

Rüdiger Holzmann

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

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

Tag der Einreichung: 03. Januar 2005
Tag der Promotion: 24. März 2005
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. A. Winnacker
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann (1. Berichterstatter)
Prof. Dr.-Ing. G. Seliger, TU Berlin (2. Berichterstatter)

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.

ISBN 3-87525-217-9
ISSN 1431-6226

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 Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2005
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich herzlich für die engagierte Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die konstruktiven Anregungen und besonders für den wissenschaftlichen Freiraum, den er mir zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger, dem Leiter des Fachgebiets Montagetechnik und Fabrikbetrieb am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferats.

Die Dissertation beruht auf der Bearbeitung verschiedener Kooperationsprojekte im Umfeld der Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die bayerische Forschungstiftung (BFS) sowie durch ergänzende Industrieprojekte unterstützt wurde. Allen beteiligten Projektpartnern möchte ich an dieser Stelle meinen aufrichtigen Dank für die Diskussionsbereitschaft und die Unterstützung aussprechen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere den Mitgliedern der Lehrstuhlgruppe Elektronikproduktion, sei herzlich für die intensiven und fruchtbaren fachlichen Diskussionen und die hervorragende Zusammenarbeit während der gemeinsamen Lehrstuhlzeit gedankt. Hervorheben möchte ich die Herren Dipl.-Ing. T. Bigl, Dr.-Ing. M. Boiger, Dr.-Ing. M. Eisenbarth, Dipl.-Ing. W. Enser, Dr.-Ing. R. Feuerstein, Dipl.-Ing. G. Gion, Dipl.-Ing. D. Kozic, Dr.-Ing. S. Krimi, Dr.-Ing. M. Reichenberger, Dipl.-Ing. C. Schimpf, Dipl.-Ing. P. Wöflück, Dipl.-Ing. B. Zolleiß und für die technische Unterstützung die Herren L. Maußner und H. Schuster. Ein besonderer Dank gilt den studentischen Hilfskräften Dipl.-Ing. H. Balreich und Dipl.-Ing. M. Rösch.

Dank möchte ich darüber hinaus meinen Eltern aussprechen, die mich jederzeit in meinen Entscheidungen bestärkt, gefördert und mir den Weg geebnet haben. Sabine meiner Frau, die mich während dieser Zeit moralisch und aktiv mit Rat unterstützte, gilt mein herzlichster Dank. Durch Ihr Verständnis hat sie ganz wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Rückersdorf, im März 2005

Rüdiger Holzmann

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aktuelle Herausforderungen an die Qualitätssicherung im turbulenten Umfeld der Elektronikproduktion	5
2.1	Abschätzung der Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen	6
2.2	Normen und Richtlinien in der Baugruppenfertigung	8
2.3	Direkte und indirekte Aufgaben der Qualitätssicherung	10
3	Bewertung der Konturstabilität von Weichloten und deren Wirkungen auf die Kontaktausbildung	11
3.1	Anforderungen der Elektronikproduktion an die Verbindungsmedien.....	12
3.1.1	Charakterisierung von Lotlegierungen	12
3.1.2	Eigenschaftsprofil von Verbindungsmedien.....	14
3.2	Einfluss der Verarbeitung auf die Kontaktausbildung und Charakterisierung typischer Fehlerbilder.....	15
3.2.1	Spezifikation untersuchter Lotmedien und Beschreibung der Analyseschwerpunkte	15
3.2.2	Erscheinungsbild der Lotmedien während der Verarbeitung	17
3.2.3	Bewertung der Kontaktstellenausbildung und davon abgeleitete Grenzwerte.....	19
4	Optimierung des Lotpastenauftrages durch bauteilspezifische Modifizierung entscheidender Kenngrößen	23
4.1	Technologische Grundlagen des Pastenauftrages	24
4.1.1	Betrachtung der Verfahrensvarianten	25
4.1.2	Aspekte eines zuverlässigen Medienauftrags.....	27
4.2	Prozessgrößen und Wechselwirkungen beim Pastenauftrag in der Schablonendrucktechnik.....	29
4.2.1	Geometrieform als Kenngröße.....	30
4.2.2	Gestaltungsrichtlinien für die Schablonengestaltung	31

4.3	Prozessevaluierung beim Einsatz mehrstufiger Druckschablonen	32
4.3.1	Gegenüberstellung alternativer Herstellungstechnologien.....	33
4.3.2	Festlegung der Analyseschwerpunkte	38
4.3.3	Analyse der Lotdepotausbildung	44
4.3.4	Vergleich der Verfahren und Darstellung von Optimierungspotenzialen	61
4.4	Analyse alternativer Geometrieformen von Schablonendurchbrüchen und Anschlussflächen	62
4.4.1	Potenziale modifizierter Lotdepotgeometrien	63
4.4.2	Qualitätsgerechte Gestaltung des Schaltungsträgerlayouts	65
5	Optische Inspektion und automatisierte Qualitätsprüfung in der Oberflächenmontage	68
5.1	Gegenüberstellung von Systemen und deren Einsatzfelder	70
5.1.1	Systeme und Verfahren zur optischen Inspektion elektronischer Baugruppen	71
5.1.2	Einsatzpotenziale der dreidimensionalen Inspektion und das entwickelte Analysesystem	73
5.2	Integration von Prüfprozessen in die Fertigungskette	75
5.2.1	Beurteilung von Prozess, Bauteilspektrum und Fehlerverteilung als Basis einer Inspektionsentscheidung	76
5.2.2	Entwickelte Strategie einer Einsatzempfehlung	78
5.3	Erweiterte Anforderungen an die optische Prüftechnologie	82
5.3.1	Charakteristische Leistungsziele bei der Systemauswahl	83
5.3.2	Technologische Anforderungen bleifreier Lote an die automatische optische Inspektion	85
5.3.3	Effizienzanalyse der automatischen optischen Inspektion	86
6	Qualifizierung der Prozessschritte in der Nacharbeit.....	87
6.1	Grundlegende Betrachtung des Nacharbeitsprozesses	89
6.1.1	Technologische Unterschiede in der Wärmeeinbringung	91
6.1.2	Wirkung alternativer Verbindungsmedien und feiner Strukturen auf Systemlösungen und Prozesse in der Nacharbeit	94
6.2	Gegenüberstellung von Prozessvarianten in der Nacharbeit	97
6.2.1	Einteilung der Teilprozesse unter Zuverlässigkeitsgesichtspunkten..	98
6.2.2	Vorbereitung der Anschlussflächen für den Einlötvorgang in der Nacharbeit	101
6.2.3	Temperaturprofilierung im Lötprozess der Nacharbeit.....	115

6.2.4	Einsatz von Stickstoff als Lötunterstützung in der Nacharbeit.....	126
6.3	Zuverlässigkeit nachgearbeiteter Baugruppen.....	127
6.3.1	Belastungsarten zur Abschätzung der Zuverlässigkeit im Feldeinsatz.....	128
6.3.2	Verhalten nachgearbeiteter Kontakte nach zyklischer Temperaturschockbelastung.....	129
7	Strategien zur Qualitätsverbesserung durch Prozessdatenanalysen.....	133
7.1	Konzepte zur Online-Produktionsdiagnose	134
7.1.1	Methoden zur Prozessbewertung in der Elektronikproduktion	134
7.1.2	Grundprinzip der Analysemethode.....	137
7.2	Datentechnische Vernetzung von Prozessstufen	138
7.2.1	Konzeption einer Kommunikationsstruktur.....	139
7.2.2	Realisiertes System zur flexiblen Anlagenvernetzung	142
7.3	Implementierung eines rechnergestützten Analysewerkzeuges	144
7.3.1	Aufbereitung der gesammelten Prozess- und Prüfdaten	144
7.3.2	Konzeptioneller Aufbau	146
7.3.3	Anwendung des Moduls zur Prozessanalyse	149
7.4	Potenziale zur Prozessoptimierung	150
7.4.1	Diagnose möglicher Prozessfehler	150
7.4.2	Gewichtung der Prozessparameter in der Oberflächenmontage.....	152
7.5	Gesamtbewertung des Einsatzpotenzials neuronaler Analysemethoden für die Elektronikproduktion	153
8	Zusammenfassung	154
9	Literaturverzeichnis.....	156
	Anhang.....	169

1 Einleitung

Die wirtschaftliche Entwicklung erfordert eine kontinuierliche Innovationskraft, die neue Marktsegmente erschließt und sich damit im globalen, technologischen Wettbewerb erweiterte Potenziale eröffnet [145]. Diese Aufgabe obliegt seit Jahren der Elektronik, die in Verbindung mit mechanischen und softwaretechnischen Aufgaben zu mechatronischen Produkten aktuell eine weitere Fortentwicklung beschreitet [24]. Getragen wird dieser Fortschritt durch vielfältige Neuerungen auf den Gebieten der Werkstoffe, der Verfahrenstechniken und den Produktionsprozessen, die zunächst jeweils im Sektor der Halbleiter auf neue elektronische Bauteile wirken. Die damit einhergehende weitere Miniaturisierung, alternative Anschlussgeometrien und eine höhere Integrationsdichte auf Bauelementeebene ermöglichen in der Elektronikproduktion immer kleinere Baugrößen bei gleichzeitig erhöhter Funktionalität. Dies führt zu grundsätzlich neuartigen Einsatzformen, die bisher zur Durchdringung nahezu aller Produktfelder mit elektronischen Applikationen geführt haben [29].

Entsprechend ihrer vielfältigen Anwendungen ergeben sich unterschiedlichste Anforderungsprofile an elektronische Baugruppen. Um diesen nachzukommen, lassen sich vereinfacht drei Gruppen unterscheiden, die in ähnlicher Ausrichtung bereits in der internationalen Richtlinie zur Bewertung von Kontaktstellen (IPC-A-610C, Acceptability of Electronic Assemblies) Berücksichtigung finden [68]. Die Wichtigkeit der Produktzuverlässigkeit stellt dabei den wesentlichen Gliederungsaspekt dar. Eine Analyse des in Deutschland (vgl. Bild 1) sowie in Westeuropa vorherrschenden Elektronikmarktes mit den tragenden Sektoren der Kfz- und Industrieelektronik, unterstreicht diesbezüglich die maßgebliche Bedeutung der Fertigung zuverlässiger Produkte.

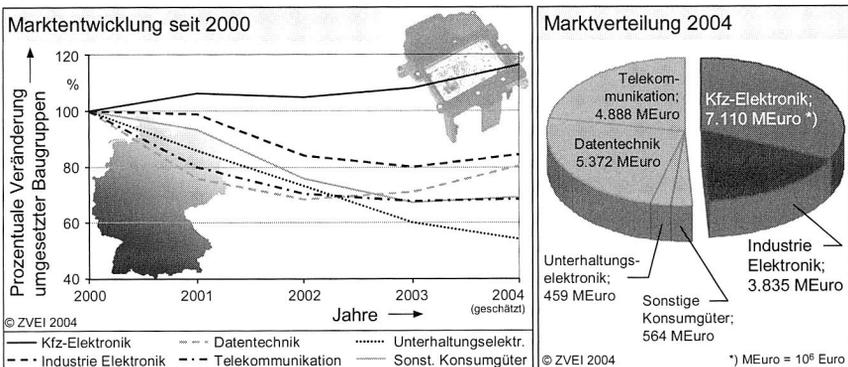


Bild 1: Markt elektronischer Baugruppen in Deutschland, gegliedert nach den wesentlichen Anwendungsgruppen [106]

Die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen wird seit Jahren durch die Faktoren Kundenakzeptanz und Wirtschaftlichkeit bestimmt. In Folge einer kontinuierlichen Technologiefortentwicklung ergeben sich stetig neue Herausforderungen an die Qualitätssicherung im Fertigungsprozess. Die Reduzierung von Fehlern in der Produktionskette oder deren frühzeitige Erkennung sowie die absolute Vermeidung von Feldausfällen stellen damit die entscheidenden Zielgrößen dar. Neben wirtschaftlichen Folgen, die im Imageverlust beim Kunden liegen [124], führt jeder Fehler zu einer kostenrelevanten Reduzierung des in der Wertschöpfung erzielten Erfolgs.

Beide Forderungen wirken auf die Produktion, die diese durch umfangreiche Prüfeinrichtungen zu erfüllen versucht. Die steigende Komplexität der Baugruppen, verbunden mit einer wachsenden Anzahl an Kontaktstellen, führt indessen zur Erhöhung des Ausfallrisikos. Daneben kommen Prüfsysteme durch verdeckte Anschlussstrukturen, feinste Anschlusskontakte und hohe Packungsdichten an die Leistungsfähigkeit ihres Erkennungs- sowie Auflösungsvermögens [132]. Demgegenüber liegt die einzige Alternative in der Prozessbeherrschung, die nur durch ganzheitliche Prozesstransparenz zu erreichen ist. Stabile und beherrschte Prozesse erfordern aber eine umfassende Prozesskenntnis, die nur durch Studien und Analysen zu erreichen ist.

Wie wichtig die Umkehr von der Prüfung zur Beherrschung der Produktion ist, zeigt sich auch in aktuellen Studien aus dem Automotive Sektor, die über 60 % aller Feldausfälle entsprechenden Fehlern in der Elektronik zuordnen (Bild 2). Damit verbunden, bewerten zwar immer noch über 50 % der Kunden den Funktions- und Sicherheitsgewinn im Automobil als positiv. 17 % von Ihnen haben jedoch bereits negative Erfahrungen durch Systemausfälle erlebt, die auf Unzulänglichkeiten in der Elektronik zurückzuführen waren [98]. Diese Mängel an Zuverlässigkeit werden speziell bei Automobilen der Oberklasse durch den erhöhten Elektronikanteil deutlich und führen durch die entsprechende Erwartungshaltung der Kunden zu weit reichenden Konsequenzen. Insbesondere die Akzeptanz von neuen Entwicklungen, wie den unterschiedlichen „X by wire“ Konzepten, könnte in Folge der bisherigen Unzuverlässigkeit eine Zurückhaltung bei den Konsumenten bewirken, was speziell die erfolgreiche Markteinführung neuer elektronischer Systemlösungen einschränken bzw. verhindern würde.

Die entscheidenden Stellglieder zur nachhaltigen Verbesserung dieses aktuell zu beobachtenden Szenarios liegen in Strategien und Methoden der Qualitätssicherung. Diese müssen den gesamten Herstellungsprozess umfassen und damit neben der Produktion auch Bereiche wie Produktentwicklung, Design oder Komponentenprüfung einschließen. Die getrennten Betrachtungen umsetzbarer Produktinnovationen in der Entwicklung und zuverlässig herstellbarer Produkte in der Massenfertigung gilt es zusammenzuführen. Nur durch eine solche Kombination ist die Qualitätssicherung befähigt

higt, die Produktion auf Anforderungen der Entwicklung vorzubereiten oder Grenzen des technologisch wie wirtschaftlich Machbaren vorzugeben.

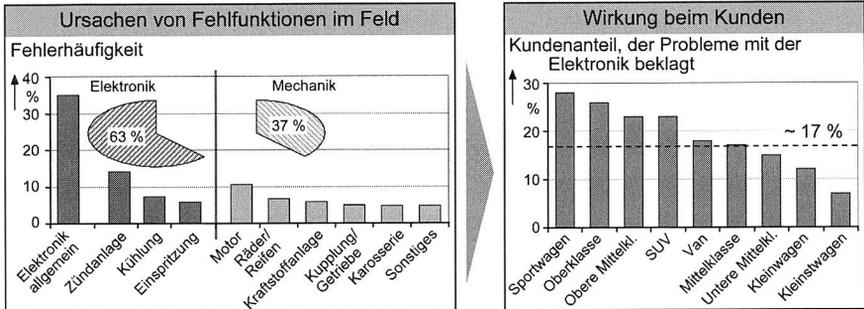


Bild 2: Fehlerschwerpunkt Elektronik am Beispiel des Automotive Sektors [98]

Mit dieser notwendigen Zielsetzung Entwicklung und Produktion zu koppeln, ergeben sich grundsätzlich neue Herausforderungen an die Qualitätssicherung. Bezogen auf die nächste in der Produktion zu leistende Technologiestufe müssen alternative Prozesstechnologien, Möglichkeiten der Umsetzung und Grenzen – zeitlich vorgelagert – der Qualitätssicherung bekannt sein. Hierzu sind Erfahrungen in der Anwendung und Lösungsstrategien gefordert, die nur durch grundlagenorientierte Untersuchungen entlang der gesamten Produktionskette zu leisten sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten diesbezüglich wesentliche Erkenntnisse ermittelt werden, die in der Gesamtheit einen maßgeblichen Beitrag zur Verbesserung von Qualität und Zuverlässigkeit hochintegrierter Flachbaugruppen erschließen. Dabei stehen weniger theoretische Betrachtungen im Vordergrund, die Arbeit soll vielmehr den anwendungstechnischen Rahmen für eine prozessbegleitende Qualitätssicherung aufbauen. Speziell die noch kritischen Prozesse und technologisch neue Anforderungen an die Elektronikproduktion müssen, wie in Bild 3 zusammengefasst, die Schwerpunkte einer derartigen Ausrichtung bilden.

Einführend soll ein kurzer Überblick in das aktuelle Aufgabenfeld der Qualitätssicherung die Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik beleuchten. Neben notwendigen Grundlagen der Baugruppenanalyse werden in Kapitel 2 auch Normen und Richtlinien angeführt, die teilweise als Analysegrundlage dienen oder zur Ergebnisbewertung herangezogen wurden.

Die Produktqualität wird wesentlich durch die Beständigkeit aller in der Elektronikproduktion aufgebauten Verbindungsstellen bestimmt. Ausschlaggebend hierfür ist neben der Verarbeitung insbesondere das Grundmedium. Dies betrifft in der Anwendung zu-

meist bleihaltige bzw. zukünftig bleifreie Verbindungsmedien. Die Verarbeitbarkeit dieser ist zumeist analysiert und gut dokumentiert. Die Wechselwirkung mit der Verarbeitungsdauer, speziell bei den bleifreien Pasten, wurde jedoch bisher kaum untersucht. Daher muss vor einer prozessorientierten Sicht auf die Zuverlässigkeit der Prozesse, eine eingehende Prüfung dieses Wirkgefüges erfolgen (Kapitel 3). Auf diesen Ergebnissen aufbauend, schließen sich Analysen des allgemein als kritisch bezeichneten Prozesses „Pastenauftrag“ an. In Kapitel 4 werden dazu Potenziale der Verarbeitbarkeit mit klassischen planaren Schablonen vorgestellt und speziell die Anforderungen hochintegrierter Flachbaugruppen mit der Technologie „Stufenschablone“ aufgegriffen.

Der technologische Fortschritt wirkt wie beispielsweise die Stufenschablone zeigt, auch auf Fertigungsprozesse der Elektronikproduktion und führt dabei zu gewissen Prozessverbesserungen. Nachdem sich die Komplexität der Baugruppen parallel dazu ebenfalls verstärkt, ist eine absolut fehlerfreie Produktion nicht zu erreichen. Inspektion und Prüfung sind weiterhin erforderlich und müssen aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll und zielorientiert eingesetzt werden. Dazu werden entsprechende Strategien in Kapitel 5 vorgestellt. Im Zuge einer Qualitätsprüfung kommt der Fehlerbehebung eine entscheidende Stellung zu. Eine einheitlich hohe Qualität der gefertigten Produkte ist nur durch eine zuverlässige Nacharbeit zu erreichen. Die Ergebnisse grundlagenorientierter Untersuchungen dieses Prozessschrittes sind mit Prozessalternativen wie Einstellungsempfehlungen in Kapitel 6 zusammengefasst.

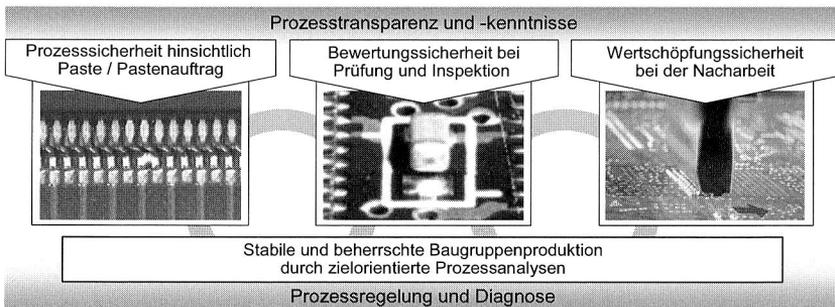


Bild 3: Herausforderungen an Qualitätssicherung zur Prozessbeherrschung

Eine ganzheitliche Strategie zur Verbesserung von Qualität und Zuverlässigkeit erfordert auch prozessübergreifende Ansätze. Hierzu wurde das in Kapitel 7 vorgestellte System zur Prozessoptimierung konzipiert und an realen Prozessdaten verifiziert. Das hieraus entwickelte, rechnergestützte Analysewerkzeug ermöglicht auf der Basis neuronaler Simulationsmodelle eine schnelle Prozessregel und kann in zweiter Stufe die Fehlerdiagnose in der Elektronikproduktion unterstützen.

2 Aktuelle Herausforderungen an die Qualitätssicherung im turbulenten Umfeld der Elektronikproduktion

Die Produktion elektronischer Baugruppen ist seit Jahren geprägt durch die hochdynamische Entwicklung bei Bauelementen, Schaltungsträgern und Verbindungsmedien bei gleichzeitig erhöhten Anforderungen an Prozessbeherrschung und Produktzuverlässigkeit. Damit ergeben sich grundsätzlich neue Anforderungen an Qualitätssicherung, Diagnose und Prozessregelung. Bauteile mit einem Anschlussraster von unter 500 µm und flexible Substrate in Mehrlagenteknik müssen im Rahmen stabiler Prozesse verarbeitet werden [12]. Für die Qualitätssicherung gilt es daher, Methoden und Prüfverfahren zur Verfügung zu stellen, die diesen Herausforderungen nachkommen [158]. Der besondere Anspruch liegt dabei in der Vision einer Null-Fehler-Fertigung unter Berücksichtigung technologisch-wirtschaftlicher Aspekte [41].

Vor dem Hintergrund eines stetig steigenden Kostendrucks und parallel zu den technologischen Herausforderungen der Produktion ist eine fehlerfreie Produktion nicht zu realisieren [116] [146]. Trotzdem muss sich die Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion an der Sicherstellung der Fähigkeit der Prozesse und der damit verbundenen Ausrüstung orientieren. Nur wenn diese die gestellten Fertigungsaufgaben mit den vorgegebenen Maschineneinstellungen erfüllen können, lassen sich auch Ergebnisse in den geforderten Toleranzen erreichen. Um diese Eigenschaften zu quantifizieren, entwickelte die Automobilindustrie in den 80er Jahren so genannte Prozessfähigkeitskoeffizienten. Diese zunächst in der Montage erfolgreich eingesetzten Faktoren wurden mit Beginn der 90er Jahre auch von den Elektronikproduzenten als Qualitätsnachweis gefordert. Durch die einfache Gegenüberstellung von Soll- und Ist-Werten erwies sich der Bestückprozess zunächst als ideal, um entsprechende Rechenvorschriften für Fähigkeitskoeffizienten zu ermitteln [168]. Für die Prozesse der Elektronikproduktion werden darauf aufbauend entsprechende Grundlagen zur Ermittlung von Maschinen- und Prozessfähigkeit beispielsweise in [89] und [99] dargestellt. Die Verfolgbarkeit der Fähigkeitskoeffizienten macht aber eine direkte Verknüpfung von Fertigungsprozessen mit qualitätssichernden Prüfungen erforderlich [142]. Nachdem die Nachverfolgbarkeit in der Elektronikproduktion zumeist absolut gefordert ist, ist diese Kopplung im Allgemeinen gegeben.

Vom Nachweis der Fähigkeit einer Produktion lässt sich nicht auf eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Produkte schließen. Da sich Prozessunzulänglichkeiten präventiv erkennen lassen, sollte jedoch die Funktionsfähigkeit der Produkte bei Auslieferung absolut gegeben sein. Aussagen zur Zuverlässigkeit des Produktes während der veranschlagten Lebensdauer sind aber nur bedingt möglich. Hier spielen eingesetzte

Werkstoffe in den Komponenten und den Verbindungsmedien eine Rolle, die sich nur bei Fertigprodukten in ihrem Wirkgefüge zeigen. Aber genau diese Abschätzung der Funktionsfähigkeit während der Lebensdauer kann Optimierungen bereits in der Entwicklung anstoßen und damit zur nachhaltigen Verbesserung der Produkte führen. Damit verbunden, ergeben sich neue Herausforderungen an die Qualitätssicherung, die eine Abschätzung von Belastungszuständen im Produkteinsatz durch Modellbetrachtungen erfordern.

2.1 Abschätzung der Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen

Die Zuverlässigkeit gelöteter Verbindungsstellen betreffend, existiert eine mannigfaltige Literatur. Einige Autoren publizieren hierbei Modelle zur Prognose der Lebensdauer, die an die experimentellen Untersuchungen angepasst sind. Eine Aussage zur Genauigkeit dieser Modelle wird hierbei von fast keinem Autor angegeben. Die Einschätzung der Genauigkeit verschiedener Methoden wird noch dadurch erschwert, dass alle Autoren leicht unterschiedliche Parametersätze oder gar Modelle verwenden [70] [115] [143]. Dennoch reduzieren sich die verwendeten Modelle auf einige wenige Grundprinzipien. Allen heutigen Methoden gemeinsam ist die Verwendung des Finite-Elemente Prinzips zur lokalen Analyse des Spannungs- / Dehnungszustands und die Einbeziehung der unelastischen Prozesse, welche für die Zerrüttung der Lötstellen verantwortlich gemacht werden.

Übertragen auf den realen Analysefall einer elektronischen Baugruppe bedeutet dies entsprechende Spannungs- und Dehnungsbelastungen aufzubauen, um so eine Dauerbeanspruchung zu simulieren. Diese Simulation muss die Einflüsse des Produktlebens in einem vertretbaren Zeitraum auf die Baugruppe abbilden und so eine Fehleranalyse oder eine Abschätzung einer bestimmten Lebensdauer ermöglichen. Ausschlaggebend ist der Beschleunigungsfaktor, der eine Lebensbelastung von Jahren auf eine Analysedauer von Wochen bzw. Monaten überträgt. Zu unterscheiden sind dabei Beanspruchungszustände nach Temperatur-Feuchte, Temperaturwechsel, Temperaturschock und den neuerdings immer öfter geforderten mechanischen Vibrationsbelastungen. Je nach Anforderungen des realen Einsatzes, die wesentlich durch die Anwendungsgruppe (z. B. Automotive) beschrieben werden, lassen sich unterschiedliche Beschleunigungsfaktoren ermitteln. Für Geräte der Telekommunikation liefert die Norm ETS 300-019-1-3 beispielsweise die entsprechende Analysebasis, die den Belastungsbereich beschreibt und damit den Beschleunigungsfaktor festlegt. [57]

Das Grundprinzip der beschleunigten Alterung macht Bild 4 deutlich. Geht man von einem Arbeitsbereich aus, in dem sich die realen Belastungskriterien wie Temperatur bzw. Luftfeuchte bewegen, ergeben sich unterschiedliche Belastungsgrenzen, die je

nach Analyseausrichtung zur schnellen Ermittlung von Fehlern überschritten werden können oder zur Abschätzung der Lebensdauer einzuhalten sind.

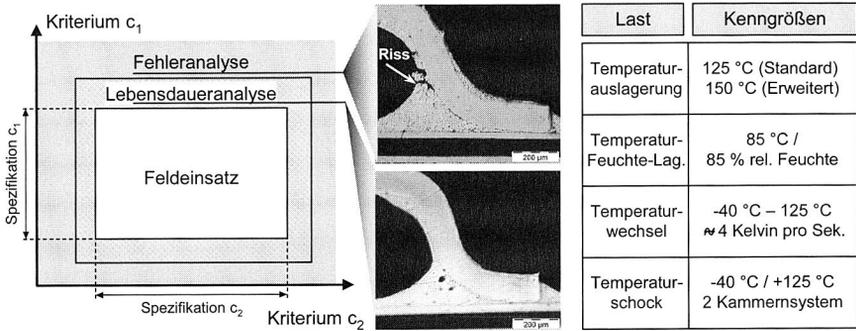


Bild 4: Belastung der Baugruppen im Feldeinsatz und deren simulierte Überbelastungen zur zeitverkürzten Analyse von Fehlern bzw. der Lebensdauer

Abhängig vom Untersuchungsobjekt (Bauteil, Substrate bzw. gesamte Baugruppe) lassen sich unterschiedliche Berechnungsmodelle heranziehen. So wird in Analogie zur Thermodynamik die Reaktionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur mit der Gleichung von Arrhenius beschrieben [102]. Sind weitere Kriterien, wie beispielsweise die Feuchte, zur Beschreibung heranzuziehen, kann das Modell nach Eyring angewandt werden, welches auf Prinzipien der Quantenmechanik eine Erweiterung der Arrhenius-Gleichung darstellt [99]. Gleiches gilt für die Temperatur-Feuchte-Abhängigkeit nach Reich-Hakim. Beide werden vorzugsweise zur Analyse der Zuverlässigkeit von Bauelementen herangezogen. [153]

Das wohl entscheidende Modell für elektronische Baugruppen beschreibt die Coffin-Manson-Beziehung zur Lebensdauerabschätzung. Dieses auf Temperaturwechsel basierende Modell führt die Belastungen auf mechanische Spannungszustände zurück, die durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten ausgelöst werden. Diese Verformungen führen zu Spannungen, die unter anderem auf Lötverbindungen, innerhalb und außerhalb von Bauelementen, Beanspruchungen verursachen. Die Beziehung von Coffin-Manson ist ein Sonderfall der Berechnung eines Ermüdungsschadens bei Metallen [115]. Dabei hat das Modell die Akkumulation von viskoplastischen Verformungsenergien zur Grundlage. Bei Lötverbindungen und unter Berücksichtigung der für Lötverbindungen charakteristischen Werkstoffkennwerte verbleibt der zyklisch plastische Dehnbereich für die mittlere Bruchlastspielzahl [133]. Damit ergeben sich die erforderliche Prüfingszahl und die Prüfzyklen durch eine Verknüpfung der Binomialverteilung mit der Weibull-Verteilung:

$$\frac{t_{\text{stress}}}{t_{\text{real}}} = \left[\frac{\ln(1 - P_A) / n}{\ln(1 - F(t_{\text{real}}))} \right]^{-b} \tag{1}$$

mit den Größen:

- t_{stress} = charakteristische Lebensdauer (Prüfzeit),
- $F(t)$ = Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t_{real} ,
- n = Anzahl der Prüflinge und
- t_{real} = in der Praxis auftretende Zeit,
- P_A = Aussagesicherheit,
- b = Weibull-Steilheit.

Die Weibull Verteilung gilt als die wichtigste Verteilung für Zuverlässigkeitsprüfungen [142]. Mit dem dafür herangezogenen Lebensdauernetz lässt sich die charakteristische Lebensdauer t_{stress} und die Weibull-Steilheit grafisch ermitteln, die in Gleichung (1) eingesetzt, eine Beziehung zur realen Lebensdauer ermöglicht (vgl. Bild 5).

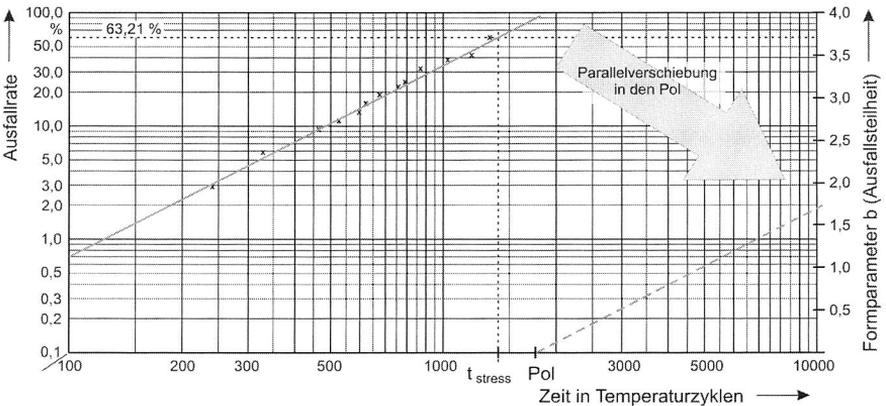


Bild 5: Anwendung des Lebensdauernetzes der Weibull Verteilung

Neben der Coffin-Manson-Beziehung sind auch andere Modelle zu Lebensdauerabschätzungen heranzuziehen. Nachdem sich diese im Ergebnis teilweise deutlich unterscheiden, gibt es, wie auch [115] zeigen konnte, erheblichen Bedarf an Abstimmung, um durch fundierte Aussagen die Basis für eine Zuverlässigkeitsbewertung zu schaffen.

2.2 Normen und Richtlinien in der Baugruppenfertigung

Eine unverzichtbare Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit vorgegebener Qualitätsmerkmale liegt im fundierten Wissen über die prozessorientierte Umsetzung eines Produktes. Durch die Nichterfüllung dieses einfachen Zusammenhangs lassen sich in der Baugruppenfertigung wesentliche Ursachen für Qualitätsmängel belegen. Daher versuchen entsprechende Qualitätsmanagementsysteme hier Abhilfe für mehr Trans-

parenz in Vorgängen und Prozessen zu schaffen. Mit Ausnahme von Anwendern aus der Militär- und Raumfahrttechnik haben sich als Basis die Normen DIN ISO 9000-9004 weltweit in der Praxis bewährt [143]. Im Rahmen einer durch entsprechend akkreditierte Organisationen durchgeführten Auditierung lassen Unternehmen ihre Systeme nach DIN ISO 9002 zertifizieren, um z. B. vom Kunden gefordert, einen Nachweis Ihrer Fertigungstransparenz zu erbringen [8]. Ohne dies zu bewerten, zeigen erste Erfahrungen einen positiven Effekt, da die Mitarbeiter im Rahmen der Vorbereitung einer Auditierung, die nicht zu unterschätzen ist, ein besseres Verständnis über die Vorgänge erhalten und damit parallel einen besseren Kenntnisstand erwerben.

Für die Anforderungen in der Elektronikproduktion ist dies zwar absolut notwendig, aber oftmals speziell in der Prozessorientierung nicht ausreichend. Fachbezogene Richtlinien schließen diese Lücke und müssen von den Verantwortlichen für Entwicklung, Produktion und Inspektion verstanden und aufgabenspezifisch angewendet werden. Die Mehrzahl dieser Richtlinien werden von den zwei Organisationen „JEDEC Solid State Technology Association“ (JEDEC Standards) und „Institute of Interconnecting and Packaging Electronic Circuits“ (IPC Standards) herausgegeben. Historisch sind immer noch einige MIL-Richtlinien (Military Standards) in Gebrauch, die aber sukzessive von den oben genannten Organisationen (und wenigen weiteren internationalen und nationalen Verbänden) überarbeitet werden. Die übergreifende Ausrichtung dieses Richtlinienwesens liegt in der Standardisierung von Produkten und Vorgängen, um eine bessere Marktdurchdringung zu erreichen [125].

Die internationale Ausrichtung dieser Richtlinien macht die Abbildung aller Aspekte weltweit angebotener elektronischer Teilkomponenten (Bauteile, Schaltungsträger und Verbindungsmedien) erforderlich. Dazu kommen noch unterschiedliche Anforderungen gemäß dem Feldeinsatz, was wiederum in einzelnen Richtlinien berücksichtigt werden müsste. Beispiel hierfür ist die IPC-A-610C, die drei Klassen nach Gebrauchsanforderungen definiert und damit eine Abstufung der Genauigkeitsanforderungen an die Lötkontakte erlaubt [68]. Eine Zusammenstellung der Normen und Richtlinien, die auch zu den nachstehenden Analysen herangezogen wurden, zeigt folgende Liste.

- Systementwicklung: IPC-D-279, IPC-SM-782A
- Baugruppenproduktion: J-STD-004, IPC-7711
- Prüfung und Inspektion: J-STD-001/002, IPC A 610C, IPC-SM-785, IPC-D-279

Die Bewertung dieser nach Anwendbarkeit und Einsatzgrenzen ist eine zentrale Aufgabe der firmeninternen Qualitätssicherung und muss abhängig von Produktspektrum und Einsatzforderungen beantwortet werden. Dies macht eine entsprechende Wissensbasis erforderlich, die auf umfassenden Prozesskenntnissen beruht.

2.3 Direkte und indirekte Aufgaben der Qualitätssicherung

Die vielfältigen Anforderungen an die Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion sind unumstritten. Deren Erfüllung wird durch produktionstechnisch anspruchsvolle Weiterentwicklungen jedoch immer entscheidender. Demzufolge sind zwei Ausrichtungen der Qualitätssicherung zu unterscheiden. Die eine Gruppe umfasst indirekte Aufgaben, die eher konzeptionell ausgerichtet sind und die Grundlage jedes Qualitätskonzeptes bilden müssen. Hierzu zählen die bereits dargestellten Aspekte wie Zuverlässigkeitsbetrachtung oder Richtlinienanwendung. Nicht zuletzt durch die Umsetzung der DIN ISO 9000ff sind Unternehmen hier zumeist gut aufgestellt. [154]

Verbesserungspotenzial lässt sich aber insbesondere in der zweiten Gruppe, den direkten Aufgaben der Qualitätssicherung, erkennen. Hier erschließen sich, wie in Bild 6 gezeigt, mehrere Aspekte, die zu maßgeblichen Verbesserungen in der Baugruppenproduktion führen. [139]



Bild 6: Aufgabenschwerpunkte einer ganzheitlichen Qualitätssicherung

Diese Notwendigkeit aufgreifend, werden im Folgenden zunächst Erkenntnisse aus umfangreichen Prozessanalysen dargestellt sowie Verbesserungsmöglichkeiten vorgeschlagen. Diese Betrachtungen erweiternd werden Strategien vorgestellt, um durch Datenanalyse einen geschlossenen Regelkreis zur Qualitätssicherung zu etablieren.

3 Bewertung der Konturstabilität von Weichloten und deren Wirkungen auf die Kontaktausbildung

Die Fertigung nahezu jeden Produktes folgt den Anforderungen, die sich aus der Zusammenführung von Komponenten bzw. Halbzeugen ergeben. Neben den Aufgaben zur Prozessentwicklung und Prozessoptimierung beeinflusst der Zustand dieser Teile maßgeblich die Gesamtproduktqualität. Das oft zitierte Wort der Chargenqualität steht als Synonym für Zuverlässigkeitsschwankungen der Teilekomponenten und kann für ganze Serien erhöhte Ausfallraten bzw. erhebliche Nacharbeit bedeuten [95].

Übertragen auf die Produktion elektronischer Baugruppen lassen sich grob drei Komponenten unterscheiden. Im Einzelnen sind dies Bauelemente mit unterschiedlichen Geometrieformen, Größen und Anschlusskontakten und die Leiterplatten, flexibel bzw. starr zumeist in mehrfacher Lagenstruktur ausgeführt, welche die Basis der spezifischen elektronischen Schaltung tragen. Nicht zuletzt die Verbindungsmedien, welche mit den zuerst aufgeführten Montagepartnern die elektronische Funktionalität und eine mechanisch stabile Verbindung herstellen sollen. Abgesehen von dieser allgemeinen Darstellung gibt es Sonderverfahren, wie das Laserstrahlschweißen, bei dem Bauteile und Schaltungsträger direkt kontaktiert werden oder Verbindungen auf Basis des mechanischen Reibschlusses, was beispielsweise für die Einpresstechnik gilt [24]. Bei beiden ist keine Zugabe von Verbindungsmedium erforderlich.

Für die standardmäßigen Produktionsaufgaben der Baugruppenfertigung kommen jedoch vorzugsweise die drei Elemente (Bauteil, Schaltungsträger und Lotpaste) zur Anwendung. Stellt man die Aufgaben von Bauelementen, Schaltungsträgern und Verbindungsmedien gegenüber, wird die zentrale Aufgabe der zuletzt genannten Komponente deutlich. Durch eine Stoffänderung vom pastösen über den flüssigen zum festen Zustand übernimmt das Verbindungsmedium produktionsunterstützende Aufgaben, wie beispielsweise bei der Selbstzentrierung von Bauteilen, und sorgt schließlich für eine feste Verbindung der beiden Komponenten.

Trotzdem beschäftigen sich Studien zumeist nur am Rande mit den Verbindungsmedien. Neben den Prozessen der Elektronikproduktion stehen Aspekte zur Verarbeitung neuartiger Substratwerkstoffe oder weiter miniaturisierter Bauelemente im Mittelpunkt bisheriger Untersuchungen. Dies gilt selbst für Studien zur anstehenden Einführung bleifreier Lotwerkstoffe. Das Verbindungsmedium stellt aber, wie in [111] und [140] belegt, ein komplexes System mit direkter Wirkung auf Qualität und Zuverlässigkeit dar. Vor einer prozessorientierten Sicht gilt es folglich, diese wesentliche Komponente näher zu betrachten.

3.1 Anforderungen der Elektronikproduktion an die Verbindungsmedien

Seit den Anfängen der modernen Elektronikproduktion folgt das Verbindungsmedium den Forderungen, die sich aus der Aufbauform der Produkte und dessen Einsatzfeldern ergeben. Dabei sind im Wesentlichen zwei Entwicklungsschritte zu nennen. Zunächst führte Mitte der achtziger Jahre die aufkommende Oberflächenmontage zu einer grundsätzlichen Umstellung im Einsatz der Verbindungsmedien. Bis dato war die Aufbautechnik nur mit bedrahteten Bauelementen möglich. Zur Kontaktierung kam erst im letzten Prozessschritt das schmelzflüssige Verbindungsmedium zum Einsatz. Die Baugruppen wurden dabei voll bestückt über Wellen- bzw. Fontänenlötanlagen geführt, wobei sich die Kontaktstellen auf der Baugruppenunterseite befanden. Die Größe der Baugruppen war damit, prozesstechnisch vorgegeben, nicht zu reduzieren. Aus der Oberflächenmontage bekannte Aspekte, wie Positionsgenauigkeit und bauteilspezifische Lotvolumen, waren hierbei unerheblich. Die überwiegenden Vorteile der Oberflächenmontage, wie Miniaturisierung, Flexibilität oder Integrationsdichte, haben jedoch zum Erfolg dieser Technik geführt. Damit verbunden hat sich die Sicht auf den Einsatz des Verbindungsmediums grundlegend geändert. [34] [140]

Der zweite Entwicklungsschritt vollzieht sich aktuell in der Elektronikproduktion und wird wesentlich von ökologischen wie technologischen Faktoren getragen. Dies bezieht sich einerseits auf die produktseitige Forderung nach höheren Dauergebrauchstemperaturen, was mit einem höheren Schmelzpunkt des Verbindungsmediums korreliert. Andererseits fordern Endkunden und auch gesetzliche Vorschriften die eingeschränkte Verarbeitung umweltbedenklicher Stoffe wie dem Blei. Damit wurden Alternativen erforderlich, die den Verarbeitungseigenschaften klassisch bleihaltiger Lotlegierungen entsprechen oder diese mitunter übertreffen. Neben dem Einsatz elektrisch leitfähiger Kleber greifen Baugruppenproduzenten zu bleifreien, zumeist höherschmelzenden Lotlegierungen [34].

