste print inspection have been examined and evaluated. The objective was the sustainable optimization of the printing process by the development of an advanced understanding of the printing process. After the classification of the printing process into the surface mount technology, the suitability of the three dimensional paste inspection system used in this work was verified. The determined bias as well as the resulting variation of the measurement system results in a sufficient measurement capability, so that this system can be used in the context of the work.

The research activities on the step stencils and the nano-coated stencils show the enormous potential for the printing process, which results from the use of innovative stencil technologies. The research also points out which aspects of the stencil and process design have to be considered. The dimensional accuracy of step stencils which strongly relies on the production technology as well as the wipe behaviour of the solder paste on the stencil surface is very important for the use of step stencils. In this context it could be demonstrated that solder paste remaining on the top side of the stencil leads to increased transfer efficiency at apertures with an uncritical release behaviour. Unlike the transfer efficiency of apertures with a critical release behaviour decreases because the solder paste can't be separated from the aperture reliably. The research on the nano-coated stencils shows that the area ratio can be reduced significantly because of the lower adhesive forces between solder paste and aperture wall. This requires that a reliable filling of the apertures is guaranteed by the setting of the machine parameters. In the context of this work area ratio values of 0.36 could be printed reliably using solder paste type 4.

Besides the printing stencils there is a variety of other factors that affect the printing process. For example, the increasing height difference between solder resist level and pad level leads to increased transfer efficiency at apertures with an uncritical release behaviour whereas the transfer efficiency decreases at apertures with a critical release behaviour. In addition, a strategy to determine stencil design guidelines on the basis of the real stencil dimensions was developed. The application of this approach demonstrates that the analyzed conventional stencil technologies does not show significant differences in the release behaviour of the solder paste for apertures with small area ratio values. This allows for the conclusion that not primarily the production technology but rather the manufacturing quality influences the release behaviour of the solder paste critically.

Finally, a concept for the evaluation of the stencil printing process on the basis of suitable capability indices was developed. This concept was validated using real quality data from a serial production. The procedure considers the sensitivity of the printing process for failures and the importance of outliers in the process data because outliers influence the quality performance significantly.

This work provides a significant contribution for the optimization of the stencil printing process of solder paste in electronics production. Thus, on the one hand technologically challenging printing processes for highly innovative products can be established in the companies by the consequent use of the illustrated potential for optimization. On the other hand the process failure rates of current printing processes can be reduced significantly with the consequence that the global demand for high quality products at lower production costs can be met.

9 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------|--|
| ANOVA | Analysis of Variance |
| ARM | Average Range Method |
| BGA | Ball Grid Array |
| CCD | Charge-Coupled Device |
| C_p | Prozessfähigkeit |
| C_{pk} | kritische Prozessfähigkeit |
| CR | Chip Resistor |
| CSP | Chip Scale Package |
| DDHV | durchschnittliches Depothöhenverhältnis |
| dpm | defects per million |
| EDX | Energiedispersive Röntgenspektroskopie |
| FBG | Flächenbedruckungsgrad |
| FC | Flip Chip |
| FPY | First Pass Yield |
| FV | Flächenverhältnis |
| iNEMI | International Electronics Manufacturing Initiative |
| IPC | Association Connecting Electronics Industries |
| JIS | Japanese Industrial Standard |
| MDHV | maximales Depothöhenverhältnis |
| MELF | Metal Electrode Leadless Faces |
| OSG | Obere Spezifikationsgrenze |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |
| QFN | Quad Flat No Lead |
| QFP | Quad Flat Package |
| REM | Rasterelektronenmikroskop |
| SMT | Surface Mount Technology |
| SPC | Statistical Process Control |
| TE | Transfereffizienz |
| THT | Through Hole Technology |
| USG | Untere Spezifikationsgrenze |
| VE x | Versatz x-Richtung |
| VE y | Versatz y-Richtung |

10 Literatur

- [1] AEGERTER, M. A.; ALMEIDA, R.; SOUTAR, A.; TADANAGA, K.; YANG, H.; WATANABE, T.: Coatings made by sol-gel and chemical nanotechnology. In: Journal of Sol-Gel Science and Technology, Volume 47, Number 2, August 2008, S. 203-236
- [2] ALBRECHT, H.-J.: Löten elektronischer Flachbaugruppen. In: Scheel, W. (Hrsg.): Baugruppenttechnologie der Elektronik – Montage. Berlin: Verlag Technik, 1999.
- [3] ARAVAMUDHAN, S.; SANTOS, D.; PHAM-VAN-DIEP, G.; ANDRES, F.: A Study of Solder Paste Release from Small Apertures of Different Geometries with Constant Volumes. In: Electronics Manufacturing Technology Symposium, 2002. IEMT 2002. 27th Annual IEEE/SEMI International, 2002, S. 159-165.
- [4] ASHMORE, C.: Optimising the Print Process for Lead Free Manufacturing. Date: <http://members.ipc.org/IPCLogin/IPCMembers/IPC/Route/0107/0107tech.pdf>, Zugriff am 11.10.2010
- [5] ASHMORE, C.; WHITMORE, M.; CLASPER, S.: Optimising the Print Process for Mixed Technology. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 735-741
- [6] AUER, F.; HARENBURG, J.; ROTH, C.: Funktionelle Schichten auf Metallen: Maßgeschneiderte Eigenschaften durch Sol-Gel-Technologie. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Jahrgang 32, Ausgabe 10, 2001, S. 767-773
- [7] BABKA, G.; SBIROLI, D.; ANGLIN, C.; BROOKS, R.: Sustaining a Robust Fine Feature Printing Process. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 704-716
- [8] BABKA, G.: Moving Towards a Stable Process: Minimizing Variation in Solder Paste Printing. Date: www.assembly.com/about/PDF/Moving_Towards_a_Stable_Pri1.pdf, Zugriff am 11.10.2010
- [9] 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, Vol. 31, No. 1, January 2008, S. 9-18
- [10] BARAJAS, L. G.; KAMEN, E. W.; GOLDSTEIN, A.: On-Line Enhancement of the Stencil Printing Process. In: Circuits Assembly, Volume 12, Number 3, 2001, S. 32-36
- [11] BAUER, N.: Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung – Qualitätssicherung in der Praxis. 1. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer-Allianz Vision, Fraunhofer IRB Verlag, 2007
- [12] BAUER, N.: Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3-D-Messtechnik. Erlangen: Fraunhofer-Allianz Vision, 2003
- [13] BELL, H.: Reflowlöten – Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler. 1. Auflage. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2005
- [14] BELMONTE, J.; SHAH, V.; MOHANTY, R.; JENSEN, T.; LASKY, R.: Determining Area Ratio Rule for Type 4 and Type 5 Solder Paste. In: Proceedings of IPC Printed

- Circuits Expo, APEX and the Designers Summit 2007, Los Angeles, CA, US, 2007
- [15] BIEDORF, R.: Analytische Praxis in der Elektronikfertigung. 1. Auflage. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2005
- [16] BIGL, T.: Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einatzgerechten elektronischen Baugruppen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Meisenbach-Verlag: Bamberg, 2008
- [17] BILLOTTE, C.; CARREAU, P. J.; HEUZEY, M.-C.: Rheological characterization of a solder paste for surface mount applications. In: Rheologica Acta, Volume 45, Number 4, S. 374-386
- [18] BÖTTCHER, H.: Funktionelle Beschichtungen auf Basis anorganischer Nanosole. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Jahrgang 32, Ausgabe 10, S. 759-766
- [19] BURKHALTER, G.; LEAK, E.; SHEA, C.; TRIPP, R.; WADE, G.: Transfer Efficiencies in Stencil Printing. Datei: http://www.ems007.com/pages/zone.cgi?a=62002&artpg=1&topic=0&_pf_=1, Zugriff am 12.10.2010
- [20] CHEN, L. A.; STERIAN, I.; SMITH, B.; KIRKPATRICK, D.: CSP compatibility in the SMT assembly process. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 11, Number 2, 1999, S. 25-29
- [21] CLECH, J.-P. M.; AUGIS, J. A.: Surface Mount Attachment Reliability and Figures of Merit for Design for Reliability. In: Lau, J. H. (Hrsg.): Solder Joint Reliability – Theory and Applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [22] CLEMENTS, D. J.; DESMULLIEZ, M. P. Y.; ABRAHAM, E.: The evolution of paste pressure during stencil printing. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 19, Number 3, 2007, S. 9-14
- [23] CLOUTHIER, R.: Developments in Advanced Stencil Technology. In: Proceedings of APEX 2000. Long Beach, CA, US, 2000. Session P-SM5, S. 1-6
- [24] COLEMAN, W. E.: Stencil Considerations for Miniature Components. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 717-734
- [25] COLEMAN, W. E.: Stencil Print Performance Studies. In: Proceedings of SMTA International 2001. Chicago, IL, US, 2001
- [26] COLEMAN, W. E.: Step Stencil design when 01005 and 0.3mm pitch μ BGA's coexist with RF Shields. Datei: http://www.circuitmart.com/pdf/step_stencil_design_01005.pdf, Zugriff am 12.10.2010
- [27] COLEMAN, W. E.; ANGLIN, C.: Stencil Options for Printing Solder Paste for 0.3 mm CSP's and 01005 Chip Components. Datei: http://www.circuitmart.com/pdf/stencil_print_options_for_small_components.pdf, Zugriff am 12.10.2010
- [28] COLEMAN, W. E.; BURGESS, M. R.: Electroformed vs. Laser-cut: A Stencil Performance Study. Datei: http://www.photostencil.com/files/pdf/electroformed_vs_laser-cut_a_stencil_performance_study.pdf, Zugriff am 12.10.2010
- [29] COLEMAN, W. E.; BURGESS, M. R.: Step stencils. In: Global SMT & Packaging. October 2006, S. 14-19