3.1.1 Charakterisierung von Lotlegierungen

Der aktuell zu beobachtenden Tendenz, höherschmelzende bleifreie Verbindungsmedien der Konfigurationen SnAg bzw. SnAgCu einzusetzen, ging eine mehrjährige Diskussion möglicher Substitute der bleihaltigen Lotlegierung voraus. Dadurch ist heute eine breite Palette an unterschiedlichen Lotwerkstoffen am Markt verfügbar, die vom Anwender nur schwer zu überblicken ist. Dies führt zur vereinfachten Unterscheidung der Produkte anhand der Schmelztemperaturen, die zwar die Temperaturführung im Lötprozess oder in der Nacharbeit (vgl. Kap.6) bestimmen, aber nichts über die weitere Eignung der Legierung für die Fertigung aussagen. Dabei lässt sich über die Bestand-

teile der Lotpaste in Form und Größe sowie dem Flussmittel eine produktionsspezifisch optimierte Zusammensetzung finden.

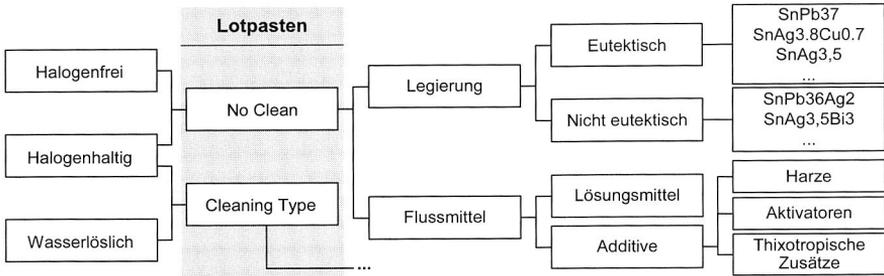


Bild 7: Genereller Aufbau und Zusammensetzung von Lotpasten

So wird beispielsweise von jeder Lotlegierung eine entsprechende Bandbreite an Korngrößen angeboten. Diese sind nach Klassen gegliedert und umfassen Korngrößen in den Intervallen von 45 - 75 µm (Typ 2) bis zu 5 - 15 µm (Typ 6), welche als spezielle Fine-Pitch Lotpasten gelten. Im Gegensatz dazu haben diese feinkörnigen Lotmedien eingeschränkte Löteigenschaften, für die der größere Oxidanteil im Medium verantwortlich ist (vgl. Bild 8). Durch die höhere Anzahl kleinerer Lotkörner steigt auch der Flächenanteil im Medium und damit proportional der Oxidgehalt. [122] [134]

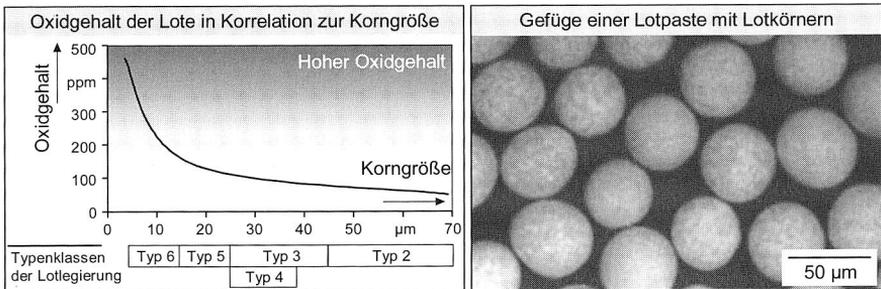


Bild 8: Wechselwirkung zwischen Oxidgehalt und Korngröße der Lotlegierung

Stellen Lotkörner die Basis der Kontaktstelle dar, so kommen dem Flussmittel entscheidende Aufgaben zur Kontaktausbildung über alle Stufen der Baugruppenproduktion zu. Dazu gehört beispielsweise die Entfernung der Oxidschichten auf den Anschlussmetallisierungen des Schaltungsträgers und der Bauteile. Dies betrifft auch die angesprochenen Oxide (vgl. Bild 8) an den Lotkörnern. Des Weiteren wird den Flussmitteln eine unterstützende Wirkung der Benetzung zugeschrieben. Gleiches gilt für

die Faktoren wie Standfestigkeit der Lotdepots, Entnetzungeffekte oder die oft diskutierten Aspekte der Viskosität und Rheologie. [37] [78]

3.1.2 Eigenschaftsprofil von Verbindungsmedien

Mit den zwei Komponenten einer Lotpaste „Lotkörner und Flussmittel“ lassen sich folglich, über die Schmelztemperatur hinausgehend, Verarbeitungsmöglichkeiten beschreiben. Dies wird zur Eigenschaftsprofilierung von Lotpasten eines Typs, d. h. einer Legierung, genutzt. Eine beispielhafte Auswahl möglicher Eigenschaftsverteilungen ist, anhand von Lotpasten der Fa. Koki, im folgenden Bild zusammengestellt.

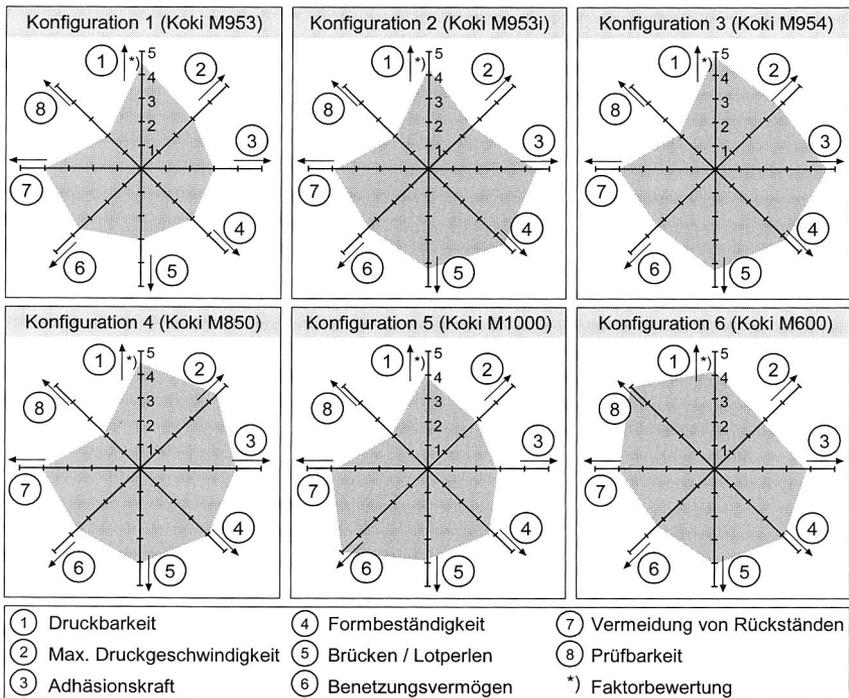


Bild 9: Unterschiedliche Eigenschaften einer Lotlegierung nach Zusammensetzung des Gesamtsystems [108]

Wie die unterschiedlichen Bewertungen der Eigenschaften zeigen, ist in der Baugruppenfertigung eine erweiterte Abstimmung der Lotpaste an die Verarbeitungsbedingungen möglich. Das Verhalten der Lotpasten während der Verarbeitungszeit lässt sich damit aber nur begrenzt steuern.

3.2 Einfluss der Verarbeitung auf die Kontaktausbildung und Charakterisierung typischer Fehlerbilder

Die Verarbeitungsdauer der Lotmedien vom pastösen zum festen Zustand der Kontaktstelle wird in der Produktionskette durch den Linientakt bestimmt. Damit ist eine sehr schnelle Verarbeitung von nur wenigen Minuten zu erwarten. Im realen Fertigungsfall kann diese Zeitspanne jedoch auch Wartezeiten des pastösen Lotmediums von mehreren Stunden umfassen. Als ursächlich verantwortlich hierfür gilt der Pastenauftrag [97]. Der Auftragsprozess erfolgt zwar kontinuierlich, es werden jedoch je Raketvorgang nur wenige Prozent der auf der Schablone zur Verfügung stehenden Paste auf den Schaltungsträger übertragen. Damit sind vom Lotmedium, auch bei schnellen Taktraten, Wartezeiten im Stundenbereich zu tolerieren. Dies kann sich bei reduzierter Linienauslastung, wie es oftmals für Mittelständler oder kleinere Elektronikfertigungen zutrifft, auf eine ganze Schicht ausweiten. Bedenkt man zusätzlich Störungen oder andere Unterbrechungen im komplexen Prozesssystem der Elektronikproduktion, so ist die Wartezeit eine erhebliche Belastung für das Lotmedium. Verstärkt wird dies noch durch die häufig zu beobachtende Unart, überschüssige Lotpaste nach der Produktion von der Schablone aufzunehmen, um diese für weitere, später anstehende Druckaufträge einzusetzen.

Eine gleich bleibende Qualität über die Verarbeitungsdauer der Lotpasten zu garantieren, stellt demnach die zentrale Herausforderung bei der Lotpastenkonfiguration dar. Diesen Anspruch folgend, sind in den Datenblättern Offen- oder Standzeiten aufgeführt, die einen Anhaltspunkt geben, wie lange mit der Paste gearbeitet werden kann. Dies steht im direkten Zusammenhang mit den in Bild 9 dargestellten Eigenschaftsprofilen und wird durch Zusätze in den Lotpasten bestimmt. Grenzwerte, wie die der Bearbeitungszeiten, sind aber auch mit einer gewissen Unsicherheit verbunden. So lassen sich kaum Informationen zur Übertragbarkeit der Grenzwerte auf unterschiedliche Produktionsanforderungen finden. Gleiches gilt für Hinweise, die eine Qualitätsbeeinträchtigung durch die Verarbeitungsdauer bereits im Druckbild oder letztlich in der Kontaktausbildung deutlich belegen würden. Die Ermittlung dieser Fehlerbilder stellt einen Schwerpunkt der durchgeführten Qualitätsanalysen an Lotpasten dar, deren Ergebnisse im Folgenden erörtert werden.

3.2.1 Spezifikation untersuchter Lotmedien und Beschreibung der Analyse-schwerpunkte

Alle bekannten Lotlegierungen neigen bei längerer Lagerung zur Feuchteaufnahme sowie zur Verflüchtigung des Flussmittels [87]. Dadurch einsetzende Effekte können im Pastenauftrag, wie auch in der Bauteilbestückung oder bezogen auf das Lötgergeb-

nis zur Wirkung kommen. Will man die Gesamtheit beschreiben, ist ein prozessbegleitender Ansatz über alle Prozessschritte erforderlich. So sind im Pastenauftrag Aspekte, wie eine reproduzierbare Füllung der Öffnungen und ein zuverlässiges Auslösen zu berücksichtigen. Dies lässt sich am Druckbild bzw. an der Schablonenverschmutzung zeigen. Speziell bei diesem Prozessschritt, ist aber auch zwischen der Offenzeit der Lotpaste und der Verarbeitungszeit bereits gedruckter Lotdepots zu unterscheiden. Für die Bauteilbestückung ist die Nassklebekraft der Paste entscheidend, um das Bauteil an der korrekten Position bis zum Lötprozess zu fixieren. Im Lötprozess muss schließlich das Verbindungsmedium der Komplexität aus Oxidentfernung und Kontaktausbildung entsprechen. Neben den optischen Möglichkeiten erlaubt die Ausprägung des Selbstzentriereffektes eine Bewertung der Eigenschaften von Lotpasten. Dazu wurden Bauteile versetzt bestückt und gemäß den in Bild 10 dargestellten Schwerpunkten die Verarbeitung unterschiedlicher Lotmedien bewertet.

Verbindungsmedium <input type="checkbox"/> Sn62Pb36Ag2 Typ 3 ¹⁾ / Typ 4 ¹⁾ ²⁾ <input type="checkbox"/> Sn95,5Ag4Cu0,5 Typ 3 ¹⁾ / Typ 4 ¹⁾ ²⁾ <input type="checkbox"/> Sn96,5Ag3,5 Typ 3 ¹⁾ / Typ 4 ²⁾ Hersteller: KOKI ¹⁾ ; GLT ²⁾	Umgebungsbedingungen / Lagerung <input type="checkbox"/> Normalklima (NK): 2°C; 50% rel. Feuchte <input type="checkbox"/> Feuchte I (F1): 23°C; 93% rel. Feuchte <input type="checkbox"/> Feuchte II (F2): 85°C; 85% rel. Feuchte <input type="checkbox"/> Lagerung in Stickstoff bei Normalklima (S)
Simulierte Verarbeitungszeit <input type="checkbox"/> Direkte Verarbeitung nach Pastenauftrag <input type="checkbox"/> 4, 6, 10, 14 bzw. 24 Stunden Verweilzeit der <u>offenen Lotpaste</u> (auf der Schablone) <input type="checkbox"/> 1, 2, 4, 6 bzw. 10 Stunden Lagerung der <u>bedruckten Leiterplatte</u>	
Bauteilplatzierung (vgl. Anhang A) <input type="checkbox"/> genau positioniert <input type="checkbox"/> um 30% in x- bzw. y-Richtung versetzt <input type="checkbox"/> um 60% in x- bzw. y-Richtung versetzt	Lötverfahren <input type="checkbox"/> Konvektion mit Stickstoff <input type="checkbox"/> Kondensation

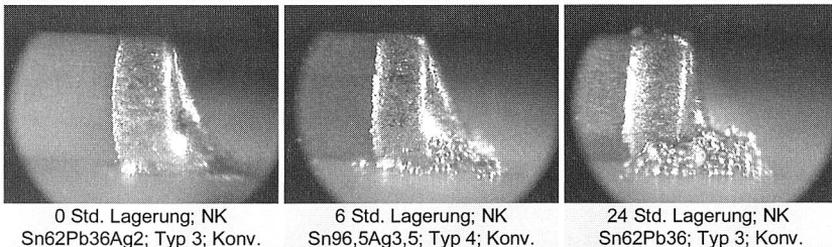


Bild 10: Analysebasis zur Bewertung von Umgebungseinflüssen auf die Verarbeitbarkeit unterschiedlicher Verbindungsmedien

Die Auswahl der Lotpasten richtet sich nach den Forderungen der Serienproduktion mit möglichst hoher Kriterienerfüllung in allen Eigenschaften. Die Verarbeitungsgüte,

auch bei längeren Offenzeiten, stand dabei im Mittelpunkt. So wurde beispielsweise auch die Paste M405 der Firma Koki eingesetzt. Die Verweildauer der Lotmedien betreffend, wurden neben dem Normalklima auch belastende Umgebungsbedingungen geschaffen, um stärkere Wirkeinflüsse aufzeigen zu können.

3.2.2 Erscheinungsbild der Lotmedien während der Verarbeitung

In der Elektronikproduktion steht zweifelsohne die Kontaktausbildung im Vordergrund einer Lotpastenanalyse. Der Zielsetzung einer prozessbegleitenden Qualitätssicherung entsprechend gilt es aber, Fehler möglichst frühzeitig während der Produktion zu erkennen. Dies bezieht sich vornehmlich auf das optische Erscheinungsbild inwieweit eine Beeinflussung hier deutlich wird. Durch die Reduzierung des Flussmittels sind unterschiedliche Reflexionen oder eine Geometrieänderung der Lotdepots (auch als „Stumpy-Effekt“ bezeichnet) zu erwarten (vgl. Bild 6.16 in [79]).

Wie bereits erwähnt, kann sich die Verarbeitungsdauer offener Lotpaste auf den Schablonendruck oder auf bereits bedruckte Schaltungsträger beziehen. Beide Aspekte korrelieren zu unterschiedlichen Eigenschaften. Schabloneseitig stehen die Viskosität und das Rollvermögen im Vordergrund, wobei es beim bedruckten Schaltungsträger vorzugsweise auf die Konturstabilität der Paste ankommt. In den Ergebnissen konnten jedoch beide Eigenschaftskriterien über alle Pasten hinweg überzeugen. Die Druckbarkeit war, wie exemplarisch im Bild 11 belegt, bis zu einer 24-stündigen Verweildauer gegeben und auch das Auslöseverhalten überzeugte. Eine Konturveränderung lässt sich darüber hinaus optisch nicht nachweisen.

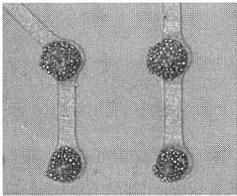
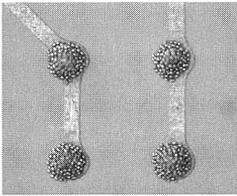
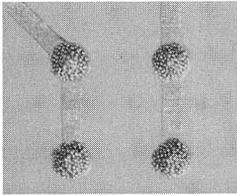
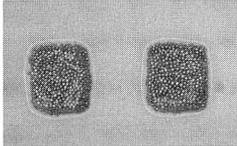
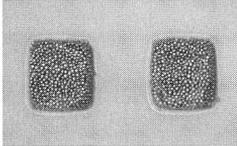
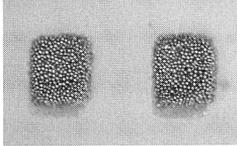
Verarbeitung	Direkt	Nach 10 Stunden	
		Normalklima (NK)	Feuchte (F1)
Einfluss	–		
Lotdepots – μ BGA46			
Lotdepots – CR0402			

Bild 11: Bewertung der Druckergebnisse abhängig von der Verarbeitungszeit der offenen Lotpaste. Gegenüberstellung des fünften Druckvorgangs. (SnAgCu)

Hochgenaue Konturanalysen mittels Lasertriangulation zeigen dagegen eine geringe Höhenreduzierung, die jedoch in der Messwertstreuung liegt. Damit sind Konturverformungen der Lotdepots, wie von Klein Wassik und Verguld [79] beschrieben, mit aktuellen Lotpasten nicht mehr zu erwarten. Einschränkend muss angeführt werden, dass die Paste mit der Verweilbedingung F2 (Temperatur-Feuchte Belastung) nach 8 Stunden absolut nicht mehr verarbeitbar war. Da diese Belastung reell nicht zu erwarten ist, kam sie nur zur Analyse des Pastenauftrags zum Einsatz.

Neben der Druckqualität ist die Nassklebekraft der Paste entscheidend für den Bestückprozess. Diese bewirkt die Positionstreu der Bauteile während der Bestückung, dem Transport bis zur festen Kontaktausbildung in der Kühlzone des Lötprozesses. Bezogen auf die Produktion werden so Effekte deutlich, welche auf die Verarbeitungsdauer zurückzuführen sind. Die Verarbeitungsdauer und die Anzahl verrutschter Bauteile stehen folglich in direktem Zusammenhang. Dieser Effekt wird bei offenen Lotpasten nach 14 Stunden und bei bedruckten Schaltungsträgern nach 6 Stunden deutlich.

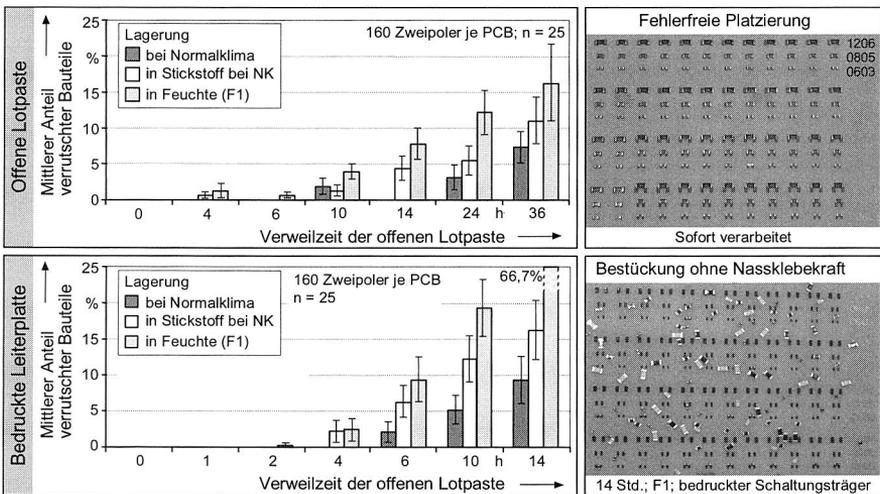


Bild 12: Einfluss der Verarbeitungsdauer auf die Nassklebekraft der Pasten und die Wirkung bei der Bauteilbestückung

Weitere Analysen zur Verarbeitbarkeit von Lotmedien umfassten auch die Kennwerte Viskosität und Benetzungskraft. Beide sind jedoch wenig aussagekräftig. So bleibt die Viskosität der eingesetzten Lotmedien im offenen Zustand über die Verarbeitungszeit nahezu konstant. Die Benetzungskraft hingegen lässt sich verfahrenstechnisch nur im Ausgangszustand charakterisieren [122].

3.2.3 Bewertung der Kontaktstellenausbildung und davon abgeleitete Grenzwerte

Eine gesicherte Aussage über die Güte von Kontaktstellen erweist sich als überaus schwierig. Dies gilt insbesondere in der Serienfertigung, für die zweifelsfrei nur zerstörungsfreie Prüfverfahren heranzuziehen sind. Optische Prüfsysteme lösen dies durch komplexe Algorithmen und Kamerasysteme, wie sie in Kapitel 5 näher ausgeführt sind. Inwieweit diese Prüfmethoden jedoch Unterschiede in den Lotmedien und damit auch mangelhafte Qualität erfassen können, macht eine grundlegende Analyse der Kontaktstellenausbildung erforderlich.

Die Ausbildung von Kontaktstellen wird als maßgebliche Aufgabe des Lotmediums angesehen [143]. Fließeigenschaften, Benetzungskraft und Selbstzentrierung sind nur einige Faktoren mit denen die Forderungen dieses im Lötprozess ablaufenden Vorgangs beschrieben werden [34]. Ein aussagekräftiges Kriterium für die Fließeigenschaft des Lotes lässt sich durch den Aufschmelztest ermitteln. Dabei wird Lotpaste direkt auf das Schaltungsträgersubstrat (keine metallisierte Fläche) oder den Lotstopp-lack aufgebracht. Durch die fehlende metallisierte Fläche wirkt keine Benetzung zum Schaltungsträger und das Lotmedium sollte zu eine Lotkugel (solder ball) zusammenfließen. Von diesem Idealfall abweichende Stufen, die direkt eine Aussage über die Löt eignung der Paste zulassen, sind in Tabelle 1 angegeben.

Kategorie	Status beim Aufschmelztest von Lotmedien	Erscheinungsbild
1	Die umgeschmolzene Lotpaste bildet nur eine große Lotkugel	
2	Die umgeschmolzene Lotpaste bildet eine große Lotkugel, umgeben von nicht mehr als 3 Lotkugeln mit einem Durchmesser unter 75 µm.	
3	Die umgeschmolzene Lotpaste bildet eine große Lotkugel, umgeben von mehr als 3 Lotkugeln mit einem Durchmesser unter 75 µm, wobei sich kein Kreisring ausbildet.	
4	Die umgeschmolzene Lotpaste bildet eine Lotkugel, umgeben von einer großen Anzahl kleinerer Lotkugeln, welche einen Kreisring oder ähnliches bilden.	

Tabelle 1: Einteilung der Löt ergebnisse im Aufschmelztest [172]

Diese Einteilung wurde auch zur Bewertung der gelagerten Lotpasten herangezogen. Wie in Bild 13 dargestellt, sind so deutliche Unterschiede der Verarbeitung nachzuweisen. Diese korrelieren zur Kontaktstellenausbildung und erlauben darüber hinaus eine frühzeitige Aussage über die Löt eignung der eingesetzten Verbindungsmedien, unabhängig von der Lotlegierung (vgl. Bild 14).

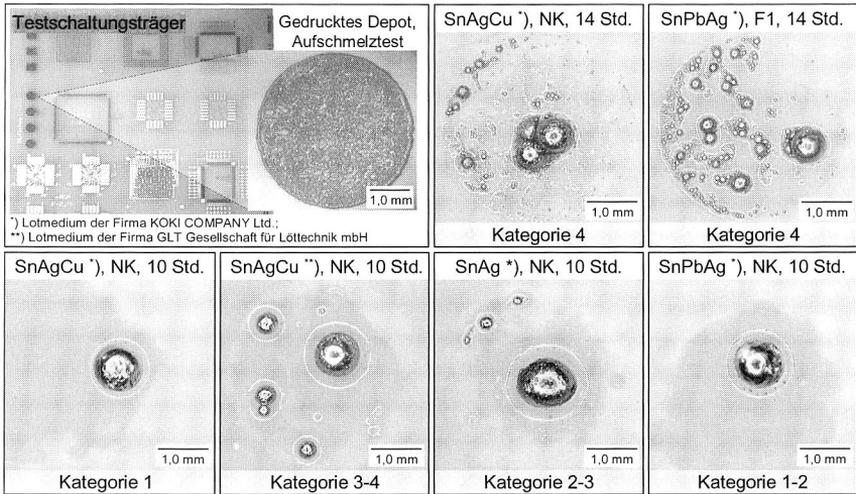


Bild 13: Ausgewählte Ergebnisse des Aufschmelztests bei offen gelagerten Lotmedien (Korngröße – Typ 3; Lötprozess – Konvektion mit Stickstoff)

Der Aufschmelztest kam bei allen Untersuchungsvarianten zur Anwendung und ermöglichte somit ein detailliertes Bild der Lötbarkeit der unterschiedlichen Pasten, bezogen auf die Verarbeitungszeit. Für offene, auf der Schablone befindliche, Lotmedien lässt sich eine kritische Verweilzeit bei 10 Stunden festlegen. Unterschiede in der Verarbeitbarkeit werden zwischen den Produkten der Firma GLT und den durchwegs besser abschneidenden Lotmedien der Firma Koki deutlich. Die eingesetzten unterschiedlichen Korngrößen der Lotlegierungen (Typ 3 & 4) zeigen keinen Einfluss auf das Lötresultat. Bei bedruckt gelagerten Medien kann eine Grenze bei 6 Stunden gezogen werden. Beide Grenzwerte beziehen sich auf eine Lagerung bei Normalklima.

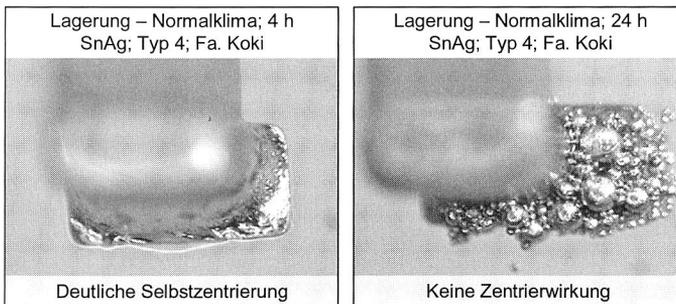


Bild 14: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Kontaktstellenausbildungen

Diese Einteilung, die sich zunächst nur aus der optischen Beurteilung der Aufschmelzergebnisse ergibt, bestätigen ebenso durchgeführte Scherkraftmessungen. Die graphische Auswertung der Scherkraft an exakt bestückten zweipoligen Widerständen der Größe CR0805 (den Selbstzentriereffekt unberücksichtigt) zeigt eine kontinuierliche Reduzierung der Kraftwerte. Deutlich kommt das Lagermedium (Luft, Feuchte, Stickstoff) und der Lagerungstyp (schablonenseitig / gedruckt) zum Tragen. Die kontinuierliche Kraftabnahme erscheint zunächst überraschend, da eben nur Grenzwerte genannt wurden. Verantwortlich hierfür ist das Flussmittel unter dem Bauteil, welches einen fest haftenden Verbund mit der Bauteilunterseite eingeht. Ist wenig oder kein Flussmittel unter dem Bauteil, so sind die aufgenommenen Kraftwerte deutlich kleiner, was die zum Teil großen Standardabweichungen erklärt.

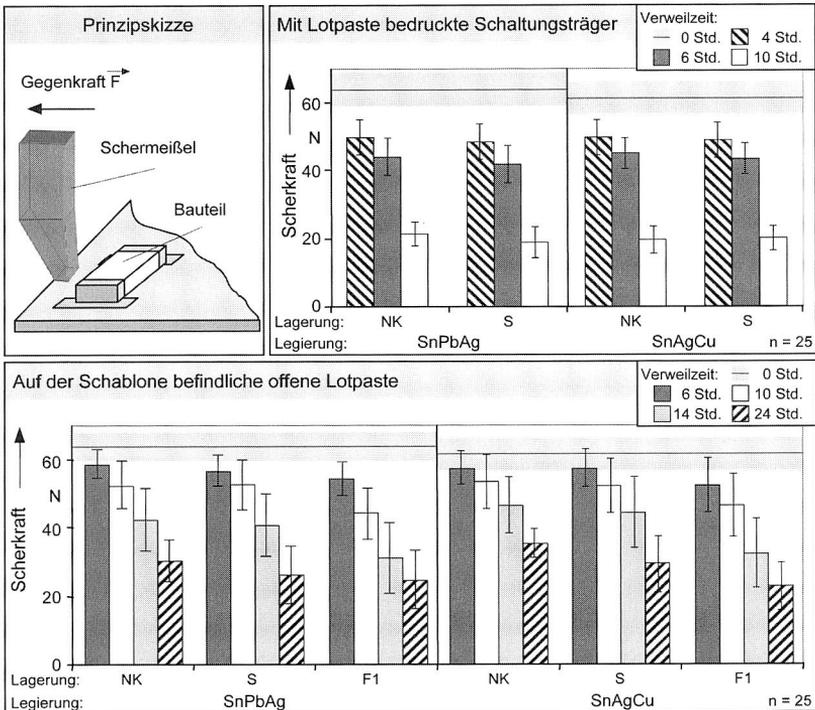


Bild 15: Scherkraftanalyse von Lötverbindungen (Korngröße – Typ 3; Lötprozess – Konvektion mit Stickstoff)

Abschließend sollen auch die Ergebnisse zur Selbstzentrierung kurz angesprochen werden. Nur hier konnten Unterschiede, bezogen auf die eingesetzten bleihaltigen und

bleifreien Lotmedien, ermittelt werden. Die Bleifreien zeigen insgesamt eine geringere Fähigkeit zur Bauteilzentrierung. Dies hängt mit den geringeren Benetzungskräften bleifreier Verbindungsmedien zusammen [54] [133].

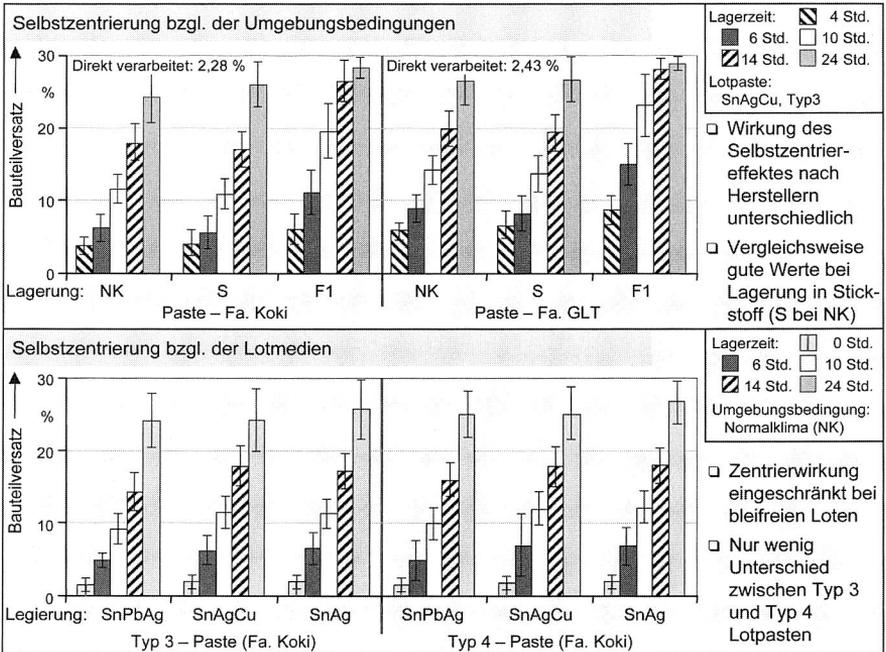


Bild 16: Unterschiedliche Ausprägung des Selbstzentrierereffektes. Darstellung des Versatzes nach dem Löten bei 30% versetzt bestückten CR0805 Bauteilen (Lötprozess – Konvektion mit Stickstoff)

Die Verarbeitungsdauer von Lotmedien und dies lässt sich auch durch den Selbstzentrierereffekt zeigen, sollte folglich im offenen Zustand unter 10 Stunden liegen. Gedruckte Paste muss innerhalb von 6 Stunden verarbeitet werden. Hohe Temperaturen oder Feuchte während der Lagerung führen insgesamt zu einer verstärkenden Wirkung, womit geringere zeitliche Grenzwerte verbunden sind.

4 Optimierung des Lotpastenauftrages durch bauteilspezifische Modifizierung entscheidender Kenngrößen

In Folge einer stetig weiteren Miniaturisierung von Anschlussstrukturen kommt dem positionsgenauen, volumengerechten Lotpastenauftrag eine besondere Stellung in der Prozesskette zu [15]. Fehler, die beim Pastenauftrag entstehen und nicht sofort erkannt werden, verursachen aufgrund nachfolgender Prozessschritte deutlich höhere Reparaturkosten [33]. Die qualitätsentscheidende Stellung des Pastenauftrages zeigt sich ebenfalls in aktuellen Studien, die knapp zwei Drittel der festgestellten Baugruppenfehler und ca. 80 % des Reparaturaufwands auf Probleme im Pastenauftragsprozess zurückführen (vgl. Bild 17) [27] [53] [157].

Der Pastenauftrag wird durch eine große Anzahl frei einstellbarer Maschinenparameter geprägt [117]. Um ein gleich bleibend hohes Qualitätsniveau zu gewährleisten, ist es zwingend erforderlich, die Parameterkonfiguration für die zu fertigenden Baugruppen zu optimieren. Daher konzentrieren sich bisherige Untersuchungen insbesondere auf einstellbare Prozessgrößen wie den Rakeldruck, die Rakelgeschwindigkeit und den Reinigungszyklus [6] [120]. Diese Parameter zeigen einen direkten Einfluss auf die Qualität des Lotdepots und stehen in Wechselwirkung zu den verarbeiteten Lotpasten [76]. Da diese Größen jedoch nicht die einzigen prozessbeeinflussenden Faktoren darstellen, werden in den Analysen wichtige Faktoren wie die Druckschablone oder die Rakelgeometrie lediglich am Rande berücksichtigt. Somit können die Untersuchungsergebnisse nur bedingt zur Qualitätsoptimierung beitragen. [141]

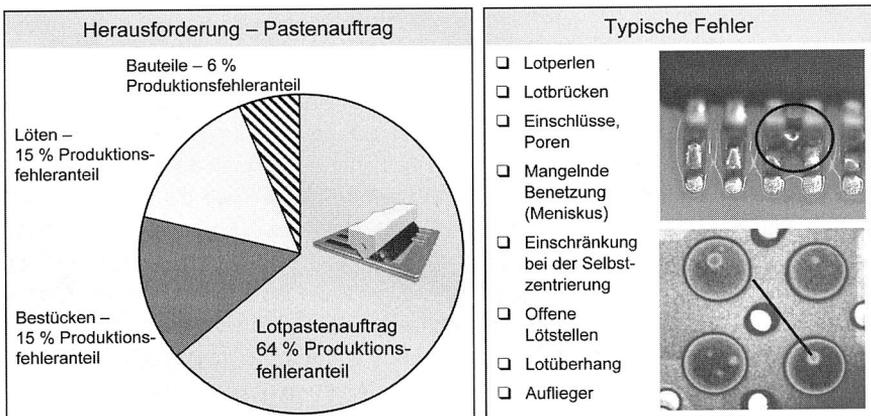


Bild 17: Fehlerverteilung in der Elektronikproduktion und typische Fehlerbilder, die ihre Ursache im Pastenauftrag haben [27] [119].

Des Weiteren lassen sich auch Optimierungsstrategien durch prozessinterne und externe Prüfsysteme festmachen, die eine zwei- bzw. dreidimensionale Vermessung der Pastendepots verfolgen [111]. Es gilt jedoch die Qualität im Pastenauftrag nicht zu prüfen, sondern Methoden für stabile Prozesse bereitzustellen. Speziell die Randbedingungen des Prozess- und Materialverhaltens, wie sie bei der Verarbeitung von Lotpasten im Prozess auftreten, stellen besondere Anforderungen an die Prozessführung.

4.1 Technologische Grundlagen des Pastenauftrages

Die weitere Miniaturisierung in der Elektronikproduktion, neuartige Bauelementgeometrien und alternative Verbindungsmedien sowie Substratmaterialien erfordern stetig neue Ansätze zur Prozessoptimierung in der Baugruppenfertigung. Bedingt durch die damit verbundene Miniaturisierung von Anschlussstrukturen kommt dem positionsgenauen, volumengerechten Lotpastenauftrag eine maßgebliche Stellung in der Prozesskette zu.

Fehler, die beim Pastenauftrag entstehen und nicht sofort erkannt werden, verursachen aufgrund der nachfolgenden Prozessschritte deutlich höhere Produktions- und Nacharbeitskosten [6]. Als Ursachen werden dabei zumeist Stellgrößen des Prozesses oder der Ausgangszustand der Verbindungsmedien angeführt. Durch die mehrstufigen Wechselwirkungen lassen sich aber auch bei optimierten Parametereinstellungen Baugruppenfehler nachweisen, die dem Pastenauftrag zugeordnet werden müssen [90]. In solchen Fällen gilt es insbesondere die Prozessanforderungen zu analysieren, ob hierbei die Anlage, die Systemkomponenten sowie das Pastenmedium die Forderungen der Produktion erfüllen können.

Dieses Spannungsfeld aufgreifend, muss zur nachhaltigen Verbesserung des Pastenauftrags eine Analyse der im Fertigungsprozess konstanten Randbedingungen erfolgen. Bezogen auf den heute weit verbreiteten Pastenauftrag im Schablonendruck ist beispielsweise eine wichtige, vom Maschinenbediener nur schwer beeinflussbare Prozessgröße, die Schablone [51]. Exemplarisch seien Faktoren wie die Geometrieform der Durchbrüche, die Schablonendicke und auch das Herstellungsverfahren genannt, welche Gleichmäßigkeit und Konturform der Lotdepots signifikant beeinflussen [77]. Verstärkt wird dieser Aspekt noch durch unterschiedliche firmenspezifische Richtlinien und Normen internationaler Organisationen, welche jeweils unterschiedliche Designvorschriften zur Auslegung ihrer Druckschablonen und auch Anschlussgeometrien auf den Schaltungsträgern anführen [66] [126] [151]. Neben den relativ einfach zu regelnden sowie auch zu optimierenden Prozessgrößen und den im Prozess konstanten Randbedingungen sind auch Prozessfaktoren zu berücksichtigen, die durch das Umfeld beeinflusst und als Störgrößen bezeichnet werden. Der Begriff Störgröße umfasst

aber nicht das gesamte Spektrum dieser Faktoren. Beispielsweise ist hier die Viskosität der Lotpaste zu nennen, die nachweislich nicht reproduzierbar regelbar ist [111]. Im Prozess ist diese Größe jedoch als wesentlich zu bewerten und sollte demnach nicht in die Gruppe der Störgrößen gezählt werden. Vielmehr sind Faktoren, wie die Umgebungstemperatur bzw. die Luftfeuchte Störgrößen, welche die Lotpastenviskosität beeinflussen. Dieser Exkurs unterstreicht beispielhaft die Randbedingungen im Pastenauftrag und verdeutlicht dessen Komplexität. Umso wichtiger ist es den Prozess im Detail zu erfassen.

4.1.1 Betrachtung der Verfahrensvarianten

Zum Aufbringen von Lotpaste bzw. alternativen Kontaktierungsmedien werden in der Oberflächenmontage anwendungsspezifisch unterschiedliche Umsetzungen verfolgt. Neben Einzelanwendungen wie der Pin Transfer Methode sind dies im Wesentlichen die Dispensetechnik sowie Verfahren auf Basis des Lotpastendrucks. In der Dispensetechnik wird mittels einer Dispensnadel respektive einer angeschlossenen Lotpastenkartusche das Medium per Druckluft bzw. per Schraubenrotation auf den Schaltungsträger übertragen. Der selektive Charakter des Pastenauftrags nach dem Dispensprinzip wird als der entscheidende Vorteil beim Einsatz dieser Technik gesehen, da der Auftrag in nahezu allen Raumachsen erfolgen kann. Der hierdurch bedingte Nachteil längerer Prozesszeiten muss unter Effizienzbetrachtungen abgewogen werden.

Kürzere Prozesszeiten können durch die Verfahren Schablonen- bzw. Siebdruck erzielt werden [79]. So werden diese zumeist in der Massenfertigung eingesetzt. Beim Siebdruck wird die Lotpaste mit einem Rakel durch ein Metallgewebe mit beschichtetem Polymerfilm gedruckt. Der Polymerfilm ist durch einen fototechnischen Herstellungsprozess mit Durchbrüchen an den jeweiligen Anschlussstellen auf der Leiterplatte versehen. Abhängig von Produktanforderungen an Positioniergenauigkeit und Volumenmenge können unterschiedliche Siebgewebetypen eingesetzt werden. Stellgrößen sind dabei die Anzahl der Fäden pro cm, die Fadenstärke sowie das Fadenmaterial. Üblicherweise sind dies Nylon-, Edelstahl- bzw. Polyesterfasern. Durch die Dynamik der Siebe liegt die Platziergenauigkeit nur bei 100 µm [88] [121]. Wird eine höhere Genauigkeit gefordert, sollte der Pastenauftrag durch Metallschablone erfolgen. Die höhere Stabilität und die zu 100 % offenen Flächen der Schablonendurchbrüche unterstützen einen reproduzierbaren Pastenauftrag. Im Siebdruck ist bestenfalls 50 % offener Flächenanteil zu erreichen, woraus sich Unterschiede im übertragbaren Lotpastenvolumen ableiten lassen. Die Öffnungen der Metallschablonen werden verfahrenstechnisch lasergeschnitten, geätzt oder die Schablone galvanisch aufgebaut. Die Lasertechnologie besitzt darunter die höchste Strukturgenauigkeit und wird insbesondere für Fine-Pitch Anwendungen eingesetzt [72].

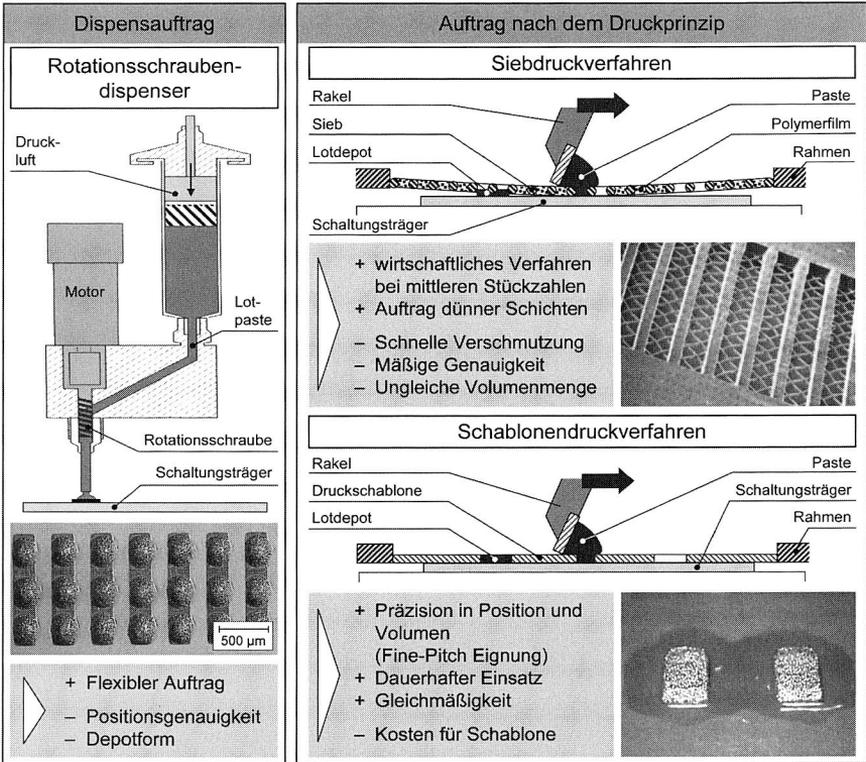


Bild 18: Gegenüberstellung der grundlegenden Prozessalternativen

Um den Pastenauftrag mit Druckschablonen im Detail analysieren zu können, sowie Aussagen über spezifische Druckergebnisse abzuleiten, ist zuvor eine Veranschaulichung des Prozesses erforderlich. In Bild 19 ist dazu eine vereinfachte Darstellung der Vorgänge beim Füllen der Schablonendurchbrüche skizziert. Im Einzelnen lassen sich hier sechs diskrete Schritte unterscheiden, wobei speziell die Fülllogik zu beachten ist. Das pastöse Verbindungsmedium wird durch die Bewegung des Rakel über die Schablone gezogen, wobei der Pasteeintrag in die Schablonenöffnungen gegen die Bewegung des Rakel verläuft. Das Medium vollzieht so eine Art Rotationsbewegung bis der Rakel den Durchbruch vollständig überquert hat. Abhängig von den Eigenschaften des Mediums (Viskosität, Korngröße, etc.) sowie der Schablonengeometrie, kann so eine entsprechende Anschlussflächenabdeckung erfolgen. Ebenso lässt sich die Geometrie der Schablone bewerten, mit der je nach Öffnungswinkel und Rundheit unterschiedliche Depothöhen aufgebracht werden können.

Neben den Pastenfließvorgängen ist in der Abbildung auch der Einfluss des Lötstopplacks angedeutet. Insbesondere bei feinsten Rastermaßen kommt es durch das Fehlen von Lötstopplack und durch die offene Spaltgeometrie zwischen Schablonenunterseite und Leiterplattenoberfläche zu einem unerwünschten Zerfließen des Verbindungsmediums. So wird die Gefahr der Brückenbildung deutlich verstärkt [71].

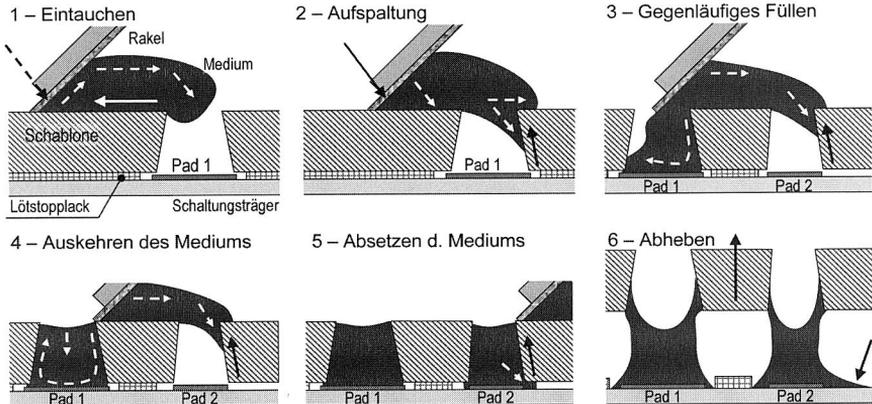


Bild 19: Prozessdetailsicht beim Schablonendruck

Durch den Zwang immer kleinere Strukturen zu drucken und stetig komplexere Bauelemente auf der Leiterplatte zu montieren, wird zukünftig auch der Pastenauftrag in Schablonendrucktechnik an Prozessgrenzen stoßen. Wie Herr Lentzen von der Fa. Speedline Technologies GmbH während einer Podiumsdiskussion auf der Messe „SMT/Hybrid/Packaging 2001“ ausführte, sind hierbei zwei gegenläufige Aspekte zu berücksichtigen. „Auf der einen Seite hat man die technischen Möglichkeiten, die die Anlagen bieten, andererseits stößt man an physikalische Grenzen. Wenn das Druckmedium aus einer Schablone herzulösen ist, kommen hier bestimmte physikalische Gesetzmäßigkeiten zum Tragen“ [121]. So sind die Anlagen, seiner Ansicht nach weniger das Problem, um eine zuverlässige Verarbeitung auch noch feinerer Strukturen zu ermöglichen.

4.1.2 Aspekte eines zuverlässigen Medienauftrags

Die Systemzuverlässigkeit ist gemäß IEEE 90 der Umfang, in dem von einem System erwartet werden kann, dass es die beabsichtigte Funktion mit der erforderlichen Genauigkeit ausführt [65]. Übertragen auf den Pastenauftrag bedeutet dies, den vorgegebenen Anforderungen möglichst genau zu folgen. Diese sind im Wesentlichen ein möglichst gleichmäßiges, vorher definiertes Pastenvolumen abzusetzen und in repro-

duzierbarer Höhe sowie gleich bleibender Formstabilität auszuführen. Vorteilhaft haben sich dazu quaderförmige Lotdepots erwiesen, da durch diese Geometrie eine systemtechnisch größtmögliche Kontaktfläche zwischen Anschlussbeinchen und dem pastösen Medium zu erreichen ist. Zur Bewertung der unterschiedlichen bereits dargestellten Verfahrensvarianten sind diese und weitere Faktoren nun auf die Depotqualität zu spiegeln und für den spezifischen Anwendungsfall zu gewichten. Dies erfordert zunächst für jedes Verfahren die möglichst optimale Depotausbildung zu ermitteln.

Beim Dispenspastenauftrag sollte möglichst eine Halbkugelform angestrebt werden, die in ihrer Ausprägung über ein Bauteil konstant und über unterschiedliche Bauteile, insbesondere Anschlussraster, auch different bzw. prozessbezogen auszuführen ist. Nur so kommt der wesentliche Vorteil beim Dispensieren zum Tragen – in einem Vorgang sowohl wenig Lotpaste bei feinen Strukturen wie auch bei größeren Anschlüssen mehr Lotpastenvolumen zur Verfügung zu stellen. Verfahrenstechnisch können nach Aussage von Systemherstellern hierfür auch Depotdurchmesser in der Größenordnung von 200 µm realisiert werden [94]. In Voruntersuchungen mit einer automatischen Dispensanlage sowie einer Typ 4 Lotpaste ließ sich dies entsprechend belegen, wobei sich die Volumenmenge ab einer Anzahl von 400 gesetzten Depots leicht reduzierte. Diese Verfahrensinkonsistenz ist nicht als kritisch zu bewerten, kann aber zu Fehlern, wie beispielsweise Aufliegern, führen.

Wird zur Bewertung der Verfahren nur die Ausformung der Lotdepots herangezogen, zeigt der Schablonendruck gegenüber dem Auftrag nach dem Dispensprinzip deutliche Vorteile. Trotzdem sind hinsichtlich der Prozesszuverlässigkeit Randbedingungen zu beachten. Hier ist beispielhaft der Einsatz von Reinigungszyklen anzuführen. Gleiches gilt für die Verarbeitungsgüte der Lotpaste (vgl. Kapitel 3). Durch beide Kriterien kann das Druckergebnis negativ beeinflusst werden. Ein direkter Vergleich mit der Dispens Technik sollte jedoch nicht geführt werden. Im Druckprozess können während eines Druckvorgangs weit über 400 Depots mit gleich bleibender Qualität erzeugt werden. Im Vergleich zur Dispenstechnik würden jedoch niemals 400 Druckvorgänge ohne Reinigung durchgeführt, weil folglich auch hier ein zuverlässiges Auslösen der Lotpaste aus der Schablonenöffnung nicht mehr zu gewährleisten ist. Weiter ist die Flexibilität im Schablonendruck deutlich eingeschränkt. So muss für jede Änderung der Schaltungsgeometrie eine neue Schablone eingesetzt werden. Die Entscheidung über die einzusetzende Technologie ist demnach an der Komplexität der Anwendung und der Stückzahlen zu orientieren.

Hinsichtlich der Verarbeitung feinsten Strukturen hat sich seit Jahren die Schablonendrucktechnik durchgesetzt. Je nach Grad der Miniaturisierung können Anschlussraster bis in den Flip-Chip Bereich verarbeitet werden [15]. Stellglied für die Verarbeitung ist

dabei die Schablonenhöhe, die in direkter Proportionalität zum Auslöseverhalten steht. Je nach Anforderung kann die Schablone nur eine Dicke von beispielsweise 50 µm aufweisen. Diese speziellen so genannten Fine-Pitch Schablonen sind aber nur bedingt für das heutige Bauelementespektrum geeignet. Große Bauteile und insbesondere Leistungskomponenten benötigen für eine sichere, mechanische sowie elektrische Verbindung mehr Lotvolumen, wodurch die aktuellen Herausforderungen an den Schablonendruck deutlich werden.

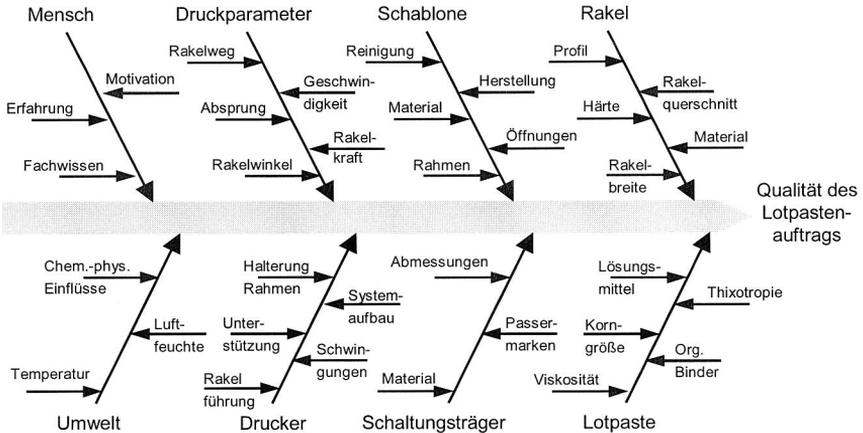


Bild 20: Ishikawa-Diagramm des Pastenauftrags

Neben der Schablone wird der Druckprozess noch durch eine Reihe weiterer Faktoren beeinflusst. Dabei stehen neben Aspekten der Systemeinstellung insbesondere auch zufällige, schwer steuerbare Effekte im Vordergrund (vgl. Bild 20).

4.2 Prozessgrößen und Wechselwirkungen beim Pastenauftrag in der Schablonendrucktechnik

Die Prozesse in der Elektronikproduktion werden im Wesentlichen durch Parameter-einstellungen und externe Störgrößen beeinflusst [47]. Gerade das Zusammenspiel zwischen Parametern und Störgrößen stellt bisher ein Hauptargument für schlechte Regelbarkeit und fehlende Prozesskenntnis in der Elektronikproduktion dar. Prozesswissen und Transparenz der Vorgänge sind aber die entscheidenden Faktoren für fähige und beherrschte Prozesse im Sinne der Qualitätssicherung.

Dies gilt insbesondere für den Pastenauftrag in der Schablonendrucktechnik. Der Prozess kann zwar durch Einstellgrößen wie Rakelgeschwindigkeit, Anpressdruck und

Trenngeschwindigkeit der Schablone sowie Reinigungszyklus geregelt werden, wesentlich wichtiger sind jedoch externe Größen. Hier gilt es insbesondere die eingesetzte Lotpaste und die Druckschablone anzuführen. Kritischer sind Faktoren aus dem Umfeld zu sehen, die zu zufälligen Prozessfehlern führen und somit die nutzbaren Prozessfenster entsprechend einschränken. Daher ist es im Schablonendruckprozess wichtig, Kenngrößen für eine ganzheitliche Prozessbeherrschung zu definieren.

4.2.1 Geometrieform als Kenngröße

Mit dem inzwischen erreichten hohen Qualitätsstandard verschärfen sich auch die Anforderungen an die Konturform der abgesetzten Lotdepots [169]. Die Geometrieausbildung der Lotdepots steht im direkten Zusammenhang mit den wesentlichen Fehlern, die dem Lotpastenauftrag zu geordnet werden. So ist beispielsweise der Fehler „offene Lötstelle“ einem zu niedrigen Lotdepot bzw. einer schlechten Ausformung des Lotdepots zuzuordnen. Bei zu viel Lotpaste oder einem zu hohen Lotdepot kann das Platzieren des Bauelements ein Verdrücken der Paste zur Folge haben und sich somit die Gefahr von Lotperlen bzw. Lotbrücken verstärken. Daher muss die Geometrieform der Lotdepots als eine wesentliche Kenngröße beim Pastenauftrag verstanden werden.

Dies belegen firmeninterne Vorschriften zur Auslegung von Schablonendurchbrüchen, die jedoch abhängig vom Bauteilspektrum und der Anwendung keine allgemein gültige Übertragung erlauben. Nachdem internationale Gestaltungsvorschriften fehlen, wird zumeist auf die IPC-SM-782a „Surface Mount Design and Land Pattern Standard“ zurückgegriffen [69] [83]. Diese vom Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits für die Surface Mount Technology herausgegebene Richtlinie befasst sich ausschließlich mit der Geometrie von Bauteilen und der Anschlussflächen auf den Schaltungsträgern. Durch eine sehr breite Vorgabe der Geometrieempfehlungen kann, wie in Bild 21 dargestellt, diese Richtlinie nur bedingt das Design des Schablonenlayouts unterstützen.

Die in Bild 21 gegenübergestellten Lötstellen zeigen exemplarisch die Grenzen der vorgestellten Richtlinie. Eine Norm am breiten Toleranzband elektronischer Bauelemente zu orientieren, zeigt sich im hochkomplexen Umfeld der Aufbau- und Verbindungstechnik als nur bedingt sinnvoll. Dies konnten auch weiterführende Untersuchungen, deren Ergebnisse in Kapitel 4.4 vorgestellt werden, bestätigen.

Ein qualitativ hochwertiger Pastenauftrag erfordert eine eindeutige Richtlinie, die sich baugruppenspezifisch an einem Algorithmus orientiert und nicht statische Geometrievorgaben zu Grunde legen will. Dort sind neben Druckparametern und Wechselwirkungen auch Zielgrößen wie das Lotvolumen anzugeben. Eine erste Basis hierfür kann

von den Richtlinien IPC 7525 und SMEMA5 abgeleitet werden [66] [151]. Durch die Komplexität des Prozesses und die Umsetzung des Pastenauftrags mit Schablone, Sieb bzw. im Dispensverfahren können diese jedoch nur Hinweise für eine zuverlässige Prozessführung geben.

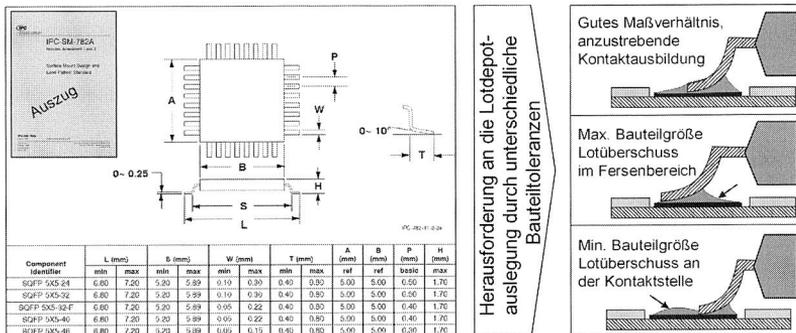


Bild 21: Wirkung der Bauteiltoleranzen auf die Lötstellenausbildung bei vorgegebenem Design der Anschlussfläche auf dem Schaltungsträger.

Die dreidimensionale Depotform und damit speziell die Lotdepothöhe ist zwar seit Jahren als wichtige Kenngröße bekannt, Aussagen über die anzustrebende Konturform sind nur aus einzelnen Veröffentlichungen zu erhalten [56] [143]. Eine umfassende Erklärung der anzustrebenden Formgebung und noch wichtiger einzelne Grenzwerte sind nicht verfügbar. Dies wird speziell bei den weiter miniaturisierten Bauelementen entscheidend, da extrem kleine Anschlussformen eine ausreichende Lotmenge benötigen, um sichere Kontaktstellen auszubilden.

4.2.2 Gestaltungsrichtlinien für die Schablonegestaltung

Über die Richtlinien zum Pastenauftrag hinausgehend, aber diesen direkt beeinflussend, sind Vorschriften zur Schablonegestaltung verfügbar. Hier kann durch die Vorgabe der Geometrieform von Schablonenöffnungen indirekt Einfluss auf die Konturform und auch auf das Lotvolumen im Pastenauftrag genommen werden. Stellhebel sind die Länge und die Breite bzw. der Durchmesser einer Schablonenöffnung und deren Höhe. Mit diesen Größen könnte man theoretisch nahezu jede 2½-dimensionale Geometrie auf die Leiterplatte übertragen. Seitens der physikalischen Grundgesetze werden jedoch Grenzen der Druckbarkeit und des Auslöseverhaltens erreicht. Zur Unterstützung des Designers sind zwei Kennwerte definiert, die gemessen an der Geometrie der Schablonenöffnungen zu einem zuverlässigeren Pastenauftrag führen. [66] [151]

Regel 1: Druckbarkeit - Aspect Ratio

$$\frac{\text{Breite/Durchmesser Schablonenöffnung}}{\text{Schablonenhöhe}} \geq 1,5; \tag{2}$$

Regel 2: Auslösbarkeit - Area Ratio

$$\frac{\text{Mantelflächeninhalt des Schablonendurchbruchs}}{\text{Flächeninhalt der Schablonenöffnung}} \leq 1,5; \tag{3}$$

Wie in Tabelle 2 dargestellt, lassen sich durch die Varianten in den Anschlussstrukturen auch abweichende Ratiowerte für unterschiedliche Bauelemente bestimmen. Entscheidend ist dabei insbesondere das Area Ratio, welches beim angeführten Mikro Ball Grid Array (μ BGA) über der vorgegebenen Grenze liegt. Der ebenso angegebene Vergleich mit dem benötigten Volumen macht die Grenzen planarer Schablonen deutlich. Denn wie im Tabellenbeispiel gezeigt, ist durch das benötigte Lotvolumen die Verarbeitung von Leistungsdioden mit einer 100 μ m Schablone nicht zu empfehlen.

Bauteile	Öffnung (mm)		Höhe 0,15 mm			Höhe 0,125 mm			Höhe 0,10 mm		
	Länge	Breite	R1	R2	Vol.	R1	R2	Vol.	R1	R2	Vol.
QFP 208	0,30	1,45	2,00	1,21	+	2,40	1,01	++	3,00	0,80	+
μ BGA 48	0,27	0,27	1,80	2,22	+	2,16	1,85	++	2,70	1,48	++
Leistungsdiode	2,00	1,20	8,00	0,40	+	9,60	0,33	o	12,00	0,27	--

Tabelle 2: Anwendung der Richtlinien auf drei ausgewählte Bauelementestrukturen. Kritische Betrachtung des Einflusses der Schablonenhöhe

4.3 Prozessevaluierung beim Einsatz mehrstufiger Druckschablonen

Die dargestellten Aspekte zur Schablonengestaltung aufnehmend, ist die Zielsetzung sehr feine Anschlussstrukturen wie auch Bauelemente mit mehr Lotpastenbedarf in einem Druckvorgang zu verarbeiten. Hierzu ist eine Variation der Schablonenhöhe über das Layout erforderlich. Das Technologiekonzept dieser so genannten Stufenschablonen (Step Stencils) ist bereits seit Jahren bekannt, wurde jedoch bisher trotz deutlicher Vorteile durch die Darstellung von Fertigungsproblemen nur selten in Prozessen der Massenfertigung eingesetzt [87]. Hemmnisse sind dabei oftmals Fertigungsaspekte der Stufenschablonen und fehlende Kenntnisse über das Druckverhalten. Durch die Weiterentwicklungen im Bauelementesektor und den vermehrten Einsatz feinsten Strukturen tritt der Einsatz dieser Schablonen jedoch aktuell wieder in den Fokus der industriellen Anwendung.

Zur Implementierung eines zuverlässigen Druckprozesses mit Stufenschablonen ist es zunächst erforderlich den Prozess im Detail zu betrachten und Systemgrenzen aufzuzeigen. So können Vorteile aber auch Prozessgrenzen dargestellt werden. Verstärkt wird diese Betrachtung durch die Berücksichtigung spezifischer Faktoren wie Reinigungszyklen und Verschmutzungsneigung. Ebenso gilt es die Geometrie der Schablonenöffnungen und deren Anordnung bei der Anwendung von Stufenschablonen zu analysieren. In Bild 23 ist dazu eine vereinfachte Darstellung einer Stufenschablone gezeigt. Je nach Anforderung kann in der Stufenschablone eine Reduzierung bzw. Verstärkung der Schablonenhöhe realisiert werden. Die Konturabbildung ist zumeist nur auf der Rakelseite ausgeführt, um den Vorteil der Lotvolumenvariation abbilden zu können. Es besteht aber auch die Möglichkeit Konturen auf der Leiterplattenseite abzubilden. Diese werden prozessspezifisch zum Schutz bereits vorhandener Strukturen, Bauteile oder Pasten eingesetzt.

4.3.1 Gegenüberstellung alternativer Herstellungstechnologien

Die stufige Ausführung von Schablonen für den Pastenauftrag erfordert im Vergleich zu Standardschablonen weitere Prozessschritte bei der Herstellung. Basierend auf durchgeführten Technologierecherchen in Internet¹ und Literatur, konnten mehrere Herstellungsverfahren unterschieden werden [10] [73] [80]. Vergleichbar mit den Technologievarianten bei der Ausführung der Schablonendurchbrüche werden auch bei der Herstellung von Stufenschablonen firmenabhängig unterschiedliche Umsetzungen verfolgt. Im Wesentlichen lassen sich drei Hauptgruppen unterscheiden. Diese basieren in der Konzeption auf der Ätztechnik, auf der Beschichtungstechnik durch galvanischen Schichtaufbau sowie auf der Patchwork Technologie (vgl. Bild 22).

Bei der Herstellung einer stufengeätzten Schablone wird von der maximalen Schablonenhöhe ausgehend, partiell auf die entsprechenden Schablonenhöhen abgeätzt. Die maximale Höhe der Lotpastendepots wird dabei durch die Stärke des Basisblechs bestimmt. Von den Anbietern werden hier Schablonen in Höhen zwischen 150 bis 250 µm angeboten. [45] [129]

Durch die Verfahrenstechnik beim Ätzen von Metallblechen kann nur eine Oberflächengüte in der Rauigkeit von etwa 25 µm erreicht werden. Bei einer derartigen Oberflächenrauigkeit kann jedoch kein rückstandsloses Abziehen des Lotes sichergestellt werden. Hierdurch ist mit Restlot auf der Schablone zu rechnen, was zu einem

¹ www.cadillac-laser.de/produkte/22_/stufen.htm; www.dek.com/gmbh.nsf/dek/stencils.html;
www.storkveco.com/products/3_stencils/3_vecomulti_01.html

schnelleren Verschmutzen und zur Beeinflussung der Druckqualität führt. Bei dieser Technik sind somit Stahlraket bzw. geschlossene Rakelsysteme nur eingeschränkt einsetzbar. Demnach sollte nach Aussage einiger Hersteller vornehmlich auf Kunststoff rakel zurückgegriffen werden [45] [104]. Durch die Ätztechnik kann es neben der Oberflächenrauigkeit auch zur Schwächung von Metallblechen kommen. Die Härte und Festigkeit des Blechs, die durch das Walzen eingebracht wird, geht durch die partiellen Vertiefungen verloren. Dies führt zu einer verkürzten Lebensdauer der Schablone. Des Weiteren treten früher Froschbildung (fertigungstechnische Verwerfungen des gewalzten Edelstahlblechs) als auch Welligkeit auf, die sich ebenfalls vermindern auf die Qualität der Schablone auswirken. Übertragen auf das Anwendungsfeld von Stufenschablonen ist nur ein geringer Flächenanteil der Schablonen in maximaler Schablonenhöhe auszuführen. So kann die Schablonenschwächung im Produktionseinsatz schnell zu Ermüdung führen und so die Qualität negativ beeinflussen.

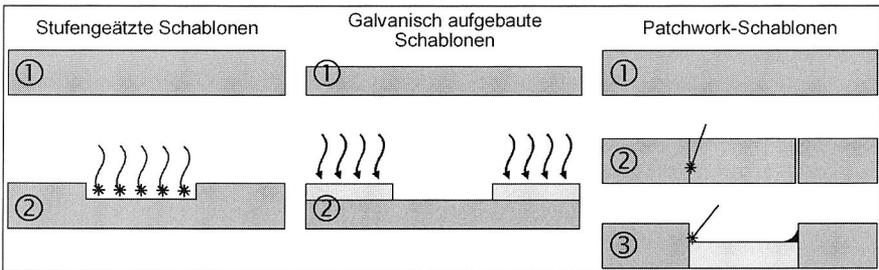


Bild 22: Alternative Herstellungstechnologien für Stufenschablonen

Neben den Faktoren der Schablonenherstellung sind in der Elektronikproduktion vielmehr Aspekte des Schablonendesigns entscheidend [151]. So steht bei der Anwendung von Stufenschablonen insbesondere der minimal einzuhaltende Abstand zwischen Schablonenöffnungen und Stufenübergängen im Vordergrund (vgl. Bild 23). Auf Basis durchgeführter Recherchen sind beim Einsatz stufengeätzter Schablonen folgende Designgrenzwerte gültig. Der Abstand parallel zur Rakelrichtung sollte bei 2 - 5 mm liegen, wobei senkrecht zur Bewegungsrichtung mindestens 1 mm pro 25 µm Stufensprunghöhe erforderlich ist. [45]

Bei der Technik galvanisch aufgebaute Schablonen unterscheidet man so genannte Laminatschablonen, bei denen ausgehend von einem gewalzten Blech die Erhöhungen partiell galvanisch aufgebaut werden und voll galvanisch aufgebaute Schablonen. Bei den Laminatschablonen wird die Höhe des Basismaterials durch die minimal benötigte Dicke bestimmt. Eine Reduzierung der Blechstärke ist nicht möglich. Der stufige Aufbau der Schablone erfolgt mittels elektrochemischen Verfahren zumeist gal-

vanisch und kann ausgehend von der Basisschablone eine Höhe zwischen 25 µm und 100 µm umfassen. [71] [72]

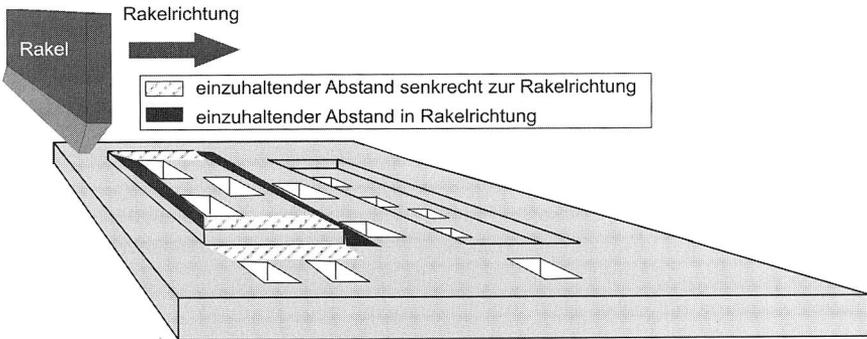


Bild 23: Kennzeichnung der kritischen Abstandsbereiche beim Einsatz von Stufenschablonen

Im Unterschied dazu ist für die vollgalvanisch aufgebaute Schablone bzw. Galvano-schablone oder Additivschablone keine Basisschablone notwendig. Bei der Herstellung dieser Schablonen wird Hartnickel verwendet. Dieses federharte Material eignet sich besonders gut für die Großserienproduktion. Außerdem sind diese Schablonen sehr gut für Anwendungen im Fine-Pitch Raster geeignet. Durch das Herstellungsverfahren ergeben sich glatte Wandungsflächen innerhalb der Durchbrüche, was ein verbessertes Auslösen der Paste zur Folge haben soll [72]. Die Fabrikation von Additivschablonen ist sehr aufwendig und teuer. Es bedarf einer klimatisierten Produktion unter Reinraumbedingungen und darüber hinaus werden spezielle Anforderungen an das Equipment gestellt. Die Herstellung lässt sich grob in 3 Verfahrensschritte gliedern. Zuerst wird eine elektrisch leitfähige Trägerplatte, die mit Photoresist beschichtet ist, belichtet. Die Trägerplatte dient somit als Matrize für die Schablone. An den Stellen, an denen in der Schablone später die Durchbrüche sind, bleibt das Photoresist stehen (Negativbild). Im zweiten Schritt wird die Matrize in ein Galvanikbad gegeben. Auf der elektrisch leitenden Matrize setzt sich Hartnickel ab. An der Stelle der Durchbrüche hindert das Photoresist das Anlagern von Nickel. Das Nickel wird galvanisch kontinuierlich aufgebaut. Die Verweildauer im Galvanikbad bestimmt somit die Dicke der Schablone. Abschließend wird die Schablone von der Matrize getrennt und die Matrize entsorgt.

Bei beiden galvanotechnischen Herstellungsverfahren kann der Druckvorgang mit Stahl- bzw. Kunststoff rakel erfolgen. Ebenso spricht nach Angabe der Hersteller nichts gegen die Anwendung von geschlossenen Rakelsystemen [81]. Unabhängig vom Ra-

kelmaterial konnten hinsichtlich des Schablonenlayouts folgende Vorgaben recherchiert werden. Senkrecht zur Rakelbewegungsrichtung wird ein Abstand von 1 bis 4 mm empfohlen. Hingegen soll in Bewegungsrichtung kein spezieller Abstand zum Stufensprung erforderlich sein. Begründet wird dies durch den gleichmäßigen Stufenübergang, wie er bei diesem Herstellungsverfahren realisiert wird. [72] [171]

Als dritte Variante zur Herstellung von Stufenschablonen ist die Patchwork-Technik anzuführen. Hier handelt es sich um einzelne Schablonen mit unterschiedlicher Blechstärke. Aus einem gewalzten Edelstahlblech (Basisblech) werden höher bzw. tiefer auszuführende Schablonenbereiche (Patch) abhängig vom Layout ausgeschnitten. In die im Basisblech frei gewordenen Bereiche werden mittels Laserschweißtechnik neue ebenfalls gewalzte Edelstahlbleche mit spezifischer Höhe eingesetzt. Das angewandte Schweißverfahren hat dabei nicht nur die Aufgabe, die beiden Bleche zu verbinden, sondern auch die Kanten des Übergangs abzurunden, um so ein Anpassen des Rakel an die Kontur zu unterstützen. Der Schweißgrat wird durch Bürsten entfernt, wobei die Maße der Durchbrüche im Gegensatz zum Elektropolieren erhalten bleiben. Gemäß der Vorgaben können minimale Schablonenhöhen von 50 μm realisiert werden. Die Patchhöhe liegt zwischen 25 μm und 300 μm . Einschränkungen bezüglich der verwendeten Rakel werden nicht gemacht. Auch bei Patchwork Schablonen sind Vorgaben zum Design verfügbar. So sollte in Rakelbewegungsrichtung ein minimaler Abstand von 0,5 mm zwischen den Schablonenöffnungen und dem Stufenrand nicht unterschritten werden. Dies ist einschränkend nur für Stufenübergänge von unter 100 μm gültig. Senkrecht zur Rakelrichtung wird als Richtwert ein minimaler Abstand von 0,5 mm pro 25 μm Stufensprung empfohlen. [113]

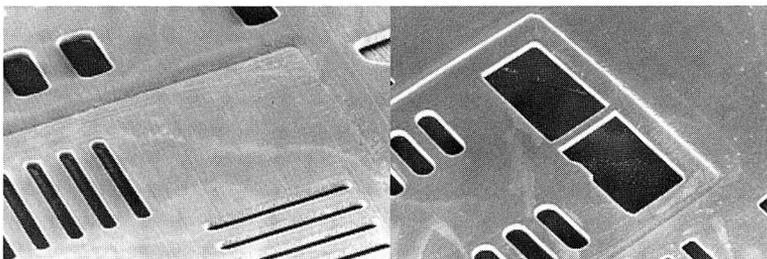


Bild 24: Patchwork-Schablone mit einer Nominaldicke von 150 μm – eingeschweißte Patches mit 100 μm (links) und mit 200 μm (rechts) [11]

Die Vorgaben zum Schablonendesign (Stufenabstand) sind für alle recherchierten Techniken sehr breit gefasst und herstellerabhängig unterschiedlich. Vielmehr sind bei manchen nachgefragten Anbietern Designempfehlungen gar nicht erhältlich, was die

Schwierigkeiten für potenzielle Anwender verdeutlicht und die bisherige Zurückhaltung im Praxiseinsatz der Technik erklärt. Umso wichtiger ist eine grundlegende Analyse dieser Thematik.

In der Gegenüberstellung der recherchierten Verfahren werden, wie bereits dargestellt, insbesondere bei geätzten Stufenschablonen Nachteile in der Anwendbarkeit und der Druckqualität deutlich. Daher sind stufengeätzte Schablonen in den nachfolgenden Analysen nicht mehr berücksichtigt worden. Vielmehr wurde die Analyse mit zwei alternativen Schablonen durchgeführt. Die Varianten waren eine voll galvanisch aufgebaute Stufenschablone der Fa. Rotec (Belgien) sowie eine Patchwork Schablone der Fa. Laserjob. Neben diesen Firmen sind weitere Anbieter von Stufenschablonen am Markt verfügbar und in Anhang B mit ihren Herstellungstechnologien verzeichnet. Die getroffene Auswahl für diese beiden Hersteller erfolgte weniger nach technologischen Gesichtspunkten, da hier kaum Unterschiede zu sehen waren. Wichtiger war bei der Untersuchung die Unterstützung bei der Designgestaltung.

Unter wirtschaftlichen Aspekten sind deutliche Unterschiede zwischen den Herstellungsverfahren zu machen. So ist die stufengeätzte Schablone auf dem Niveau der standardmäßigen SMT-Schablone einzuordnen. Etwas aufwendiger in der Herstellung ist die Patchwork Schablone, was auch kostenspezifisch deutlich wird. Am kostenintensivsten ist die Laminat bzw. voll galvanisch aufgebaute Variante, welche bis zum 3-fachen Kostensatz der stufengeätzten Schablone gehen kann.

Vor der Analyse der Druckqualität unterschiedlich hergestellter Stufenschablonen gilt es die Abbildung der vorgegebenen Stufenkontur zu bewerten. So sind die Höhen der Stufensprünge und die Höhen der Schablonendurchbrüche in den unterschiedlichen Bereichen zu verifizieren. Als Messverfahren bieten sich hier Systeme auf Basis der Lasertriangulation oder der Weißlichtinterferometrie an, mit denen eine dreidimensionale Analyse der Schablonenoberfläche erfolgen kann (vgl. Kapitel 5.1.2).

Für die ausgewählten Schablonentypen lassen sich anhand der Analyse deutliche Unterschiede nachweisen. Die Technologie eingeschweißter Patches (Patchwork-Schablone) ist dabei als konturgenau mit klaren Stufenübergängen zu bezeichnen (vgl. Bild 25). Hingegen zeigt die galvanisch aufgebaute Schablone an manchen Übergängen Maßabweichungen. Es sind keine exakten Schablonenstufen vorhanden, sondern ein kontinuierliches Angleichen an das niedrigere Niveau. Für das Abziehen mit dem Rakel ist dieser Aspekt als positiv zu deuten, steht aber im stufennahen Bereich im Gegensatz zur eigentlichen Funktion unterschiedlicher Stufenhöhen. Zudem ist die Oberflächengüte in den Fine-Pitch Bereichen mit einer Schablonenhöhe von 125 µm deutlich rauer als die auf der restlichen Schablonenoberfläche. Bei der Analyse des

Lotpastenauftrags werden die Schablonenarten diesbezüglich nochmals gegenübergestellt.

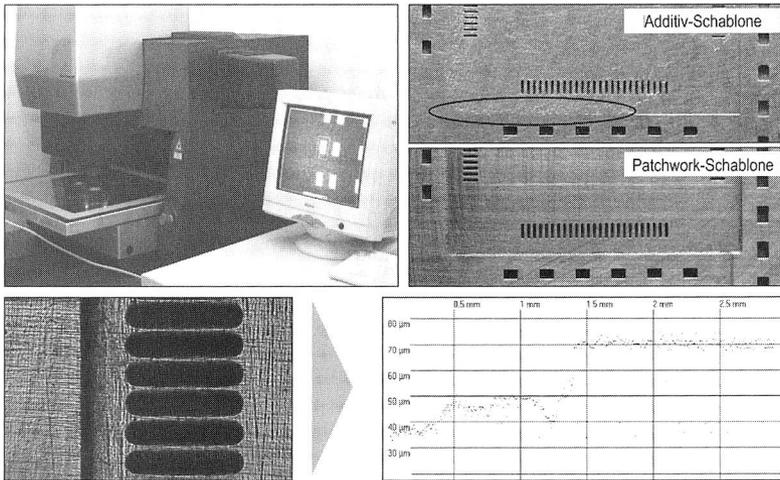


Bild 25: Überprüfung der realisierten Stufenkontur sowie der Schablonendurchbruchshöhen als Vorqualifikation der wesentlichen Eingangsgröße

4.3.2 Festlegung der Analyseschwerpunkte

Zur Gegenüberstellung von Schablonen beim Pastenauftrag ist die Definition der abzusetzenden Lotdepotgeometrien entscheidend für die Aussagekraft der Untersuchungen. Im speziellen Analysefall von Stufenschablonen gilt es somit auf einer Schablone klassische SMD Komponenten, Leistungsdioden aber auch Bauteile aus dem Fine-Pitch Bereich abzubilden. Die standardmäßigen Prozesseinstellungen wie Rakelgeschwindigkeit (20 mm/s), Druck (6 kg) und Rakelgeometrie wurden direkt vom Einsatz planarer Druckschablonen übernommen. Die zur Anwendung kommende bleihaltige Lotpaste (SS4-M952 – Fa. Koki; Sn62Pb36Ag2) weist eine Korngröße Typ 4 (25 - 38 µm) auf und ist damit für die Studien grundsätzlich geeignet.

Layoutgestaltung

Als Basis für die Analyse der Lotdepotausbildung wurden die in Tabelle 3 zusammengefassten Komponenten ausgewählt. Durch die Ausrichtung der Analyse auf die Lotpastendepots dienen die Bauelemente nur als fiktive Grundlage zur Festlegung einer praxisnahen Anschlusskontur auf dem Schaltungsträger bzw. der Öffnungsgeometrien auf der Schablone. Mit den ausgewählten Bauteilen kann der Einfluss der Stufen-

schablonen auf unterschiedliche Öffnungsgeometrien wie auch auf die Flächengrößen untersucht werden. Die angegebenen Größen für die Schablonenöffnungen und die Anschlussflächen auf der Leiterplatte sind, soweit verfügbar, aus Firmenvorschriften übernommen [60]. Alle weiteren Faktoren wurden von Normschriften abgeleitet [69].

Bauelemente	Pitch in μm	Anschlussfläche LP Bereich Lötstopp	Geometrie Schablonendurchbruch
Chip Resistor CR0805 Zweipoler	–	1,32 mm x 0,91 mm (2) 1,52 mm x 1,11 mm (3)	1,22 mm x 0,81 mm (2) Höhe: 150 μm
MELF – Metal Electrode Face; Leistungsdiode	–	1,50 mm x 1,21 mm (2) 1,70 mm x 1,32 mm (2)	1,40 mm x 1,11 mm (2) Höhe: 175 μm
μBGA – Mikro Ball Grid Array	750	0,30 mm (3) 0,50 mm (3)	0,275 mm (3) Höhe: 125 μm
SQFP100 – Quad Flat Pack	500	1,48 mm x 0,30 mm (3) 12,50 mm x 1,63 mm (2)	1,28 mm x 0,275 mm (3) Höhe: 125 μm
SQFP128 – Quad Flat Pack	400	1,48 mm x 0,25 mm (3) 12,85 mm x 1,63 mm (2)	1,28 mm x 0,225 mm (3) Höhe: 125 μm

Tabelle 3: Eingesetzte Komponentenstrukturen mit den Layoutgeometrien

Es gilt nun die ausgewählten Öffnungsgeometrien auf der Schablone so anzuordnen, dass möglichst viele Technologieaspekte und Anwendungsgrenzen von Stufenschablonen zu analysieren sind. Zur Umsetzung eines effizienten Versuchsablaufs wurde der Versuchsplan so gestaltet, dass der Pastenauftrag aus den vier möglichen Rakelrichtungen ($0^\circ / 180^\circ$; $90^\circ / 270^\circ$) erfolgt. Dies lässt sich durch den Systemaufbau vorteilhaft mit einem Schaltungsträger im Größenformat „Einfach-Euro“ realisieren.

Gemäß der definierten Bauteile und der Anschlussgeometrien sind drei Schablonenhöhen als drucktechnisch günstig definiert worden. Im Fine-Pitch Bereich der Bauteile Nr. 2-6 (vgl. Bild 26) soll die Schablone die geringste Höhe von 125 μm aufweisen. Das Normalniveau der Schablone ist zur Realisierung der Stufen in 150 μm ausgeführt. Die zur Abbildung von Leistungsbausteinen in der Untersuchung eingesetzten Melf Bausteine (Nr. 1) benötigen mehr Lotvolumen. So ist auf der Schablone in diesem Bereich eine Verstärkung auf 175 μm erforderlich. Per Vorgabe ist so an mehreren Positionen auf der Schablone ein Stufensprung von 25 μm abgebildet. Daneben gilt es aber auch den Einfluss einer 50 μm Stufung zu verdeutlichen. Dies wird durch einen direkten Übergang vom Bereich der Fine-Pitch zu den Leistungskomponenten erreicht.