- [30] DERVAES, R. F.; POULOS, J.; WILLIAMS, S.: Conquering SMT stencil printing challenges with today's miniature components – Is electroform technology the right solution? In: Global SMT & Packaging, März 2009, S. 30-36
- [31] DESMULLIEZ, M. P. Y.; KAY, R. W.; ABRAHAM, E.; DE GOURCUFF, E.; JACKSON, G. J.; STEEN, H. A. H.; LIU, C. CONWAY, P. P.: Sub-100 micron pitch stencil printing for wafer scale bumping. In: Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (IEEE), 2005, S. 1-7
- [32] DESMULLIEZ, M. P. Y.; KAY, R. W.; STOYANOV, S.; BAILEY, C.: Stencil printing at sub-100 microns pitch. In: Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference (IEEE), EPTC 2004, S. 354-358
- [33] DIEPSTRATEN, G.; WU, D.: Estimating Stencil Life and Ideal Heating Profile of Solder Paste Using Advanced Thermo-Gravimetric Analysis. Datei: http://www.circuitmart.com/pdf/estimating_stencil_life.pdf, Zugriff am 13.10.2010
- [34] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: Prüfprozesseignung – Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. 3. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007
- [35] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 5. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2005
- [36] DURAIRAJ, R.; EKERE, N. N.; SALAM, B.: Thixotropy flow behaviour of solder and conductive adhesive pastes. In: Journal of Materials Science: Materials in Electronics 15, 2004, S. 677-683
- [37] DURAIRAJ, R.; JACKSON, G. J.; EKERE, N. N.; GLINSKI, G.; BAILEY, C.: Correlation of solder paste rheology with computational simulations of the stencil printing process. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 14, Number 1, 2002, S. 11-17
- [38] DURAIRAJ, R.; MALLIK, S.; SEMAN, A.; MARKS, A.; EKERE, N. N.: Investigation of Wall-slip Effect on Paste Release Characteristic in Flip chip Stencil Printing Process. In: 10th Electronics Packaging Technology Conference, 2008, S. 1328-1333
- [39] DURAIRAJ, R.; MALLIK, S.; SEMAN, A.; MARKS, A.; EKERE, N. N.: Rheological characterisation of solder pastes and isotropic conductive adhesives used for flip-chip assembly. In: Journal of Materials Processing Technology 209, 2009, S. 3923-3930
- [40] DURAIRAJ, R.; NGUTY, T. A.; EKERE, N. N.: Critical factors affecting paste flow during the stencil printing of solder paste. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 13, Number 2, 2001, S. 30-34
- [41] DURAIRAJ, R.; RAMESH, S.; MALLIK, S.; SEMAN, A.; EKERE, N.: Rheological characterisation and printing performance of Sn/Ag/Cu solder pastes. In: Materials and Design 30, 2009, S. 3812-3818
- [42] DUSEK, M.; HUNT, C.: A novel measurement technique for stencil printed solder paste. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 15, Number 2, 2003, S. 35-45

- [43] EKERE, N. N.; HE, D.; RIEDLIN, M. H. A.: The viscoelastic characteristics of solder paste under high frequency oscillatory shear. In: 23rd IEEE/CPMT Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1998. S. 373-376
- [44] EKERE, N. N.; LO, E. K.; MANNAN, S. H.: Process Modelling Maps for Solder Paste Printing. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 6, Number 2, 1994, S. 4-11
- [45] EKERE, N. N.; MANNAN, S. H.; CURRIE, M. A.: Solder Paste Printing Process Modelling Map. In: Proceedings of 18th IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium, 1995, S.137-141
- [46] FELDMANN, K.; FRANKE, J.; SCHÜBLER, F.: Development of micro assembly processes for further miniaturization in electronics production. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 59, Issue 1, 2010, S. 1-4
- [47] FELDMANN, K.; HOLZMANN, R.: Prozessintegrierte Qualitätssicherung durch zielgerichtete Regelungsstrategien. In: PLUS – Produktion von Leiterplatten und Systemen, Jahrgang 101, Heft 4 (2003), S. 634-639
- [48] FELDMANN, K.; STURM, J.: Yield improvement in SMT production by integrated Process Monitoring and Testing. In: 15th IEEE/CHMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium, 1993, S. 229-234
- [49] FISCHER, A. C.; MAHN, C. H.: Material Properties of Stainless Steel: What does it mean for Stencil Manufacturers? Datei: <http://www.datumalloys.com/new/files/products/95.pdf>, Zugriff am 28.12.2009
- [50] FÖRSTER, W.; WAGNER, G.: Sol-Gel Beschichtungen als dünne Korrosionsschutzschichten. Datei: http://www.phaenomen-farbe.de/pf_812_forschung_sol-gel.htm, Zugriff am 17.01.2010
- [51] GLINSKI, G. P.; BAILEY, C.; PERICLEOUS, K.: Simulation of the Stencil Printing Process. In: International Symposium on Electronic Materials and Packaging, 2000, S. 364-370
- [52] GRUMM, H.: Hochwertige Schablonentechnik für die Integration höhenverteilter Komponenten in die Leiterplatte. In: Tagungsband SMT/HYBRID/PACKAGING 2010 – Systemintegration in der Mikroelektronik, Berlin, Offenbach: VDE Verlag, S. 41-48
- [53] GUNN, R.; RIES, B.: Selecting and Implementing Solder Paste Inspection for SMT Process Control. In: Proceedings of IPC SMEMA Council APEX 2001, San Diego, CA, US, 2001. Session SM1-3, S. 1-8
- [54] HAUPT, M.; OEHR, C.; RUHFAß, R.; SCHMIDT, R.: Entwicklung von Antihafschichten auf Schablonen zur Optimierung von Druckprozessen in der Mikroelektronik. In: Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik – Erfolg durch Innovation, 2006, Fellbach: DVS/GMM, S. 65-70
- [55] HE, D.; EKERE, N. N.; CURRIE, M. A.: The Behavior of Solder Pastes in Stencil Printing with Vibrating Squeegee. In: IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part C, Volume 21, Number 4, S. 317-324

- [56] HE, D.; EKERE, N. N.; CURRIE, M. A.: The Study of the Response of Solder Pastes under Sinusoidal Vibration. In: 21st IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1997, S. 37-43
- [57] HE, D.; EKERE, N. N.; SALAM, B.; DURAIRAJ, R.; JACKSON, G.: Monte Carlo study of solder paste microstructure and ultra-fine-pitch stencil printing. In: Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Volume 14, 2003, S. 501-506
- [58] HEILMANN, N.; LINDLOFF, A.; DOLD, C.; FRIEDRICH, D.; TRODLER, J.: 01005 Prozess-Technologie. Siemens Automation & Drives, Electronics Assembly Systems: München, 2007
- [59] HOLZMANN, R.: Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach-Verlag: Bamberg, 2005
- [60] HOLZMANN, R.; FELDMANN, K.: Ganzheitliche Analyse von Anwendungspotenzialen und Technologiegrenzen mehrstufiger Druckschablonen beim Pastenauftrag. In: Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Verbindungstechnik, 2004, Fellbach: DVS/GMM, S. 349-354
- [61] HONG, D.; LEE, H.; KIM, M.; CHO, H.: A 3D Inspection System for PCB board by Fusing Moiré Technique and Stereo Vision Algorithm. In: Proceedings of SICE Annual Conference 2007, Kagawa, Japan, 2007, S. 2473-2479
- [62] HUANG, C. Y.; LIN, C. T.; TSAI, H. L.: Study of process capability for the stencil printing in printed circuit board assembly. In: Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2004, S. 10.8.1-10.8.8
- [63] HUI, T.-W.; PANG, G. K.-H.: Solder paste inspection using region-based defect detection. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 42, 2009, S. 725-734
- [64] HWANG, J. S.: Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing. New York, NY, US: McGraw-Hill, 1996
- [65] HWANG, J. S.: Solder Paste Technology and Applications. In: Lau, J. H. (Hrsg.): Solder Joint Reliability – Theory and Applications, New York, NY, US: Van Nostrand Reinhold, 1991
- [66] JACKSON, G. J.; HENDRIKSEN, M. W.; KAY, R. W.; DESMULLIEZ, M.; DURAIRAJ, R. K.; EKERE, N. N.: Sub process challenges in ultra fine pitch stencil printing of type-6 and type-7 Pb-free solder pastes for flip chip assembly applications. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 17, Issue 1, S. 24-32
- [67] JACKSON, G. J.; HENDRIKSEN, M. W.; DURAIRAJ, R. K.; EKERE, N. N.; DESMULLIEZ, M. P. Y.; KAY, R. W.: Differences in the sub-processes of ultra fine pitch stencil printing due to type-6 and type-7 Pb-free solder pastes used for flip chip. In: Proceedings of 53rd Electronic Components and Technology Conference (IEEE), ECTC 2003, S. 536-543
- [68] JESS, J.: Schablone für mehrere Pastenhöhen. In: EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Leinfelden-Echterdingen: Konradin Verlag, 5/2002, S. 36-38

- [69] JUDD, M.; BRINDLEY, K.: Soldering in Electronics Assembly. 2nd Edition, Newnes, 1999
- [70] KAY, R.; DESMULLIEZ, M.; STOYANOV, S.; BAILEY, C.; DURAIRAJ, R.; EKERE, N.; HENDRIKSEN, M.; FRIMPONG, F.; SMITH, B.; PRICE, D.; ROBERTS, A.; WHITMORE, A.; ONGLEY, P.; GOURLAY, J.: Low Temperature Flip-chip Packaging based on Stencil Printing Technology. Date: <http://www.microstencil.co.uk/Papers/Low%20Temperature%20Flip-Chip%20Packaging%20based%20on%20stencil%20printing%20technology.pdf>, Zugriff am 12.07.2010
- [71] KAY, R. W.; DE GOURCUFF, E.; DESMULLIEZ, M. P. Y.; JACKSON, G. J.; STEEN, H. A. H.; LIU, C.; CONWAY, P. P.: Stencil Printing Technology for Wafer Level Bumping at sub-100 Micron Pitch Using Pb-Free Alloys. In: Proceedings of 55th Electronic Components and Technology Conference (IEEE), ECTC 2005, S. 848-854
- [72] KAY, R. W.; DE GOURCUFF, E.; RONEY, I.; GORMAN, N. J.: Stencil print technology for fine pitch deposition of Pb-free flip chip interconnects. Date: <http://www.microstencil.co.uk/Papers/Stencil%20Printing%20technology%20for%20fine%20pitch%20deposition%20of%20Pb-free%20flip%20chip%20interconnects.pdf>, Zugriff am 12.07.2010
- [73] KAY, R. W.; STOYANOV, S.; GLINSKI, G. P.; BAILEY, C.; DESMULLIEZ, M. P. Y.: Ultra-Fine Pitch Stencil Printing for a Low Cost and Low Temperature Flip-Chip Assembly Process. In: Transactions on Components and Packaging Technologies (IEEE), Volume 30, Issue 1, 2007, S. 129-136
- [74] KEIL, M.: SPC and usage difficulties in SMT. In: Global SMT & Packaging, September 2008, S. 16-21
- [75] KENNEDY, J.: A study of solder paste printing requirements for CSP technology. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 12, Issue 3, 2000, S. 13-19
- [76] KIM, J. H.; SATOH, M.; IWASAKI, T.: Rheological properties of particle-flux suspension paste. In: Advanced Powder Technology, Volume 16, Number 1, 2005, S. 61-71
- [77] KLEIN WASSINK, R. J.; VERGULD, M. M. F.: Manufacturing Techniques for Surface Mounted Assemblies. Electrochemical Publications Ltd., Port Erin, Isle of Man, British Isles, 1995
- [78] KLEIN WASSINK, R. J.: Weichlöten in der Elektronik. 2. Auflage. Eugen G. Leuze Verlag, Saalgau, 1991
- [79] KLOESER, J.; COSKINA, P.; ASCHENBRENNER, R.; REICHL, H.: Bump formation for flip chip and CSP by solder paste printing. In: Microelectronics Reliability, Volume 42, 2002, S. 391-398
- [80] KOENEN, C.: Mehr als seine Stufenschablone. In: EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Leinfeld-Echterdingen: Konradin Verlag, 9/2004, S. 16
- [81] LÄNTZSCH, C.: Nano coated SMT stencil with anti-adhesion effect. Konradin Verlag - EPP (Hrsg.): <http://www.epp-online.de/4/-/article/16537487/15927029/> (Stand: 07.12.2010), Zugriff am 07.12.2010

- [82] LÄNTZSCH, C.; RÖSCH, M.: Nanobeschichtete Schablone mit Anti-Haft-Wirkung. In: PLUS – Produktion von Leiterplatten und Systemen, Jahrgang 106, Heft 6 (2008), S. 1196-1201
- [83] LASKY, R. C.; SANTOS, D.; BHAVE, A. A.; MING, W.: Six Sigma Techniques for Solder Paste Selection. Indium Corporation (Hrsg.): <http://www.indium.com/techlibrary/whitepapers/six-sigma-techniques-for-solder-paste-selection>, Zugriff am 14.05.2010
- [84] LATHROP, R. R.: Solder Paste Print Qualification Using Laser Triangulation. In: IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part C, Volume 10, Number 3, July 1997
- [85] LEA, C.: A Scientific Guide to Surface Mount Technology. Electrochemical Publications Limited, Ayr, 1988
- [86] LEE, N.-C.: Reflow Soldering Processes and Troubleshooting – SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies. Reed Elsevier group, Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, US, 2002
- [87] LEHMANN, T.: Schablonen für Null-Fehler-Produktion. In: PLUS – Produktion von Leiterplatten und Systemen, Jahrgang 105, Heft 1 (2007), S. 156-161
- [88] LI, J.; PORANKI, S.; GALLARDO, R.; ABTEW, M.; KINYANJUI, R.; SRIHARI, K.: Design and Process Development for the Assembly of 01005 Passive Components. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 502-509
- [89] LI, L.; THOMPSON, P.: Stencil Printing Process Development for Flip Chip Interconnect. In: Transactions on Electronics Packaging Manufacturing (IEEE), Volume 23, Number 3, July 2000, S. 165-170
- [90] LINDLOFF, A.: Was ist eine Stufenschablone? In: EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Leinfelden-Echterdingen: Konradin Verlag, 4/2007, S. 62
- [91] LIUKKONEN, T.; TUOMINEN, A.: Decreasing variation in paste printing using statistical process control. In: Microelectronics Reliability, Volume 43, 2003, S. 1157-1161
- [92] MANESSIS, D.; ASCHENBRENNER, R.; OSTMANN, A.; REICHL, H.: Latest Developments in Bumping Technologies for Flip Chip and WLCSP Packaging. In: 33rd IEEE/CPMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium (IEMT), 2008, S. 1-6
- [93] MANESSIS, D.; BÖTTCHER, L.; PATZELT, R.; OSTMANN, A.; REICHL, H.: Latest Developments in Bumping Technologies for Flip Chip and WLCSP Packaging. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 169-174
- [94] MANESSIS, D.; PATZELT, R.; OSTMANN, A.; ASCHENBRENNER, R.; REICHL, H.: Stencil Printing Technology for 100 μm Flip Chip Bumping. In: Proceedings of 36th International Symposium on Microelectronics, IMAPS 2003, Boston, S. 241-246
- [95] MANESSIS, D.; PATZELT, R.; OSTMANN, A.; ASCHENBRENNER, R.; REICHL, H.; AXMANN, A.; LAENTZSCH, C.; KLEEMANN, G.: Evaluation of Innovative Nano-Coated Stencils in Ultra-Fine-Pitch Flip Chip Bumping Processes. In: Proceedings of 41st International Symposium on Microelectronics, IMAPS 2008, S. 438-445

- [96] MANESSIS, D.; PATZELT, R.; OSTMANN, A.; ASCHENBRENNER, R.; REICHL, H.; KAY, R.; DE GOURCUFF, E.: Latest Technological Advancements in Stencil Printing Processes for Ultra-Fine-Pitch Flip Chip Bumping Down to 60 μm Pitch. In: Proceedings of 39th International Symposium on Microelectronics, IMAPS 2006, San Diego, CA, US
- [97] MANESSIS, D.; PATZELT, R.; OSTMANN, A.; REICHL, H.: Advancements in Bumping Technologies for Flip Chip and WLCSP Packaging. In: European Microelectronics and Packaging Conference (IEEE), EMPC 2009, S. 1-6
- [98] 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, Volume 6, Number 1, February 1995, S. 34-42
- [99] MANNAN, S. H.; EKERE, N. N.; ISMAIL, I.; LO, E. K.: Squeegee Deformation Study in the Stencil Printing of Solder Pastes. In: IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part A, Volume 17, Number 3, 1994, S. 470-476
- [100] MANNAN, S.; EKERE, N. N.; LO, E. K.; ISMAIL, I.: Predicting Scooping and Skipping in Solder Paste Printing for Reflow Soldering of SMT Devices. In: Soldering & Surface Mount Technology, Volume 5, Number 3 (1993), S. 14-17
- [101] MASING, W.: Handbuch Qualitätsmanagement. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1999
- [102] MOHANTY, R.: Substrate Printing for Micro BGA. Speedline Technologies (Hrsg.): <http://speedlinetech.com/docs/papers/mpm/SubstrateBumping.pdf> (Stand: 13.10.2010), Zugriff am 13.10.2010
- [103] MOHANTY, R.; CLAIBORNE, B.; ANDRES, F.: Effect of Squeegee Blade on Solder Paste Print Quality. Speedline Technologies (Hrsg.): <http://speedlinetech.com/docs/papers/mpm/EffectOfSqueegeeBlade.pdf> (Stand: 13.10.2010), Zugriff am 13.10.2010
- [104] MOHANTY, R.; IYER, R. L.; SANTOS, D.: Effect Of Board Clamping System On Solder Paste Print Quality. CircuitMart (Hrsg.): http://www.circuitmart.com/pdf/effect_board_clamping_systems.pdf (Stand: 04.01.2011), Zugriff am 13.10.2010
- [105] MOHANTY, R.; LOVE, R.: Advances in Broadband Printing. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 747-752
- [106] MOHANTY, R.; SANTOS, D.: Process Capability Index: A Better Way to Assess Equipment Capability. In: Proceedings of SMTA International 2008. Orlando, FL, US, 2008
- [107] MOHANTY, R.; SHAH, V.; HAUGEN, P.; HOLTE, L.: Solder Paste Inspection Technologies: 2D-3D Correlation. SMT & Surface Mount Technology Electronics Manufacturing (Hrsg.): <http://www.smtnet.com/library/files/upload/Solder-Paste-Inspection-APEX2008.pdf> (Stand: 04.01.2011), Zugriff am 04.01.2011
- [108] MOHANTY, R.; SHAH, V.; NICHOLLS, G.; TRIPP, R.: Broadband Printing: The New SMT Challenge. Speedline Technologies (Hrsg.): <http://www.speedlinetech.com/docs/papers/mpm/BroadbandPrinting.pdf> (Stand: 08.01.2011), Zugriff am 08.01.2011

- [109] MOHANTY, R.; SHAH, V.; RAMASUBRAMANI, A.; LASKY, R.; JENSEN, T.: Investigating the 01005-Component Assembly Process Requirements. Speedline Technologies (Hrsg.): <http://speedlinetech.com/docs/papers/mpm/UltraFinePitchPrinting.pdf> (Stand: 08.01.2011), Zugriff am 08.01.2011
- [110] MORAD, N.; YII, H. K.; HITAM, M. S.; LIM, C. P.: Development of an Intelligent System for the Solder Paste Printing Process. In: Proceedings of TENCON 2000, Volume 3, 2000, S. 479-483
- [111] MORRIS, J. R.; WOJCIK, T.: Stencil Printing of Solder Paste for Fine-Pitch Surface Mount Assembly. In: IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Volume 14, Number 3, September 1991, S. 560-566
- [112] N. N.: KRÜSS Advancing Surface Science: OWRK. Krüss GmbH (Hrsg.): <http://www.kruss.de/de/theorie/messungen/kontaktwinkel/modelle/owrk.html> (Stand: 11.01.2011), Zugriff am 11.01.2011
- [113] N. N.: LaserJob GmbH – Feinschneiden, Lasergravieren, Laserbohren, Laser-Arbeiten. LaserJob GmbH (Hrsg): http://www.laser-job.de/cmsportal/cms/front_content.php?idart=94 (Stand: 11.01.2011), Zugriff am 11.01.2011
- [114] N. N.: ANSI/J-STD-005: Requirements for Soldering Pastes. Electronics Industries Association and Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Arlington, VA, Northbrook, IL, US, 1995
- [115] N. N.: DIN 32513-1: Weichlotpasten – Teil 1: Zusammensetzung, Technische Lieferbedingungen. DIN – Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2005
- [116] N. N.: DIN EN 29454-1: Flussmittel zum Weichlöten, Einteilung und Anforderungen, Teil 1: Einteilung, Kennzeichnung und Verpackung. DIN – Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1994
- [117] N. N.: DIN ISO 21747:2007-03: Statistische Verfahren – Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen für kontinuierliche Qualitätsmerkmale. DIN – Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2007
- [118] N. N.: IPC-7525A: Stencil Design Guidelines. IPC – Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn, IL, US, Februar 2007
- [119] N. N.: IPC-A-610D DE: Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen. IPC – Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn, IL, US, 02/2005
- [120] N. N.: IPC-SM-782A: Surface Mount Design and Land Pattern Standard. IPC – Association Connecting Electronics Industries, Northbrook, IL, US, 04/1999
- [121] N. N.: Technology focus: The rise of solder paste jet printing. In: Global SMT & Packaging. February 2010, S. 70-71
- [122] NEUTZLING, J.: Aktuelle Merkmale und Regeln für SMD-Metallschablonen. In: PLUS – Produktion von Leiterplatten und Systemen, Jahrgang 105, Heft 1 (2007), S. 104-113
- [123] NGUTY, T. A.; EKERE, N. N.: Modeling the effects of temperature on the rheology of solder pastes and flux system. In: Journal of Materials Science: Materials in Electronics 11, 2000, S. 39-43