² Eckige Grundform

³ Runde bzw. abgerundete Grundform

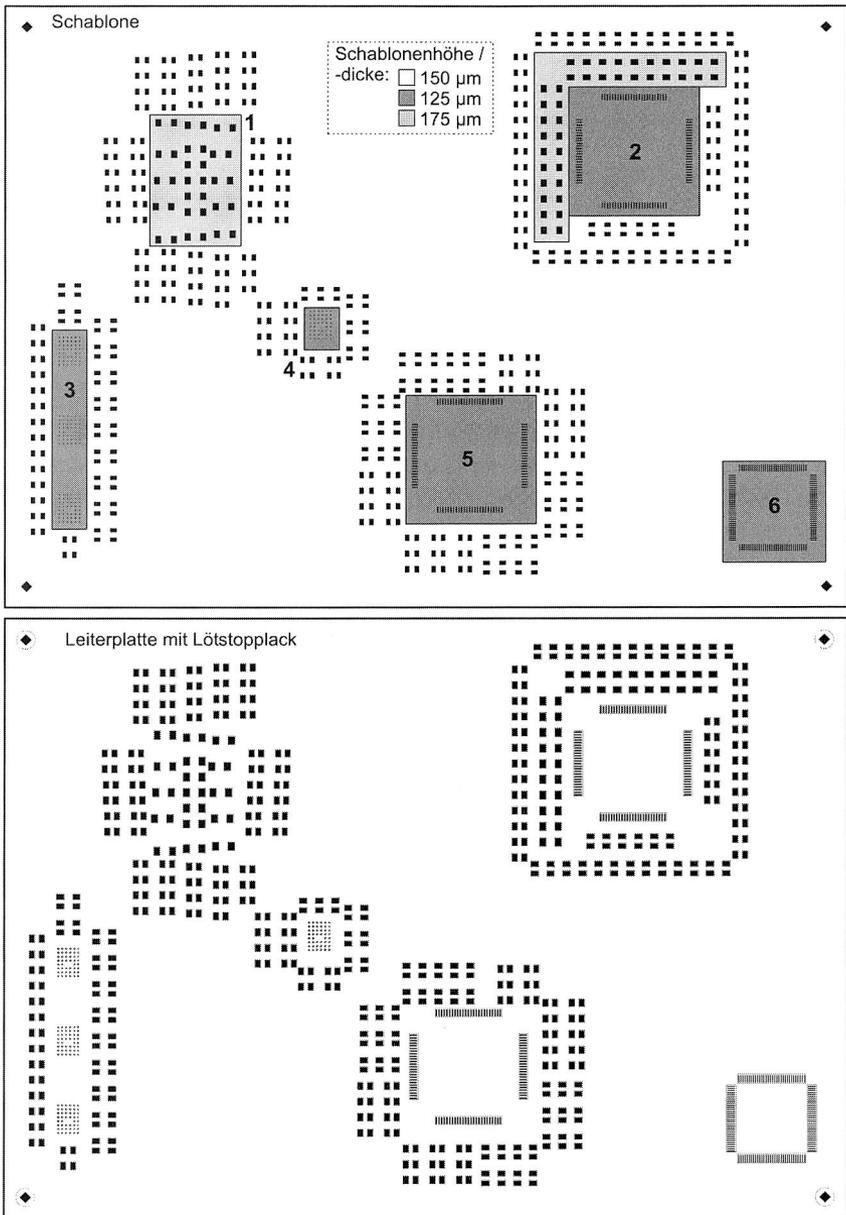


Bild 26: Layout von Stufenschablone und Leiterplatte

Wie im Schablonenlayout dargestellt, können somit sechs unterschiedliche Analysebereiche realisiert werden. In den Bereichen 1, 4, 5 und 6 kann durch das entwickelte Layout der Abstand zum Stufensprung im Detail analysiert werden. Die Anschlüsse der Fine-Pitch Bausteine (Nr. 4, 5, 6) bzw. der Leistungsdioden (Nr. 1) sind asymmetrisch in Abständen von 0,5 μm , 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm zum Stufensprung angeordnet. Im Bereich Nr. 2 sind Stufensprünge von 25 μm und 50 μm bei sonst konstanter Anordnung und einem vorgegebenen Abstand von 1 mm zum Stufensprung realisiert. Bereich Nummer 3 dient zur Analyse von Aspekten der Rakelflexibilität.

Um einen möglichst produktionsnahen Druckprozess zu simulieren, wurde der Schaltungsträger auch mit Lötstopplack versehen. Der Lötstopplack ist standardgemäß in einer Schichtdicke von 35 μm aufgebracht. Im Vergleich zu der Anschlussmetallisierungsstärke ca. 17 μm ergibt sich eine Höhendifferenz von 18 μm , die der Schablonenhöhe zu zurechnen ist, um eine theoretisch maximale und auch ideale Lotpastenhöhe rechnerisch zu ermitteln. Durch Auskehrreffekte des Rakel, aber auch durch das Abheben der Schablone nach dem Druck, kann der reale Volumenwert bzw. die Lotdephöhe relativ stark schwanken [128].

Schablonendrucker

Beim eingesetzten Schablonendrucker handelte es sich um die AP Excel der Firma Cookson Electronics Equipment - MPM. Dieser inlinefähige Drucker verfügt über eine rechnergestützte Steuerung auf Windows-NT-Plattform und gehört technologisch zur neuesten Generation von Schablonendruckern. Im Folgenden sollen aufgrund der Komplexität des Druckers nur einige für die Untersuchung wesentliche Faktoren dargestellt werden

Die Positionierung und Fixierung der Leiterplatte ist sowohl mechanisch (Side-Snuggers) als auch durch Vakuum (Drucknest) möglich. Das eingesetzte Vision-System verfügt mit seinen Linearantrieben über eine Wiederholgenauigkeit der Positionierung von $\pm 25 \mu\text{m}$ bei 6σ und dient sowohl der Ausrichtung von Schablone zur Leiterplatte vor dem Druckprozess als auch der 2D-Inspektion nach dem Drucken. Zusätzlich verfügt die Maschine über einen zweiköpfigen Pastendispenser und eine separate Einheit zur Reinigung der Schablone. Ebenso können geschlossene Rakelsysteme integriert werden, die in Absprache mit der Firma Speedline (Cookson Electronics Equipment Group) aus technologischen Gründen nicht zur Anwendung kamen. Somit wurden zur ganzheitlichen Betrachtung ein standardmäßiges Stahlrakel und ein Kunststoffrakel mittlerer Härte in den Untersuchungen eingesetzt. Um eine Beeinflussung des Drucks durch die Rakel auszuschließen, wurden die Untersuchungen mit neuwertigen Werkzeugen durchgeführt. Wie sich in Voruntersuchungen zeigen

ließ, ist dies insbesondere bei Kunststoffrakeln ein wesentliches Qualitätskriterium, weil nur so ein hinreichend gutes Abziehen der Schablone zu gewährleisten ist.

Bei allen Druckvorgängen wurde die maschineninterne Leiterplattenunterstützung eingesetzt, um vergleichbare Auftragskräfte über die gesamte Leiterplatte zu gewährleisten. Das Reinigen der Schablonen erfolgt mit dem Reinigungsmittel des Maschinenherstellers.

Optische Messmittel und Prüfmethoden

Wie bereits dargestellt, lässt sich die Qualität im Pastenauftrag durch Formstabilität und Formausbildung der Lotpastendepots beschreiben. Diese Kenngrößen sind durch optische Analysen direkt nach dem Pastenauftrag zu erfassen. Dazu sind 2D bzw. 3D Messsysteme verfügbar, die vom Abdeckungsgrad bis zur Konturanalyse ein breites Inspektionsspektrum umfassen. Moderne Anlagen zum Pastenauftrag verfügen darüber hinaus über interne 2D Prüfsysteme, die im Wesentlichen zur Ausrichtung der Schablone zur Leiterplatte dienen, aber eben auch nach dem Druckprozess eine stichpunktartige Abdeckungsinspektion an kritischen Stellen des Layouts ermöglichen.

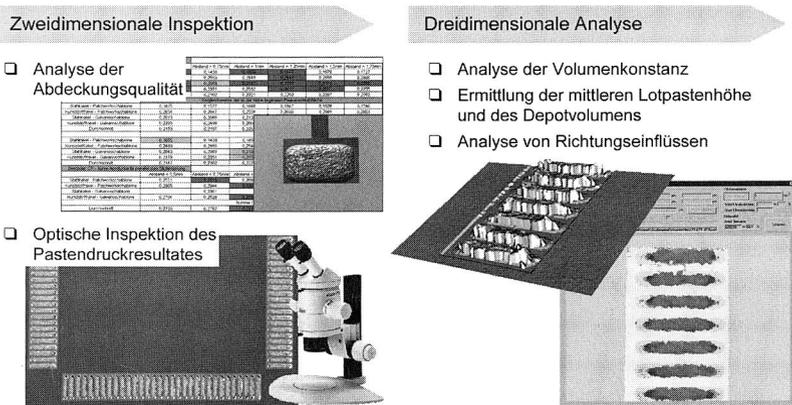


Bild 27: Abfolge bei der Lotdepotsinspektion

Um in der Studie eine ganzheitliche Analysebasis aufzubauen, erfolgte die Untersuchung in zwei Stufen. Beim Anlagenhersteller der Fa. Speedline wurden die Versuchsreihen durchgeführt und soweit möglich die verfügbaren Messmittel zur Erstbewertung eingesetzt. So konnte beispielsweise zur Analyse der Lotdepots die maschineninterne 2D-Inspektion, die auch der eingesetzte Drucker unterstützte, herangezogen werden. Zur Verstärkung der 2D Inspektionsergebnisse wurden alle Lotpastendepots noch

durch Aufnahmen mittels Stereomikroskopie protokolliert. In der zweiten Stufe wird eine dreidimensionale Vermessung der Depots durch das am Lehrstuhl zur Verfügung stehende Kohärenzradar (Weißlichtinterferometrie) durchgeführt (vgl. Kapitel 5.1.2). Diese Detailuntersuchung erfolgte direkt im Anschluss an den Pastenauftrag und konnte nach vier Tagen abgeschlossen werden. Durch die kurze Analysezeit und eine entsprechende Lagerung bei konstantem Klima können negative Folgen auf die Lot-depotform und damit eine Beeinflussung der Ergebnisse ausgeschlossen werden.

Versuchsplanung

Gemäß dem Layout von Leiterplatte und Schablone sind nach dem Versuchsplan vier Druckrichtungen zu unterscheiden. Dies gilt für beide Schablonenarten (galvanisch aufgebaute und Patchwork Schablone) und die zwei unterschiedlichen Rakelvarianten. Somit ergeben sich $2^4=16$ Einstellungen, die zur Verstärkung der Aussagefähigkeit mit jeweils 5 Leiterplatten umgesetzt wurden.

Parameter-einstellung	Herstellungsverfahren der Schablonen	Rakel-material	Bewegungsrichtung des Rakel
P1: PS_OU	Patchwork	Stahl	Oben nach Unten
P2: PK_OU	Patchwork	Kunststoff	
P3: GS_OU	Galvanisch aufgebaut	Stahl	
P4: GK_OU	Galvanisch aufgebaut	Kunststoff	
P5: PS_UO	Patchwork	Stahl	Unten nach Oben
P6: PK_UO	Patchwork	Kunststoff	
P7: GS_UO	Galvanisch aufgebaut	Stahl	
P8: GK_UO	Galvanisch aufgebaut	Kunststoff	
P9: PS_RL	Patchwork	Stahl	Rechts nach Links
P10: PK_RL	Patchwork	Kunststoff	
P11: GS_RL	Galvanisch aufgebaut	Stahl	
P12: GK_RL	Galvanisch aufgebaut	Kunststoff	
P13: PS_LR	Patchwork	Stahl	Links nach Rechts
P14: PK_LR	Patchwork	Kunststoff	
P15: GS_LR	Galvanisch aufgebaut	Stahl	
P16: GK_LR	Galvanisch aufgebaut	Kunststoff	

Bild 28: Untersuchungsprogramm zur Analyse des Stufeneinflusses

Um jeweils annähernd gleich bleibende Bedingungen herzustellen, ist die Schablone nach jedem Druckprozess von der Unter- sowie auch von der Oberseite gründlich manuell mit Reinigungsmittel zu säubern. Parallel dazu ist als ein entscheidendes Kriterium

um für das Einsatzpotenzial von Stufenschablonen die Verschmutzungsneigung zu analysieren. Die Güte des Schablonenabziehens wird mit alternierenden Rakelzügen untersucht. Hierdurch sind nur 2 Rakelrichtungen zu variieren, was $2^2=8$ Einstellungen erfordert. Zur Simulation der Verschmutzung wird jede Einstellung so oft wiederholt, bis sich ein mangelhafter Pastenauftrag durch die 2D Analyse des Schablonendruckers (Abdeckung unter 65 % bzw. über 125 %) nachweisen lässt. Auf den Versuchsplan basierend wurden in der Studie 120 Leiterplatten bedruckt.

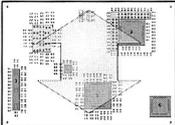
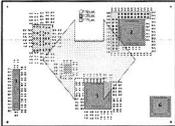
V1: PS_V	Patchwork	Stahl	
V2: PK_V	Patchwork	Kunststoff	
V3: GS_V	Galvanisch aufgebaut	Stahl	
V4: GK_V	Galvanisch aufgebaut	Kunststoff	
V5: PS_H	Patchwork	Stahl	
V6: PK_H	Patchwork	Kunststoff	
V7: GS_H	Galvanisch aufgebaut	Stahl	
V8: GK_H	Galvanisch aufgebaut	Kunststoff	

Bild 29: *Versuchsprogramm zur Untersuchung der Verschmutzungsneigung von Stufenschablonen*

4.3.3 Analyse der Lotdepotausbildung

Nach der groben Abschätzung des Versuchsplans sind in der Studie eine Vielzahl an Bild- und Analysedaten zu erfassen, die auszuwerten sind. Um diese analysieren zu können, ist es notwendig, Analyse Themen zu bilden. Dazu sind in Vorüberlegungen und während der Versuchsdurchführung sieben Schwerpunkte definiert worden. Jeder dieser Schwerpunkte wurde zur Qualifizierung von Anwendungspotenzialen und Systemgrenzen der Stufenschablonen in Kernaussagen gefasst. Diese sind im Folgenden dargestellt und anhand der Analyseergebnisse beurteilt.

Wirkung des Stufenabstandes auf das Druckergebnis (Lotdepotform)

Nachdem im Pastenauftrag speziell die Verarbeitung von Fine-Pitch Strukturen höhere Anforderungen an die Prozessführung stellt, gilt es insbesondere hier auf Volumenkonstanz und Formausbildung der Lotdepots zu achten. Diese Herausforderung aufnehmend, sollen zunächst die Analyseergebnisse aus diesen Bereichen mit den Bauteilraster QFP 100 und QFP 128 (Zone 4 / 5) dargestellt werden. Die Schablonen weisen hier eine Nominalhöhe von 125 µm auf. Der im definierten Abstand liegende Stufensprung steigt auf die mittlere Schablonenhöhe von 150 µm. Die jeweiligen Abstände charakterisieren das geometrische Lot vom Rand der Öffnung zum Stufensprung. Dieser wesentliche Vektor steht auf dem Vektor der Rakelrichtung stets senkrecht und

definiert somit den Analyseraum. Als Analysebasis lässt sich das maximal auftragbare Lotpastenvolumen aus der Aperaturfläche und der Schablonenhöhe wie folgt berechnen. Um die Vergleichbarkeit der ermittelten Werte für beide Öffnungsgeometrien sicher zu stellen, erfolgt eine getrennte Betrachtung der ermittelten Lotpastenvolumina.

Depotvolumen der SQFP100-Struktur – 500 µm Pitch Raster:

$$V_{\text{dot}} = (1,01 \text{ mm} \cdot 0,274 \text{ mm} + (0,138 \text{ mm})^2 \cdot \pi) \cdot (0,125 \text{ mm} + 0,018 \text{ mm}) \quad (4)$$

$$V_{\text{dot}} = 0,048 \text{ mm}^3$$

Depotvolumen der SQFP128-Struktur – 400 µm Pitch Raster:

$$V_{\text{dot}} = (1,06 \text{ mm} \cdot 0,225 \text{ mm} + (0,113 \text{ mm})^2 \cdot \pi) \cdot (0,125 \text{ mm} + 0,018 \text{ mm}) \quad (5)$$

$$V_{\text{dot}} = 0,040 \text{ mm}^3$$

Wie die graphische Auswertung der Volumenwerte in Bild 30 belegt, zeigt der Stufenprung eine nachweisliche Wirkung auf das Depotvolumen. Erst ab einem Randabstand von mehr als 1,5 mm vom Stufenprung sind über alle Varianten vergleichbare Werte für das Lotvolumen zu ermitteln. Dies lässt sich auch durch eine kleinere Standardabweichung belegen. Zu unterstreichen sind im Besonderen Abweichungen zwischen Kunststoff- und Stahlrakel. Hingegen zeigen die Volumenwerte, bezogen auf die Herstellungstechnologie der Schablonen, keine direkte Abhängigkeit. Beide Betrachtungen werden noch im Einzelnen dargestellt.

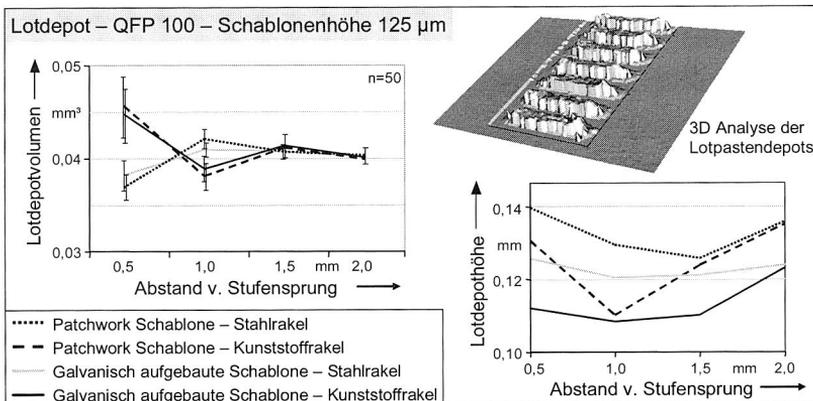


Bild 30: Analyse der Lotdepots in Abhängigkeit vom Abstand zur Schablonenstufe (Stufen: 150 µm ⇒ 125 µm; 500 µm Pitch – QFP 100) [56]

Neben der aussagerelevanten Volumenmessung sind ebenfalls Analysen hinsichtlich der Lotpastenhöhe durchgeführt worden. Wie die Abbildung ebenfalls belegt, ist dieser

Messwert nur bedingt aussagekräftig. Durch die Messunsicherheit und die ausgeprägte Konturform der Lotdepots lassen sich insbesondere bei feinen Strukturen keine zuverlässigen Werte ermitteln (vgl. Bild 30 rechts unten). Hingegen wird die Analyseausage durch die Betrachtung der Standardabweichung über die gemessenen Lotpastenhöhen noch verstärkt werden.

Insgesamt lassen sich folgende Aussagen zur Analyse der Lotdepots im Fine-Pitch Bereich (500 µm Rastermaß) treffen. Zunächst sind die Unterschiede der aufgenommenen Volumenwerte ab einem Stufenabstand von 1 mm und dem Einsatz eines Stahlrakel vernachlässigbar gering. Dies belegt die Einschätzung einer zuverlässigen Prozessbeherrschung beim Einsatz von Stufenschablonen. Andererseits ist auffällig, dass bei den Strukturen im Stufenabstand von 0,5 mm das maximal auftragbare Lotpastenvolumen bei manchen Proben überschritten wird. Als Ursache kann ein differenter Rakeldruck auf Schablone und Leiterplatte angeführt werden, der in der Studie durch systeminterne Sensorik belegt werden konnte. Durch die Rakeldeformation am Stufensprung wirken andere Kräfte auf die pastöse Lotpaste, wodurch die Abstreifwirkung auf überschüssige Lotpaste in der Schablonenstufe schwindet und sich Depotvolumina über den rechnerisch zu erwartenden Werten ergeben [55].

Ähnliche Aussagen können auch bei der Untersuchung des Analysebereiches 5 (QFP 128 µm; Pitchraster 400 µm) ermittelt werden. Unterschiede zeigen sich lediglich bei der Analyse der Lotvolumina. So ist die Streuung der Versuchswerte größer, was durch die feinere Druckgeometrie zu begründen ist.

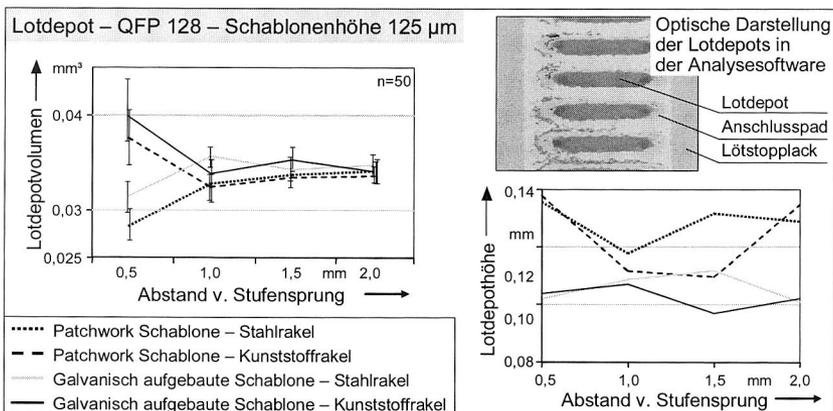


Bild 31: Analyse der Lotdepots in Abhängigkeit vom Abstand zur Schablonenstufe (Stufen: 150 µm ⇒ 125 µm; QFP 128)

Im Stufenabstand von über einem Millimeter sind die Unterschiede, bezogen auf die Untersuchungsvarianten, kaum mehr zu deuten. Die ermittelten Schwankungen im Volumen können aber zu Einschränkungen in der Prozessbeherrschung führen. Auch hier konnten in der Auswertung Volumenwerte ermittelt werden, die über dem theoretischen Abdruckmaximum liegen.

Neben der Umsetzung von Stufenschablonen mit höhenreduzierten Fine-Pitch Bereichen kann auch eine partielle Verstärkung der Schablone erfolgen. Diese Bereiche sind vornehmlich zur Verarbeitung von Leistungskomponenten vorgesehen. Korrespondierend wurde der Bereich Nr. 1 als Leistungsbereich vom Nominalniveau (150 μm) auf 175 μm erhöht. Zu betrachten sind hier beide Seiten der Schablonenstufe. Einmal ist das Kriterium Stufenabstand im Leistungsbereich zu analysieren, wobei unter Berücksichtigung des Prozessaufbaus die Deformation des Rakel nicht auf diesen Bereich begrenzt ist. Als entscheidend für die Depotqualität der gesamten Baugruppe sind daher zweitens die Übergänge auf die Nominalhöhen zu nennen. So sind zur Analyse im Leistungsbereich Schablonendurchbrüche für Melf Bausteine vorgesehen und im Umfeld der Erhöhung wurden Schablonenöffnungen in der Struktur von Chip-Widerständen der Größe CR0805 eingebracht. Bezogen auf die Layoutmaße (vgl. Tabelle 3) sind in der Analyse folgende Volumenwerte zu erwarten.

Depotvolumen der MELF-Struktur (Leistungskomponente):

$$V_{\text{dot}} = 1,40 \text{ mm} \cdot 1,11 \text{ mm} \cdot (0,175 \text{ mm} + 0,018 \text{ mm}) = 0,299 \text{ mm}^3 \quad (6)$$

Depotvolumen der CR0805-Struktur:

$$V_{\text{dot}} = 1,22 \text{ mm} \cdot 0,81 \text{ mm} \cdot (0,175 \text{ mm} + 0,018 \text{ mm}) = 0,167 \text{ mm}^3 \quad (7)$$

Den theoretischen Volumenwerten folgend, sind die gemessenen Volumina dieser Strukturen um einen Faktor höher als die Werte im Fine-Pitch Bereich. Trotzdem lassen sich ähnliche Schlussfolgerungen durch die Analyse der Messwerte ableiten. Wie in Bild 32 dargestellt, sind zunächst wiederum zwei Bereiche über den Stufenabstand zu unterscheiden. Im Abstand von weniger als 0,75 mm sind Schwankungen über die Untersuchungsvarianten nachweisbar. Diese Schwankungen zeigen sich ebenfalls an der Standardabweichung der Messergebnisse.

Einschränkend ist jedoch anzuführen, dass diese Schwankungen nicht zu vergleichen sind mit den Schwankungen im Fine-Pitch Bereich. Relativ betrachtet sind im Fine-Pitch Bereich im Abstand von weniger als 0,5 mm Schwankungen in der Größenordnung zwischen 10 % und 15 % zu ermitteln. Im Gegensatz dazu liegt hier die Schwankungsbreite vergleichsweise niedrig bei ungefähr 4 %.

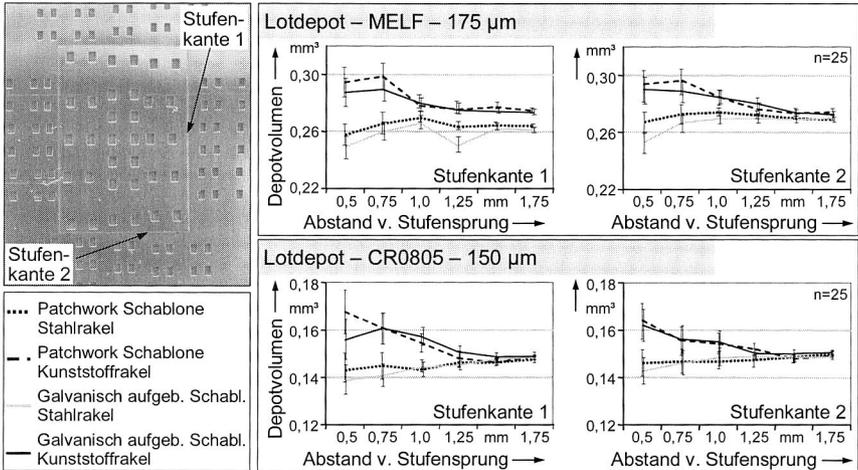


Bild 32: Analyse der Lotdepothöhe in Abhängigkeit vom Abstand zur Schablonenstufe (Stufen: 150 µm ↔ 175 µm)

Eine technologische Grenze für das Schablonendesign lässt sich an den Werten nur bedingt nachweisen. Insbesondere beim Einsatz von Stahrrakeln ist ein Einsatz von Stufenschablonen, auch im Abstand von 0,5 mm, ohne erhebliche Einschränkungen in der Lotdepotform möglich. Dies gilt für beide untersuchten Geometrien (MELF / CR-0805) entlang der Stufenkante 1 und 2. Durch die leicht geänderte Flächenanordnung an der Stufenkante 2 lässt sich eine geringe Schwankung über die Volumenmittelwerte berechnen. Diese Aussage ist nicht zu belegen, da der Effekt im Streubereich der Ergebnisse liegt.

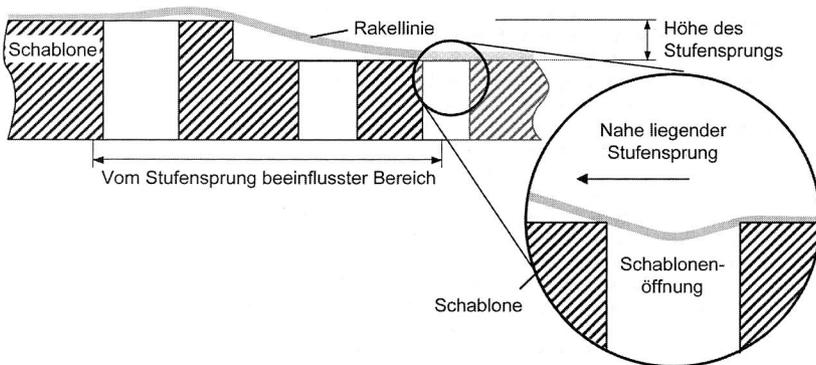


Bild 33: Verstärkte Darstellung der prinzipiellen Rakeldeformation am Stufensprung

Die Schwankungen im Volumen lassen sich, wie bereits dargestellt, durch Rakel deformation und eine damit verbundene unterschiedliche Kraftwirkung begründen. Dieses Prinzip ist schematisch in Bild 33 dargestellt. Gerade an den Stellen, an denen das Rakel in der Vertiefung wieder zum Aufliegen kommt, kann es bei einer ungünstigen Lage des Ausbruchs zu einem erhöhten Auskehren des Lotes kommen, was sich in einem geringeren Lotpastenvolumen dieser Depots widerspiegelt. Dadurch sind die lokalen Minima im Verlauf der Lotpastenvolumen zu erklären. Mit zunehmendem Abstand des Durchbruchs vom Stufensprung ist davon auszugehen, dass sich die Lotpastenvolumina auf einen konstanten Wert einpendeln.

Grenzverhalten der Druckbarkeit und des Auslöseverhaltens

Die Prozessgrenzen beim Pastenauftrag im Druckprozess werden durch das Auslöseverhalten (Area Ratio) und die Druckbarkeit (Aspect Ratio) beschrieben. Soll gleiches für die Stufenschablone gelten, muss geklärt werden, inwieweit diese Druckeigenschaften gegeben sind. Dazu sind in zwei Analysebereichen (3 und 4) die Strukturen von Mikro Ball Grid Array (μ BGA) Anschlüssen abgebildet worden. Diese in runder Geometrie aufgeführten Schablonenöffnungen liegen in ihren Kennwerten sehr nahe an den Grenzwerten der Designrichtlinien und eignen sich entsprechend für eine kritische Betrachtung der Technologie.

Die bereits bei Standardschablonen zu beobachtende mangelhafte Ausbildung von Lotdepots bei diesen Strukturen wird bei den Stufenschablonen noch deutlicher. Folglich konnte keine quantitative Auswertung der Depotvolumen erfolgen. Bei manchen Parameterkombinationen wurden überdies gar keine Lotdepots auf der Leiterplatte abgebildet. Nachdem der eingesetzte Schablonendrucker AP Excel, bedingt durch die Kameraauflösung, keine 2D Inspektion der kleinen μ BGA Anschlussflächen auf dem Schaltungsträger zuließ, konzentrierten sich die Analysen allein auf die vorliegenden Mikroskopaufnahmen.

Mangelhafte Druckergebnisse waren speziell im Analysebereich 4 zu verzeichnen. Dies zeigte sich auch in einem schlechteren Abziehen der Lotpaste. Der vertiefte Bereich der Stufenschablone hat hier nur eine Größe von 8,05 x 6,55 mm, was zur Anpassung des Rakel nicht ausreicht. Die Gegenüberstellung der Mikroskopbilder macht deutlich, dass bereits innerhalb der einzelnen Parametereinstellungen erhebliche Unterschiede im Druckergebnis auftreten.

Es muss daher für jede Parametereinstellung das beste und das schlechteste Druckergebnis betrachtet und diese miteinander verglichen werden. Darauf aufbauend lassen sich dann die Druckergebnisse für die unterschiedlichen Parametereinstellungen gegenüberstellen. Zunächst wird auf den Prozess mit der Einstellung „Patchwork

Schablone und Stahlraket (P1, P5, P7, P9)“ eingegangen. Bild 34 stellt im linken Bildabschnitt das beste Druckergebnis der Anschlussstruktur in der Region 4 dar, während das Druckergebnis in der rechten Bildhälfte mit nur einer bedruckten Anschlussfläche nicht akzeptiert werden kann.

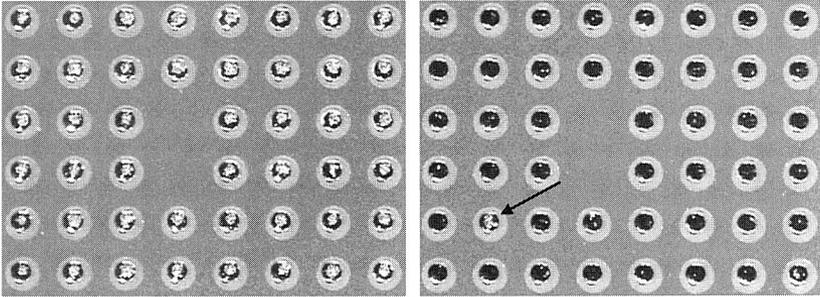


Bild 34: Vergleich der Druckergebnisse der μ BGA-Anschlussstrukturen der Region 4 für die Parameterkombinationen P1, P5, P7, P9

Ähnliche Ergebnisse erhält man beim Vergleich der μ BGA Strukturen der Region 3. Zu hinterfragen ist, warum innerhalb einer Parametereinstellung solche Abweichungen auftreten können. Ein Kriterium ist sicherlich die Reinigung der Schablonenober- und -unterseite nach jedem Druck. Die manuelle Reinigung gestaltet sich bei diesen Anschlussstrukturen relativ schwierig und aufwendig. So kann die nicht reproduzierbar durchzuführende Schablonenreinigung diese Schwankungen bewirken. Nachzuweisen ist aber auch der Einfluss des Schablonenlayouts. Insbesondere in höhenreduzierten Bereichen ist die Wirkung auf Druckqualität und Depotform zu zeigen.

Wie in Bild 35 dargestellt, sind bei allen Faktor-Kombinationen erhebliche Unterschiede im Depotvolumen festzustellen. Folglich können bei der Technologie „Stufenschablone“ die Grenzwerte für planare Schablonen nur bedingt übernommen werden. Eine engere Einfassung ist notwendig, um einen reproduzierbaren Pastenauftrag mit gleichmäßigen Lotdepots zu erreichen.

Nachdem in Bild 35 nur die Druckergebnisse aus den Untersuchungsvarianten P9-16 (vgl. Bild 28) gegenübergestellt sind, lassen sich auch Unterschiede zwischen den Lotdepots der drei μ BGA Strukturen nachweisen. War das Druckbild in den Randbereichen sehr mager bzw. kein Lot vorhanden, so konnte über alle Versuchsreihen der Studie im mittleren Bereich der höhenreduzierten Zone ein verbessertes Druckresultat erzielt werden. Dies gilt im Besonderen für die galvanisch aufgebaute Schablone, mit der ein vollständiger, gleichmäßiger Lotauftrag in der Bereichsmitte zu erreichen war.

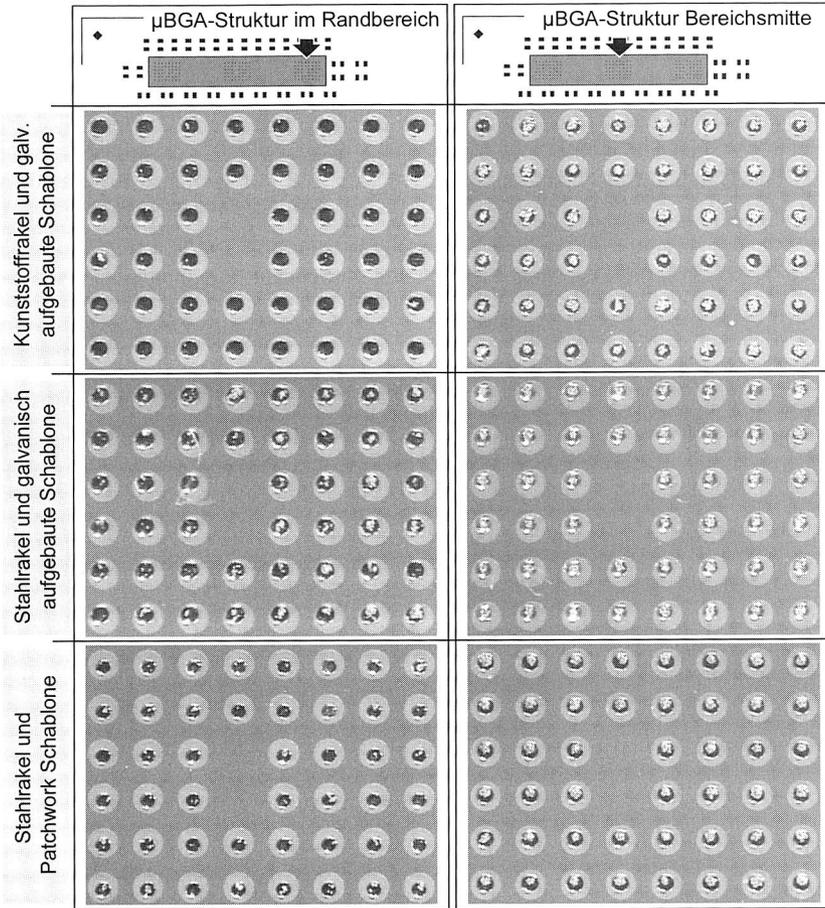


Bild 35: Gegenüberstellung der abgesetzten Lotdepots der μBGA 46 Strukturen (Region 3 – Rakelrichtung senkrecht zur langen Bereichsseite)

Einfluss des Rakelmaterials auf das Druckergebnis

Der Rakel stellt neben der Schablone das zweite wesentliche Werkzeug im Pastenauftrag dar. Rakelwinkel, Material und Härte erschließen Möglichkeiten der Prozessoptimierung, die nunmehr auch in der Praxis zum Einsatz kommen [76]. Um eine erste Abschätzung bei Stufenschablonen geben zu können, wurden in den Studien alle Versuchsreihen mit gebräuchlichem Stahlraket und einem Kunststoffraket mittlerer Härte durchgeführt.

Wie in den bereits dargestellten Ergebnissen angedeutet, zeigen die beiden Rakeltypen unterschiedliche Ausprägungen in den Druckeigenschaften. Durch das differente dynamische Verhalten der Werkstoffvarianten gilt es den Einfluss der Stufenübergänge auf ein höheres bzw. niedrigeres Schablonenniveau herauszuarbeiten. Im Fokus der Betrachtung steht dabei nicht der Stufenabstand, sondern vielmehr die Abweichung der Volumenwerte bezogen auf den Rakelwerkstoff. Als Maß für die Abweichung wird das Lotdepotvolumen im minimalen Stufenabstand herangezogen. Die relative Volumendifferenz wurde in Korrelation zu einem durch die Stufe nicht zu beeinflussenden Volumenwert ermittelt. Dieses Lotdepot musste damit mehr als 2 mm von einer Stufe entfernt liegen.

Der Stufensprung auf ein höheres Schablonenniveau wird zumeist als weniger kritisch angesehen [113]. Die Öffnungsgeometrien der Schablone sind relativ betrachtet, größer ausgeführt und auch der Rakel kann vergleichbar der planaren Technik über den höheren Schablonenbereich streifen. Nachdem in den Studien zwei unterschiedliche Übergänge auf höheres Niveau realisiert wurden, umfasst die Analyse der Lotdepots die Analysebereiche 1 und 5.

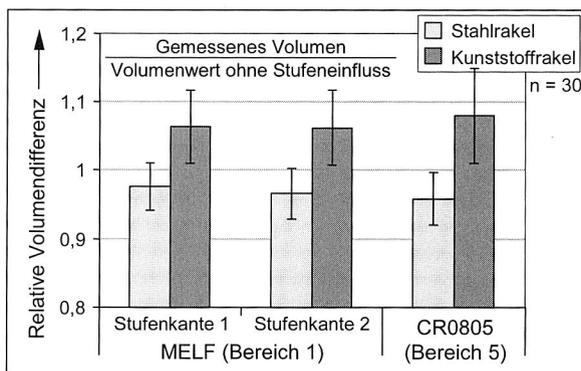


Bild 36: Gegenüberstellung der eingesetzten Rakeltypen unter dem Aspekt der Volumenkonstanz – Übergang auf ein höheres Schablonenniveau (25 μm)

Die Gegenüberstellung in Bild 36 unterstreicht nochmals die Vorteile beim Einsatz eines Stahlraker. Trotz zunächst erwarteter Potenziale von Kunststoffrakeln, die materialbedingt eine bessere Dynamik besitzen, sind größere Schwankungen im Verhältnis zum unbeeinflussten Lotdepot zu ermitteln. Darüber hinaus lassen die konstanten Verhältnismerte der Lotdepots auf eine gute Prozessbeherrschbarkeit der mehrstufigen Schablonentechnologie schließen. Eine Korrelation zur Größe der Schablonenöffnungen konnte nicht nachweisen werden.

Noch deutlicher wird diese Einschätzung bei der Analyse des Stufenübergangs auf ein niedrigeres Niveau. Gemäß den für die Analyse herangezogenen Bereichen 1, 5 und 6 umfasst die Auswertung im Wesentlichen die Fine-Pitch Strukturen (SQFP 100/128). Diese stellen von vornherein erhöhte Anforderungen an den Druckprozess. So ist auch eine größere Volumendifferenz zu erwarten. Bild 37 bestätigt dies, zeigt aber wiederum beim Einsatz des Stahlrakel eine relativ konstante Abdruckqualität über die Lotdepots. Für den Fine-Pitch Bereich wird ebenso deutlich, dass die Volumendifferenz indirekt proportional zur Größe der Schablonenöffnungen ansteigt. Übertragen auf die Zielsetzung eine allgemein gültige Richtlinie zu entwickeln, unterstreicht dies die Schwierigkeit diskrete Anwendungsgrenzen zu definieren. Es sollte demnach nicht von Grenzen, sondern von Anwendungsintervallen gesprochen werden, die in einer bauteilunabhängigen Designvorschrift münden.

In Bild 37 ist als dritte Kategorie die relative Volumendifferenz über die Lotdepotvolumen der Zweipoler „CR0805“ dargestellt. Die Analyseergebnisse folgen der bereits dargestellten Empfehlung zum Einsatz eines Stahlrakel.

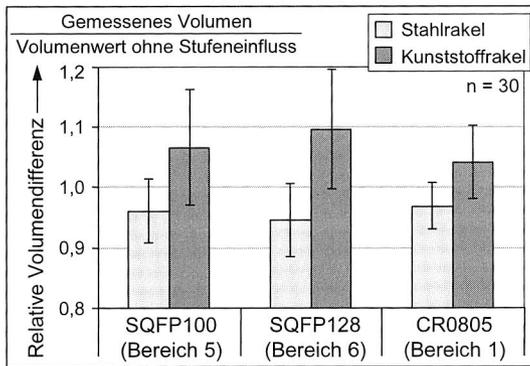


Bild 37: Gegenüberstellung der eingesetzten Rakeltypen unter dem Aspekt der Volumenkonstanz – Übergang auf ein niedrigeres Schablonenniveau (25 µm)

Interessant ist die Graphik dahingehend, dass die relative Volumendifferenz höher ausfällt als beim untersuchten Stufenübergang auf ein höheres Niveau. Nachdem dieser Effekt nicht als Rauschen der Messwerte bzw. des Prüfverfahrens zu deuten ist, sind Stufenübergänge auf niedrigere Schablonenniveaus als kritischer anzusehen.

Einfluss des Herstellungsverfahrens der Schablonen auf das Druckergebnis

Die weitere Miniaturisierung bei Bauteilen und Anschlussstrukturen zwingt Anlagen- wie Systemhersteller zu neuartigen Lösungsansätzen. Im Pastenauftrag trifft dies ins-

besondere die Schablone [71]. Hier werden, wie bereits dargestellt, unterschiedliche Herstellungsvarianten für Druckschablonen entwickelt, um Auslöseverhalten, Positionsgenauigkeit bzw. Oberflächenstruktur zu verbessern.