- [124] NGUTY, T. A.; EKERE, N. N.: Monitoring the effects of storage on the rheological properties of solder paste. In: Journal of Materials Science: Materials in Electronics 11, 2000, S. 433-437
- [125] NGUTY, T. A.; EKERE, N. N.; ADEBAYO, A.: Correlating Solder Paste Composition with Stencil Printing Performance. In: 24th IEEE/CPMT Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1999, S. 304-312
- [126] NGUTY, T. A.; SALAM, B.; DURAIRAJ, R.; EKERE, N. N.: Understanding the Process Window for Printing Lead-Free Solder Pastes. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Volume 24, Number 4, October 2001, S. 249-254
- [127] NGUTY, T. A.; SALAM, B.; RAJKUMAR, D.; DURAIRAJ, R.; EKERE, N. N.; CURRIE, M. A.; STEEN, H. A. H.: The rheology and printing performance of lead-free solder pastes. In: Proceedings of NEPCON West 2000, Anaheim, CA, US
- [128] NOWOTTNICK, M.: Zuverlässigkeit von Lötverbindungen in Abhängigkeit von der Lotmenge. ETFN (Hrsg.): <http://www.etfn.de/elektronik-technologie-forum-nord-2009.html>, Zuverlaessigkeit_Lotvolumen.pdf (Stand: 11.01.2011), Zugriff am 11.01.2011
- [129] OPPERMAN, M.; SAUER, W.; WOLTER, K.-J.: Cost Efficient Quality Strategies for Microsystems and Electronics Production. In: 1st Electronics Systemintegration Technology Conference 2006, Dresden, Germany, S. 1127-1132
- [130] ORESJO, S.: Defect Levels for Different Component Types at the PCBA Manufacturing Process. In: Proceedings of SMTA International 2001. Rosemont, IL, US, 2001
- [131] ORESJO, S.: New study reveals component defect levels: an extensive study of almost one billion solder joints reveals the defect levels and most common defects for components on PCBAs. In: Circuits Assembly, Mai 2002, S. 39-43
- [132] ORESJO, S.: Results from 2007 Industry Defect Level and Test Effectiveness Studies. In: IPC Printed Circuits Expo, APEX and Designers Summit, 2008, Paper Number S03-03
- [133] PAN, J.; TONKAY, G. L.: A Study of the Aperture Filling Process In Solder Paste Stencil Printing. Datei: http://www.lehigh.edu/lse/documents/99t_006.pdf, Zugriff am 11.01.2011
- [134] PAN, J.; TONKAY, G. L.; STORER, R. H.; SALLADE, R. M.; LEANDRI, D. J.: Critical Variables of Solder Paste Stencil Printing for Micro-BGA and Fine-Pitch QFP. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Volume 27, Number 2, April 2004, S. 125-132
- [135] PATENTANMELDUNG WO2007033882A1: Printing Template Of An SMT Process And Method Of Coating It. Angemeldet am 25. August 2006, veröffentlicht am 29. März 2007, Anmelder: Siemens Aktiengesellschaft, Erfinder: Heinrich Zeininger, Rudolf Zrenner
- [136] PHAM-VAN-DIEP, G.; BELMONTE, J.; ARAVAMUDHAN, S. R.; HARREL, J.: Closed-Loop Process Control in the Solder Paste Printing Process. In: Assembly, 2006, S. 1-7

- [137] PRASAD, R. P.: Surface Mount Technology. Principles and Practice. Van Nostrand Reinhold, New York, 1989
- [138] RAJKUMAR, D.; NGUTY, T.; EKERE, N. N.: Optimising Process Parameters for Flip Chip Stencil Printing Using Taguchi's Method. In: 26th IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 2000, S. 382-388
- [139] RAMASUBRAMANIAN, A. S.; SANTOS, D.; MOHANTY, R.: Broadband Printing – A Paradigm. SMT & Surface Mount Technology Electronics Manufacturing (Hrsg.): <http://www.smtnet.com/library/files/upload/Broadband-Printing-Paradigm-APEX2008.pdf> (Stand: 11.01.2011), Zugriff am 11.01.2011
- [140] RAMKUMAR, S. M.; CLOUTHIER, R.; GHAFFARIAN, R.: Print Process Characterization for BGA, Fine Pitch and CSP Components. In: Proceedings of SMTA International 2001. Chicago, IL, US, 2001
- [141] RAMKUMAR, S. M.; GANESHAN, V.; THENALUR, K.; GHAFFARIAN, R.: Reliability and paste process optimization of eutectic and lead-free for mixed packaging. In: Proceedings of SMTA International 2002. Chicago, IL, US, 2002
- [142] RIEDLIN, M. H. A.; EKERE, N. N.: Rheological Techniques for Measuring Normal Stress Differences of Solder Paste. In: 21st IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1997, S. 178-183
- [143] RÖSCH, M.; FELDMANN, K.: 3D-Pastendruckinspektion zur Prozesskontrolle und Optimierung im Schablonendruck. In: PLUS – Produktion von Leiterplatten und Systemen, Jahrgang 106, Heft 11 (2008), S. 2394-2399
- [144] RÖSCH, M.; FRANKE, J.: Beurteilung der Prozessfähigkeit des Schablonendrucks auf Basis geeigneter Qualitätsfähigkeitsindizes. In: Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 – Zuverlässigkeit und Systemintegration –, DVS/GMM, Fellbach, 2010, S. 58-64
- [145] RÖSCH, M.; FRANKE, J.: Stencil Design Guidelines for Robust Printing Processes in Electronics Production Considering Stencil and Solder Paste Specific Properties. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 735-741
- [146] RÖSCH, M.; FRANKE, J., FELDMANN, K.: Konzept zur Prozessfähigkeitsbeurteilung des Schablonendrucks in der Elektronikfertigung. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 104, Heft 6 (2009), S. 492-497
- [147] RÖSCH, M.; FRANKE, J.; LÄNTZSCH, C.; KLEEMANN, G.: Characteristics and Potentials of Nano-Coated Stencils for Stencil Printing Optimization. In: Proceedings of SMTA International 2010. Orlando, FL, US, 2010, S. 816-822
- [148] RÖSCH, M.; KOZIC, D.; FELDMANN, K.: Eigenschaften und Potenziale von nanobeschichteten SMT-Druckschablonen. In: Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 – Systemintegration und Zuverlässigkeit –, DVS/GMM, Fellbach, 2008, S. 145-150
- [149] RÖSCH, M.; KOZIC, D.; FELDMANN, K.: Qualifizierung des Schablonendruckprozesses unter Verwendung nanobeschichteter SMT-Druckschablonen. In: PLUS – Produktion von Leiterplatten und Systemen, Jahrgang 105, Heft 11 (2007), S. 2175-2179

- [150] SANTOS, D. L.; ARAVAMUDHAN, S.; PHAM-VAN-DIEP, G.; BHOSALE, A.: One process, different results: Methodologies for analyzing a stencil printing process using process capability index analyses. In: Proceedings SMTA International 2005. Chicago, IL, US, 2005, S. 65-72
- [151] SANTOS, D.; MOHANTY, R.: Process Development And Characterization Of The Stencil Printing Process For Small Apertures. EMSNow (Hrsg.): <http://www.emsnow.com/cnt/files/White%20Papers/speedProcessDevelopmentCharacterization.pdf> (Stand: 11.01.2011), Zugriff am 11.01.2011
- [152] SAUER, W.; WOHLRABE, H.: Machine and Process Capability Coefficient of Solder Paste Printers. In: 24th International Spring Seminar on Electronics Technology: Concurrent Engineering in Electronic Packaging, 2001, S. 26-31
- [153] SCHEEL, W.: Einführung. In: Scheel, W.: Baugruppenttechnologie der Elektronik – Montage, 1. Auflage. Berlin: Verlag Technik, Eugen G. Leuze Verlag, 1997, S. 9-23
- [154] SCHIEBEL, G.: Bestückung elektronischer Baugruppen. In: Scheel, W.: Baugruppenttechnologie der Elektronik – Montage, 1. Auflage. Berlin: Verlag Technik, Eugen G. Leuze Verlag, 1997, S. 91-151
- [155] SCHIERENBECK, H.: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre. 14. Auflage, München, Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1999
- [156] SCHÜßLER, F.: Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Meisenbach-Verlag: Bamberg, 2010
- [157] SHAH, V.; MOHANTY, R.; BELMONTE, J.; JENSEN, T.; LASKY, R.; BISHOP, J.: Process Development for 01005 Lead-Free Passive Assembly: Stencil Printing. In: IPC Printed Circuits Expo, APEX and Designers Summit, 2007, Paper Number S28-01
- [158] SHIMAMURA, M.; OKUNO, T.; AKITA, S.; DAILY, D.: Awakening From Head-In-Pillow: A Novel Pre-Production Test Method For BGA Non-Wet Issues. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 422-429
- [159] SLYMAN, D. A.: Alles im Lot – Alternativen bei Lotlegierungen für gesicherte Verbindungen. In: Fachseminar zur Elektronikproduktion: Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, FAPS-TT GmbH, Nürnberg, 2004
- [160] TIGGELEN-AARDEN, I. V.: Kosteneffizientes Testverfahren zur QS von Lotpasten – Teil1. In: Productronic, Heft 10, 2003, S. 2-4
- [161] TRODLER, J.; SCHMIDT, W.: Bleifreie Lötprozessechnik: Haupteinflüsse und Wechselwirkungen auf die Lötqualität beim Verarbeiten von SAC-Lotpasten. In: Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik – Erfolg durch Innovation, DVS/GMM, Fellbach, 2006, S. 51-58
- [162] WICKHAM, M.; ZOU, L.; DUSEK, M.; HUNT, C. P.: Measuring the Impact of Land Size and Solder Joint Volume on Lead-free Solder Joint Reliability. National Physical Laboratory (Hrsg.): http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/depc_mpr44.pdf (Stand: 11.01.2011), Zugriff am 11.01.2011
- [163] WILSON, A. R.; WEST, A. A.; VELANDIA, D. M. S.; CONWAY, P. P.; WHALLEY, D. C.; QUINTERO, L. A. M.; MONFARED, R.: Characterization of printed solder paste ex-

- cess and bridge related defects. In: 2nd Electronics System-Integration Technology Conference ESTC 2008, 2008, S.1305-1310
- [164] WOHLRABE, H.: Aktive Nutzung von Qualitätsfähigkeitskennziffern in der Fertigung von elektronischen Baugruppen – ein Überblick. In: Elektronische Baugruppen – Aufbau und Fertigungstechnik –, DVS/GMM, Fellbach, 2002, S. 283-290
- [165] WOHLRABE, H.: Maschinen- und Prozessfähigkeit von Bestückausrüstungen der SMT. In: Sauer, W.; Wolter, K.-J.: Elektronik-Technologie in Forschung und Praxis – Band 1, 2. überarbeitete Auflage, Templin, Verlag Dr. Markus A. Detert, 2001
- [166] WOHLRABE, H.: Qualitätsoptimierung bei der Fertigung elektronischer Baugruppen mittels statistischer Analysemethoden. In: Wolter, K.-J.; Zerna, T.; Wiese, S.: System Integration in Electronic Packaging, Volume 7, Templin, Verlag Dr. Markus A. Detert, 2009
- [167] WOHLRABE, H.: Qualitätssicherung. In: Sauer, W. (Hrsg.): Prozesstechnologie der Elektronik – Modellierung, Simulation und Optimierung der Fertigung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2003
- [168] WOHLRABE, H.; TRODLER, J.; GOEDECKE, A.: Analysen für eine Null-Fehler-Qualität von Lotpastendruckprozessen. In: Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 – Zuverlässigkeit und Systemintegration –, DVS/GMM, Fellbach, 2010, S. 71-76
- [169] WU, X.; CHUNG, W.; TONG, H.; CHENG, J.; XU, Y.: A New Solder Paste Inspection Device: Design and Algorithm. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007, S. 680-685
- [170] YANG, J.; CAI, J.; WANG, S.; JIA, S.: Study of stencil printing technology for fine pitch flip chip bumping. In: ICEPT-HDP International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2009, S. 900-905
- [171] YEN, H.-N.; TSAI, D.-M.; YANG, J.-Y.: Full-field 3-D measurement of solder pastes using LCD-based phase shifting techniques. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Volume 29, Number 1, 2006, S. 50-57
- [172] ZERNA, T.: Aufbau- und Verbindungstechnik für Elektronik-Baugruppen der Höchstintegration. In: Wolter, K.-J.; Zerna, T.; Wiese, S.: System Integration in Electronic Packaging, Volume 4, Templin, Verlag Dr. Markus A. Detert, 2008
- [173] ZHANG, S.; MOHANTY, R.; JIANG, X.; MAO, R.; YU, C.; XIA, C.; SWEATMAN, K.; TEOH, D.; FU, H.; ARNOLD, J.: iNEMI Solder Paste Deposition Project – First Stage Review Optimizing Solder Paste Printing for Large and Small Components. In: Proceedings of SMTA International 2009. San Diego, CA, US, 2009, S. 753-760

11 Anhang

Anhang Kapitel 4.2

Vorgehensweise Versuchsteil 1:

Druckparameter und Materialien: Rakelgeschwindigkeit 25 mm/s - 50 mm/s - 75 mm/s, Rakelkraft 2 N/cm - 3 N/cm - 4 N/cm, Trenngeschwindigkeit 3 mm/s, Trennabstand 3 mm, Rakellänge 250 mm, Rakelwinkel 45° - 60°, Rakelmaterial Edelstahl - Kunststoff, Lotpastenmenge 200 g, Lotpastentyp 3 - 4, Leiterplatten (vollflächig chemisch Zinn, Abmessungen 200 mm x 175 mm x 1,5 mm)

Versuchsablauf: Durchführung von 10 Druckzyklen, lichtmikroskopische Analyse der Pastenrückstände auf der Schablonenoberfläche

Vorgehensweise Versuchsteil 2:

Druckparameter und Materialien: Rakelgeschwindigkeit 50 mm/s, Rakelkraft 3 N/cm, Trenngeschwindigkeit 3 mm/s, Trennabstand 3 mm, Rakellänge 250 mm, Rakelwinkel 60°, Rakelmaterial Edelstahl, Lotpastenmenge 200 g, Lotpastentyp 3, Leiterplatten (vollflächig chemisch Zinn, Abmessungen 200 mm x 175 mm x 1,5 mm)

Versuchsablauf: Durchführung von 10 Walkzyklen, Reinigung der Schablonenunterseite (Reinigungsoption Nass/Vakuum/Trocken), Durchführung eines Initialdrucks, Bedrucken von 10 Leiterplatten ohne Reinigung der Schablonenunterseite, messtechnische Erfassung der Transfereffizienzen auf den 10 bedruckten Leiterplatten

Auswertung der Transfereffizienzen in den einzelnen Schablonenbereichen:

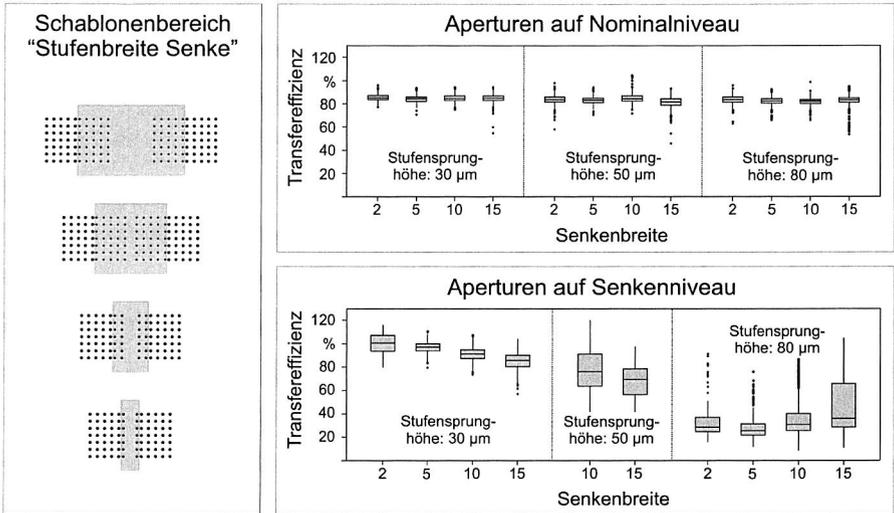


Abbildung 117: Transfereffizienzen der Aperturen im Schablonenbereich „Stufenbreite Senke“ in Abhängigkeit von Stufensprunghöhe und Senkenbreite

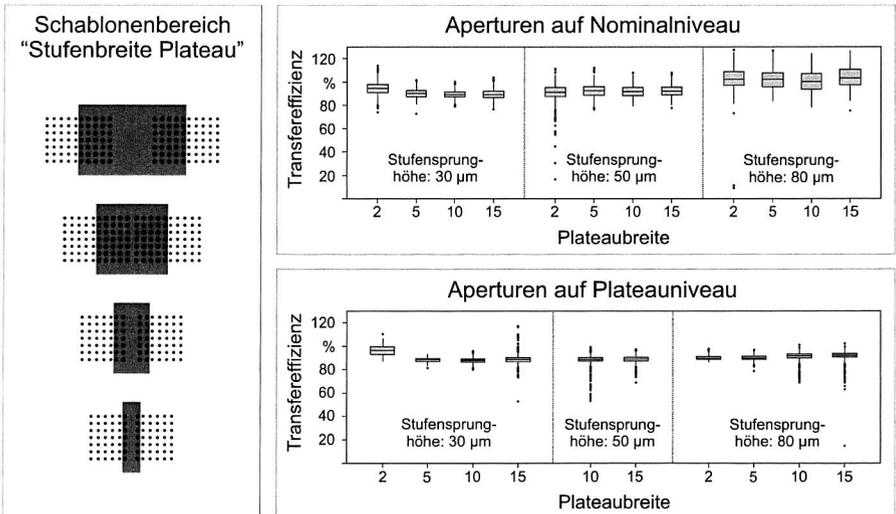


Abbildung 118: Transfereffizienzen der Aperturen im Schablonenbereich „Stufenbreite Plateau“ in Abhängigkeit von Stufensprunghöhe und Plateaubreite

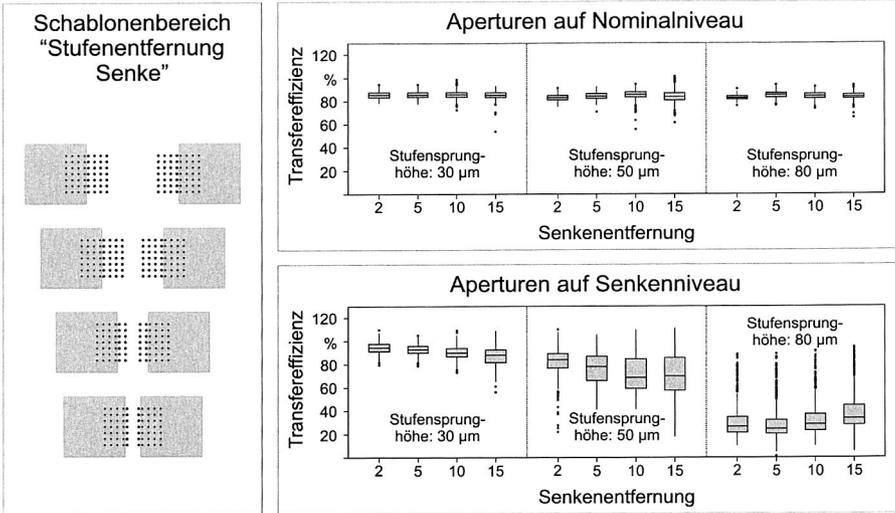


Abbildung 119: Transfereffizienzen der Aperturen im Schablonenbereich „Stufenentfernung Senke“ in Abhängigkeit von Stufensprunghöhe und Senkenentfernung