Im Rahmen der Studie kamen diesbezüglich die beiden Varianten „galvanisch aufgebaute“ sowie „Patchwork“ Schablone zum Einsatz. In Anlehnung an die Auswertung der Rakelmaterialien erfolgte die Analyse auf Basis der Volumenwerte im Nahbereich der Schablonenstufe und umfasste die angesprochenen Analysebereiche. Ebenso wurde der Einfluss der Schablonenvarianten, getrennt nach der Art des Stufenübergangs, bewertet. Die Vergleichbarkeit der Volumenwerte basierte wiederum in einer Normierung an Lotdepots ohne Stufeneinfluss.

Wie bereits in den Auswertungen zum Stufenabstand angedeutet, ist der Einfluss der Schablonenvariante dem des Rakelmaterials untergeordnet. Trotzdem lassen sich einige Tendenzen anhand der in Bild 38 dargestellten Graphik ableiten. Wie aus der Darstellung hervorgeht, zeigt die galvanisch hergestellte Schablone für alle untersuchten Strukturen eine etwas höhere Abweichung im Lotvolumen. Dieser Effekt wird speziell bei feineren Strukturen deutlich. Die ermittelten Standardabweichungen lassen die Interpretation als Messwertrauschen aufkommen. Die große Anzahl an Versuchswerten sollte aber die Bewertung als Tendenz zulassen.

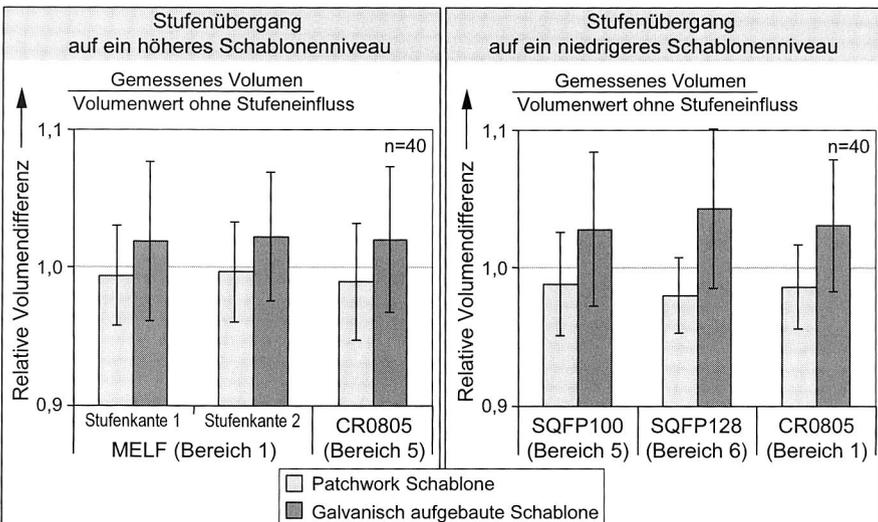


Bild 38: Gegenüberstellung der Herstellungsverfahren von Stufenschablonen unter dem Aspekt der Volumenkonstanz

Damit kann die Patchwork-Schablone, wie weiterführende Analysen zeigen, nicht sofort als die bessere Variante gelten. Vielmehr lässt sich der Effekt durch das Schablonenhöhenprofil erklären. Dazu wurden beide Schablonen mit dem bereits für die Lotdepotanalyse eingesetzten Kohärenzradar vermessen (vgl. Kapitel 5.3).

Während die Technologie der eingeschweißten Patches bei der Patchwork Schablone konturgenaue und klare Übergänge erzeugt, zeigt sich bei der galvanisch aufgebauten Schablone ein eher gleitender Übergang. Dadurch lässt sich auch der Unterschied im Volumen erklären. Weiterhin ist durch die Oberflächenanalyse eine deutlich höhere Oberflächenrauheit in den Fine-Pitch Bereichen der galvanisch aufgebauten Schablonen nachzuweisen. Auswirkungen auf die Druckqualität ließen sich nicht belegen.

Zu unterstreichen ist bei der Schablonenbewertung der Ausbruch eines kleinen Eckbereiches in der Patchwork-Schablone. Die Schablonen wurden zwar durch die Reinigungszyklen stark belastet, ein solches Versagen nach ca. 60 Druck- bzw. Reinigungsvorgängen ist aber als eher kritisch zu beurteilen.

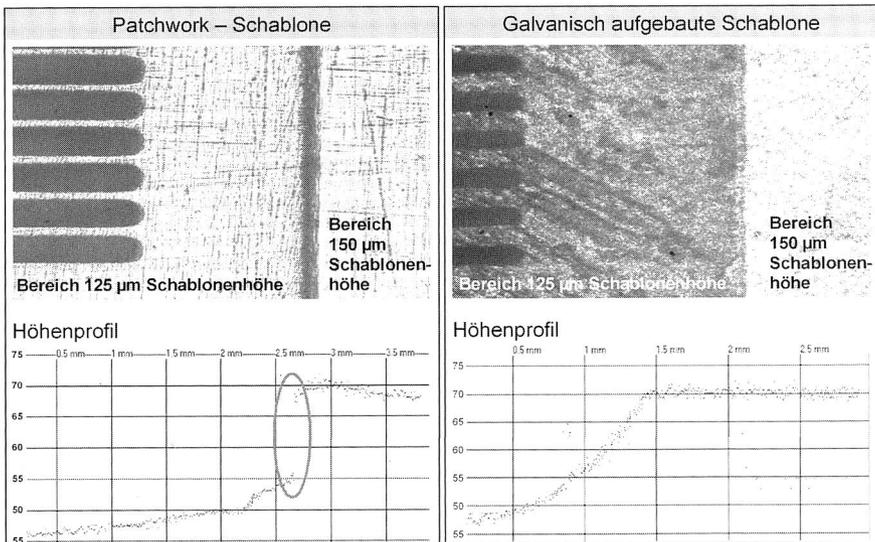


Bild 39: Stufensprung von 125 µm auf 150 µm bei der Patchwork-Schablone (links) und der Galvano-Schablone (rechts)

Berücksichtigt man den gleitenden Übergang im Layoutdesign und die nur minimalen Auswirkungen auf das Depotvolumen, können beide Schablonen als gleichwertig in

der Druckqualität bewertet werden. Um detaillierte Aussagen über die Lebensdauer von Patchwork-Schablonen zu treffen, sind Langzeitstudien im realen Fertigungsbetrieb erforderlich.

Wirkung der Stufenhöhe auf die Lotdepotform

In der bisherigen Betrachtung der Technologie „Stufenschablone“ bezogen sich die Analysen immer auf einen Stufenübergang von 25 μm . Durch diesen relativ kleinen Stufenübergang könnten sich für so manche Baugruppen deutliche Vorteile im Pastenauftrag ergeben. Trotzdem sind auch höhere Stufenübergänge technisch möglich und für einige Anwendungen auch praktisch sinnvoll. Daher wurde im bisher unbeachteten Analysebereich 2 ein Stufensprung von 50 μm neben einer Stufe von nur 25 μm abgebildet. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist in dem zur Analyse dienenden Fine-Pitch Bereich die Durchbruchstruktur eines SQFP 100 eingebracht. Der Abstand zwischen den Schablonenöffnungen und dem Stufensprung ist konstant auf 1,25 mm festgelegt. Aufgrund der symmetrischen Anordnung und den daraus resultierenden konstanten Abständen zum Stufensprung können zur Auswertung alle Parameterkombinationen herangezogen werden.

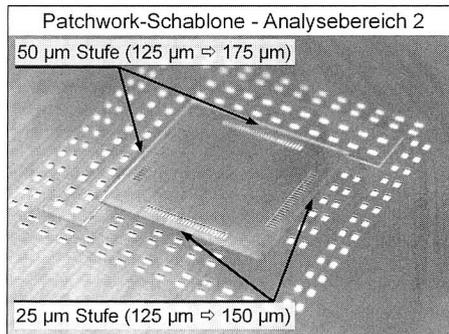


Bild 40: Gegenüberstellung unterschiedlicher Stufenhöhen

In Bild 41 sind die zwei Stufenhöhen nach Rakelmaterial und Schablonentypus gegenübergestellt. Deutlich sind höhere Volumenwerte bei der 50 μm Stufe zu sehen. Bezogen auf die gesamte Graphik lässt sich das dargestellte Prinzip der Rakelverformung auch auf höhere Stufen übertragen. Durch die Deformation des Rakel kommt es im Nahbereich zu Schwankungen im Lotvolumen, die abhängig vom Abstand zum Stufensprung und von der Durchbruchgröße zur kritischen Beeinflussung des Prozesses führen können. Im angeführten Beispiel, das nur als Momentaufnahme des Abstandes 1,25 mm anzusehen ist, ist die Kombination mit Stahlrakel und galvanisch hergestellter Schablone als zuverlässig zu bewerten. Dies liegt einerseits in der geringen Standard-

abweichung der Stichprobe und andererseits in der vergleichbaren Größenordnung für die Lotdepotvolumen begründet.

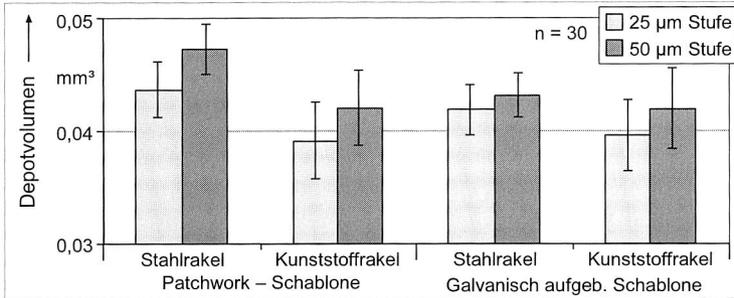


Bild 41: Vergleich der Lotpastenvolumen für beide Stufenhöhen

Gerade die Tendenz eines überhöhten Pastenauftrages ist bei Fine-Pitch Anwendungen unerwünscht, weil dadurch zu hohe Lotpastendepots entstehen, welche die Bildung von Lotbrücken und Lotkugeln begünstigen [31]. Eben dies soll mit dem Einsatz von Stufenschablonen verhindert werden.

Die Volumenaussage ist zumeist der einzige, quantitativ zu ermittelnde Wert, der über alle Auswertungen eine Vergleichbarkeit zulässt. Wie in Bild 42 zu erkennen, gibt es aber auch Grenzen. Bei manchen Lotdepots im Umfeld der 50 µm Stufe wird eine Höhenreduzierung der Konturform deutlich. Dies lässt sich wiederum durch die Rakelverformung begründen, da in diesem Abstand vom Stufensprung durch das Rakel mehr Lotpaste aus der Schablonenöffnung ausgekehrt wird.

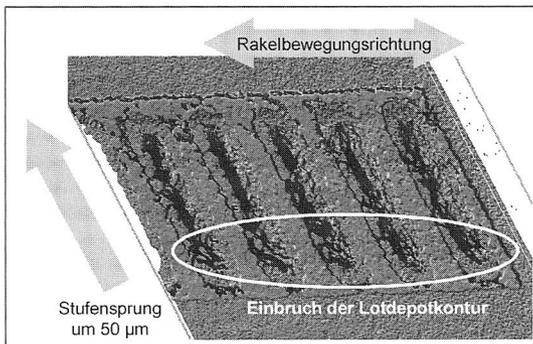


Bild 42: Aufnahme der dreidimensionalen Struktur der Lotdepots im Nahbereich der 50 µm Schablonenstufe

Verschmutzungsneigung der eingesetzten Stufenschablonen

Wie bereits im Kapitel 4.3.2 ausgeführt, ist der Verschmutzungsneigung von Stufenschablonen ein eigenes Versuchsprogramm zugeordnet. Hier werden nach fünf alternierenden Druckvorgängen der optische Eindruck der Schablone und das Abdruckverhalten analysiert. Der Fokus der Analyse liegt hierbei auf den Fine-Pitch Strukturen, da bereits in Voruntersuchungen erkennbar war, dass diese die Zeit zwischen den Reinigungszyklen bestimmen (Analysebereiche 2, 4, 5 und 6). Eine Untersuchung der Verschmutzungsneigung erfolgte rein qualitativ. Weder die Bestimmung von Lotpastenvolumina noch die Auswertung der SPC-Daten des Schablonendruckers erscheinen hier sinnvoll, da beide Kriterien nur bedingt eine Aussage über die Verschmutzung der Schablone zu lassen. Denn für die Auswertung ist es unerheblich, auf welche Länge oder auf welches Volumen sich die Lotpastenbrücken ausdehnen.

Eine besondere Herausforderung an den Schablonendruck stellen Strukturen im Ultra Fine-Pitch Bereich. Daher ist zunächst die Struktur des Bauelements SQFP 128 zu betrachten. Dieses Bauelement weist eine Rasterbreite von 400 µm auf und war somit die feinste Struktur auf dem Testschaltungsträger. Durch die Anordnung der Anschlussbeinchen ergeben sich 32 Anschlüsse pro Seite und somit im Maximum 31 Lotbrücken. Da die Rakelbewegungsrichtung bekanntlich auch einen Einfluss auf die Strukturausformung hat, wurde zusätzlich nach Anschlüssen, senkrecht beziehungsweise parallel zur Bewegungsrichtung, unterschieden. Die Auswertung der Druckvorgänge ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Lotdepotstruktur SQFP128	Stahlrakel – Patchwork Schablone		Kunststoffrakel – Patchwork Schablone		Stahlrakel – Galvanisch aufgeb. Schablone		Kunststoffrakel – Galvanisch aufgeb. Schablone	
	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel
Druckvorgang 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Druckvorgang 2	6	0	20	10	0	0	22	12
Druckvorgang 3	28	2	31	31	8	0	28	15
Druckvorgang 4	31	31	31	31	20	5	31	30
Druckvorgang 5	31	31	31	31	31	18	31	31

Tabelle 4: Anzahl der Lotpastenbrücken der SQFP 128 Struktur

Folgende Erkenntnisse sind aus der Zusammenstellung abzuleiten. Beim Einsatz eines Kunststoffrakel kommt es relativ schnell zur Ausprägung von ersten Lotpastenbrücken. Nach vier respektive fünf Druckvorgängen ist eine vollständige Lotlinie über die Anschlusskontur vorhanden. Dieser Effekt wird unabhängig vom Schablonentyp deutlich. Hingegen ist die Brückenbildung beim Einsatz eines Stahlrakel in Verbindung mit einer vollgalvanisch aufgebauten Schablone am geringsten. Auffällig wird bei der Aus-

wertung die schnellere Ausbildung von Lotbrücken unabhängig von der Faktorkombination. Mit parallel durchgeführten Untersuchungen konnte dieser Effekt beim Einsatz einer planaren Schablone nicht bestätigt werden.

Lotdepotstruktur SQFP100	Stahlraket Patchwork Schablone		Kunststoffraket Patchwork Schablone		Stahlraket Galvanisch auf- geb. Schablone		Kunststoffraket Galvanisch auf- geb. Schablone	
	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel
Druckvorgang 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Druckvorgang 2	8	0	6	0	0	0	0	0
Druckvorgang 3	19	2	20	12	0	0	0	0
Druckvorgang 4	24	10	24	17	10	0	0	0
Druckvorgang 5	24	14	24	21	18	2	1	0

Tabelle 5: Anzahl der Lotpastenbrücken der SQFP100 Struktur

Nach demselben Schema wurde die Untersuchung für die SQFP100-Strukturen der Region 5 vorgenommen. Da diese Struktur aus 25 Anschlussbeinchen besteht, beträgt die maximale Anzahl der Lotpastenbrücken 24. Die aus der Untersuchung der SQFP128-Strukturen gemachten Beobachtungen lassen sich teilweise auch durch Tabelle 5 bestätigen.

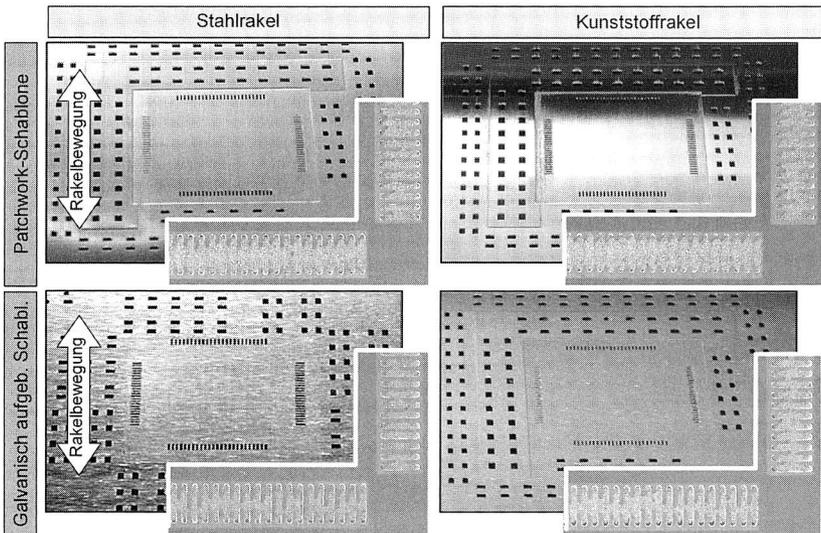


Bild 43: Optischer Eindruck von Schablone und Lotdepots nach fünf Rakelzyklen

Die Annahme, dass es bei der Anwendung von Kunststoffrakeln zu einem schnelleren Ansteigen der Lotpastenbrücken kommt, kann hier nicht nachgewiesen werden. Die weitere Analyse im Schablonenbereich 2 verstärkt nochmals die bereits dargestellten Aussagen zum Verschmutzungsverhalten (vgl. Bild 43). Eine Korrelation zwischen einem höheren Stufenprung und einer höheren Verschmutzungsneigung respektive höheren Brückenanteilen ließ sich nicht beweisen.

Des Weiteren zeigt der vierte Fine-Pitch Bereich (μ BGA Strukturen) durch die Anordnung im 750 μ m Rastenabstand keine Lotpastenbrücken. Beim Einsatz des Kunststoffrakel in Verbindung mit der Patchwork-Schablone konnte der größte mittlere Abdeckungsgrad bei dieser kritischen Struktur erreicht werden.

Einfluss des direkten Stufenübergangs auf das Druckergebnis im Umfeld

In Folge des Stufenübergangs wirken die größten Kräfte direkt auf das Rakel. Grund genug, die Lotdepots in der direkten Flucht der Rakellinie näher zu analysieren. Hierzu wurden Strukturen der zweipoligen Bauteile (CR0805) herangezogen. Ziel der Analyse war die Erfassung einer Konturabbildung während des Stufenübergangs. Nachdem die Volumenwerte zu keiner Aussage führten, wurden optische Analysen durchgeführt und Höhenprofile aufgenommen. Diese bestätigten eine gleichmäßige Ausbildung der Lotdepots, wie auch in Bild 44 dargestellt. Darüber hinaus bestätigt die ebenmäßige Höhenlinie der Depots einen vernachlässigbaren Einfluss des Stufenübergangs.

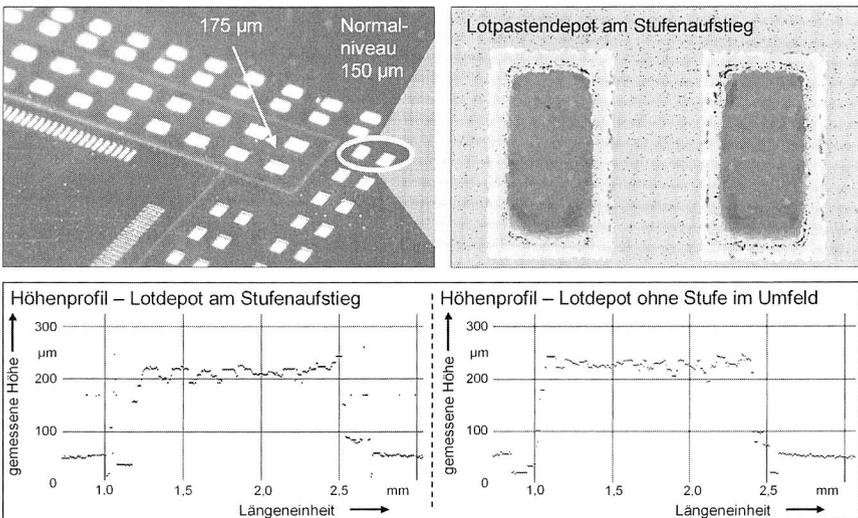


Bild 44: Einfluss des Stufenübergangs (Stahlrakel, Patchwork Schablone)

Die Ergebnisse ließen sich über alle Faktorkombinationen bestätigen. Weiterführende Aussagen über Wechselwirkungen bei feineren Strukturen sind damit nicht zu erschließen. Ebenfalls durchgeführte Untersuchungen am Stufenübergang von 50 µm bestätigen hingegen die Einschätzung einer untergeordneten Prozessbeeinflussung.

4.3.4 Vergleich der Verfahren und Darstellung von Optimierungspotenzialen

Die Herausforderungen durch feinere Strukturen führen zu neuen Technologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Dies gilt im Besonderen für den Pastenauftrag [118]. Neben neuen hochgenauen Anlagen und alternativen Materialien wie Polymer-Schablonen, betrifft dies auch die Technologie mehrstufiger Schablonen. Der Einsatz in der Serienfertigung kann jedoch nur folgen, wenn Erkenntnisse dieser Technologie aus Grundlagenuntersuchungen vorliegen. Dazu sind im Folgenden Möglichkeiten und Grenzen dieser Technologie als Richtlinien zusammengestellt. [56] [60]

Potenziale und Grenzen des Verfahrens:

- Die Ausformung von gleichmäßigen Lotdepots in der Größenordnung der vorgegebenen Schablonenöffnungen ließ sich über alle Faktorkombinationen zeigen.
- Die vorgegebenen Höhen der Schablonen werden uneingeschränkt durch die aufgetragenen Pastendepots abgebildet. Bei großen Durchbrüchen und im Bereich einer Schablonenverdickung zeigt sich verstärkt die im Pastenauftrag bekannte Depotkrümmung (Badewannenkurve).
- Die in der planaren Schablonentechnik bewährten Designregeln zu Auslöseverhalten und Druckbarkeit können für die Technik der Stufenschablonen nur bedingt angesetzt werden. Für einen prozesssicheren Auftrag von Pastenmedium sollte der Ratiowert deutlich über der bisher gebräuchlichen Grenze von 1,5 liegen. Dies gilt auch für galvanisch aufgebaute Schablonen, die im Allgemein ein besseres Auslöseverhalten besitzen.
- Die Verschmutzungsneigung ist bei Stufenschablonen als kritisch zu bewerten, da sehr schnell Lotpastenbrücken entstehen. Hier ist in der Praxis eine Abstimmung der Reinigungszyklen mit der Anlage und dem Produktionstakt erforderlich.

Anwendungsrichtlinien:

- Für das anzustrebende Design von Schablone und Schaltungsträger ist kein generell gültiger Stufenabstand anzugeben. Daher gilt es, abhängig von der Durchbruchgeometrie, jeweils den minimal möglichen Abstand zu ermitteln. Trotzdem sind in Tabelle 6 Grenzen für die 25 µm Stufenübergänge als Richtwerte zusammengestellt.

- Bei der Gegenüberstellung der Raketwerkstoffe lässt sich hingegen ein eindeutiges Ergebnis ableiten. Der Kunststoffrakel hat bei allen untersuchten Faktorkombinationen eine stärkere Volumenschwankung über einen breiteren Stufenabstand gezeigt. Für die Anwendung im Stufenschablonenbereich ist dieser als nicht geeignet zu bezeichnen.

minimal sinnvoller Stufenabstand	Patchwork – Schablone		Galvanisch aufgegeb. Schablone	
	Stahlrakel	Kunststoffrakel	Stahlrakel	Kunststoffrakel
Stufenaufstieg vom Fine-Pitch Bereich	keine Einschränkung	> 0,5 mm	keine Einschränkung	> 0,5 mm
Stufenabstieg zum Fine-Pitch Bereich	≥ 1,5 mm	> 1,5 mm	≥ 1,0 mm	> 1,5 mm
Stufenaufstieg vom Nominal Bereich	≥ 0,75 mm	> 1,25 mm	≥ 0,5 mm	≥ 1,25 mm
Stufenabstieg zum Nominal Bereich	≥ 0,5 mm	> 1,25 mm	≥ 0,5 mm	> 1,25 mm

Tabelle 6: Richtwerte für das Layout beim Einsatz von Stufenschablonen

- Der Aspekt des Herstellungsverfahrens lässt sich in der Studie durch die beiden Technologievarianten Patchwork Schablone sowie galvanisch aufgebaute Schablone analysieren. Beide Technologien zeigen hinsichtlich des Stufenabstands ähnliche Kennwerte im aufgetragenen Lotvolumen. In der Detailanalyse kann die galvanisch aufgebaute Schablone in der Volumenkonstanz tendenziell bessere Werte liefern. Ursächlich verantwortlich ist das bessere Auslöseverhalten. Aus wirtschaftlicher Sicht und in der Abbildung der Stufenkontur überzeugt hingegen die Patchwork Variante.
- Der zusätzlich in der Studie berücksichtigte Stufenübergang der Höhe 50 µm führt im Stufenabstand von 1,25 mm zu leicht höheren Volumenwerten. Bessere Volumenwerte konnten nur beim Einsatz der galvanisch aufgebauten Schablone zusammen mit dem Stahlrakel ermittelt werden. Hierbei liegen die Volumenwerte auf dem gleichen Niveau wie bei den 25 µm Schablonenstufen.

4.4 Analyse alternativer Geometrieformen von Schablonendurchbrüchen und Anschlussflächen

Neben der Schablonenhöhe ist die Geometrie der Schablonenöffnung die Form bestimmende Größe der Lotdepots. Wird die Schablonenhöhe wesentlich durch die Verhältnisse Aspect Ratio und Area Ratio bestimmt, folgen Öffnungsgeometrien der Schablonen klassisch den Geometrien der Anschlussflächen auf den Schaltungsträgern. Faustformeln, die eine Reduzierung um 10 % bzw. um 100 µm vorgeben, haben über Jahre in der Praxis zu feststehenden Vorgaben geführt. Übertragen auf die An-

forderungen durch weiter miniaturisierte Strukturen und feinste Anschlussgeometrien heutiger Bauteile sind jedoch dynamische, bauteilbezogene Vorgaben für die Lotdepotgeometrie erforderlich.

4.4.1 Potenziale modifizierter Lotdepotgeometrien

Eine Richtlinie zur bauteilspezifischen Gestaltung von Schablonendurchbrüchen lässt sich aber nur aus grundlagenorientierten Analysen unterschiedlicher Geometrievarianten ableiten. Dazu sind zunächst Anschlussstrukturen gängiger Bauteile zu betrachten, um die Vorteilhaftigkeit einer Lotdepotmodifikation aufzuzeigen. Neben der Lotdepotform müssen hier vielmehr Kriterien wie Kontaktstellenausbildung und Fehlerverteilung berücksichtigt werden. [163]

Will man das Bauteilspektrum einteilen, so lassen sich unter anderem 3 Gruppen festlegen. Die Grundtypen dieser Bauteile kamen bereits bei den Studien zur Stufenschablone zur Anwendung und lassen sich nach Lead Frame Komponenten, Area Array Packages und zweipoligen Bauteilen clustern. Für eine umfassende Analyse gilt es aus diesen Gruppen Bauteilstrukturen unterschiedlicher Rastergröße zu betrachten. Dazu werden Anschlussgeometrien aus der IPC-SM-782A übernommen und entsprechenden Modifikationen gegenübergestellt [69]. Diese dienen als Basis für die unterschiedlichen Öffnungsgeometrien der Schablone. Ausgewählte Varianten, die auch in den Studien zum Einsatz kamen, sind am Beispiel der SQFP 100 in Bild 45 dargestellt.

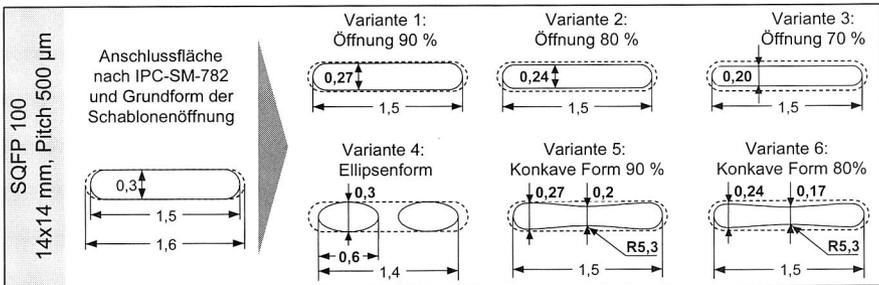


Bild 45: Modifizierte Schablonengeometrien am Beispiel eines SQFP 100 Rasters

Die dargestellten Geometrien lassen sich durch Ergebnisse aus Voruntersuchungen und Recherchen begründen, die zuviel Lotvolumen als eine Fehlerursache beim Pastenauftrag ergaben [53] [152]. So führt ein Lotüberhang im Bereich der Beinchenferse oftmals bei Lead Frame Package wie dem SQFP 100 zur Brückenbildung. Zumeist ist jedoch die Volumengröße bereits durch die Grundform der Schablonenöffnungen gegeben. Um speziell hier eine Reduzierung zu erreichen, wurden die Geometrieformen

4 bis 6 in Bild 45 konzipiert. Die Druckbarkeit und das Auslöseverhalten sind durch vorherige Abschätzung der Ratiowerte berücksichtigt, um vergleichbare Lotdepotformen und -volumen zu erreichen. [150]

Grundlegende Aufgabe eines Lotdepots ist eine mechanisch feste, elektrisch sichere Verbindung zwischen den Anschlussflächen und den Bauteilkontakten herzustellen [143]. Für die Analyse bedeutet dies, neben der optischen Inspektion der Kontaktstellen auch zerstörende Prüfungen zur Festigkeitsanalyse und zur Bewertung des Lotgefüges durchzuführen. Für zweipolige Bauteile kann die Kontaktfestigkeit, klar definiert, durch Scherkraftmessungen erfolgen. Bei weiteren oftmals für die Lotdepotgeometrie anspruchsvolleren Bauteilen wie Lead Frame Komponenten und Area Array Packages gestaltet sich die Kraftmessung vergleichsweise schwieriger. Für Lead Frame Komponenten werden von einigen Herstellern Zugtests, bezogen auf einzelne Kontaktbeinchen, herangezogen (vgl. Bild 71). Nachdem hier die Kontaktstellenfestigkeit oftmals die Metallisierungshaftung übersteigt und für Area Array Packages kein Verfahren etabliert ist, muss bei der Auswertung der modifizierten Lotdepots auf die Festigkeitsbewertung verzichtet werden. Wie in Bild 46 dargestellt, liefern auch optische Prüfungen nach Kontaktform und Fehlerverteilung sowie metallographische Analysen fundierte Aussagen, inwieweit die Depotmodifikation eine Optimierung erschließen kann.

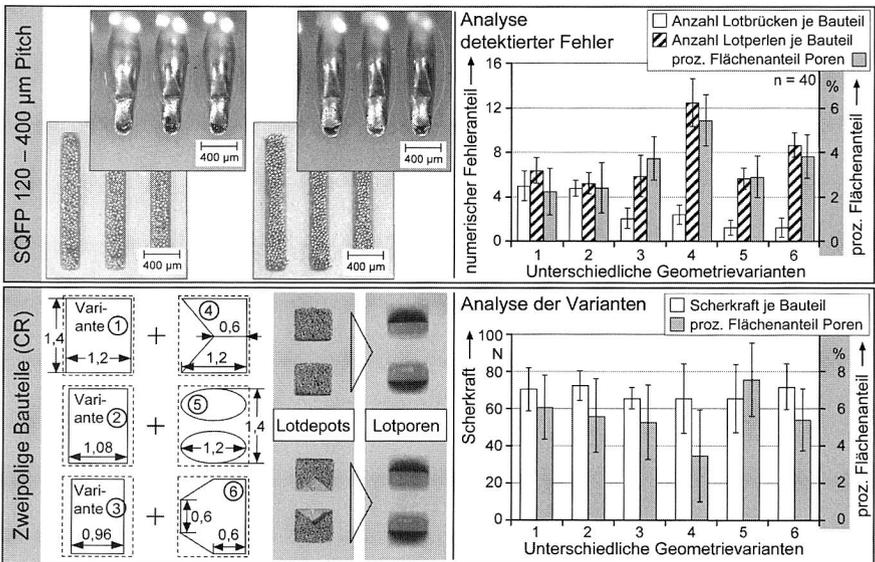


Bild 46: Einzelne Ergebnisse zur Wirkung veränderter Lotdepots auf die Kontaktstellenausbildung anhand ausgewählter Bauelemente

Geht man von der Standardausführung der Depotform (Variante 1) aus, lassen sich die modifizierten Geometrieformen wie folgt bewerten. So sind bei Quad Flat Pack Komponenten zwei Einflussfaktoren auf die Fehlerausbildung zu ermitteln. Mit der Flächenreduzierung verbunden, bilden sich nachvollziehbar weniger Lotbrücken aus. Parallel dazu ist aber auch eine erhöhte Anzahl an Lotporen (Lunker) zu erfassen. Noch deutlicher werden diese Wechselwirkungen bei den alternativen Geometrien. In der Gesamtanalyse, die neben dem QFP 128 aus Bild 46 auch die Bauteile QFP 100 (500 μm Pitch) und QFP 168 (300 μm Pitch) umfasst, lassen sich aber trotzdem Vorteile in der Variante 5 zeigen. Geringe Lotbrückenanzahl und ein mittlerer Fehleranteil auf Normalniveau gestatten eine Empfehlung für diese alternative Lotdepotgeometrie.

Im Gegensatz dazu zeigen die Analysen der zweipoligen Bauelemente geringere Wertedifferenzen. Damit ist eine Empfehlung zu Gunsten einer Geometrievariante vergleichsweise schwierig. Der oftmals bei Zweipolern angeführte Tombstoneeffekt (Grabsteineffekt) war in den Untersuchungen nur selten und kann damit nicht zur Analyse herangezogen werden. Damit lassen sich nur bei Variante 3 und 4 Vorteile erkennen, die aber durch die Streuung der Ergebnisse nicht nachzuweisen sind.

4.4.2 Qualitätsgerechte Gestaltung des Schaltungsträgerlayouts

Wie bereits die Untersuchungen von Lotdepotformen gezeigt haben, steht die Anschlussfläche auf dem Schaltungsträger im direkten Bezug zur erreichbaren Qualität im Pastenauftrag. Flächengröße und Form der Anschlussstellen können die Kontaktausbildung (Benetzung) positiv beeinflussen oder zur Reduzierung von Lotperlen, Poren und Brücken beitragen [60]. In der Aufbau- und Verbindungstechnik wird die Metallisierung des Schaltungsträgers als eine maßgebliche Einflussgröße bezeichnet. Unterschiedlichste Varianten sind möglich und werden bezogen auf die bleifreie Produktion aktuell diskutiert [52]. Ebenso wichtig sind die Geometrie der Anschlussflächen und das Layout des Lötstopplacks [37].

Vorgaben zur qualitätsgerechten Gestaltung von Anschlussflächen und Lötstopplack sind heute nur in Grundzügen bekannt bzw. festgeschrieben [83]. Dies hat in der Entwicklung der Oberflächenmontagetechnik zu unterschiedlichsten firmeninternen Vorschriften geführt, die aber auf die neuen Herausforderungen aus dem Bauelementesektor nur bedingt anwendbar sind. Bei den öffentlichen Richtlinien steht insbesondere die IPC-SM-782A durch eine umfassende Darstellung und Beurteilung üblicher Bauteilgeometrien und Anschlussformen in der Kritik ungeeigneter Größenvorgaben [74] [83]. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Analyse, welche Unterschiede in den Normen und Vorschriften ebenso berücksichtigt. Ausgehend von

der IPC-SM-782A wurden daher zunächst Basisbaugruppen hergestellt, um deutlich sichtbare Unzulänglichkeiten und eine erste Optimierungsrichtung ermitteln zu können.

Exemplarisch ist in Bild 47 der Einfluss verschiedener Anschlussgeometrien auf dem Schaltungsträger bei der Verarbeitung von zweipoligen Widerstandskomponenten CR0402 dargestellt. Während die Geometrievorgaben aus der IPC Norm zu erhöhten Fehleranteilen bei Lotperlen, Lunkern sowie der Anzahl an Tombstones führen, wirkt sich eine Reduzierung der Kontaktflächen ganzheitlich positiv auf das Prozessergebnis aus. Aus diesen einfachen Effekten und weiteren mehrstufigen Untersuchungen konnten nunmehr konkrete Empfehlungen und Richtlinien zur Anschlussgestaltung je nach Bauelementtyp und Strukturgröße abgeleitet werden [56] [58]. Generell lässt sich festlegen, dass bei zweipoligen Bauelementen die exakte Größe des zu verarbeitenden Bauteils entscheidend für die Anschlussflächendimensionierung ist. Damit sind auch die oftmals nicht ideal vorgegebenen Größen in der IPC Norm zu begründen. Die Norm gibt bei den Bauteilgrößen einen breiten Toleranzbereich vor, um möglichst flexibel eingesetzt werden zu können. Übertragen auf die Größen der Anschlussflächen führt dies zu einer eingeschränkten Anwendbarkeit.

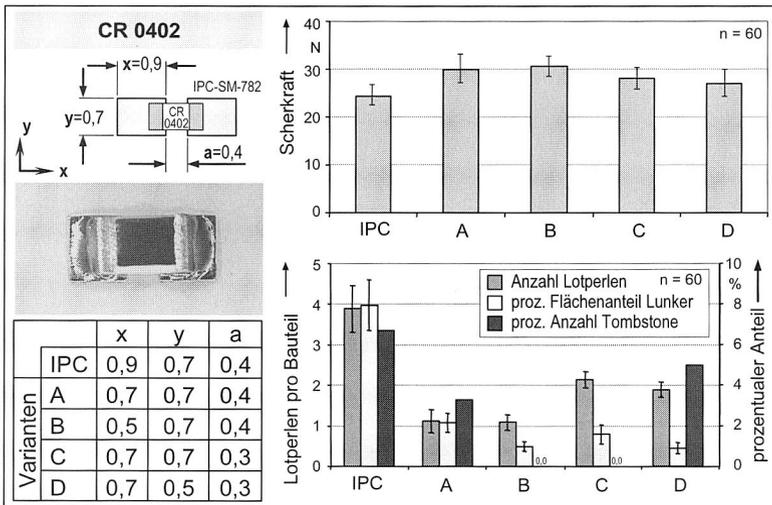


Bild 47: Qualifizierung unterschiedlicher Geometrien an Anschlussflächen auf einem Schaltungsträger

Aufbauend auf diesen Spezifikationen wurden im Rahmen der Studie Bauteile des gleichen Typs, beispielsweise CR0402, aber von unterschiedlichen Herstellern verar-

beitet. Mit den damit verbundenen Größenunterschieden konnte eine allgemein gültige Gestaltungsvorschrift entwickelt werden. Hieraus lässt sich folgende Empfehlung für zweipolige Bauelemente ableiten. Die anzustrebende Länge der Anschlussfläche in x-Richtung sollte proportional zur metallisierten Fläche der Bauteilanschlüsse (x-Richtung) ausgeführt werden und im Mittel die doppelte Länge umfassen (vgl. Bild 12). Bei der Ausführung der Fläche in y-Richtung konnte ein Zusammenhang zur Bauteilhöhe hergestellt werden. In einer Näherung sollte die Anschlussbreite (y-Richtung) zusätzlich zur Bauteilbreite 20-25 % der Bauteilhöhe einschließen. Als Faustformel gilt für kleine zweipolige Bauelemente, wie CR0201 und CR0402 der Faktor 25 % als Bemessungsgröße.

In den durchgeführten Untersuchungen wurde zusätzlich zu den Anschlussflächen auch die Struktur des Lötstopplacks betrachtet und variiert. So konnten durch das gezielte Aufbringen eines Lötstoppstegs zwischen den Bauteilanschlüssen die Folgen auf Kontaktausbildung und Fehlerhäufigkeit analysiert werden. Speziell bei feinen Anschlussstrukturen wurden so die bekannten Wechselwirkungen des Kapillareffektes mit Brückenbildung zwischen den Kontaktzonen deutlich.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Kapitel 4.4.1 ist insbesondere bei den Lead Frame Strukturen die Anschlusslänge zu optimieren. Dazu wurden in mehreren Stufen die Grenzen der Längenreduzierung durch Scherkraftanalysen ermittelt. Ergänzt wurde diese Grundlagenbetrachtung durch Lebensdaueranalysen der Geometrievarianten. In einer zusammenfassenden Beurteilung ist festzuhalten, dass die weit hin gebräuchlichen Anschlussflächen für die Kontaktierung überdimensioniert sind. Als Grundregel sollte die Länge der Anschlussfläche das vierfache Maß des planaren Anteils des Bauteilbeinchenkontaktes nicht überschreiten. Dies gilt unabhängig vom Bauteil. Der Einsatz von Lötstopplack ist dann wiederum auch zwischen den Anschlusskontakten sinnvoll. Bei reduzierten Anschlussflächen kann durch den Lötstopplack die Brückenbildung deutlich reduziert werden.

5 Optische Inspektion und automatisierte Qualitätsprüfung in der Oberflächenmontage

Die Fertigungsqualität in der Elektronikproduktion wird bisher im Wesentlichen durch anspruchsvolle optische und elektronische Prüfprozesse getragen [5] [137]. Wirtschaftliche Gründe und die gestiegene Komplexität der Baugruppen erforderten in den letzten Jahren eine technologische Neuausrichtung. Nachgewiesene Prüfgrenzen und ein erheblicher Fehlerschlupf bewogen die Baugruppenhersteller die manuellen Sichtprüfungen durch automatisierte Systeme zu ersetzen. So werden ein bzw. zwei, in Einzelfällen sogar drei, dieser Automatischen Optischen Inspektionssysteme (AOI) prozessnah zur Erzielung einer möglichst hohen Ausbeute eingesetzt [77]. Ausbeute und wirtschaftlicher Kostendruck führen aber gegenläufig zu konträren Lösungen [41]. Nur durch den kosteneffizienten Einsatz der Prüfgeräte und möglichst geringen Inspektionsfehlern (Fehlerschlupf und Pseudofehler) kann eine technologisch-wirtschaftlich ausgewogene Produktion erreicht werden. Es ist also zu klären, wo, wie viele und welche Prüfsysteme zielführend eingebracht werden sollen. Das Prinzip, die Produktqualität nur überprüfen zu wollen, muss nunmehr definitiv durch intelligente Prüf- und Regelungsstrategien ersetzt werden. [85]

Hier gilt es zunächst elektronische und optische Prüfsysteme zu unterscheiden. Die elektronischen Analysen, wie In-Circuit-Test (ICT), Funktionstest (FT) und Belastungstests, können durch die Notwendigkeit der schaltungstechnischen Funktionalität der Baugruppe erst am Ende der Produktionskette erfolgen [143]. Neue Prüfstrategien und unterschiedliche Optimierungsansätze zielen dabei vornehmlich auf eine Reduzierung des Incircuit-Tests [158]. Durch steigende Funktionsintegration und Packungsdichte sind 100 %-Prüfungen mit diesen Prüfsystemen technologisch nicht mehr zu leisten [158]. Wirtschaftlich sprechen zusätzlich Kostengründe gegen eine 100 %-Prüfung beim ICT, da für jede Baugruppe ein spezifischer Testaufbau benötigt wird. Die geforderte Produktzuverlässigkeit kann jedoch nur durch eine entsprechende Substitution der Prüfleistung erreicht werden [50]. Dies ist gemäß aktueller Studien durch einen erhöhten Anteil automatischer optischer Inspektionssysteme zu erfüllen [137] [158]. Die Integration dieser Systeme in den Produktionsprozess stellt dabei oft nur einen Teilaspekt dar. Diese Problematik aufgreifend, aber auch weiterführende Aspekte einer modernen Prüfstrategie berücksichtigend, wurden Studien durchgeführt, die das Spannungsfeld von Inspektion und Prüftechnik charakterisieren. [25] [32] [46]

Das Spektrum an Anschlusskontakten elektronischer Bauelemente, welches zur Inspektion ansteht, reicht von Fine-Pitch Komponenten über klassische SMT Bauteile bis hin zu bedrahteten Bauelementen (Through Hole Devices - THD). Jedes dieser Bautei-

Ie lässt sich anhand der geometrischen Packungsgestalt unterscheiden. Vom optischen Prüfsystem wird jedoch erwartet, all diese Bauteile mit gleich bleibender Präzision zu analysieren, d.h. zuverlässige Prüfaussagen zu generieren. In Bezug auf die Bauteilkontaktstellen werden die komplexen Anforderungen an das Prüfsystem schnell offensichtlich. Bei THD Bauteilen sind die Lötstellen besonders auf eine vollständige Füllung der Anschlussbohrung zu prüfen. Ganz im Gegensatz kommt es bei SMD Bauteilen auf eine gleichmäßige Lötstellenausbildung an. Benetzungsbewertung, Meniskusausbildung und Oberflächengüte der Lötstellen sind hier die wesentlichen Kriterien zur Qualifizierung der Baugruppenqualität. [68]

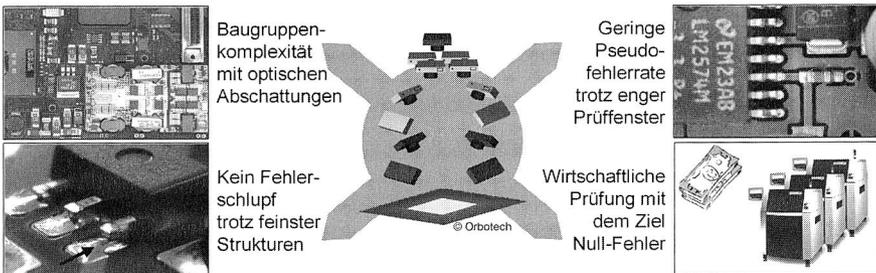


Bild 48: Spannungsfeld der Prüftechnik in der Elektronikproduktion

Ein weites Fehlerspektrum mit Lotbrücken, Lotperlen und Lunker sowie dem Gesichtspunkt der Kontaktbenetzung verstärkt zusätzlich die Anforderungen an die optische Prüftechnik [48]. Dies wird vor allem bei Fine-Pitch Bauteilen deutlich, da deren Kontaktstellen unter Umständen in der Größenordnung der optischen Auflösung liegen können. Technologische Grenzen einer Automatischen Optischen Inspektion ergeben sich aber speziell bei Area-Array Komponenten wie Ball Grid Arrays bzw. Flip Chips, die durch verdeckt liegende Anschlussstrukturen eine optische Inspektion einschränken. Hier ist neben ersten manuellen Seiteneinblickmikroskopen die Röntgeninspektion von besonderer Bedeutung [26] [34]. Die Röntgenanalyse bietet sich auch für automatische Testabläufe an [147]. Einschränkend ist zu bemerken, dass die Röntgeninspektion zwar innere Fehler der Kontaktstellen beurteilen lässt, stößt aber bei der Bewertung der Lötmenisken an technologische Grenzen. Hier zeigen 3D-Röntgenverfahren mehr Analysetiefe, die jedoch durch den zeitlichen und technologischen Aufwand bisher nur für Einzelprüfungen zur Anwendung kommen [43].

Dem Linientakt angepasste schnelle Prüfzeiten und komplexe Inspektionsfelder bestimmten die Automatische Optische Inspektion. Verknüpft mit der dargestellten Vielfalt im Bauelementespektrum sind die zwei Faktoren Fehlerschlupf und Pseudofehler zu den wesentlichen Kriterien der Inspektion geworden. Der Baugruppenproduzent will

beim Einsatz eines Prüfsystems vornehmlich alle Produktionsfehler vor dem Feldeinsatz abfangen, was bedeutet, keinen Fehlerschlupf zu zulassen. So gilt es, die Prüfsysteme mit sehr kleinen Prüffenster bzw. sehr engen Prüfkriterien einzustellen. Gegenläufig wird dadurch der Anteil der als Fehler detektierten Gutteile, die so genannte Pseudofehlerrate, entsprechend ansteigen. Dies führt für den Systembediener unweigerlich zu lästigen Pseudofehlermeldungen. Diese sind als gut zu kennzeichnen, um sie im Produktionsprozess weiter zu leiten. Ein Effekt, der zur abstumpfenden AOI Fehlerbildbewertung durch den Bediener führen kann und so wiederum einen messbaren Fehlerschlupf nach sich zieht. Dadurch kann in Einzelfällen die produktionsunterstützende Wirkung einer automatischen optischen Prüfung nicht greifen.

5.1 Gegenüberstellung von Systemen und deren Einsatzfelder

Eine Automatisierung der optischen Inspektion mittels digitaler Bildverarbeitung hat das Ziel, anhand von gesetzten Grenzkriterien berührungslos objektiv und fehlerfrei jede gewünschte Stelle hinsichtlich ihrer Beschaffenheit zu bewerten und ihre Übereinstimmung mit bzw. den Grad der Abweichung von einem definierten Idealzustand festzustellen und zu dokumentieren [23] [101]. Die theoretische Idealvorstellung einer umfassenden Fehlerfrüherkennung, insbesondere bei nicht beherrschten Prozessen, spiegelt sich in einer vollständigen Abdeckung durch die Inspektion eines jeden Prozessschrittes wider. Wie in Bild 49 dargestellt, haben die Herren Klein-Wassink und Verguld diesen Zusammenhang in Ihrem Buch „Manufacturing Techniques for Surface Mounted Assemblies“ provokativ skizziert. [79].

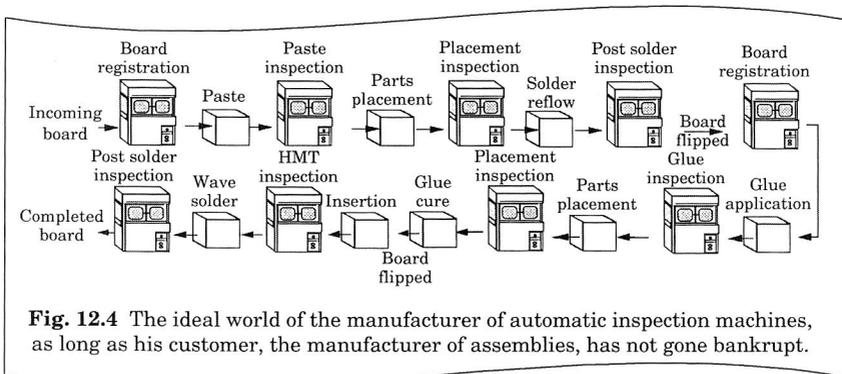


Fig. 12.4 The ideal world of the manufacturer of automatic inspection machines, as long as his customer, the manufacturer of assemblies, has not gone bankrupt.

Die ideale Welt für Hersteller von Automatischen Optischen Inspektionssystemen, solange ihre Kunden, die Baugruppenproduzenten, nicht dem Bankrott erliegen.

Bild 49: Idealvorstellung einer umfassenden Fehlerfrüherkennung

Diese Maximalabdeckung ist aus verschiedenen, besonders aber wirtschaftlichen Gründen, nicht die Zielsetzung des AOI Einsatzes. Das AOI soll vielmehr die Inspektion und ihre Auswirkung an den als kritisch erkannten Prozessschritten verbessern. Ein prozessintegrativer Ansatz der Systeme kann durch Rückkopplungsstrategien zu einer ganzheitlichen Optimierung beitragen. Um einen umfassend positiven Effekt aus dem AOI Einsatz abzuleiten, müssen jeweils folgende Regeln beachtet werden [1].

- Keine Inspektion ohne Aufzeichnung
- Keine Aufzeichnung ohne Analyse
- Keine Analyse ohne nachfolgende Aktionen.

Technologisch übernehmen heutige AOI Systeme die zwei ersten Punkte dieser Aufzählung. Der Dritte ist durch eine festgelegte Rückverfolgungsstrategie oder durch selbstständiges Bedienerhandeln abzudecken [18]. Oftmals liegt hier der kritische Punkt (vgl. Kap. 7). Aber auch die Aufzeichnung selbst, verbunden mit der Inspektion, ist zu diskutieren. Hier lassen sich verschiedene Konzepte unterscheiden, die auch in Beziehung zur Prozessintegration stehen.

5.1.1 Systeme und Verfahren zur optischen Inspektion elektronischer Baugruppen

Zur Bewertung der Lötstellen wird meistens der AOI Typus orthogonale Inspektion mit einem Auflichtkameranystem und einer Grauwertanalyse herangezogen [110]. Diese reine zweidimensionale (2D) Analyse arbeitet mit Analysefenstern, die per vorhergehender Definition einen Bereich (Inspektionsfenster), beispielsweise am Lötmeniskus, aufnehmen und diesen Bereich über einen Schwellwertvergleich beurteilen. Das Verfahren wird im Wesentlichen für die Inspektion nach dem Reflow- bzw. Wellenlötprozess eingesetzt. Aber auch die Pastendepot- und Bestückpositionskontrolle kann erfolgen. Durch graphische Auswertung der Bilder der Auflichtinspektion wird eine x- und y-Richtungsvermessung durchgeführt. So können die Positionen von Bauteilen sowie Position und Flächenabdeckung von Lotdepots analysiert werden. Gerade die Analyse der Lotdepots wird aktuell als immer wichtiger angesehen [59] [77]. Die Zuordnung der Mehrzahl an Produktionsfehlern zum Pastenauftrag führte in diesem Prozess zu einer breiten Integration von 2D Inspektionssystemen [56] [112]. Pastenabdeckung wird hier mit einer guten Pastendruckqualität gleichgesetzt, was aber im Detail noch zu beweisen wäre.

Ein erweitertes Konzept zur optischen Inspektion mit digitaler Bildaufnahme erfasst den zu überprüfenden Bereich parallel durch mehrere Kameramodule. Dabei können durch spezifische Systemanordnungen detaillierte Schräganalysen der Anschlussstel-

len auf der Baugruppe erfolgen. In solchen Anlagen werden bis zu 20 Einzelkamerasysteme integriert und gesteuert [22]. Durch die ebenfalls umgesetzte farbige Vollbildanalyse kann der Inspektionsbereich und damit die Inspektionsgüte deutlich gesteigert werden. In den durchgeführten Studien konnte der Effekt an speziell modifizierten Baugruppen veranschaulicht werden (vgl. Bild 50). Anzuführen ist jedoch ein gewisser Mehraufwand bei der Programmerstellung, was sich jedoch nicht auf die produktionsintegrierte Inspektionszeit auswirkt. Interessant ist das Verfahren, welches als $2\frac{1}{2}D$ (oder $2D^+$) bezeichnet wird, für die Prüfung am Ende der Produktionskette, weil hier Bauteilkontakt, Lötstelle und Position im Detail zu analysieren sind.

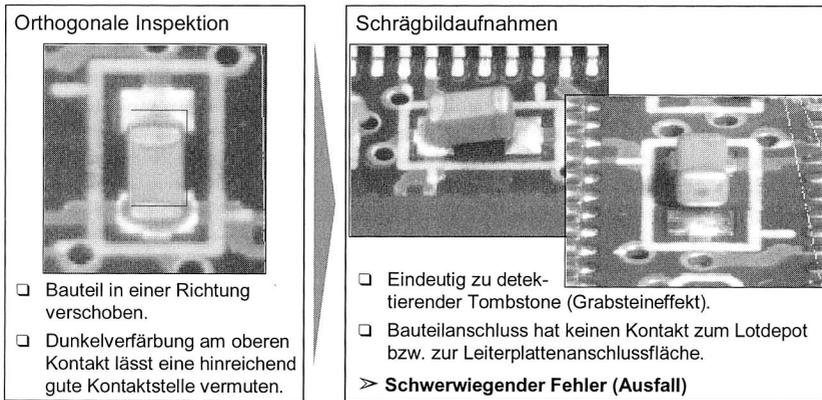


Bild 50: Unterschiedliche Prüfaufnahmen eines Probeobjektes, verbunden mit der entsprechenden Ergebnisbeurteilung

Andere visuelle Inspektionen basieren nicht auf der optischen Bildanalyse. Sie scannen durch eine berücksungslose Abtastung die Oberfläche der Baugruppe bzw. des Halbzeugs und errechnen hieraus eine dreidimensionale Abbildung der Realität. Diese Systeme sind mittlerweile durch erweiterte Rechnerkapazitäten und optimierte Algorithmen so leistungsstark, dass auch ein Einsatz im Inlinebetrieb möglich ist [111]. Technologisch wird die 3D Inspektion zumeist durch eine Lasertriangulation gelöst. Einkoppeleffekte des Laserstrahls auf unterschiedlichen Oberflächen, wie auch auf FR4 Leiterplatten bzw. dem Lötstopplack, können zur fehlerhaften Beurteilung der Konturhöhen führen. Daher werden auch in [136] alternative Systeme gefordert, die durch eine reproduzierbare Verbindung zur Objektoberfläche geringe Messunsicherheiten zeigen. Durch die unterschiedlichen Materialien im Baugruppenverbund und den wechselnden Oberflächenreflexionen sind diese Forderungen für die Aufbau- und Verbindungstechnik von besonderem Interesse. Durchgeführte Studien ergaben hierzu deutliche Vorteile bei Messverfahren nach dem Prinzip der Weißlichtinterferometrie.

5.1.2 Einsatzpotenziale der dreidimensionalen Inspektion und das entwickelte Analysesystem

Das Weißlichtinterferometer, auch als Kohärenzradar bezeichnet, ist ein spezielles Lichtmikroskop. Das Messprinzip ist schon seit etwa 100 Jahren für blanke Oberflächen bekannt, aber durch eine spezielle Beleuchtung, die gezielt lokale Speckle erzeugt, lassen sich auch verschiedenste optisch raue Objekte, wie Leiterbahnstrukturen oder Bauteilanschlussballs interferometrisch vermessen. Wie in Bild 51 dargestellt, wird im Prinzip die Weglänge des Lichtes für jeden Objektpunkt mit der Länge des korrespondierenden Referenzweges im Interferometer verglichen. Nur wenn die Weglängen annähernd gleich sind, entsteht im entsprechenden Bildpunkt (Bereich) der Interferenzkontrast. Während der Sensor sich auf das Objekt zu bewegt, wird der Zeitpunkt des maximalen Interferenzkontrastes für jeden Bildpunkt individuell bestimmt und die jeweilige Sensorposition abgespeichert. Damit ist ein Konturbild des Objektes mit sehr geringer Messunsicherheit zu erstellen.

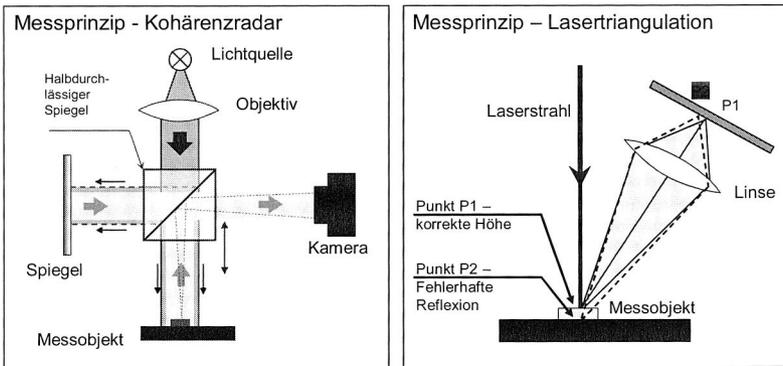


Bild 51: Gegenüberstellung der grundlegenden Messprinzipien zur dreidimensionalen Oberflächenanalyse

Die Messzeit hängt vom Messbereich ab, nach dem das Objekt in Tiefenrichtung abgetastet wird. Abtastgeschwindigkeiten von 8 $\mu\text{m/s}$ bis 40 $\mu\text{m/s}$ waren bei der Analyse von Lotdepots auf Leiterplatten erreichbar. Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass die statistische Messunsicherheit einer Oberfläche unabhängig vom Bearbeitungszustand bzw. der Textur der Oberfläche ist. Dies macht einen technologischen Vorteil gegenüber der Lasertriangulation deutlich, bei der die Messunsicherheit stark von der Oberflächenart des Messobjektes abhängt. Einschränkend ist anzumerken, dass die Messung eine ausreichende Reflexion vom Objekt erfordert und möglichst kein Fremdlicht störend einwirkt. Zur weiteren Verbesserung der Einsatzmöglichkeiten

wurde deshalb ein Programm entwickelt, welches die Messwerte filtert und über fehlerhafte Werte interpoliert. So sind auch ausgesprochen feine Strukturen zu messen, was die Anwendungspotenziale in der Elektronikproduktion erweitert. Den Forderungen aus der Baugruppenfertigung folgend, unterstützt die vom Messsystem getrennt einsetzbare Analysesoftware spezifische Teilbetrachtungen, wie Volumenermittlungen, Positionsvermessungen und Höhenvergleiche (Bild 52).

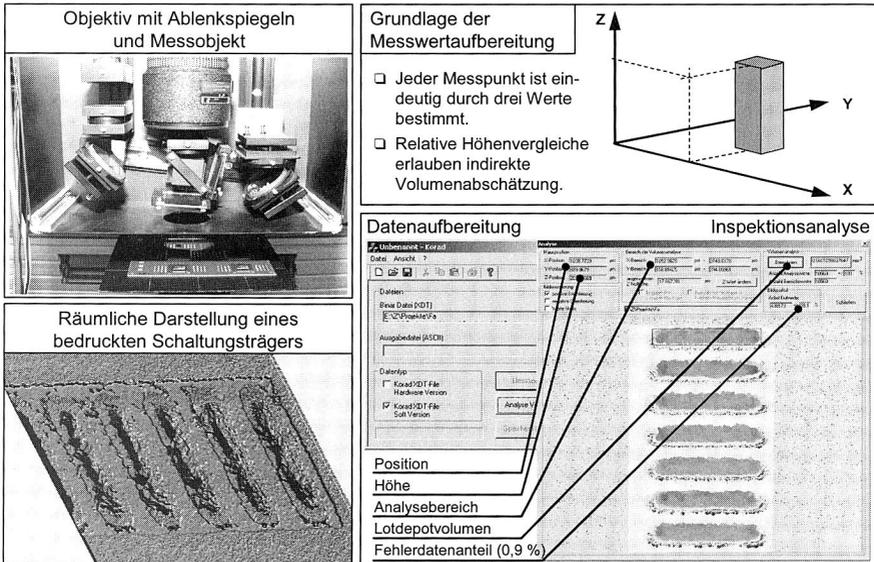


Bild 52: Einsatz der Weißlichtinterferometrie zur dreidimensionalen Inspektion des Pastenauftrags und entwickelte Software zur erweiterten Prüfdatenanalyse

Die Weißlichtinterferometrie ist eines der wenigen Messprinzipien, welche eine berührungslose Vermessung von Objekten mit einer Genauigkeit von wenigen Nanometern gestattet. Da die Interferometrie nur eine geringe Neigung der Objektoberfläche erlaubt, stößt das Verfahren speziell beim Höhenübergang und auch bei einer Objektverwölbung an Grenzen. Damit verbundene Fehlmessungen der Höhenkontur konnte durch den implementierten Messwertfilter kompensiert werden. Die eingeschränkte Toleranz zu verwölbten Messobjekten kann beispielsweise auch in der Elektronikproduktion bei voll bestückten Baugruppen zu Messungenauigkeiten führen. In einer entsprechend durchgeführten Grundlagenstudie mit Testträgern unterschiedlicher Durchbiegungen (0 - 2,5 mm) konnte die maximal zu erwartende Messabweichung ermittelt werden. Bei einer Durchbiegung von 2,5 mm über das Messfeld war eine Messwert-

abweichung von $2,07 \mu\text{m}$, bei einer Standardabweichung von $0,47 \mu\text{m}$ festzustellen. Die damit ebenfalls nachgewiesene Güte des Messverfahrens konnte auch durch [135] bestätigt werden. Die Messaufnahmen wurden an einem Weißlichtinterferometer Soft-Korad^{3D} durchgeführt, welches vom Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt wurde [4]. Insgesamt ist festzuhalten, dass die dreidimensionale optische Inspektion nach allen Prozessschritten eingesetzt werden kann. Vorteile zeigen sich aber speziell bei der Inspektion der Lotdepots, da nur so Ergebnisse wie Lotvolumen und Lotdepotform zu ermitteln sind.

5.2 Integration von Prüfprozessen in die Fertigungskette

Die dargestellte technologische Basisbetrachtung optischer Prüfverfahren und Inspektionssysteme ist bei weitem nicht umfassend, soll aber die technologischen Möglichkeiten aufzeigen. Weit wichtiger ist die anwendungsspezifisch sinnvolle Integration dieser Prozesse in die Fertigungskette. Wie Recherchen gezeigt haben, ist nahezu jeder Prozessschritt durch ein spezielles System zu überwachen. Ausgehend von einer klassischen Prozesskette mit Pastenauftrag, Bauteilbestückung, oftmals gegliedert in Standardbestücker (Chip Shooter) und Präzisionsbestücker (Fine-Pitch Placer) für komplexere Bauelemente sowie dem Lötprozess ergeben sich vier theoretische Positionen [132].

Nachdem die vier Positionen aus wirtschaftlichen Gründen nicht gleichzeitig zur Inspektion besetzbar sind, sind Entscheidungsstrategien zur zielführenden Integration gefordert. Die Ansichten hierzu gehen bisher jedoch stark auseinander. So sehen Fachleute, Produzenten und Qualitätsverantwortliche die richtige Strategie in Zuordnung der Inspektion zu kritischen Prozessen, die als Hauptfehlerverursacher gelten [44]. Folgt man aktuellen Studien, so steht hierfür der Pastenauftrag an erster Stelle [27]. Auch aus Sicht einer prozessbegleitenden Qualitätssicherung ist diese frühzeitige Kontrolle und Fehlerbehebung zu unterstützen. Die Ausrichtung nach dem Fehlerverursacherprinzip hängt aber wesentlich vom Baugruppenspektrum ab. Die Telekommunikation ausgenommen, lässt sich in der Baugruppenfertigung ein Wechsel von der Großserie zu einer variantenreichen Produktion verfolgen. Damit verbundene Unterschiede in der Baugruppenkomplexität wirken auch auf die Fehlerverteilung der Prozesskette. Entsprechend wird von Prozesstechnologien die Meinung vertreten, eine Inspektion ist aus technologisch-wirtschaftlichen Gründen nur am Ende der Prozesskette sinnvoll [19]. Die Argumente stützen sich dabei im Wesentlichen auf die Fehlerabdeckung, da erst nach dem Löten alle Fehler und auch Prozesswechselwirkungen deutlich werden. Eine von der Firma Viscom durchgeführte Studie [82] mit 5,7 Mio inspizierter Lötstellen verdeutlicht diese Einschätzung durch eine Fehlerabdeckungsrate von gerade 8,3 % nach dem Pastenauftrag (vgl. Bild 53, links).

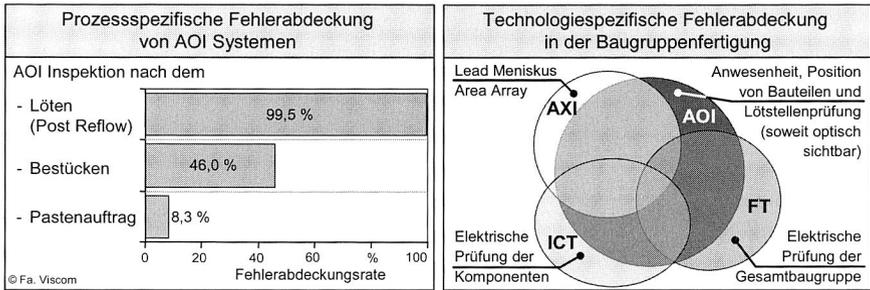


Bild 53: Fehlerabdeckung der unterschiedlichen Prüfpositionen (links) [82]
 Fehlerabdeckung unterschiedlicher Inspektionstechnologien (rechts) [42]

Eine vollständige Prüfdeckung aller Fehler der Baugruppenproduktion kann aber auch die Automatische Optische Inspektion am Ende der Prozesskette nicht leisten. Wie in Bild 16 dargestellt, gilt dies auch für die alternativ eingesetzten Prüftechnologien. So sind beispielsweise Polaritätsfehler (verdreht bestückte Bauteile) oder auch nicht verlötete, aufliegende Kontakte nur durch elektrische Tests sicher zu überprüfen. Dies unterstreicht wiederum die Komplexität bei der Wahl der richtigen Inspektionsalternative. Die Gesamtheit aller Einflussfaktoren von der Baugruppe über die Prozessfolge bis hin zu den Bauteilen muss zur Analyse herangezogen werden. [63]

5.2.1 Beurteilung von Prozess, Bauteilspektrum und Fehlerverteilung als Basis einer Inspektionsentscheidung

Die Prozesse der Baugruppenfertigung werden durch eine Vielzahl von Einflussgrößen und Wechselwirkungen bestimmt. Um hieraus für die Inspektion bestimmende Faktoren abzuleiten, ist eine detaillierte Prozessbetrachtung notwendig. In hierzu durchgeführten Recherchen konnten zu erwartende Potenziale, aber auch technologische Grenzen der Prüftechnik ermittelt werden. Gespiegelt an den Anforderungen beispielhafter Baugruppen erweiterte sich die Betrachtung auch auf Aspekte der Bauteile und Prozessfehler. Diese wesentlichen Erkenntnisse sollen im Folgenden die Überlegungen zur Integrationsstrategie deutlich machen.

Geht man von einer standardmäßigen Prozesskette aus, liegt der Fokus zunächst auf dem Medienauftrag. Durch den statisch nachgewiesenen Fehleranteil liegt es nahe, speziell diesen Prozess durch Inspektion besser zu beherrschen. Die dadurch möglichen kurzen Regelschleifen können den Prozess für den Bediener transparenter machen und so eine ganzheitliche Optimierung anstoßen. Ebenso sind Fehler frühzeitiger im Prozess zu erkennen und auszuschleusen. Damit verbunden ist eine äußerst kos-

teneffiziente Fehlerbehebung durch einfache Reinigung des Schaltungsträgers zu gestalten. Einschränkungen bei einzelnen Leiterplattenmetallisierungen werden in Kapitel 6 angesprochen. Dies wäre ein absolut überzeugender Ansatz, wenn nicht die auftretenden, zum Teil im Pastenauftrag verursachten Fehler, erst noch zu charakterisieren wären. Die zu Beginn bereits dargestellten gegenläufigen Ziele einer geringen Pseudo-fehlerrate bei gleichzeitigem absolutem Verbot von Fehlerschlupf erfordern klar definierte Prüftore. Hier steht die Inspektion in der Anwendung nach dem Pastenauftrag noch am Anfang. Eine, durch diesen Mangel motivierte, eigene Studie an 100 unterschiedlich bedruckten und dann verarbeiteten Schaltungsträgern führte zu einer ersten Grobgliederung, die in Bild 54 veranschaulicht ist. Die Einteilung orientierte sich an den erzielten Lötstellenergebnissen, die nach IPC-A-610C klassifiziert wurden [68] und an den Häufigkeiten detektierter Fehler, wie beispielsweise Lotbrücken, offene Lötstellen sowie Lotperlen. Die so entwickelte Einteilung wird auch durch die dafür in Frage kommenden Normvorschriften IPC-7525 und SMEMA 5 bestätigt [66][151]. Deutlich wird die große Abhängigkeit eines akzeptablen Verarbeitungsergebnisses von der Depotform. Dies zeigt sich speziell bei feineren Anschlussstrukturen. Unabhängig von den in der Untersuchung festgestellten Grenzen konnte damit gezeigt werden, dass eine zweidimensionale Inspektion zur Qualifizierung des Pastenauftrages nicht ausreicht. Sie kann, und darin sollte die Funktion als integriertes System liegen, nur für systematische Veränderungen in der Prozessqualität herangezogen werden.

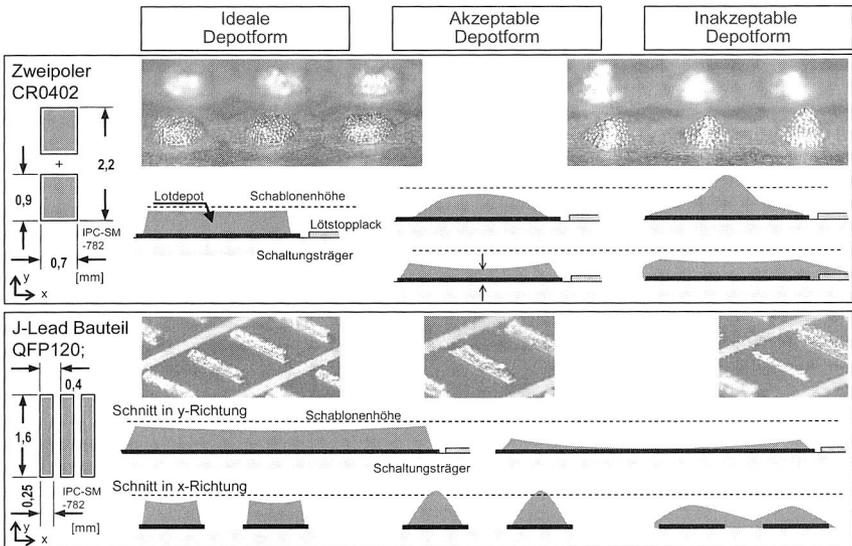


Bild 54: Gliederung der Lotdepotform nach der erzielbaren Verarbeitungsqualität

Eine Inspektion nach der Bauteilbestückung ist heute bei den meisten Baugruppenherstellern im Sektor Mobiltelekommunikation etabliert. Sie haben eine für das Baugruppenspektrum günstige Prüfprozessintegration bereits realisiert. Daher sollen zunächst die Gründe für diese Zuordnung veranschaulicht werden, um mögliche Stellhebel zur Generalisation dieser Auswahl ableiten zu können. Die Aufgabe der AOI Prüfung liegt in diesem speziellen Produktionsspektrum in der Inspektion der Bauteilbestückung nach dem Chip Shooter. Es ist folglich nur eine Teilinspektion des Bestückprozesses, die den komplexeren Bestückprozess der hochintegrierten Bauteile nicht einschließt. Betrachtet man jedoch die dabei verarbeiteten Bauteile, so sind dies zu meist Area Array Komponenten, die im AOI nur mit einer sehr begrenzten Prüfaussage zu bewerten sind. Des Weiteren kann die optische Inspektion vor dem Fine-Pitch Placer zur Lotdepotprüfung, der oft kritischen feineren Depotstrukturen, herangezogen werden. Dies bestätigt die positive Beurteilung der Integrationslösung. Trotzdem kann dieser Ansatz nicht auf alle Produktionsfelder der Aufbau- und Verbindungstechnik übertragen werden. Werden beispielsweise stark miniaturisierte Lead Frame Komponenten wie QFPs (Quad Flat Pack) verarbeitet, so ist die optische Prüfung nach dem letzten Bestückprozess vorteilhafter, weil sich die Fehlerbehebung hier deutlich einfacher gestaltet. Die verbleibende Unsicherheit, ob ein potenzieller Fehler vielleicht durch den Selbstzentriereffekt während des Lötens kompensiert wird, besteht in gleicher Weise bei allen dargestellten Konzepten.

Diese Ungewissheit kann nur eine Prüfung am Ende der Prozesskette nehmen. Hier sind in Verbindung mit den elektrischen Prüfungen nahezu alle Fehler aufzudecken. Eine oftmals diskutierte Fragestellung befasst sich mit dem Einsatz der Röntgeninspektion, die es als Erweiterung der AOI Anwendung ermöglicht verdeckt liegende Anschlussstrukturen zu prüfen [7]. Daneben ist die technologische Ausbaustufe der Automatischen Optischen Inspektion Gegenstand unterschiedlicher Überlegungen mit dem Ziel eines Gesamtprüfkonzeptes. Ob nun eine Röntgenanalyse notwendig ist oder die Inspektion der Baugruppen aus verschiedenen Blickwinkeln erfolgen soll, ist auch bei einer der Produktion nachgeschalteten Prüfung nicht allgemein gültig zu klären. Der Bauteilmix und die in der konkreten Produktionsanwendung zu erwartenden bzw. bekannten Fehlerverteilungen müssen die Empfehlung grundlegend beeinflussen.

5.2.2 Entwickelte Strategie einer Einsatzempfehlung

Es ist folglich eine Auswahlstrategie notwendig, die aufbauend auf den Informationen aus der Fertigung eine Einsatz- und Technologieempfehlung erschließt. In der Zusammenführung der dargestellten Erkenntnisse aus den Technologie- und Prozessstudien zur Inspektion, konnte eine Anwendungsmatrix generiert werden, die flexibel für unterschiedlichste Fertigungsanforderungen eingesetzt werden kann. Dazu wurden

technologische Gesichtspunkte der Fertigung mit den Herausforderungen durch Bauelemente, Substrate und Verbindungsmedien verbunden und am möglichen Inspektionsgrad gespiegelt.

Wie in Bild 55 dargestellt, wurde dazu eine mehrstufige Einteilung entwickelt. Ausgehend von den unterschiedlichen Bauteiltypen in der linken Spalte erlaubt der Bezug zu den einzelnen produktionstechnisch möglichen AOI Einsatzorten (obere Tabellenzeile) eine von Produktionsmengen unabhängige Beurteilung. Denn abgesehen von der Menge der verarbeiteten Bauteile eines Typs, ergeben sich nur sekundäre Einflüsse auf Inspektionstechnologie und Integration. So lässt sich bei einer Baugruppe mit einer theoretischen Konfiguration von beispielsweise nur QFP Bauteilen keine alternative Inspektionsbewertung ermitteln. Entscheidend ist vielmehr der Inspektionsaufwand, der je nach Packungsdichte zu unterscheiden ist.

Inspektionsmatrix Bauteilspektrum \ Typus	Nach dem Pastenauftrag		Nach der Bestückung Standard / Fine-Pitch		Am Ende der Fertigungskette AOI			AXI	Empfehlung Systemanzahl Packungsdichte gering stark		Baugruppen-Inspektionsmatrix	
	2D	3D	2D	3D	2D	2½D	3D	2D				
Zweipolige Bauelemente	-	-	o	-	o	+	--	--	0	0	1	einschränkend - verstärkend +
SMD-Bauelemente Anschlussgeometrie Gull Wings	o	-	o	o	o	+	--	o	0	1	1	
SMD-Bauelemente Anschlussgeometrie J-Leads	o	-	o	o	-	+	--	+	0	1	1	
THD Bauelemente (im Pin in Paste Verfahren)	o	+	-	--	o	+	+	o	0	0	1	
Zweipolige Bauelemente (Fine-Pitch)	+	+	+	-	+	++	-	-	0	1	1	
SMD Anschlussgeometrie Gull Wings (Fine-Pitch)	+	+	++	-	o	++	--	o	1	1	2	
SMD Anschlussgeometrie J-Leads (Fine-Pitch)	+	+	++	-	-	++	-	+	1	1	2	
Area Array Komponenten	+	+	o	-	-	o	-	+	0	0	1	
Area Array Komponenten (Fine Pitch)	o	++	o	-	--	-	--	+	0	1	1	
Area Array Komponenten (Ultra Fine-Pitch)	-	++	o	-	--	--	--	++	0	1	2	

Gewichtung der Empfehlungsmatrix:
 ++ empfehlenswert + positiv o neutral
 - unnötig -- ungeeignet

Bauteileinteilung nach Anschlussraster (Pitch):
 Standard ≥ 800 µm; Ultra Fine < 300 µm;
 Fine ≥ 300 µm; < 800 µm;

Bild 55: Entscheidungsmatrix zur Integration von Inspektionssystemen in die Produktionskette

Die weiß hinterlegte tabellarische Darstellung in Bild 55 folgt einem Bewertungsschema in 5 Stufen. Von absolut empfehlenswerten Standorten eines Inspektionssystems, (durch „+“ gekennzeichnet) bis hin zu eher ungeeigneten Technologien zur Prüfung einzelner Prozessstufen (durch „-“ gekennzeichnet) sind hier alle bewerteten Kombinationen bezeichnet. Die Kategorie neutral „o“ ist vergeben, wenn keine eindeutige Klassifikation zu ermitteln war. Hier müssen entsprechende Entscheidungen von der Kombination der Bauteile auf der Baugruppe abgeleitet werden.

Die Komplexität bei der Inspektionsauswahl wird durch die reale Fertigungsvielfalt auf Bauteilebene erreicht. Die Mischung hängt dabei stark von den Anteilen der unterschiedlichen Bauteiltypen ab. Um hier die Entscheidung in Korrelation zur Packungsdichte zu unterstützen, konnte aus den Studien eine Empfehlung der Anzahl einzusetzender AOI bzw. AXI Systeme entwickelt werden. Die Packungsdichte bezieht sich dabei nicht allein auf die Anzahl der verarbeiteten Bauelemente auf der Baugruppe, sondern sie soll eine Brücke zu wirtschaftlichen Faktoren bilden. So ist eine Baugruppe von beispielsweise 50 x 50 mm Kantenlänge noch nicht mit dem Begriff „starke Packungsdichte“ zu bezeichnen, obgleich eine flächenmäßig enge Bestückung vorliegt. Vielmehr sind hochkomplexe HDI Baugruppen mit entsprechendem wirtschaftlichem Hintergrund hiermit adressiert und begründen damit auch zwei Inspektionssysteme in der Prozesskette.

In der letzten Stufe der Entscheidungsmatrix folgt die Übertragung der bisher durchgeführten Klassifikation in den Produktionsprozess. Die dazu entwickelte Baugruppen-Inspektionsmatrix hilft bei der Entscheidungsfindung durch Gewichtung aller Bauteilkombinationen. Zu unterscheiden sind in Bild 55 Kombinationen, welche die Entscheidung ein Inspektionssystem einzusetzen, positiv unterstützen, aber auch aus technologischen Gründen das Potenzial als eingeschränkt beurteilen. Dabei ist keine direkte Verknüpfung zur Anzahl empfohlener Inspektionssysteme herzustellen.

Die Anwendung des gesamten Systems soll am folgenden Beispiel verdeutlicht werden. Geht man von einer exemplarisch mit zweipoligen Bauelementen und SMD Bauteilen (Geometrieformen – J-Lead und Gull Wing im Fine-Pitch Raster) bestückten Baugruppe aus, so gelten die Tabellenzeilen 1, 3 und 6. Zur Vereinfachung wird von einem annähernd gleichen Bauteilverhältnis ausgegangen, das zu einer Baugruppe mittlerer Packungsdichte montiert wird. In der Gegenüberstellung des empfohlenen Integrationsgrads ergibt sich die Einsatzempfehlung soweit, dass für die SMD Bauteile ein Inspektionssystem eingesetzt werden sollte. Diese Empfehlung steht in einer verstärkenden Verknüpfung zu der Aussage, bei zweipoligen Bauteilen könnte auf ein automatisiertes Inspektionssystem verzichtet werden. Übertragen auf die Positionsbeurteilung sollte dieses System am Ende der Prozesskette eingesetzt werden und tech-

nologisch eine 2½ D Inspektion abdecken. Sollte die Baugruppe noch zusätzlich Area Array Komponenten beinhalten, wird die Auswertung durch die Tabellendarstellung in Bild 55 deutlich schwieriger. Hierfür wurde eine Bewertungsmethodik konzipiert, die in Bild 56 schematisch dargestellt ist. Durch eine breitere Informationserfassung kann so ein erweitertes Bild der realen Produktion untersucht und eine verbesserte Analyse der Integrationsalternativen erfolgen.

Anzahl unterschiedlicher auf der Baugruppe montierter Bauteil-Geometrieformen					
Auswahl der unterschiedlichen Geometrieformen					
THD Bauelemente (exkl. wellengelötete Bauteile)	Zweipolige Bauteile (Widerstände, Kapazitäten)	SMT – Bauteile Anschlussgeometrie Gull Wings (GFP)	SMT – Bauteile Anschlussgeometrie J-Leads (PLCC)	Area Array Komponenten	
Angabe des ungefähren Bauteilflächenanteils	Auswahl der Bauteile	Auswahl der Bauteile	Auswahl der Bauteile	Auswahl der Bauteile	
	Bauteilanzahl	Bauteilanzahl	Bauteilanzahl	Bauteilanzahl	
		Angabe des Anschlussrasters	Angabe des Anschlussrasters	Angabe des Anschlussrasters	
Ermittlung des Bauteilflächenanteils	Ermittlung des Bauteilflächenanteils	Ermittlung des Bauteilflächenanteils	Ermittlung des Bauteilflächenanteils	Ermittlung des Bauteilflächenanteils	
Flächige Größe des Schaltungsträgers der Baugruppe					
Fünfstufige, bauteilspezifische Gewichtung auf Basis von Flächenanteilen und Rastermaß					
Zuordnung eines bewertenden Faktors zu den auf der Baugruppe eingesetzten Bauteilen (vgl. vorhergehende Abbildung)					
Ermittlung des bestückten Flächenanteils					
Dreistufige Bewertung der Packungsdichte (vgl. vorhergehende Abbildung)					
Anzahl einzelner Produktionsprozesse?					
Auswahl der eingesetzten Produktionsprozesse					
Auftrag von Verbindungsmedium		Bestückprozess		Verbindungstechnik	
Eingesetztes Verfahren?		Eingesetztes Verfahren?		Eingesetztes Verfahren?	
Schablonen- bzw. Siebdruck	Dispenstechnik	Standard nur ein Typ	Chip Shooter in Kombination mit Fine-Pitch Placer	Löten	Aushärten des Klebers
Technologie- stufe?	Technologie- stufe?	Technologie- stufe?	Technologie- stufe?	Technologie- stufe?	Technologie- stufe?
Integriertes AOI (2D)?	Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?
Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?	Nachgeschaltetes externes AOI?
J	N	N	N	N	N
Technologie?	Technologie?	Technologie?	Technologie?	Technologie?	Technologie?
Anwendung der bauteilspezifischen AOI/AXI Einsatzbewertung aus der vorhergehenden Abbildung (weißer Tabellenbereich)					
Beurteilung der eingesetzten Produktions- wie Prüftechnologie und Ausgabe eines Integrationsvorschlages					

Bild 56: Konzipierte Struktur zur rechnergestützten Gegenüberstellung unterschiedlicher Integrationsalternativen (Struktogramm)

In der Ablauffolge des dargestellten Struktogramms zeigen sich drei bewertende Teilschritte, die in Ihrer Funktion noch zu beschreiben sind. So wird eine „fünfstufige, bauteilspezifische Gewichtung“ angeführt, welche die Eingaben zu Bauteilfläche und Rastermaß zusammenfasst. Die fünfstufige Einteilung gliedert die eingesetzten Bauteiltypen nach dem Einfluss auf die Inspektionsentscheidung von gering (Stufe 1) bis entscheidend (Stufe 5). Jedes in der konzipierten Struktur hinterlegte Bauteil besitzt eine Stufenbewertung, die durch Typus, Größe und Rastermaß eindeutig definiert ist. So

besitzt beispielsweise das Bauteil „QFP256E13A15.7-2.6“ [84] auf Grund des Anschlussrasters und der Bauteilfläche die Stufenbewertung 5. Im Gesamtbaugruppengefüge mit anderen Bauteilen des Typs „SMD Anschlussgeometrie J-Lead“ (vgl. Bild 55) kann diese Bewertung beibehalten oder abgeschwächt werden.