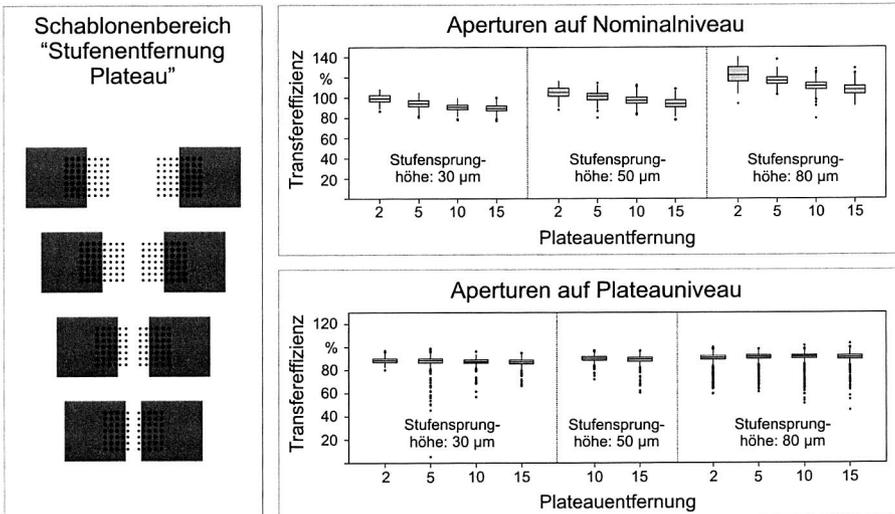


Abbildung 120: Transfereffizienzen der Aperturen im Schablonenbereich „Stufenentfernung Plateau“ in Abhängigkeit von Stufensprunghöhe und Plateauentfernung

Anhang Kapitel 4.3

Vorgehensweise Druckversuche:

Druckparameter und Materialien: Rakelgeschwindigkeit 50 mm/s, Rakelkraft 2,2 N/cm, Trenngeschwindigkeit 3 mm/s, Trennabstand 3 mm, Rakellänge 200 mm, Rakelwinkel 60° (15 mm Überhang), Rakelmaterial Edelstahl, Lotpastenmenge 120 g, nanobeschichtete und unbeschichtete Edelstahlschablone (jeweils lasergeschnitten), Lotpastentyp 3 und 4, Leiterplatten (blank FR4) Einfacheuroformat (100 mm x 160 mm x 1,5 mm)

Versuchsablauf: Durchführung von 10 Walkzyklen, Reinigung der Schablonenunterseite (Reinigungsoption Nass/Vakuum/Trocken), Durchführung eines Initialdrucks, Bedrucken von 10 Leiterplatten ohne Reinigung der Schablonenunterseite, lichtmikroskopische Analyse der bedruckten Leiterplatte und der Schablonenunterseite sowie messtechnische Erfassung der Transfereffizienzen auf den 10 bedruckten Leiterplatten

Vorgehensweise erweiterte Druckversuche:

Druckparameter und Materialien: Rakelgeschwindigkeit 10 mm/s, Rakelkraft 3,5 N/cm, Trenngeschwindigkeit 3 mm/s, Trennabstand 3 mm, Rakellänge 200 mm, Rakelwinkel 45°, Rakelmaterial Edelstahl, Lotpastenmenge 120 g, nanobeschichtete und unbeschichtete Edelstahlschablone (jeweils lasergeschnitten), Lotpastentyp 4, Leiterplatten (blank FR4) Einfacheuroformat (100 mm x 160 mm x 1,5 mm)

Versuchsablauf: Durchführung von 10 Walkzyklen, Reinigung der Schablonenunterseite (Reinigungsoption Nass/Vakuum/Trocken), Durchführung eines Initialdrucks, Bedrucken von 8 Leiterplatten mit Reinigung der Schablonenunterseite nach jedem Druckzyklus, lichtmikroskopische Analyse der bedruckten Leiterplatte und der Schablonenunterseite sowie messtechnische Erfassung der Transfereffizienzen auf den 8 bedruckten Leiterplatten

Anhang Kapitel 5.1

Vorgehensweise Druckversuche Kapitel 5.1.1:

Druckparameter und Materialien: Rakelgeschwindigkeit 30 mm/s, Rakelkraft 2,5 N/cm, Trenngeschwindigkeit 3 mm/s, Trennabstand 3 mm, Rakellänge 200 mm, Rakelwinkel 60° (15 mm Überhang), Rakelmaterial Edelstahl, Lotpastenmenge 200 g, Leiterplatten (blank FR4) Einfacheuroformat (100 mm x 160 mm x 1,5 mm)

Versuchsablauf: Durchführung von 10 Walkzyklen, Reinigung der Schablonenunterseite (Reinigungsoption Nass/Vakuum/Trocken), Durchführung eines Initialdrucks, Bedrucken von 10 Leiterplatten ohne Reinigung der Schablonenunterseite, lichtmikroskopische

Analyse der Schablonenunterseite sowie messtechnische Erfassung der Transfereffizienzen auf den 10 bedruckten Leiterplatten

Vorgehensweise Druckversuche Kapitel 5.1.3:

Druckparameter und Materialien: Rakelgeschwindigkeit 50 mm/s, Rakelkraft 2,5 N/cm, Trenngeschwindigkeit 3 mm/s, Trennabstand 3 mm, Rakellänge 200 mm, Rakelwinkel 60° (15 mm Überhang), Rakelmaterial Edelstahl, Lotpastenmenge 200 g, Leiterplatten (blank FR4) Einfacheuroformat (100 mm x 160 mm x 1,5 mm)

Versuchsablauf: Durchführung von 10 Walkzyklen, Reinigung der Schablonenunterseite (Reinigungsoption Nass/Vakuum/Trocken), Durchführung eines Initialdrucks, Bedrucken von 10 Leiterplatten ohne Reinigung der Schablonenunterseite, messtechnische Erfassung der Qualitätsmerkmale auf den 10 bedruckten Leiterplatten

Geometriekennwerte des Schablonenlayouts Kapitel 5.1.3:

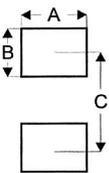
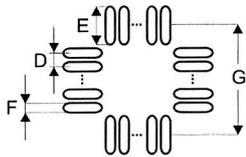
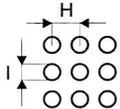
| Chipwiderstände | | | | | |
|---|-------------|---------|---------|---------|----------|
|  | Bezeichnung | A | B | C | |
| | CR1206 | 1,60 mm | 1,40 mm | 2,80 mm | |
| | CR0805 | 1,30 mm | 1,10 mm | 1,90 mm | |
| | CR0603 | 0,80 mm | 0,90 mm | 1,70 mm | |
| | CR0402 | 0,60 mm | 0,80 mm | 1,30 mm | |
| | CR0201 | 0,30 mm | 0,35 mm | 0,75 mm | |
| QFP-Bauelemente | | | | | |
|  | Bezeichnung | D | E | F | G |
| | QFP0,5 | 0,50 mm | 1,20 mm | 0,25 mm | 15,20 mm |
| | QFP0,4 | 0,40 mm | 1,20 mm | 0,20 mm | 15,20 mm |
| BGA-Bauelemente | | | | | |
|  | Bezeichnung | H | | I | |
| | BGA1,0 | 1,00 mm | | 0,42 mm | |
| | BGA0,8 | 0,80 mm | | 0,35 mm | |
| | BGA0,5 | 0,50 mm | | 0,28 mm | |

Abbildung 121: Geometriekennwerte des Schablonenlayouts

Anhang Kapitel 5.2

Vorgehensweise Druckversuche:

Druckparameter und Materialien: Rakelgeschwindigkeit 50 mm/s, Rakelkraft 2,5 N/cm, Trenngeschwindigkeit 3 mm/s, Trennabstand 3 mm, Rakellänge 200 mm, Rakelwinkel 60° (15 mm Überhang), Rakelmaterial Edelstahl, Lotpastenmenge 200 g, Leiterplatten (blank FR4) Einfacheuroformat (100 mm x 160 mm x 1,5 mm)

Versuchsablauf: Durchführung von 10 Walkzyklen, Reinigung der Schablonenunterseite (Reinigungsoption Nass/Vakuum/Trocken), Durchführung eines Initialdrucks, Bedrucken von 10 Leiterplatten ohne Reinigung der Schablonenunterseite, messtechnische Erfassung der Qualitätsmerkmale auf den 10 bedruckten Leiterplatten

Bestimmung der kritischen Flächenverhältnisse der Schablonen S1 bis S5:

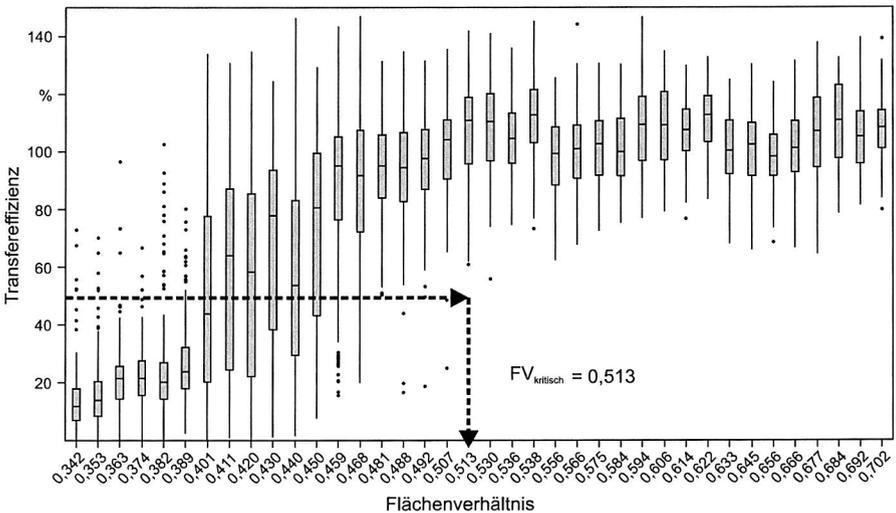


Abbildung 122: Bestimmung des kritischen Flächenverhältnisses von Schablone S1 auf Basis der realen Auslösecharakteristik

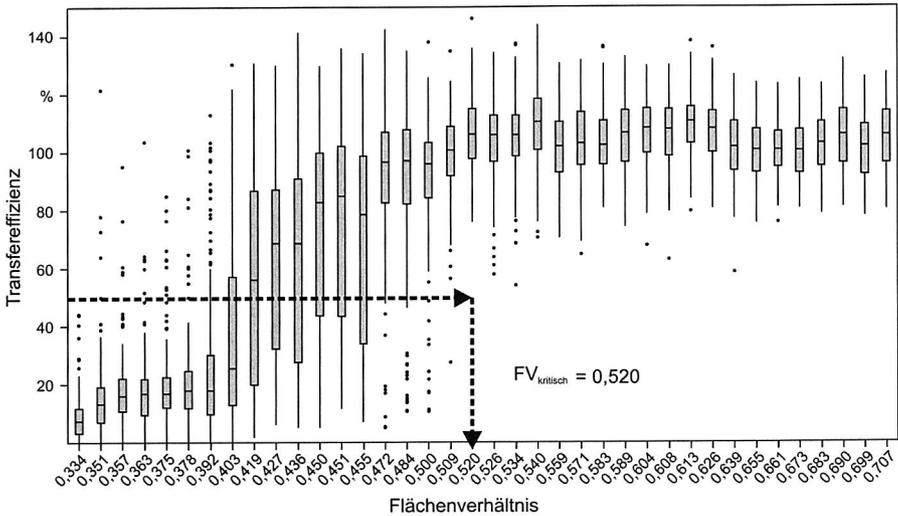


Abbildung 123: Bestimmung des kritischen Flächenverhältnisses von Schablone S2 auf Basis der realen Auslösecharakteristik

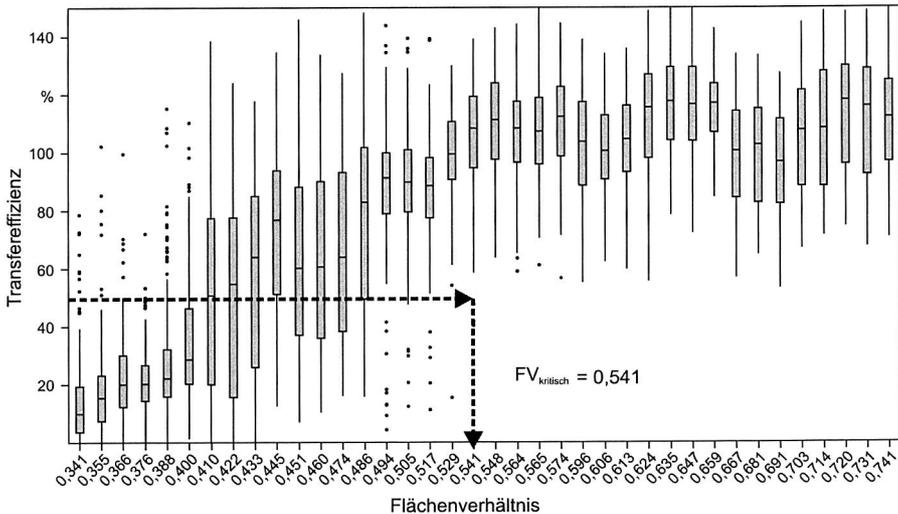


Abbildung 124: Bestimmung des kritischen Flächenverhältnisses von Schablone S3 auf Basis der realen Auslösecharakteristik

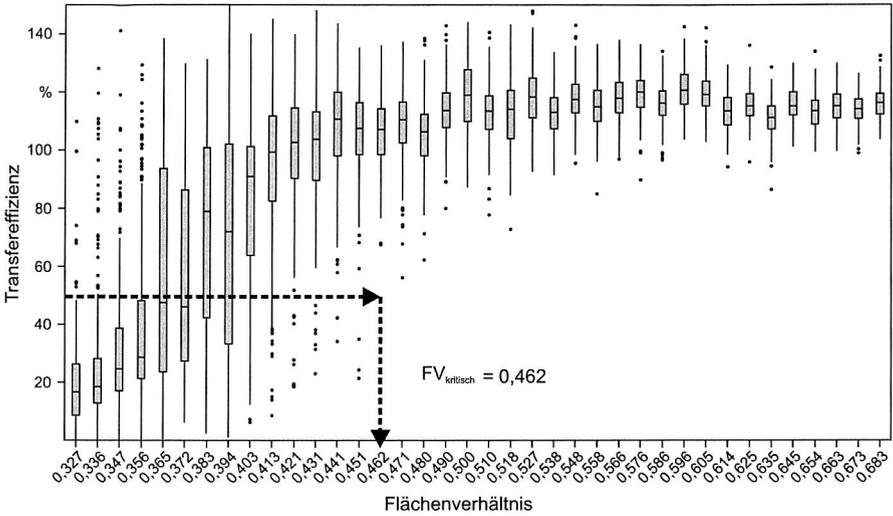


Abbildung 125: Bestimmung des kritischen Flächenverhältnisses von Schablone S4 auf Basis der realen Auslösecharakteristik

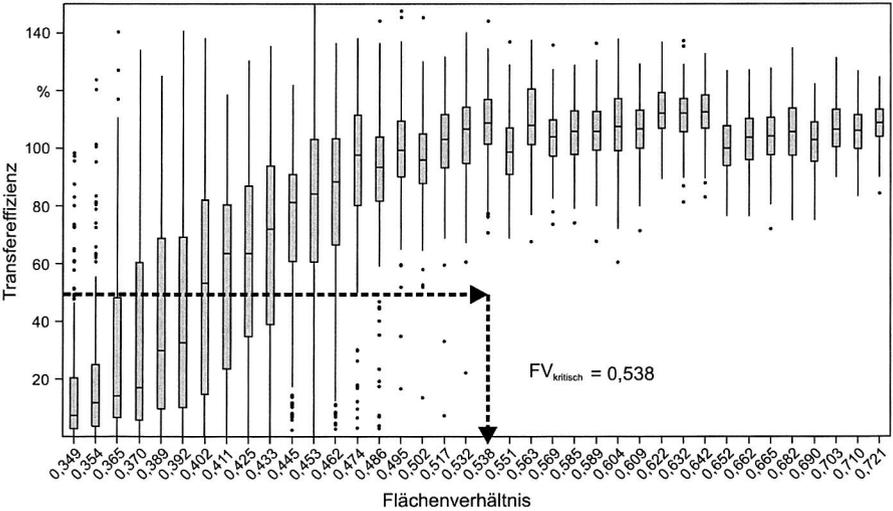


Abbildung 126: Bestimmung des kritischen Flächenverhältnisses von Schablone S5 auf Basis der realen Auslösecharakteristik

Anhang Kapitel 5.3

Geometrie Kennwerte des Leiterplatten- und Schablonenlayouts:

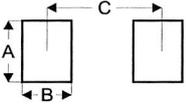
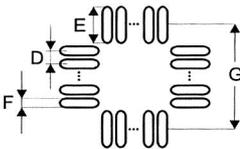
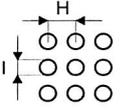
| Chipwiderstände | | | | | |
|---|------------------------|---------|---------|---------|----------|
|  | Bezeichnung | A | B | C | |
| | CR1206 | 1,80 mm | 1,60 mm | 2,80 mm | |
| | CR0805 | 1,50 mm | 1,30 mm | 1,90 mm | |
| | CR0603 | 1,00 mm | 1,10 mm | 1,70 mm | |
| | CR0402 | 0,70 mm | 0,90 mm | 1,30 mm | |
| QFP-Bauelemente | | | | | |
|  | Bezeichnung | D | E | F | G |
| | LQFP128-14mm -4mm | 0,40 mm | 1,25 mm | 0,25 mm | 15,25 mm |
| | LQFP64-14mm -8mm | 0,80 mm | 1,80 mm | 0,50 mm | 15,25 mm |
| BGA-Bauelemente | | | | | |
|  | Bezeichnung | H | | I | |
| | CTBGA84-5mm -7mm | 0,50 mm | | 0,25 mm | |
| | PBGA160-1.0mm -15mm | 1,00 mm | | 0,40 mm | |

Abbildung 127: Geometrie Kennwerte der Anschlussflächen auf der Leiterplatte

| Bauelement | Sollvolumen | Volumenstufe | Schablonen- dicke | Abmessung A | Abmessung B |
|---------------|-----------------------------|--------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| CR1206 | 0,504 mm ³ | 150 % | 190 µm | 1,732 mm | 1,532 mm |
| CR1206 | 0,470 mm ³ | 140 % | 190 µm | 1,677 mm | 1,477 mm |
| CR1206 | 0,437 mm ³ | 130 % | 190 µm | 1,620 mm | 1,420 mm |
| CR1206 | 0,403 mm ³ | 120 % | 150 µm | 1,743 mm | 1,543 mm |
| CR1206 | 0,370 mm ³ | 110 % | 150 µm | 1,673 mm | 1,473 mm |
| CR1206 | 0,336 mm³ | 100 % | 150 µm | 1,600 mm | 1,400 mm |
| CR1206 | 0,302 mm ³ | 90 % | 150 µm | 1,523 mm | 1,323 mm |
| CR1206 | 0,269 mm ³ | 80 % | 150 µm | 1,442 mm | 1,242 mm |
| CR1206 | 0,235 mm ³ | 70 % | 110 µm | 1,566 mm | 1,366 mm |
| CR1206 | 0,202 mm ³ | 60 % | 110 µm | 1,457 mm | 1,257 mm |
| CR1206 | 0,168 mm ³ | 50 % | 110 µm | 1,340 mm | 1,140 mm |

Tabelle 12: Geometrie Kennwerte der Schablonenaperturen des Chipwiderstands CR1206

| Bauelement | Sollvolumen | Volumenstufe | Schablonen- dicke | Abmessung A | Abmessung B |
|---------------|-----------------------------|--------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| CR0805 | 0,322 mm ³ | 150 % | 190 µm | 1,405 mm | 1,205 mm |
| CR0805 | 0,300 mm ³ | 140 % | 190 µm | 1,361 mm | 1,161 mm |
| CR0805 | 0,279 mm ³ | 130 % | 190 µm | 1,316 mm | 1,116 mm |
| CR0805 | 0,257 mm ³ | 120 % | 150 µm | 1,414 mm | 1,214 mm |
| CR0805 | 0,236 mm ³ | 110 % | 150 µm | 1,358 mm | 1,158 mm |
| CR0805 | 0,215 mm³ | 100 % | 150 µm | 1,300 mm | 1,100 mm |
| CR0805 | 0,193 mm ³ | 90 % | 150 µm | 1,239 mm | 1,039 mm |
| CR0805 | 0,172 mm ³ | 80 % | 150 µm | 1,174 mm | 0,974 mm |
| CR0805 | 0,150 mm ³ | 70 % | 110 µm | 1,273 mm | 1,073 mm |
| CR0805 | 0,129 mm ³ | 60 % | 110 µm | 1,186 mm | 0,986 mm |
| CR0805 | 0,107 mm ³ | 50 % | 110 µm | 1,092 mm | 0,892 mm |