In einem weiteren Struktogrammschritt ist eine dreistufige Einstellung der Packungsdichte vorgesehen. Hier wird zunächst die Flächenbelastung der Baugruppe durch Bauelemente ermittelt und diese an der Flächengröße der Baugruppe gespiegelt. Wird von einer Produktionsbaugruppe aus mehreren Nutzen ausgegangen, stellt die gesamt zu fertigende Baugruppe das Maß der Bewertung dar.

Die konzipierte Logik zur Charakterisierung der Produktion ermöglicht eine Verfeinerung der Empfehlungsmatrix aus Bild 55. Durch die Erweiterung auf Teilprozesse, wie dem Auftrag von Verbindungsmedium bzw. der Verbindungstechnik, ergeben sich weitere Einschränkungen, die eine Entscheidungsfindung begünstigen. In der „Beurteilung der Produktions- und Prüftechnologien“ sind dazu mehrstufige Verknüpfungen zu konzipieren, die Produktion und Inspektionsaufgaben verbinden. Neben der Einordnung der technologischen Stufe der Produktionsprozesse, aus denen sich bereits Hinweise über sinnvolle Positionen für die Inspektion ableiten lassen, ist auch die Prozessfolge zu berücksichtigen. So spricht, durch den nicht einsetzenden Selbstzentriereffekt bei der Verbindungstechnik „Leitkleben“, die vereinfachte Nacharbeit für eine Inspektion vor dem Kleberaushärteprozess [55]. Gleiches gilt für einen Vergleich des Lotauftragsprozesses, der durch Schablonendruck besser beherrscht wird, als durch die Dispensetechnik, was die Inspektionsentscheidung beeinflussen muss. Letztlich ist die bereits eingesetzte automatische, optische Prüftechnik zu betrachten. Anlagenintegrierte Inspektionseinheiten, wie oftmals bei Schablonendruckern, sprechen gegen eine weitere externe prozessnachgeschaltete Inspektion. Diese Regeln müssen den aus Bild 55 ermittelten Inspektionsvorschlag prozessspezifisch unterstützen bzw. einschränken.

So konnte, angefangen beim Bauteil über die Packungsdichte bis zur geplanten Produktionskette, eine detaillierte Analyseketten aufgebaut werden, die zu einer prozessübergreifenden Integrationsempfehlung führt. Ergänzend ergeben sich Hinweise auf einzusetzende Technologien, die jedoch im Gesamtzusammenhang der Fertigungsvarianten zu überprüfen sind.

5.3 Erweiterte Anforderungen an die optische Prüftechnologie

Verbesserte Prozesstransparenz sowie prozessbegleitende Prüfschritte haben in der Aufbau- und Verbindungstechnik zu einer deutlichen Reduzierung der Produktionsfehler geführt. Die Restquote detektierter Fehlerstellen ist, z. B. bei sichtbaren IC- Bein-

chen, so gering, dass die Pseudofehlerrate um Faktoren von 10 bis 100 höher sein kann. Irrtümlich ausgeführte Reparaturversuche an Pseudofehlern, insbesondere im Fine-Pitch Bereich, führen zu Folgefehlern, die häufig die Anzahl der echten Fehler übersteigt [82]. Den hieraus abzuleitenden Anforderungen muss sich die Inspektionstechnologie zukünftig stellen, um dem geforderten Qualitätsniveau zu folgen.

5.3.1 Charakteristische Leistungsziele bei der Systemauswahl

Mit der Entscheidung ein Automatisches Optisches Inspektionssystem in den Produktionsprozess zu integrieren, ergeben sich aber weitere Fragestellungen in Hinblick auf den Leistungsumfang und die Funktionalität des Systems. Die am Markt verfügbaren Systeme verfolgen zwar alle die gleiche Zielrichtung der Fehlererkennung auf elektronischen Baugruppen, in ihrer Systemgestaltung lassen sich aber deutliche Unterschiede erkennen. Damit ist nicht allein die angesprochene technologische Differenzierung nach 2 D bzw. 2½ D Systemen adressiert, sondern auch Leistungsaspekte, die nur durch die Gegenüberstellung der Systeme deutlich werden. Um ein einheitlich reproduzierbares Vorgehen zu etablieren, sollten wesentliche Aspekte berücksichtigt werden, die sich aus den Erfahrungen der Studien an optischen Inspektionssystemen ergaben.

Wie bei der Entscheidungsfindung, steht auch bei der Auswahl des passenden AOI bzw. AXI Systems die Baugruppe im Mittelpunkt der Betrachtung. Aufbauend auf den bereits erarbeiteten Ergebnissen zur optimierten Inspektionsintegration lassen sich Erkenntnisse über mögliche Baugruppenfehler ableiten. In der Produktion kann dies durch Erfahrungen aus der Sichtprüfung oder besser durch angelegte Fehlerprotokolle erfolgen. Mit diesem Fehlerkatalog ist eine Klassifikation mittels Pareto-Analyse bzw. ABC-Analyse durchzuführen, um die wesentlichen Fehlerbilder zu erkennen [124]. Damit verbunden, kann vor der Inspektionseinführung die Fertigung auf systematische Fehler überprüft werden, was zumeist eine Produktionsoptimierung nach sich zieht [97]. Die ermittelten Fehlerbilder stellen nunmehr die Basis einer Systembewertung dar. Eine speziell aufgebaute Baugruppe mit vorgegebenen Fehlern kann die Leistungsfähigkeit, aber auch Systemgrenzen aufzeigen und damit die Entscheidung für ein System begründen. Der oft diskutierte Ansatz einer Benchmarkstudie kann hier eine vergleichende Analyse unterstützen. Trotzdem sollte der Aufwand für die Inspektionsauswahl vorab bewertet und die Potenziale dieser Auswahl abgewogen werden. Ebenso möglich sind Kurzanalysen in direkter Kooperation mit den Systemanbietern. Hier können die aufgebauten Testbaugruppen (mit speziell vorbereiteten Fehlern) analysiert und die Prüftiefe bewertet werden. Auch das wesentliche Kriterium des Programmieraufwandes ist dabei zu beurteilen. Die Einstellung der Anlagen beim Hersteller erfolgt zwar von Spezialisten, aber die neue Einrichtung einer Baugruppe stellt

trotzdem für alle ein vergleichbares Maß an Aufwand dar und liefert damit eine gute Bewertungsgrundlage. Eine Benchmarkstudie führt zwar zu mehr Flexibilität in der Systemauswahl, der wirtschaftliche Aufwand für Schulungen an den unterschiedlichen Geräten und Teststudien sollte aber vorher kalkuliert werden. Speziell der Aufwand für die Programmierung kann erst bei der produktionsnahen Anwendung des Systems erfasst werden. Wird die Entscheidung für ein System ohne technologisches Benchmarking getroffen, ist eine Erprobungsphase beim Kunden zu empfehlen, um den Programmieraufwand nochmals zu verifizieren und Supportleistungen zu prüfen.

Neben der fehlerorientierten Bewertung des Leistungsumfangs unterschiedlicher Inspektionssysteme gilt es speziell den folgenden Kriterienkatalog bei der Systemkonfiguration zu beachten.

- Komplette Erfassung, Speicherung und Berücksichtigung der Fehlermuster zur Bewertung der Lötstellen bzw. sonstiger definierter Prozess- bzw. Materialqualität.
- Fehlerdatenerfassung, automatische Berechnung und Bereitstellung der Fehlerstatistik mit dem Ziel der Prozessüberwachung.
- Anbindung an ein CAQ-System über eine Datenschnittstelle mit dem Ziel der Prozessregelung.
- Der Erfolg des AOI-Einsatzes muss an der Reduzierung des personalintensiven Aufwandes für die Sichtprüfung messbar sein.

Insgesamt sollte die Inspektion nicht durch das Ziel „Fehler-Erkennung“ getragen werden, sondern vielmehr, wie in Bild 57 dargestellt, durch den Willen zur Prozessverbesserung motiviert sein.

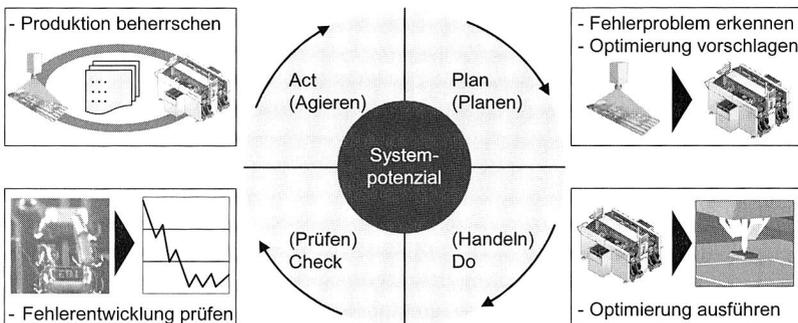


Bild 57: Auf die Inspektion ausgerichteter PDCA-Zyklus zur Prozessverbesserung nach W. E. Deming [95]

5.3.2 Technologische Anforderungen bleifreier Lote an die automatische optische Inspektion

Gemessen an der aktuellen Baugruppenfertigung sind alle Komponenten auf bleihaltige Lötprozesse abgestimmt, seien es Leiterplatten, Bauelementanschlüsse oder für die Prozesse notwendige Hilfsstoffe. Auch die Prüfmethoden wie automatische optische Inspektion oder Röntgeninspektion haben ihre Auswertelgorithmen über die Jahre auf bleihaltige Lötstellen optimiert. Das kommende Bleiverbot in Lotwerkstoffen zum 01.07.2006 stellt daher eine grundlegende Neuausrichtung der Baugruppenfertigung dar. [3]

Zur Verarbeitung unterschiedlicher bleifreier Lote liegen mittlerweile umfangreiche Studien und Ergebnisberichte vor, die von der Benetzung der Lotwerkstoffe bis zur Einstellung des Lötprofils den Produktionsprozess abdecken. Gleichermäßen sind Zuverlässigkeitsaspekte durch Lebensdauerstudien untersucht worden und entsprechende Optimierungen haben zu den heute verfügbaren, für die Aufbau- und Verbindungstechnik geeigneten, bleifreien Lotpasten geführt. Des Weiteren werden für die nun notwendige Umstellung eine Reihe von Tagungen und Seminaren durchgeführt, die dieses Thema weiter vertiefen sollen [52] [162]. Die Auswirkungen von bleifreien Lötverbindungen auf die Testbarkeit elektronischer Baugruppen spielten bisher eine untergeordnete Rolle. Wie Bild 58 zeigt, ist jedoch bereits mit dem Auge ein deutlicher Unterschied in der Optik der Lötstellen zu erkennen.

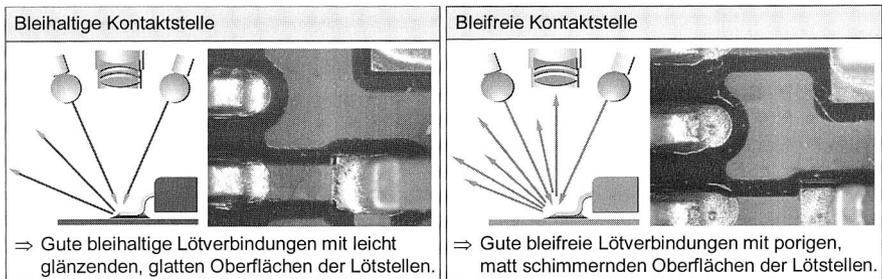


Bild 58: Gegenüberstellung von AOI Aufnahmen von bleihaltigen und bleifreien Lötlegierungen

Um dies grundlegend zu untersuchen, wurden mehrere Baugruppen mit bleihaltigem und bleifreiem Lot (Sn62Pb36Ag2 ; Sn95.5Ag4Cu0.5) aufgebaut und mit einem AOI System überprüft. Die bleifreien Lötstellen zeigen einen größeren Helligkeitswert im Bereich des Lötmeniskus. Dies führt bei einer Prüfung mittels Grauwertanalyse zu einer eingeschränkten Fehlererkennung und einer erhöhten Pseudofehlerrate. Durch

Anpassung von Grenzwerten und einer Veränderung optischer Kennzahlen konnte nur begrenzt entgegengewirkt werden. Die geforderte Inspektionszuverlässigkeit war nur durch eine systeminterne Optimierung sicherzustellen. Ebenfalls durchgeführte Röntgenanalysen bleifreier Kontaktstellen waren ohne Einschränkungen in der Ergebnisbewertung durchzuführen. [19] [46]

5.3.3 Effizienzanalyse der automatischen optischen Inspektion

In verschiedenen Untersuchungen wurde bereits aufgezeigt, dass mit der Qualitätssteigerung ein erhebliches Kostensenkungspotenzial im Prüffeld verbunden ist [168]. Dieser Senkung von Prüf- und Fehlerkosten steht jedoch ein erhöhter Aufwand für präventive Maßnahmen entgegen. In letzter Konsequenz führt das Streben nach einer Null-Fehler-Produktion zu exponentiell ansteigenden Fehlervermeidungskosten [41]. Das wirtschaftliche Optimum liegt an dem Punkt, an dem die Summe aus Fehlerbeseitigungs- und Fehlervermeidungskosten ein Minimum aufweist [41]. Für die Elektronikproduktion ist die Bestimmung dieses Optimums von besonderer Bedeutung, da einerseits ein erheblicher Aufwand für Prozessoptimierung und -beherrschung ansteht, andererseits kostenintensive Prüfstrategien und Nacharbeiten durchzuführen sind.

Folglich kommt dem Nachweis der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit bei der Anschaffung eines Inspektionssystems entscheidende Bedeutung zu. Auch bei technologisch einwandfreier Begründung der Notwendigkeit ist eine Kalkulation der Rentabilität (Return on Investment – ROI) gefordert. Neben den relativ einfach zu erfassenden Personalkosten sind indirekte Kosten aus der Produktion in der Wirtschaftlichkeitsrechnung zu berücksichtigen. Ausschlagend ist der Fehleranteil der laufenden Produktion ohne Inspektionssystem und den damit verbunden Kosten. Die Fehlerverteilung ist aus den nachgelagerten zumeist elektrischen Prüfungen bzw. aus den Funktionsprüfungen am Gesamtprodukt zu ermitteln. Die damit verursachten Kosten sind aus drei verschiedenen Gesichtspunkten zu bewerten. Bei den Baugruppen, die nicht nachzuarbeiten sind und einen Totalausfall darstellen, sind die gesamten Produktionskosten zu veranschlagen. Falls die Nacharbeit möglich und kostenspezifisch sinnvoll ist, ist die Baugruppe zu demontieren und die Zusatzkosten abzuschätzen, die durch den verspäteten Fehlernachweis entstanden sind. Der wohl am schwierigsten zu erfassende Gesichtspunkt ist die fehlende Rückkopplung der Inspektionsergebnisse auf die Produktion. Die damit fehlende Optimierung soll durch die Anschaffung des Inspektionssystems erreicht werden. Auch hierfür sind Kostentabellen, beispielsweise in [152], verfügbar, um eine Reduzierung der Fehlerrate (dpm – defects per million) wirtschaftlich zu erreichen. Insgesamt kann die Effizienz einer Inspektionsanschaffung nur durch vorherige Recherche der Ist-Situation nachgewiesen und mit der Stückzahlrate ein Break Event Point der Investition ermittelt werden.

6 Qualifizierung der Prozessschritte in der Nacharbeit

Die Prüfstrategien in der Elektronikproduktion stehen in direkter Beziehung zur Nacharbeit der Baugruppen. Ein optimiertes Prüfkonzept, basierend auf dem Einsatz eines oder mehrerer Inspektionssysteme, verfolgt vor dem Hintergrund steigender Qualitätsanforderungen zweifelsohne das Ziel nur fehlerfreie, absolut zuverlässige Produkte dem Kunden anzubieten. Neben diesem, im Wesentlichen wirtschaftlich begründeten Aspekt, sind aber zwei weitere Faktoren ausschlaggebend für den Unternehmenserfolg [9]. Zunächst ist es das einfach zu titulierende „Lernen aus Fehlern“, welches den Schwerpunkt in Kapitel 7 darstellt. Das zweite ist die Erhaltung und Nutzung der bereits geleisteten Wertschöpfung, auch bei fehlerhaften Baugruppen [2]. Diese müssen mit der Kenntnis der spezifischen Fehlstelle in einem Reparaturprozess nachgearbeitet werden [123]. Technologisch und auch wirtschaftlich erscheint es zunächst nicht sinnvoll, einen Baustein im Werte eines Euro-Cent-Bruchteils auszutauschen. Immerhin können die Kosten für die Nacharbeit den Wert um ein Vielfaches übersteigen. Die sichergestellte Funktionsfähigkeit der Baugruppe, insbesondere die Möglichkeit diese als Gutteil am Markt anzubieten, unterstreicht jedoch das Potenzial einer zuverlässigen Nacharbeit. Eben diese Zuverlässigkeit der Prozesse in der Nacharbeit ist heute nur begrenzt gegeben [154].

Die Nacharbeit war schon immer ein kritischer Prozessschritt mit deutlichen Schwächen in Prozessbeherrschung und Systemzuverlässigkeit [127] [161]. Mit den neuen Technologien in der Elektronikproduktion (feinere Strukturen, verdeckte Anschlüsse) haben sich die Herausforderungen an eine qualitativ hochwertige Nacharbeit nochmals verstärkt [37]. Eine Nacharbeit, basierend auf manuellen Systemen oder Handgeräten wie LötKolben bzw. Lötzange, ist in diesem Umfeld nicht mehr zeitgemäß und produktionstechnisch inkonsequent [144]. Aber auch heutige, moderne Nacharbeitssysteme erfüllen nur bedingt die Anforderungen an Prozessbeherrschung, Systemautomatisierung sowie an Handhabung und Rüstzeit [60].

Die Anforderungen an die Nacharbeitssysteme sind in den letzten Jahren ständig gewachsen. Dies ist nicht nur durch die technologische Entwicklung zur Oberflächenmontage zu begründen, sondern ergibt sich vielmehr durch den dynamischen Fortschritt im Bauteilesektor, der sich in der Komplexität der Baugruppe widerspiegelt. Neben der ständig steigenden Pin- respektive Ball-Anzahl, sowie der immer kleineren Abstände, müssen die Systeme vielmehr die zunehmende Gehäusevielfalt beherrschen. Diese Forderungen nach Flexibilität und Prozessführung aufnehmend, sind erste Systeme mit bauteilspezifischen Systemvoreinstellungen verfügbar (siehe Bild 59) [16]. Die Unterschiede hinsichtlich Bauteilhöhe, -form und Rastermaß sowie dem wich-

wissen, Stellgrößen und Wechselwirkungen betreffend. Beides gilt es durch Studien zu erfassen [109].

Neben der weiteren Miniaturisierung bei den Bauteilen und der technologischen Forderung nach höheren Gebrauchstemperaturen muss die Nacharbeit auch den Herausforderungen der aktuellen EU Gesetzgebung begegnen (RoHS / WEEE) [20] [21]. Fest vorgegebene Wiederverwendungs- und damit auch Nacharbeitsquoten von bis zu 80 % des Gesamtproduktes erfordern alternative Strategien und unterstreichen das Potenzial einer ganzheitlichen Beherrschung der Nacharbeit [155].

6.1 Grundlegende Betrachtung des Nacharbeitsprozesses

Die Null-Fehler-Fertigung ist die Vision jeder Produktion und wird von dieser auch zielgerichtet verfolgt [99]. Doch trotz aller Optimierungen sind Nacharbeiten an Baugruppen nicht auszuschließen. Um in diesem Umfeld eine Nacharbeit hinsichtlich der Forderung nach stabilen Prozessen und definierter Qualität zu erreichen, ist es nötig, die unterschiedlichen Anwendungen in der Nacharbeit zu klassifizieren und die entsprechenden Technologien zu bewerten. Dazu muss die Standardprozesskette um die aus der Nacharbeit erforderlichen Prozessschritte erweitert und modifiziert werden. Die so konzipierte Struktur ist schematisch in Bild 60 zusammengestellt. Wichtig ist es, neben der Standardreparatur von fertig produzierten Flachbaugruppen Nacharbeitsstrategien auch innerhalb der Prozesskette zu etablieren, um so eine einfachere und auch kostengünstigere Behebung von Prozessfehlern zu erreichen [170]. Insgesamt konnten drei verschiedene Einsatztypen unterschieden werden, die in der Anwendung verschiedene Anforderungen an die technologische Ausgestaltung des Nacharbeitsprozesses stellen.

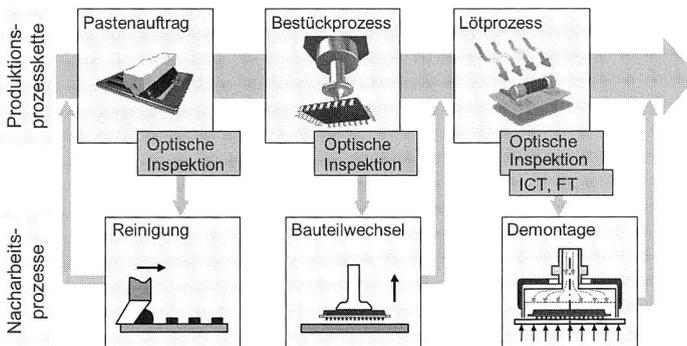


Bild 60: Struktur der erweiterten Produktionskette zur Integration unterschiedlicher prozessnaher Nacharbeitsschritte

Die erste Variante betrifft Fehler, die bereits beim Lotpastenauftrag entstanden sind und detektiert werden. Hier zeigen Untersuchungen, dass der Einsatz der Dispens-technologie möglich wäre, aber die dispensten Lotdepots den Ansprüchen an Formstabilität, Reproduzierbarkeit und Positionsgenauigkeit nachkommen müssen [122]. Um dies für die Nacharbeit grundlegend zu klären, ist ein Vergleich von dispensten Lotdepots mit gedruckten erforderlich. Nachdem es auch in der Dispens-technologie Unterschiede gibt, kamen in einer hierfür durchgeführten Studie Dispensverfahren nach dem Druckluft- sowie dem Rotations-schraubenprinzip (vgl. Bild 18) zum Einsatz [47]. Manuell durchgeführter Dispenspastenauftrag kann der Forderung an die Positioniergenauigkeit nicht folgen und wurde deshalb nicht weiter betrachtet. Den Anforderungen durch immer feinere Strukturen nachkommend, umfasste die Studie vier unterschiedliche Größen von Anschlussflächen (Pads) im Durchmesser von 300 µm bis 850 µm, was einem Pitchabstand von minimal 500 µm entspricht. In der Auswertung der gesetzten Lotdepots kam die bereits in Kapitel 5 beschriebene Weißlichtinterferometrie zum Einsatz, die Konturanalysen, Volumenberechnungen und Höhenmessungen gestattete. Wie in Bild 61 dargestellt, lässt sich anhand der Messwerte ein deutlicher Unterschied zwischen den Auftragsverfahren nachweisen.

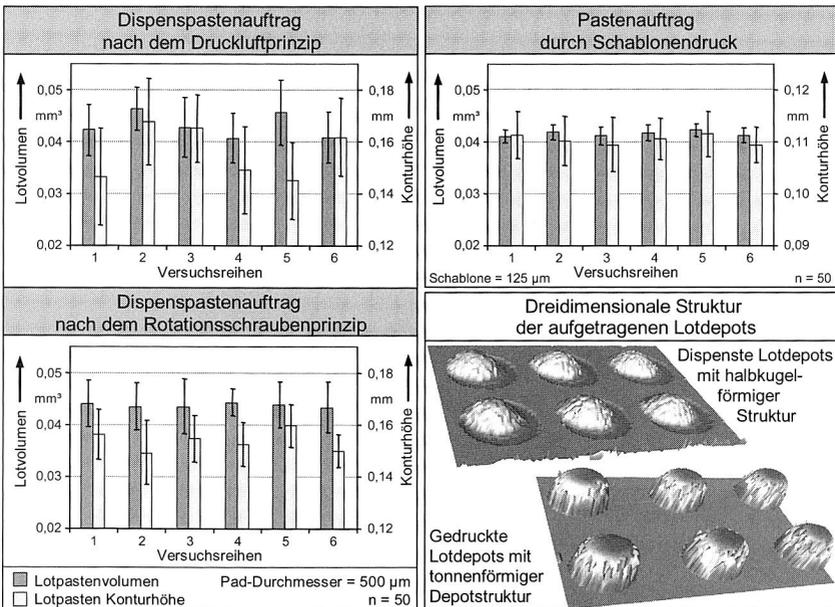


Bild 61: Analyse unterschiedlicher Dispens-technologien als Alternativen in der Baugruppennacharbeit

Die größte Schwankungsbreite zeigt sich im Dispenspastenauftrag nach dem Druckluftprinzip. Dies wird an der Standardabweichung der einzelnen Messreihen deutlich und durch die unterschiedlichen Volumenmittelwerte der Versuchsreihen unterstrichen. Bessere Ergebnisse konnten für Lotdepots mit einem Durchmesser von 750 μm bzw. 850 μm erzielt werden. Damit ist dieses Verfahren zum Pastenauftrag in Nacharbeit bei sehr feinen Strukturen nicht zu empfehlen. Deutlich mehr Potenzial zeigt hingegen der Einsatz von Dispenssystemen nach dem Rotationsschraubenprinzip. Vergleichsweise konstante Volumenmengen und geringe Unterschiede in der Lotpastenhöhe sprechen für eine reproduzierbare Anwendung in der Nacharbeit.

Jedoch geht die Nacharbeit im Anschluss an den Pastenauftrag zumeist mit der Reinigung des gesamten Schaltungsträgers einher. Demnach ist ein erneuter Pastenauftrag im Schablonendruck unter technologisch-wirtschaftlichen Aspekten zu bevorzugen. Den durchgeführten Analysen zum Dispenspastenauftrag kommt nach dem Bestücken bzw. bei der Nacharbeit fertig produzierter Baugruppen eine entscheidende Bedeutung zu, da hier selektiv zumeist nochmals Lotpaste aufgetragen werden muss.

Wird die Nacharbeit im Anschluss an den Bestückprozess durchgeführt, gilt es fehlerhaft bestückte Bauteile zu ersetzen oder fehlende Bauteile zu bestücken. Ebenso ist in Einzelfällen der Auftrag von Verbindungsmedien vorzusehen, da beim Bauteilwechsel die Lotpaste verdrückt oder entfernt werden kann. Die Anforderung liegt jedoch hauptsächlich im positionsgenauen Abgreifen und Absetzen von Bauteilen. Marktanalysen haben gezeigt, dass entsprechende Positioniereinrichtungen mit rechnergestützter Positionskontrolle verfügbar sind und somit eine stabile Prozessführung garantieren. Ferner wird die Baugruppe bei der Nacharbeit in diesem Prozessschritt weniger beansprucht, da keine Temperatureinbringung notwendig ist.

Die Nacharbeit am Ende der Fertigungslinie ist die am häufigsten eingesetzte Variante. Entsprechende Anforderungen stellen sich an die Prozessbeherrschung und damit an das zu definierende Nacharbeitssystem. Marktanalysen haben ergeben, dass für oberflächenmontierte Bauteile und speziell für Area Array Packages unterschiedlichste Systeme angeboten werden, die sich technologisch in zwei Gruppen einteilen lassen: Nacharbeitssysteme, die mit Heißluft arbeiten und andere Systeme, die mit Infrarotstrahlung die Wärmeübertragung umsetzen.

6.1.1 Technologische Unterschiede in der Wärmeeinbringung

In der Nacharbeit der Baugruppenfertigung sind immer noch Anlagen im Einsatz, die einen hohen Anteil von manuellen Bedienereingriffen erfordern [49] [60]. Hierbei werden partiell noch LötKolben (vgl. Bild 62 links) zur Fehlerbehebung an feinsten An-

schlussstrukturen herangezogen, was bei nicht fachgerechter Handhabung auch zu weiteren Baugruppenfehlern führen kann. Die Gründe liegen hierfür neben der ständig steigenden Packungsdichte auch in der fehlenden Prozessführung. Letzteres gilt von der einfachen Lötzange bis hin zu teilautomatisierten Systemen. Die zentrale Forderung Qualität über alle Schritte der Baugruppenfertigung zu liefern, steht folglich in deutlichem Widerspruch zur industriellen Anwendung [123]. Neuartige Lösungsansätze sind gefordert, die durch flexible Regelung zu einer Optimierung in der Wärmeeinbringung führen [170]. Diese Regelbarkeit kann aber zielgerichtet nur durch umfangreiches Prozesswissen über Stellgrößen und Wechselwirkungen erfolgen [143].



Bild 62: Manuelle Nacharbeitswerkzeuge wie LötKolben und -zange können den Anforderungen aus der Baugruppenfertigung nicht entsprechen

Schematisch lässt sich die Nacharbeit in einen grundlegenden Systemaufbau und verschiedene Konzepte zur Wärmeeinbringung unterteilen. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Wärmeübertragung mit Heißgas bzw. Infrarot-Strahl. Für beide Technologien sind Untersuchungsberichte verfügbar, die jeweils die Potenziale der Verfahren betonen [2] [49] [94]. Im Mittelpunkt stehen dabei die lokale Wirkung der Oberheizung und der damit verbundene Einfluss auf die Gesamtbaugruppe. Durch die gerichtete Strahlung bei der Infrarot-Technologie (IR) wird davon ausgegangen, dass die Wärmeverteilung über die Baugruppe durch Abschattungseffekte großen Schwankungen unterliegen kann. Dies gilt insbesondere für Area Array Komponenten, die durch Ihren flächigen Körper die Kontakte abschirmen und so spezielle Lösungsansätze

ze in der IR Nacharbeit erfordern. Schäden an Bauteilen und Schaltungsträgern durch abschirmungsbedingte Temperaturunterschiede können die Folge sein.

Des Weiteren sind Erfahrungen mit IR-Reflowöfen weitgehend bekannt, die bisweilen zum völligen Austausch dieser Technik im Lötprozess der Baugruppenfertigung geführt haben. Als Gründe hierfür werden vorzugsweise Grenzen in der Wärmeverteilung angeführt, die auch auf IR-Lösungen in der Nacharbeit übertragen werden können. In eigenen Untersuchungen konnte zwar die Nacharbeit auch für Area Array Packages realisiert werden, die Profilierung erfordert jedoch mehr Prozesskenntnisse und führt trotzdem zu größeren Temperaturunterschieden über die Fläche des Bauteils (vgl. Bild 63) [54]. In den Analysen ließ sich die positive Wirkung von Strahlerabschirmungen bestätigen, die zu weniger Wärmebelastung im Nacharbeitsumfeld führen. Ebenso konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass gemessen an den zukünftigen Herausforderungen die Nacharbeitsvariante Heißgas durch die bessere Regelbarkeit eher das Potenzial einer qualitätsorientierten Nacharbeit erschließt.

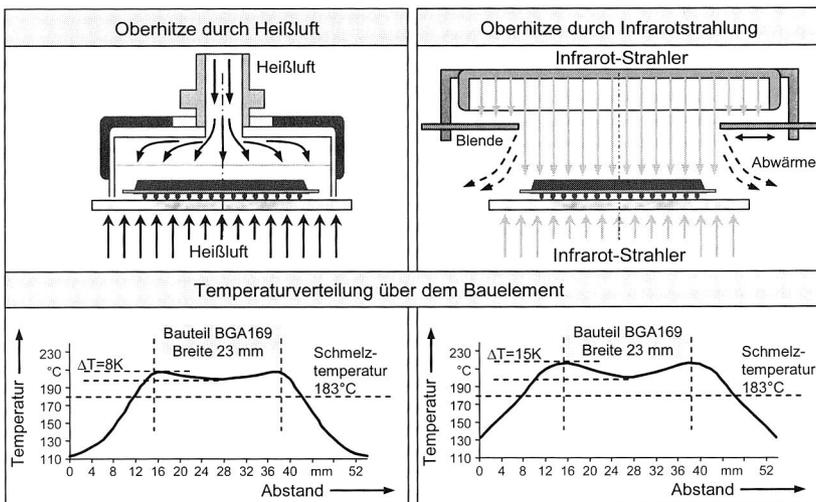


Bild 63: Prinzipskizze von Nacharbeitssystemen mit Infrarot- bzw. Heißgas Oberhitze und die Temperaturverteilung bei der Nacharbeit eines BGA169 Bauteils

Betrachtet man beide Varianten, so wird die Wärmeübertragung mit Heißgas ursächlich durch die Temperatur, die Stärke des Luftstroms und die Werkzeuggeometrie bestimmt. Die Infrarot-Strahlung hingegen ist direkt von der Strahlungsleistung abhängig, wobei Abschirmbleche das Werkzeug bilden. Bei beiden Verfahren erfolgt die Einstel-

lung dieser Größen vorwiegend durch Testschaltungsträger, die mit speziellen Sensoren ausgestattet sind. Die kontinuierlich an den Lötstellen wirksamen Temperaturen wurden bisher fälschlicherweise nur als nebenläufig angesehen. Die Wärmeübertragung wird durch eine Kombination aus Ober- und Unterhitze realisiert. Der Nacharbeitslötprozess beginnt im Wesentlichen mit der Unterhitze. Die untere Wärmestrahlung dient zur Erwärmung der gesamten Flachbaugruppen, um eine möglichst geringe thermische Drift und Spannung auf der Baugruppe zu garantieren. Beim Einsatz bleihaltiger Verbindungsmedien sollte dabei der gesamte Schaltungsträger auf ca. 120 °C erwärmt werden. Die fokussierte Oberheizung wird für den anschließenden realen Aufschmelzprozess der Lotpaste eingesetzt.

Die Verteilung der Oberhitze und die konstante Wärmeübertragung über das Bauteil stellen einen der kritischsten Faktoren in der Prozessgestaltung dar. Neben der Erwärmung der fehlerhaften Verbindungen muss das Bauteilumfeld vor Beschädigungen und unbeabsichtigten Temperatureinwirkungen geschützt werden. In durchgeführten Untersuchungen mit beiden Technologievarianten konnte nachgewiesen werden, dass bei beiden eine zuverlässige Prozessführung möglich ist, wenn eine Temperaturkontrolle kontinuierlich oder durch Testschaltungsträger durchgeführt wird. Prozessspezifische Unterschiede zeigen sich durch die eher flächige Aufheizung beim Prozess mit Infrarot-Oberheizung. Beispielsweise sind bei der Verarbeitung von Bauelementen mit verdeckten Anschlussstrukturen (Ball Grid Array BGA; Chip Size Package CSP) Temperaturunterschiede von bis zu 15 K nachweisbar (siehe Bild 3). Die dadurch notwendige höhere Temperatureinbringung führt zu einer hohen thermischen Belastung für das Bauteil. Andererseits erlaubt die Anwendung der IR-Strahlung als Oberhitze einen sehr flexiblen Einsatz in der Praxis, da keine speziellen Vorrichtungen für verschiedene Bauteiltypen eingesetzt werden müssen.

6.1.2 Wirkung alternativer Verbindungsmedien und feiner Strukturen auf Systemlösungen und Prozesse in der Nacharbeit

In der Literatur sind über 200 Lotwerkstoffe mit Schmelzpunkten unter 300 °C verzeichnet, die grundsätzlich als Verbindungswerkstoffe für elektronische Komponenten zum Einsatz kommen könnten. Aus Sicht des jeweiligen Anwenders lassen sich diese Weichlotwerkstoffe in verschiedene Gruppen unterteilen, wobei auch Kombinationen verschiedener Kriterien auftreten können.

Mit dem Begriff Weichlot wurden in der Elektronikfertigung bisher fast ausschließlich die bleihaltigen Legierungen Sn63Pb37, Sn60Pb40 oder Sn62Pb36Ag2 verbunden. Diese werden unter Verwendung verschiedener Lötverfahren als Standardlotwerkstoffe branchenübergreifend, universell für die unterschiedlichsten Applikationen zwischen

Konsumelektronik und Automobilanwendungen, eingesetzt. Weltweit wird seit Jahren die Verwendung bleihaltiger Lotmedien unter dem Aspekt einer Einschränkung umweltgefährlicher Stoffe diskutiert.

Die Gesetzgeber der europäischen Union befassen sich seit mehreren Jahren mit der Problematik der Elektronikaltgeräte. Diesbezüglich wird zur Reduzierung des Einsatzes bestimmter gefährlicher Stoffe per Gesetz regelnd eingegriffen. So haben die europäischen Gesetzgeber zum 13.02.2003 zwei Richtlinien mit dem Ziel einer verbesserten Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung von Elektro- und Elektronikgeräten erlassen. Die Richtlinie 2002/96/EG „Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment“ (WEEE) bezweckt vorrangig die Vermeidung von Abfällen und darüber hinaus die Wiederverwendung von Altgeräten [21]. Parallel dazu ist in einer zweiten Richtlinie 2002/95/EG „Directive on the Restriction of the Use of certain hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment“ (RoHS) die Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe geregelt [20]. In der Kombination beider Vorschriften, die binnen 18 Monaten in nationales Recht zu überführen sind (Aug. 2004), werden nahezu alle Produktkategorien elektronischer Baugruppen betroffen sein. Neben weiteren Terminen zur Umsetzung der Vorschriften ist für die Elektronikproduktion der Stichtag 01.07.2006 entscheidend. Ab diesem Termin dürfen weder halogenhaltige Substrate, beispielsweise in Leiterplatten, noch bleihaltige Lotwerkstoffe eingesetzt werden. Oftmals diskutierte Ausnahmen spezieller Industriesektoren oder Produktgruppen sind in den Richtlinien soweit nicht enthalten und werden sich nur durch die Definition eines elektronischen Produktes aus der Gesamtproduktbetrachtung ergeben. Nur für Lotlegierungen mit einem Bleianteil von über 85-gewichtsprozent ist aufgrund fehlender Substitute eine weitere Verwendung offen [20] [127].

Eine löttechnische Alternative zum Einsatz von bleihaltigen Elektronikstandardloten bietet die Verwendung alternativer, bleifreier Lotwerkstoffe. Vor dem technologischen Hintergrund lassen sich mehrere Lotlegierungen mit einem Schmelzpunkt von unter 300°C unterscheiden. In den letzten Jahren hat das wissenschaftliche und wirtschaftliche Interesse an diesen Legierungen stark zugenommen, so dass konkrete Überlegungen für einen Einsatz derartiger bleifreier Lotwerkstoffe in der Elektronikfertigung angestellt wurden. Besonders geeignet für Lotanwendungen sind Metalle der dritten, vierten und fünften Hauptgruppe des Periodensystems sowie die der ersten und zweiten Nebengruppe. Die Metalle der ersten Nebengruppe zeichnen sich dabei vor allem durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit aus. Aus der Fülle der denkbaren bleifreien Legierungen lässt sich in einer ersten Annäherung unter Berücksichtigung ökologischer (Toxizität), technologischer (Schmelzpunkt) und wirtschaftlicher (Verfügbarkeit) Randbedingungen eine kleine Gruppe von Metallen isolieren, die als Bestandteile zukünftiger bleifreier Elektroniklote ein gewisses Potenzial besitzen (Tabelle 7).

Element	Antimon (Sb)	Kupfer (Cu)	Indium (In)	Silber (Ag)	Wismut (Bi)	Zinn (Sn)	Zink (Zn)
Schmelzpunkt in °C	630,7	1083,0	156,6	961,9	271,3	231,9	419,6
Elektrische Leitfähigkeit in $10^{-6} \Omega \text{cm}$	41,7	1,6	8,4	1,6	129,0	11,0	5,8
Thermische Leitfähigkeit in W/m (bei 300 K)	24,4	401,0	81,8	429,0	7,9	66,8	116,0
Weltweite Produktion in kt/a	53,0	$8,0 \cdot 10^3$	0,1	9,9	3,0	165,0	$4,9 \cdot 10^3$
Kapazitätsreserve in kt	2500,0	$2,3 \cdot 10^6$	1,5	1000,0	4,0	4500,0	$1,2 \cdot 10^6$
Metallkosten in Euro/kg	2,1	1,6	380,0	161,0	6,1	4,5	0,7

*Tabelle 7: Legierungsbestandteile zinnreicher, bleifreier Elektroniklote
(Quelle: London Metal Exchange und Kitco Inc.)*

Hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften wie elektrische und thermische Leitfähigkeit ergeben sich keinerlei Einschränkungen für den Einsatz der angeführten Metalle in Elektronikloten. Hingegen schränkt der hohe Preis bzw. die unzureichende Verfügbarkeit den Einsatz von Au- und In-haltiger Legierungen ein. Zink (Zn) wird bisher als Legierungselement aufgrund vermuteter Korrosionsprobleme und Verarbeitungsschwierigkeiten kaum als Lotbestandteil eingesetzt. [64]

Diese Aufstellung macht deutlich, dass gerade im Hinblick auf den Schmelzpunkt und dadurch auch auf die notwendigen Verarbeitungstemperaturen eine Ersatzlegierung für die bisherigen Standardlote nicht verfügbar ist. Vor dem Hintergrund der thermischen Belastungen für Schaltungsträger und Bauteile ergeben sich deshalb neue Herausforderungen für die Prozessführung in der Nacharbeit. Aktuelle Berichte zeigen, dass die Legierung Zinn-Silber(-Kupfer) (Sn95,5Ag4Cu0,5 bzw. Sn96Ag4) weltweit das größte Interesse findet [46]. Zinn-Silber(-Kupfer) ist die Variante, die mit den Schmelztemperaturen 217°C bzw. 221°C dem altgedienten, aber umweltbelastenden Zinn-Blei-Lot noch am ähnlichsten kommt. Für Sonderanwendungen mit geringer thermischer Belastung kommt auch Zinn-Wismut (SnBi58; Schmelzpunkt 138°C) in Frage. Diese Legierung zeichnet sich gegenüber der Standardlegierung durch gute Lötstelleneigenschaften bei gleichzeitig deutlich niedrigerem Schmelzpunkt aus [131].