Tabelle 13: GeometrieKennwerte der Schablonenaperturen des Chipwiderstands CR0805

| Bauelement | Sollvolumen | Volumenstufe | Schablonen- dicke | Abmessung A | Abmessung B |
|---------------|-----------------------------|--------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| CR0603 | 0,162 mm ³ | 150 % | 190 µm | 0,875 mm | 0,975 mm |
| CR0603 | 0,151 mm ³ | 140 % | 190 µm | 0,843 mm | 0,943 mm |
| CR0603 | 0,140 mm ³ | 130 % | 150 µm | 0,919 mm | 1,019 mm |
| CR0603 | 0,130 mm ³ | 120 % | 150 µm | 0,881 mm | 0,981 mm |
| CR0603 | 0,119 mm ³ | 110 % | 150 µm | 0,841 mm | 0,941 mm |
| CR0603 | 0,108 mm³ | 100 % | 150 µm | 0,800 mm | 0,900 mm |
| CR0603 | 0,097 mm ³ | 90 % | 150 µm | 0,757 mm | 0,857 mm |
| CR0603 | 0,086 mm ³ | 80 % | 150 µm | 0,711 mm | 0,811 mm |
| CR0603 | 0,076 mm ³ | 70 % | 150 µm | 0,662 mm | 0,762 mm |
| CR0603 | 0,065 mm ³ | 60 % | 110 µm | 0,719 mm | 0,819 mm |
| CR0603 | 0,054 mm ³ | 50 % | 110 µm | 0,652 mm | 0,752 mm |

Tabelle 14: GeometrieKennwerte der Schablonenaperturen des Chipwiderstands CR0603

| Bauelement | Sollvolumen | Volumenstufe | Schablonen- dicke | Abmessung A | Abmessung B |
|---------------|-----------------------------|--------------|----------------------|-----------------|-----------------|
| CR0402 | 0,079 mm ³ | 150 % | 150 µm | 0,631 mm | 0,831 mm |
| CR0402 | 0,074 mm ³ | 140 % | 150 µm | 0,607 mm | 0,807 mm |
| CR0402 | 0,068 mm ³ | 130 % | 150 µm | 0,582 mm | 0,782 mm |
| CR0402 | 0,063 mm ³ | 120 % | 150 µm | 0,556 mm | 0,756 mm |
| CR0402 | 0,058 mm ³ | 110 % | 150 µm | 0,528 mm | 0,728 mm |
| CR0402 | 0,053 mm³ | 100 % | 150 µm | 0,500 mm | 0,700 mm |
| CR0402 | 0,047 mm ³ | 90 % | 150 µm | 0,470 mm | 0,670 mm |
| CR0402 | 0,042 mm ³ | 80 % | 150 µm | 0,439 mm | 0,639 mm |
| CR0402 | 0,037 mm ³ | 70 % | 150 µm | 0,405 mm | 0,605 mm |
| CR0402 | 0,032 mm ³ | 60 % | 110 µm | 0,444 mm | 0,644 mm |
| CR0402 | 0,026 mm ³ | 50 % | 110 µm | 0,399 mm | 0,599 mm |

Tabelle 15: Geometriekennwerte der Schablonenaperturen des Chipwiderstands CR0402

| Bauelement | Sollvolumen | Volumenstufe | Schablonen- dicke | Abmessung F | Abmessung E |
|---------------|------------------------------|--------------|----------------------|------------------|------------------|
| QFP128 | 0,0374 mm ³ | 130 % | 140 µm | 0,2193 mm | 1,2193 mm |
| QFP128 | 0,0331 mm ³ | 115 % | 130 µm | 0,2105 mm | 1,2105 mm |
| QFP128 | 0,0288 mm³ | 100 % | 120 µm | 0,2000 mm | 1,2000 mm |
| QFP128 | 0,0230 mm ³ | 80 % | 100 µm | 0,1931 mm | 1,1931 mm |
| QFP128 | 0,0202 mm ³ | 70 % | 80 µm | 0,2085 mm | 1,2085 mm |
| QFP128 | 0,0185 mm ³ | 60 % | 75 µm | 0,2049 mm | 1,2049 mm |
| QFP128 | 0,0144 mm ³ | 50 % | 60 µm | 0,2000 mm | 1,2000 mm |

Tabelle 16: Geometriekennwerte der Schablonenaperturen des QFP-Bauelements QFP128

| Bauelement | Sollvolumen | Volumenstufe | Schablonen- dicke | Abmessung F | Abmessung E |
|--------------|------------------------------|--------------|----------------------|------------------|------------------|
| QFP64 | 0,1591 mm ³ | 130 % | 230 µm | 0,4056 mm | 1,7056 mm |
| QFP64 | 0,1408 mm ³ | 115 % | 210 µm | 0,3954 mm | 1,6954 mm |
| QFP64 | 0,1224 mm³ | 100 % | 180 µm | 0,4000 mm | 1,7000 mm |
| QFP64 | 0,0979 mm ³ | 80 % | 140 µm | 0,4092 mm | 1,7092 mm |
| QFP64 | 0,0857 mm ³ | 70 % | 130 µm | 0,3900 mm | 1,6900 mm |
| QFP64 | 0,0734 mm ³ | 60 % | 110 µm | 0,3941 mm | 1,6941 mm |
| QFP64 | 0,0612 mm ³ | 50 % | 90 µm | 0,4000 mm | 1,7000 mm |

Tabelle 17: Geometrie Kennwerte der Schablonenaperturen des QFP-Bauelements LQFP64

| Bauelement | Sollvolumen | Volumenstufe | Schablonendicke | Abmessung I |
|--------------|------------------------------|--------------|-----------------|------------------|
| BGA84 | 0,0080 mm ³ | 130 % | 110 µm | 0,3044 mm |
| BGA84 | 0,0071 mm ³ | 115 % | 100 µm | 0,3003 mm |
| BGA84 | 0,0062 mm³ | 100 % | 100 µm | 0,2800 mm |
| BGA84 | 0,0049 mm ³ | 80 % | 80 µm | 0,2800 mm |
| BGA84 | 0,0046 mm ³ | 70 % | 75 µm | 0,2800 mm |
| BGA84 | 0,0037 mm ³ | 60 % | 60 µm | 0,2800 mm |
| BGA84 | 0,0031 mm ³ | 50 % | 50 µm | 0,2800 mm |

Tabelle 18: Geometrie Kennwerte der Schablonenaperturen des BGA-Bauelements BGA84

| Bauelement | Sollvolumen | Volumenstufe | Schablonendicke | Abmessung I |
|---------------|------------------------------|--------------|-----------------|------------------|
| BGA160 | 0,0216 mm ³ | 130 % | 150 µm | 0,4283 mm |
| BGA160 | 0,0191 mm ³ | 115 % | 140 µm | 0,4170 mm |
| BGA160 | 0,0166 mm³ | 100 % | 120 µm | 0,4200 mm |
| BGA160 | 0,0133 mm ³ | 80 % | 100 µm | 0,4115 mm |
| BGA160 | 0,0116 mm ³ | 70 % | 80 µm | 0,4304 mm |
| BGA160 | 0,0107 mm ³ | 60 % | 75 µm | 0,4260 mm |
| BGA160 | 0,0083 mm ³ | 50 % | 60 µm | 0,4200 mm |

Tabelle 19: Geometrie Kennwerte der Schablonenaperturen des BGA-Bauelements BGA160

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion
durch wissensbasierte Systeme**
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen
durch den Einsatz der Simulationstechnik**
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität
im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
**Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen**
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens
von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
**Konzeption und Wirtschaftlichkeit
von Planungssystemen in der Produktion**
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
**Technologisch orientierte Montageplanung
am Beispiel der Schraubtechnik**
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung
der rechnerintegrierten Teilefertigung**
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt
**Modulares Planungssystem
zur Optimierung der Elektronikfertigung**
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechbiegeteile**
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung
in Feldkommunikationssystemen**
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3

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

Band 56: Uwe Schönherr
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 71: Michael Steber

**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestor

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**

143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meißner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Lötten komplexer Baugruppen**

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 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**

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**

186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
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
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1994.
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

- Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6
- Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X
- Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8
- Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9
- Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7
- Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5
- Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8
- Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3
- Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7
- Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3
- Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1
- Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X
- Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Nегendandck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung – Verfahrenintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

- Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4
- Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2
- Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7
- Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X
- Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3
- Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-191-1
- Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-192-X
- Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile – Materialeinfluss und Materialverhalten
148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-193-8
- Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-196-2
- Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0
- Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozeßtechnik für das simultane Lötén mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-198-9
- Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren – Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens

164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche

104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-221-7

- Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9
- Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5
- Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
120 Seiten, 117 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3
- Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1
- Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8
- Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung
146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-227-6
- Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-228-4
- Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-230-6
- Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-231-4
- Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-232-2
- Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-233-0
- Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-234-9
- Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-237-3

- Band 171: Martin Prechtl
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien – System- und Prozesstechnik
154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-238-1
- Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-239-X
- Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-240-3
- Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen
136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9
ISBN 3-87525-243-8
- Band 175: Peter Wöflück
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2
- Band 176: Attila Komlódi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9
- Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7
- Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0
- Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4
ISBN 3-87525-251-9
- Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8
- Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6
- Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
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
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6

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

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

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

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen
107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung
178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9

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

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5
133 Seiten, 69 Bilder, 5 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion
149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme
160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlflügeoperationen
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktlagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahlfließschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 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
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 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
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3

Band 219: Andreas Dobroschke
**Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung
wickeltechnischer Produkte**
184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7

Band 220: Azhar Zam
**Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled
Tissue-Specific Laser Surgery**
99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4

Band 221: Michael Rösch
**Potenziale und Strategien zur Optimierung des
Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion**
192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1