Eine moderne elektronische Baugruppe wird neben dem Lotmedium im Wesentlichen durch die eingesetzten Bauelemente in ihrer Technologie und Funktionsweise definiert. Dies gilt insbesondere für die Nacharbeit, bei der Verbindungsmedium und Bauteilgeometrie die Prozessführung nachhaltig beeinflussen. Die Bauelemente als elementare Funktionsträger jeder elektronischen Schaltung sind oftmals der auslösende Treiber für Miniaturisierung oder Funktionsintegration.

Dies kann beispielhaft an der Entwicklung bei zweipoligen Widerständen bzw. Kondensatoren veranschaulicht werden. Ein heute bereits in der Serienfertigung eingesetztes Bauelement des Typs 0201 besitzt Außenmaße von ca. $0,6 \times 0,3$ mm und hat damit nur $1/25$ der Fläche einer technologisch vergleichbaren 1206 Komponente. Daraus ergibt sich für die Anschlussflächen auf der Leiterplatte eine Fläche von ca. $0,3 \times 0,3$ mm. Ähnliche Dimensionen gelten für QFPs, die bei einem Raster von $0,4$ mm reproduzierbare Lotpastendepots im Größenbereich von $200 \mu\text{m}$ Anschlussbreite erfordern. Diese Geometrien sind im Prozess von den einzelnen Stationen einzuhalten bzw. innerhalb deren Toleranzen zu gewährleisten. Legt man diese Anschlussmaße zugrunde, gilt es beispielsweise für die Bauteilbestückung eine Platziergenauigkeit von $\pm 50 \mu\text{m}$, bei einer Prozessfähigkeit von mindestens $C_p=1,33$ (4σ) zu fordern [30]. Gleichwohl ist bei aktiven wie bei passiven Bauelementen ein Trend zur weiteren Miniaturisierung der Anschlussstrukturen zu beobachten, wodurch sich die Anforderungen an den Nacharbeitsprozess nochmals verstärken.

6.2 Gegenüberstellung von Prozessvarianten in der Nacharbeit

Wie bereits angedeutet, ergeben sich heute aufgrund bestehender Defizite sowie neuer Entwicklungstendenzen erweiterte Anforderungen an die Nacharbeit, die bisherige Systeme nicht mehr oder nur bedingt erfüllen können. Die heute verfügbaren Systeme sind folglich auf Ihre Konfiguration zu überprüfen. Im technologischen Grenzbereich unterschiedlicher Prozessstufen der Nacharbeit gilt es, die bisher noch kritischen Bereiche zu erkennen und durch ganzheitliche Strategien zu optimieren. Vergleichbar mit dem mehrstufigen Vorgehen der letzten Jahre zur Verbesserung der Anlagenqualität der Standardprozesskette (Pastenauftrag, Bestücken, Löten und Qualitätssicherung) sind heute verstärkt Anstrengungen zur Optimierung des Nacharbeitsprozesses zu unternehmen. Nur durch ein einheitlich hohes Qualitätsniveau, auch in der Nacharbeit, kann eine gesicherte Elektronikproduktion den zukünftigen Herausforderungen begegnen [38] [44].

Aus den zahlreichen Ansätzen zur Prozessbeherrschung in der Nacharbeit sind zwei Strategien mit entsprechendem Potenzial für die neuen Anwendungen zu differenzieren. Zunächst ist dies, die bereits in Grundzügen dargestellte Integration der Nacharbeit in den Fertigungsprozess. Ähnlich wie vor Jahren die optischen Inspektionssysteme in die Prozesskette eingegliedert wurden und heute oftmals direkt nach kritischen Prozessschritten eingreifen, muss auch die Nacharbeit hier ihren Platz einnehmen. So können Verfahren in der Nacharbeit vereinfacht und manche kritische Teilprozessschritte vor dem Hintergrund eines steigenden Kostendrucks in der Elektronikproduktion kompensiert werden. Die zweite Säule zur Verbesserung des Prozesses fußt in der Prozesskenntnis. Nur im Zusammenwirken von fähigen Systemlösungen mit dem ent-

sprechenden Prozesswissen (Möglichkeiten und Systemgrenzen) sind kritische von beherrschten Prozessen zu unterscheiden. Dabei gilt es, die noch weitgehend unbekannt Teilprozesse in der Nacharbeit zu analysieren und entsprechende Auswirkungen auf die Bauteilzuverlässigkeit zu ermitteln.

Bei den zwei Strategien ist jedoch vorzusehen, dass die Nacharbeit in ihrer komplexesten Form mit fünf Teilprozessen zu betrachten ist. Es ist daher entscheidend, auch bei Optimierung und Prozessbeurteilung das Gesamtsystem der Nacharbeit zu erfassen. Synergien hieraus können direkt in die technologischen sowie insbesondere wirtschaftlich sinnvollen Ansätze einer prozessketten-internen Nacharbeit einfließen.

6.2.1 Einteilung der Teilprozesse unter Zuverlässigkeitsgesichtspunkten

Die Nacharbeit ist ein Spiegel der Produktionsprozesskette der Massenfertigung. Neben den klassischen Prozessschritten Pastenauftrag, Bauteilbestückung sowie der Verbindungstechnik Reflowlöten sind diesen in der Nacharbeit zwei weitere Vorgänge vorgeschaltet. Zunächst wird durch einen Entlötvorgang die mechanische Verbindungsstelle zwischen Bauelementanschluss und Kontakt auf dem Schaltungsträger aufgeschmolzen. Das Lotmedium wird dabei über die Liquidustemperatur erwärmt und ausgehend von der starren Kontaktgeometrie zähflüssig. Durch den sich anschließenden zweiten Prozessschritt in der Nacharbeit, dem Abheben des Bauelements, ist eine Trennung der Kontaktstelle vollzogen. In Bild 64 sind die einzelnen Schritte mit entscheidenden Faktoren zusammengefasst.

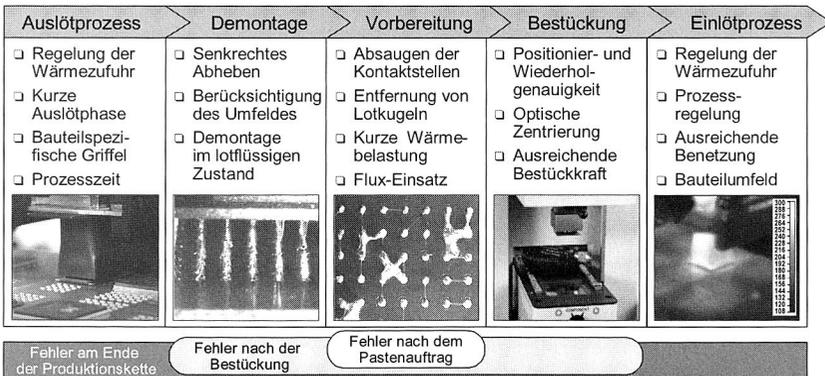


Bild 64: Darstellung der Prozessfolge in der Nacharbeit nach der Fertigungstiefe

Die Prozesse in der Nacharbeit lassen sich gemäß der letzten Abbildung in Vorgänge der Handhabung, des Lötens und der Mikrobearbeitung gliedern. Die Zuverlässigkeit

und Reproduzierbarkeit von Vorgängen der Handhabung, wie beispielsweise dem Platzieren von Bauelementen, sind stark durch den Automatisierungsgrad des Systems bestimmt. Je nach Komplexität der Bauelementegeometrie sind hier optische Hilfsmittel wie Auflichtmikroskope bis hin zu Kamerasystemen, zur automatischen Ausrichtung verfügbar. Die Handhabung kann demnach als beherrscht gelten und soll im Folgenden nur noch am Rande betrachtet werden.

Konträr erscheinen hier die Lötprozesse. Selbst bei heute verfügbaren, teilautomatisierten Systemen ist die Profilierung aufwendig und von vielen Randbedingungen abhängig. Im Unterschied zum standardmäßigen Reflowlöten in der Produktionskette mit speziell nur einem Profil für das jeweils zu verarbeitende Verbindungsmedium ist in der Nacharbeit die entscheidende Kenngröße das Bauelement [154] [161]. Dies bedeutet, mit dem Ziel einer qualitativ hochwertigen Nacharbeit, den Lötprozess für jedes Bauteil in Vorheiz-, zum Teil in Haltezone sowie in Peak- und Abkühlzone anzupassen. Wichtige Prozessbedingungen, wie maximale Temperaturen, Aufheizgradienten und die Verweildauer sind somit von der Erfahrung bzw. Intention des Bedieners abhängig [36]. Unter Qualitätsansprüchen ist damit jedoch kein reproduzierbarer Prozess zu gestalten [95]. Verstärkt wird dies zusätzlich durch die Anforderungen einer möglichst kurzen Prozesszeit in der Größenordnung von maximal zwei Minuten [96]. Der Reflowprozess der Serienproduktion ist im Gegensatz dazu auf fünf bis sieben Minuten ausgelegt [143].

Ebenso entscheidend für die Qualität in der Nacharbeit ist die oft unterschätzte Vorbereitung der Anschlussflächen auf den Schaltungsträgern [166]. Verschmutzung der Metallisierung durch Lot, Flussmittel bzw. Oxide ist als ausgesprochen kritisch zu beurteilen. Jedoch stellt die Entfernung der Reststoffe eine weitere Belastung der Baugruppe dar. Hier gilt es den Prozess in einer Weise zu führen, dass weder die Anschlussmetallisierung noch die Bauelemente im Umfeld beschädigt werden. Durch das zumeist manuelle Vorgehen in diesem Prozessschritt ist das Ziel einer verbesserten Prozessbeherrschung grundlegend zu überprüfen. Zusätzlich ist an den Anschlussstellen für die Neukontaktierung des Bauteils Verbindungsmedium aufzutragen. Die unterschiedlichen Möglichkeiten und bauteilspezifische Bewertungen der Verfahren werden im nächsten Kapitel detailliert betrachtet werden. Insgesamt sind diese Prozessstufen in Korrelation zur Technologie des eingesetzten Nacharbeitssystems zu setzen. So konnte aus Recherchen in [16] [92] [109] und eigenen Untersuchungen ein Bewertungsschema entwickelt werden, welches systembezogen auf potenzielle Fehler und Baugruppenschäden hinweist (vgl. Tabelle 8). Die Beurteilung basiert des Weiteren auf technologischen Grenzen der unterschiedlichen Systemausprägungen in der Nacharbeit.

		Auslöten	Bauteil abheben	Flächen vorbereiten	Neues Bauteil setzen	Einlöten
Systemausprägung	manuell	Schädigung der Baugruppe Prozessführung	Verschmutzung der Baugruppe Schädigung der Metallisierung	Zerstörung der Metallisierung Lotreste sowie Lotperlen	fehlerhafte Positionierung Keine Fine-Pitch Bauteile	Schlechte Kontaktausbildung Lunker, Lotperlen
	teilautomatisiert	Schwierige Profilierung Belastung der Baugruppe	Verschmierungen	Entfernung der alten Lotpaste Schädigung der Metallisierung	optische Grenzen	Offene Lötstellen Bedingte Reproduzierbarkeit
	hochautomatisiert	Profilentwicklung		Schädigung der Metallisierung		Herausforderung durch alternative Lote

Tabelle 8: Mögliche Baugruppenschäden und Anforderungen an den Lötprozess in der Nacharbeit (Gewichtung steigend von hell nach dunkel).

Neben den Prozessen und den Parametern ist die Bauteilgeometrie ein wesentliches qualitätsbestimmendes Kriterium. Faktoren wie Kontaktform, Anschlussgröße und Anzahl, Rasterabstand sowie Kontaktlegierung müssen ebenfalls in der Nacharbeit berücksichtigt werden.

Um eine möglichst breite Analysebasis zur Untersuchung und Optimierung der Nacharbeit zu schaffen, kamen in den durchgeführten Studien neben gängigen Bauteilen auch komplexe Kontaktierungsformen im Fine-Pitch Raster bis zu 400 µm zum Einsatz. Wie in Tabelle 9 auszugsweise zusammengestellt, wurden Bauteile mit aufschmelzenden Anschlusskontakten ebenso verarbeitet wie Bauteile mit festen Kontaktbeinchen bzw. zweipolige Bauelemente. Die Beinchenmetallisierung wurde bleifrei aus Zinn bzw. Kupfer gewählt bzw. bei Area Array Komponenten mit der Lotlegierung abgestimmt. Des Weiteren kamen bei den Untersuchungen Leiterplattenmetallisierungen in chemisch Zinn, chemisch Silber und Nickel-Gold zur Anwendung.

Bezeichnung	Pitch in µm	Anzahl der Anschlüsse	Größe Grundkörper
BGA169	1500	169	23,0 mm x 23,0 mm
CSP46 (µBGA46)	750	46	5,8 mm x 7,9 mm
SSOP 28	636	28	10,2 mm x 5,3 mm
QFP208	500	208	28 mm x 28 mm
TQFP144	500	144	20 mm x 20 mm
TQFP100	500	100	14 mm x 14 mm
TQFP120	400	120	14 mm x 14 mm
Widerstand CR0805	–	2	2,0 mm x 1,3 mm

Tabelle 9: Auswahl eingesetzter Bauteile mit technischen Kennzahlen [69] [84]

6.2.2 Vorbereitung der Anschlussflächen für den Einlötvorgang in der Nacharbeit

Der Lötprozess in der Nacharbeit und dabei speziell der Einlötprozess einer neuen Komponente belegt nachweislich die Herausforderung an eine Optimierung in der Nacharbeit. Trotzdem steht beim Einlötprozess die Güte der Kontaktausbildung im direkten Bezug zum vorgelagerten Prozess der Anschlussflächenvorbereitung [60].

Dabei kommen unterschiedliche Verfahrensvarianten zum Einsatz, die Kontaktstellen auf dem Schaltungsträger zu bearbeiten [54]. Diese Vorbereitung kann verfahrensspezifisch durch die Verteilung des Lotwerkstoffes aus der Serienproduktion über die Anschlusskontakte erfolgen [67]. Es werden dabei Lötstutzen eingesetzt, welche die festen Lotreservoirs aufschmelzen und so das Medium verteilen bzw. überschüssiges Lot abstreifen lassen. Die so neu ausgebildeten wieder festen Lotdepots bilden die Basis für den anschließenden Einlötprozess. Die andere Gruppe der Verfahren verfolgt eine konträre Ausrichtung. Das beim Bauteileauslöten auf dem Schaltungsträger zurückbleibende Lotmedium aus der Serienproduktion wird nicht für den Einlötprozess herangezogen. Es gilt dementsprechend, das Medium vom Schaltungsträger zu entfernen. Für die Kontaktherstellung kommt frische pastöse Lotpaste bzw. abhängig vom Bauteilkontakt nur Flussmittel zur Anwendung.

Die sich hiermit erschließenden, gängigen Varianten sind auf die Anforderungen einer zuverlässigen Lötverbindung zu spiegeln. Nachdem diese Varianten in gleicher Weise auf bleifreie wie auch auf bleihaltige Verbindungsmedien anwendbar sind, erfolgten die Untersuchungen im Wesentlichen mit alternativer Lotlegierung. Vor dem Hintergrund einer geänderten, zumeist höheren Verarbeitungstemperatur bleifreier Medien stellen sich hier erweiterte Forderungen an eine zuverlässige Prozessführung.

Hinsichtlich der Prozessgestaltung lassen sich grob sechs Alternativen unterscheiden, die unabhängig von der Baugruppe in der Praxis angewendet werden [67]. In der Gegenüberstellung der Varianten wird daher von einer optimierten Lötprofilierung für bleifreie bzw. bleihaltige Lote ausgegangen. Eine detaillierte Darstellung der Temperaturprofile ist in Kapitel 6.2.3 gegeben. Wird die Lotpaste aus der Serienproduktion entfernt, sind für den erneuten Auftrag folgende Techniken verfügbar:

1. Aufbringen von Lotpaste durch Minischablone.
2. Dippen der neu einzulötenden Komponenten in Lotpaste.
3. Aufbringen von Lotpaste im Dispensprozess (vgl. Kapitel 6.1).
4. Aufbringen von Flussmittel auf die Anschlussstellen des Schaltungsträgers ohne zusätzliches Kontaktierungsmedium.

Geht man hingegen vom Gebrauch bereits umgeschmolzener alter Lotpaste aus, lässt sich eine Unterscheidung nur durch das den Lötprozess unterstützende Flussmittel vollziehen.

5. Umsetzung des Einlötvorgangs ohne Zugabe von Flussmittel.
6. Umsetzung des Einlötvorgangs unter Einsatz von Flussmittel.

In der Verfahrensumsetzung der ersten Variante ist eine Minischablone durch Vorrichtungen auf dem Bauteilbereich der Leiterplatte zu fixieren (Bild 65). Die Schablone darf dabei nur geringfügig größer als der Bauteilbereich ausgeführt werden, um trotz der Bauteile im Nacharbeitsumfeld ein ebenes Aufliegen zu gewähren [36]. Prozesstechnisch ist das Verfahren stark von der Ausrichtung der Schablone und der manuellen Führung des Rakels abhängig. Respektable Ergebnisse sind folglich von der Erfahrung des Systembedieners abhängig. Wurde von einem befriedigenden Druckergebnis ausgegangen, so war für alle untersuchten Komponenten eine gute Lötstellenausbildung gemäß der durchgeführten Analyse zu erzielen. Deutliche Einschränkungen sind jedoch in der Umsetzung zu nennen. So waren in den Untersuchungsreihen Fehler, wie Brücken oder Lotperlen, bei den feinen Strukturen nicht völlig auszuschließen. Insgesamt betrachtet, bietet sich dieses Verfahren für Bauteile mit einer Anschlussstruktur über 600 µm an.

Beim zweiten, alternativen Verfahren wird die Lotpaste nicht auf die Kontaktstellen des Schaltungsträgers aufgebracht, sondern es werden vielmehr die Anschlussstrukturen der Bauelemente zum Auftrag von Verbindungsmedium genutzt. Dazu wird das Bauelement, wie in Bild 65 dargestellt, mit den Anschlussstellen in ein vorbereitetes Lotpastenreservoir getaucht (gedippt). Zur Analyse des Verfahrens wurden Pastenreservoirs in der Flächengröße 40 x 40 mm und den Varianten 200 µm, 300 µm und 500 µm der Formtiefe untersucht. Die Fläche ist durch die Größe der zu untersuchenden Bauelementegeometrien bestimmt. Durch die unterschiedlichen Formtiefen sollten verschieden große Mengen an Lotpaste auf die Kontaktstellen übertragen werden können. Dies ließ sich jedoch durch die durchgeführten Analysen nicht bestätigen. Das Bauteil wird sowieso unabhängig von der Lotreservoirtiefe immer nur ca. 50-100µm in die Paste eingedrückt. Die wesentliche Herausforderung zeigte sich hingegen im Pastentransfer auf die Anschlussstellen. Kann dies sichergestellt werden, sind die Lötergebnisse als befriedigend zu bewerten. Auch bei flächiger Haftung von Lot an den Anschlussstellen war jedoch die Lotpastenmenge unterschiedlich und oftmals zu gering. Bei der untersuchten CSP Komponente war durch die kleinen Benetzungsflächen kein Pastenübertrag zu erreichen, was eine deutliche Einschränkung des Verfahrens darstellt.

In weiterführenden Untersuchungen wurde der Ansatz verfolgt durch die Zugabe von Flussmittel eine Reduzierung der Viskosität der Lotreservoirs zu erreichen. Ein leichteres Eintauchen (Dippen) der Bauteilanschlüsse führt zu besseren Benetzungseigenschaften des pastösen Verbindungsmediums an den Kontaktstellen der Bauelemente. Dazu wurden unterschiedliche Mischungsverhältnisse untersucht, von denen vier auszugswise in Tabelle 10 aufgelistet sind. Wie die Tabelle zeigt, konnten für zwei Alternativen vergleichsweise gute Ergebnisse in der Lotübertragung erzielt werden. Beide Varianten sind zur Beurteilung der Langzeitzuverlässigkeit, mittels Temperatur-Schock-Lagerung belastet, weiter untersucht worden (vgl. Kapitel 6.3).

Var.	Lotpasten	Flussmittel	Anteil	Beurteilung
1	1190 mm ³	60 mm ³	5 %	wenig Lot
2	1157 mm ³	93 mm ³	8 %	sichere Benetzung mit Lot
3	1136 mm ³	114 mm ³	10 %	ausreichend Lot, gute Lötstelle
4	1087 mm ³	163 mm ³	15 %	hoher Lunkeranteil, flacher Meniskus

Tabelle 10: Untersuchte Mischungsverhältnisse – Lotpaste / Flussmittel

Der Auftrag von Lotpaste nach der Dispenstechnologie gilt als weitere Prozessalternative. Hier werden zumeist Handdispenser eingesetzt, um die notwendige Menge an Lot auf die Kontaktstellen zu platzieren. Erfahrungsgemäß ist jedoch beim Handdispensieren weder die nötige Positioniergenauigkeit noch ein gleichmäßiges Lotvolumen zu erreichen. Besser geeignet sind vollautomatische Systeme, die ebenso im Fertigungsprozess Einsatz finden. Beispielsweise sei hier das Dispenssystem Cam/Alot 1818 der Fa. Cookson Electronics Equipment angeführt, welches in den Untersuchungsreihen herangezogen wurde. Das Verfahren ist zum Aufbringen einer ausreichenden Lotmenge auf die rechteckigen Anschlussflächen für Fine-Pitch Lead Frame Komponenten entsprechend zu modifizieren. Die Optimierung eröffnet drei Varianten, die jeweils in der Anzahl der Lotdepots pro Anschlussfläche zu unterscheiden sind. Bei der Umsetzung mit nur einem einzelnen Lotdepot ist durch die massige Ausführung mit Brückenbildung zu rechnen. Die Varianten mit zwei bzw. drei Lotdepots pro Anschluss gehen mit einem erheblichen Mehraufwand in der Prozessregelung einher. Zudem sind entsprechende Lotdepots im Durchmesser von 200 - 250 µm nur mit speziellen Lotpasten (dispensfähig; Typ 4 bzw. 5) reproduzierbar zu dispensieren. In der Lötstellenausbildung überzeugen beide Verfahren, während die Lotbrückenbildung bei der Variante mit zwei Lotdepots deutlich geringer ausfällt. Daneben ist dieses Verfahren schneller und damit auch wirtschaftlicher.

Für stark miniaturisierte Bauelemente mit aufschmelzenden Anschlusskontakten wie bei BGA, µBGA bzw. Flip Chips (FC) erfolgt die Nacharbeit zumeist ohne zusätzlichen

Verbindungswerkstoff. Vielmehr werden die Kontaktstellen auf der Leiterplatte mit Flussmittel benetzt und so die Grundlage zur Kontaktausbildung zwischen den Komponentenanschlüssen und der Leiterplatte geschaffen. So nachgearbeitete Baugruppen zeigen durchgehend eine gute Kontaktausformung, wobei die Bauteile etwas tiefer einschwimmen. Zu beachten ist jedoch, ein für den bleifreien Lötprozess geeignetes Flussmittel einzusetzen, welches durch seine zähe, harzhaltige Konsistenz die Fixierung der Bauteile unterstützt. Ebenso muss das Flussmittel möglichst fein in ausreichender Menge über die Anschlussflächen verteilt werden. Zuviel Flussmittel kann die Ausbildung intermetallischer Phasen hemmen und so die mechanische Festigkeit der Verbindung einschränken.

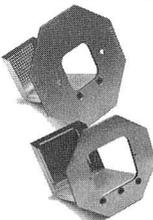
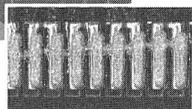
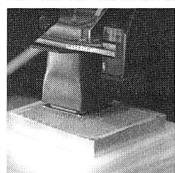
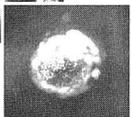
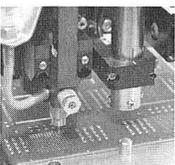
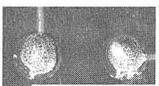
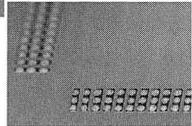
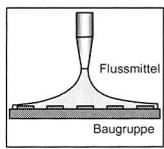
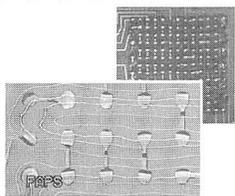
<p>Einsatz einer Minischablone</p>    <ul style="list-style-type: none"> + Positionierung + Lotdepotform - Ebene Schablonenauflage - Pitchabstand > 600 µm 	<p>Eintauchen der Bauteile (Dippen)</p>    <ul style="list-style-type: none"> + Unabhängig von der Baugruppenintegration + Handhabung - Lotübertrag - Gleichmäßigkeit - Grenzen bei Area Arrays
<p>Dispenspastenauftrag (automatisiert)</p>    <ul style="list-style-type: none"> + Beste Positionierung + Reproduzierbarkeit + Bauteilspektrum - Regelaufwand - Systemintegration 	<p>Auftrag von Flussmittel (keine Lotpaste)</p>   <ul style="list-style-type: none"> + Positionsunabhängig + Handhabung - Mengenkonzanz - spezielles Flussmittel - Nur für Area Arrays

Bild 65: Gegenüberstellung der Verfahrensvarianten zur Anschlussflächenvorbereitung nach Entfernung des Verbindungsmediums der Serienproduktion

In einer Zwischenbewertung der zuletzt dargestellten Verfahren zeigt sich bereits ein deutliches Optimierungspotenzial, speziell bei der Verarbeitung von Fine-Pitch Komponenten mit starren, nicht aufschmelzenden Anschlusskontakten. Um hier die Nacharbeit seitens der Anschlussflächenvorbereitung zu verbessern, sind neuartige Systemlösungen erforderlich. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen konnte ein alternativer Ansatz konzipiert werden.

Bei der hier vorgeschlagenen Systemlösung wird das Verbindungsmedium nicht wie gewöhnlich auf den Schaltungsträger aufgebracht, sondern wie beim Bauteildippen auf die Kontaktstellen des Bauteils aufgetragen. In der Umsetzung kommt wiederum eine Minischablone zur Anwendung, die im Vergleich zur Variante 1 eine bessere Zugänglichkeit ermöglicht und durch den größeren Prozessraum eine gleichmäßigere Rakelbewegung erlaubt. Des Weiteren ist dieses Verfahren von der Integrationsdichte des Schaltungsträgers unabhängig und erschließt somit eine deutlich verbesserte Anwendungsflexibilität.



Bild 66: Prototypischer Verfahrensaufbau

Wie in Bild 66 dargestellt, lässt sich das Verfahren in drei Stufen gliedern. Zunächst ist das Bauteil mit den Anschlussstrukturen nach oben in der Vorrichtung zu platzieren. Gummiringe an den Führungsstiften der Schablone gewähren einen gleichmäßigen Absprung der Schablone nach dem Druckvorgang. Die Schablone wird sodann auf das Bauteil aufgesetzt. Die Zentrierung der Schablone zu den Bauteilbeinchen erfolgt durch eine Feinjustierung im Mikroskop. Im dritten Schritt wird Lotpaste aufgebracht und durch eine Handrakel auf die Beinchenstrukturen übertragen. Durch ein alternierendes Rakeln über die Minischablone kann eine ausreichende, reproduzierbare Menge Lot auf die Beinchen aufgetragen werden (vgl. Bild 67). Beim Lösen der Schablone entspannen sich die bereits angesprochenen Gummiringe und heben dabei die Schablone gleichmäßig von den Beinchen ab.

Eine Verbesserung der Handhabung des Verfahrens erschließt die Weiterentwicklung mit zwei Schablonen. Nachdem sich die Feinjustierung der Schablonen zu den Bauteilanschlüssen als ein für manuelles Vorgehen kritischen Teilvorgang erwiesen hat, wurde eine zweite Schablone konzipiert, die zur Positionierung der Beinchen zu den Schablonenöffnungen der Druckschablonen dient. Vor der Platzierung der Druckschablone wird folglich die Justierschablone aufgebracht. Im Verhältnis zu den Anschlussflächen der Bauteilkontakte besitzt die Justierschablone um $25\ \mu\text{m}$ größere Öffnungen, was eine mechanische und damit einfache wie reproduzierbare Ausrichtung der Schablone zu den Bauteilkontakten gestattet. Einem ähnlichen Ansatz, die

Lotpaste direkt auf die Anschlusskontakte der Bauteile aufzutragen, folgt ein seit kurzem auf dem Markt verfügbares System [103]. Die dargestellte Entwicklung unterscheidet hierzu in der Erweiterung zur Schablonen-Bauteil-Ausrichtung und im Systemaufbau, der hier zusätzlich eine optische Kontrolle der Kontaktstellen erlaubt.

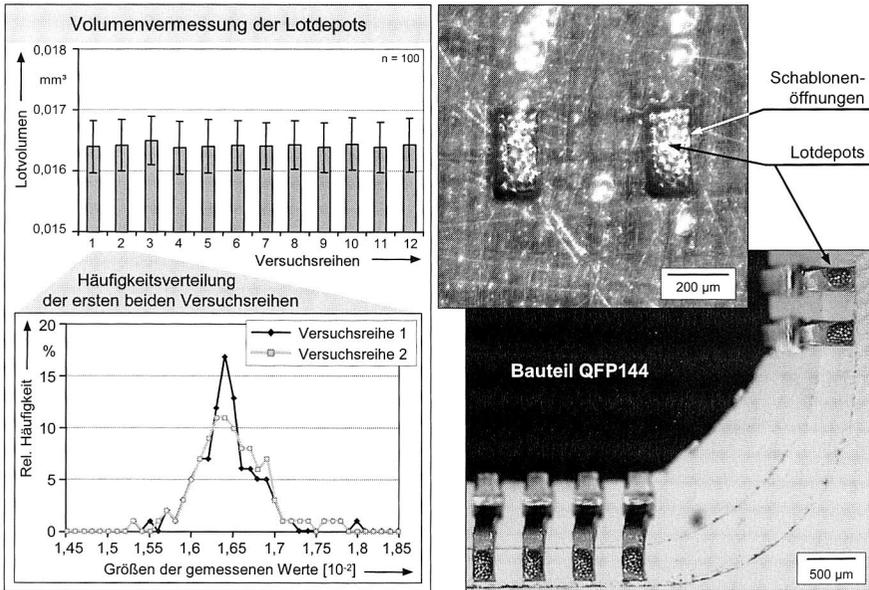


Bild 67: Bewertung der Lotdepos beim Pastenauftrag nach der neu entwickelten Verfahrensalternative

Wie in [139] angeführt, sind die wichtigsten Voraussetzungen für eine sichere Produktion stabile Prozesse. Dies gilt folglich auch für die Nacharbeit und speziell für neu entwickelte Systemlösungen. Bewegt sich eine signifikante Zielgröße des Prozesses stabil innerhalb ihrer Eingriffsgrenzen, spricht man von einem beherrschten Prozess. Die zu dieser Aussage führenden mathematischen Grundlagen sind in Kapitel 2.4 dargestellt und werden mit den Faktoren c_p bzw. c_{pk} charakterisiert. Ausgehend von den beiden in Bild 67 aufgezeichneten Versuchsreihen kann folgender statistischer Zusammenhang abgeleitet werden. Die Kenngrößen aus den Untersuchungen ergeben sich wie folgt.

- Toleranzgrenzen: Untere: $T_u = 0,0145 \text{ mm}^3$; Obere: $T_o = 0,0185 \text{ mm}^3$;
- Mittelwerte: Reihe 1: $\mu_1 = 0,01640 \text{ mm}^3$ Reihe 2: $\mu_2 = 0,01642 \text{ mm}^3$
- Standardabweichungen: Reihe 1: $\sigma_1 = 4,29 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3$ Reihe 2: $\sigma_2 = 4,27 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3$

Zum Nachweis der Prozessfähigkeit mussten in der Studie einige Annahmen getroffen werden. So kann, durch den Chi²-Anpassungstest bestätigt, von einer normalverteilten Stichprobe ausgegangen werden (vgl. Anhang C), deren Toleranzgrenzen aus den Untersuchungen zum Pastenauftrag übernommen wurden [59]. Des Weiteren wurde zur Volumenaufnahme das Messprinzip der Weißlichtinterferometrie herangezogen, welches nach [135] und [149] eine entsprechende Prozessfähigkeit besitzt. Obwohl die Studie über 2000 Lotdepots umfasste und die in 12 Versuchsreihen mit je 100 Messpunkten untersucht wurden, spricht man nach T. Pfeifer [124] von einer Kurzzeituntersuchung und bezeichnet die c_p - und c_{pk} -Werte mit p_p - und p_{pk} -Werte (vorläufige Prozessfähigkeit). Zur Bestätigung der Prozessfähigkeit ist in der Literatur der Schwellwert $c_{pk}=1,0$ angegeben [95], der in manchen Industriezweigen beispielsweise der Automobilindustrie auf 1,33 bzw. 1,66 erhöht vorgeschrieben ist [107] [126]. Prozesse, die einen Fähigkeitsindex über diesen Schwellwerten erreichen, sind als fähig zu bezeichnen [168]. Dies gilt, wie durch nachstehende Ergebnisse gezeigt werden konnte, auch für die entwickelte Prozessalternative zur Aufbereitung der Anschlussstellen in der Nacharbeit.

$$p_{p1} = \frac{T_o - T_u}{6 \cdot \sigma_1} = \frac{0,0185 - 0,0145}{6 \cdot 4,294 \cdot 10^{-4}} = 1,55 \quad (8.1)$$

$$p_{pk1} = \min\left(\frac{\mu_1 - T_u}{3 \cdot \sigma_1}, \frac{T_o - \mu_1}{3 \cdot \sigma_1}\right) = \frac{0,0163999 - 0,0145}{3 \cdot 4,294 \cdot 10^{-4}} = 1,48 \quad (9.1)$$

$$p_{p2} = \frac{T_o - T_u}{6 \cdot \sigma_2} = \frac{0,0185 - 0,0145}{6 \cdot 4,268 \cdot 10^{-4}} = 1,56 \quad (8.2)$$

$$p_{pk2} = \min\left(\frac{\mu_2 - T_u}{3 \cdot \sigma_2}, \frac{T_o - \mu_2}{3 \cdot \sigma_2}\right) = \frac{0,0164234 - 0,0145}{3 \cdot 4,268 \cdot 10^{-4}} = 1,50 \quad (9.2)$$

Bedingt durch die Beinchengeometrie steht jedoch im Vergleich zum Serienschablondruck beim entwickelten Verfahren eine geringere Menge an Verbindungsmedium für den Einlötprozess zu Verfügung. Ein zusätzlicher Auftrag von Flussmittel auf die Anschlusskontakte des Schaltungsträgers kann hierbei die Benetzung im Lötvorgang unterstützen. Das Flussmittel ist flächig, dünnsschichtig ohne Anforderung an die Positionierung auf die Anschlussflächen des Schaltungsträgers aufzubringen.

Die Geometrie der Durchbrüche in der Minischablone konnte durch umfangreiche Untersuchungen optimiert werden. Daraus ist grob eine Faustformel für die Technologieanwendung abzuleiten. Der Durchbruch soll in der Breite ca. 90 % der Beinchenbreite und ca. 120 % der planaren, anschlussseitigen Beinchenlänge umfassen. Die sich so in der Nacharbeit ausbildenden Lötstellen zeigten in der optischen Analyse eine gute Benetzung von Beinchen und Leiterplattenanschlussfläche. Ferner ist für nachgearbei-

tete Gull Wing Verbindungsstellen eine gute wie auch reproduzierbare Meniskusausbildung belegbar. Typische Fehler wie Lotbrücken oder Lunker sind nur selten festzustellen.

Ein erweiterter Verfahrensvergleich der alternativen Techniken zur Anschlussvorbereitung in der Nacharbeit kann nur im Zusammenhang mit dem Lötprozess erfolgen. Danach eröffnen Untersuchungen wie Scherkraftmessungen der mechanischen Festigkeit und metallografische Schliffanalysen weitere Kennzahlen, die eine qualitative Gegenüberstellung gestatten.

Die Zuverlässigkeit einer Baugruppe wird neben mechanischer Festigkeit und Gefügestruktur der Kontaktstellen auch durch die Haftfestigkeit der Anschlussmetallisierung auf dem Leiterplattensubstrat charakterisiert. Um eine vielleicht schädigende Beeinflussung der Anschlussflächen auf der Leiterplatte auszuschließen, erfolgt so manche Nacharbeit unter Beibehaltung des alten Lotmediums (bez. Altlot) aus der Serienproduktion. Diese bereits zweimal umgeschmolzenen Lotdepots beinhalten nur minimale Reste an Flussmittel und auch das Volumen kann von Anschlussfläche zu Anschlussfläche stark variieren [170]. So ist auch hier ein gewisser Aufwand notwendig, um die Lotdepots für den erneuten Einlötprozess eines Bauteils vorzubereiten. In der Untersuchung wurde zwischen den Nacharbeitsoptionen, Verwendung umgeschmolzenen Lotes mit bzw. ohne zusätzliches Flussmittel unterschieden (vgl. Bild 68).

Ohne zusätzliches Flussmittel ist der Einsatz des alten Lotes wie aus theoretischer Überlegung bereits zu klären ist, als nicht sinnvoll zu bezeichnen. Es ist prozesstechnisch schwierig das Bauteil während der Einlötphase an der korrekten Position zu fixieren und gleichzeitig ein Einsinken des Bauteils zu ermöglichen. Durch die Fixierung wird zudem der für die Nacharbeit wichtige Selbstzentriereffekt unterbunden, wodurch sich erhöhte Anforderungen an die Platziergenauigkeit der Bauelemente ergeben. In der Bewertung der Kontaktstellen zeigen sich ebenfalls deutliche Verfahrensnachteile.

Der Einsatz von Flussmittel zur Lötunterstützung bei Verwendung von Altlot erwies sich im Vergleich als die bessere Strategie. Durch entsprechend harzhaltige Flussmittel soll sogar die Fixierung entfallen können. Dies konnte jedoch durch die Testreihen nicht belegt werden. In der Kontaktausbildung ist der optische Eindruck gut, was durch Röntgenanalysen und durchgeführte Festigkeitsuntersuchungen der Kontaktstellen nachgewiesen werden konnte. Zu beachten ist wiederum die Menge des Flussmittels. Zu viel Flussmittel kann zum Aufschwimmen des Bauteils oder auch zu Lotklau führen. Diese Fehler und eine gewisse Lotperlenanteile müssen bei dieser Variante toleriert werden [36]. Durch die einfache Handhabung und respektable Lötstellen überzeugt dieses Verfahren speziell bei Bauteilen mit lötbeständigen Anschlussstrukturen.

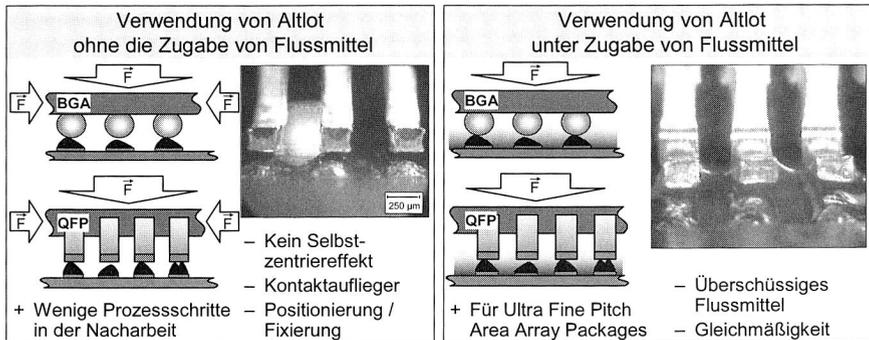


Bild 68: Verfahrensalternativen beim Einsatz des Lotmediums der Serienproduktion

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aus den dargestellten Alternativen keine allgemein gültige Empfehlung abgeleitet werden kann. Vielmehr wird der Bezug auf eine bauteilspezifische Anwendung deutlich. Es gilt folglich, weitere Kriterien zu überprüfen und auftretende Fehler in ihrer Häufigkeit zu bewerten. Basierend auf den Erfahrungen aus der Baugruppennacharbeit wurden die vorgestellten Verfahren in ihrem Einsatz nach Komplexität, Wiederholbarkeit und Flexibilität bewertet und damit besser vergleichbar. (Tabelle 11). Ebenso wurden zur Beurteilung der Verbindungsqualität nachgearbeiteter Kontaktstellen qualitativ optische Klassifikationen und quantitative Analysen durchgeführt.

Werkzeug		Schablone Leiterplatte	Dippen Bauteil	Dispensen Leiterplatte	Schablone Bauteil	Flussmittelauftrag		
Ort						Leiterplatte	Beibehalten des Alllots	
n=50		Entfernung des Alllots						
QFP 208	Einsatz	4	3	2	2		2	
	Optik	3	4	2	2		3	
TQFP 100	Einsatz	4	3	2	2		2	
	Optik	4	4	2	3		3	
TQFP 144	Einsatz	4	3	3	2		3	
	Optik	4	5	2	3		3	
TQFP 120	Einsatz	5	4	3	3		4	
	Optik	5	5	3	3		5	
SSOP 28	Einsatz	3	3	2	2		1	
	Optik	2	3	2	2		2	
BGA 169	Einsatz	3	3	2	2	1	2	
	Optik	2	3	1	2	2	3	
CSP46 (µBGA)	Einsatz	5	4	3	3	1	3	
	Optik	4	5	2	3	3	5	

Tabelle 11: Kennwerte der Verfahrensvarianten ermittelt nach Anhang E; Qualitative Bewertung aufsteigend von 1 nach 5 (Notenprinzip)

Die Kennwerte aus Tabelle 11 folgen, wie in Anhang E dargestellt, einer Bewertungsmatrix über vier Personen, welche die Prozesse durchgeführt und danach anhand unterschiedlicher Kriterien beurteilt haben. Die optische Bewertung der nachgearbeiteten Lötstellen setzt zweifelsohne die Notwendigkeit eines Einlötprozesses nach der Flächenvorbereitung voraus. Hier wird von einem optimierten Lötprozess ausgegangen, der den Grundsätzen zur Profileinstellung aus Kapitel 6.2.3 folgt. Zur Einteilung der Kontaktstellen nach optischen Kriterien wird die IPC-A-610C [68] herangezogen, die durch Grenz Betrachtung von Lötkontakten eine Gegenüberstellung erlaubt.

Die sich aus der letzten Tabelle ergebende Tendenz gilt es nunmehr durch weitere quantitative Messwerte zu bestätigen. Dazu wurden unterschiedliche Fehlertypen aufgenommen und bei Lead-Frame Komponenten durch zerstörende Prüfungen die mechanische Festigkeit der Kontaktstellen gemessen.

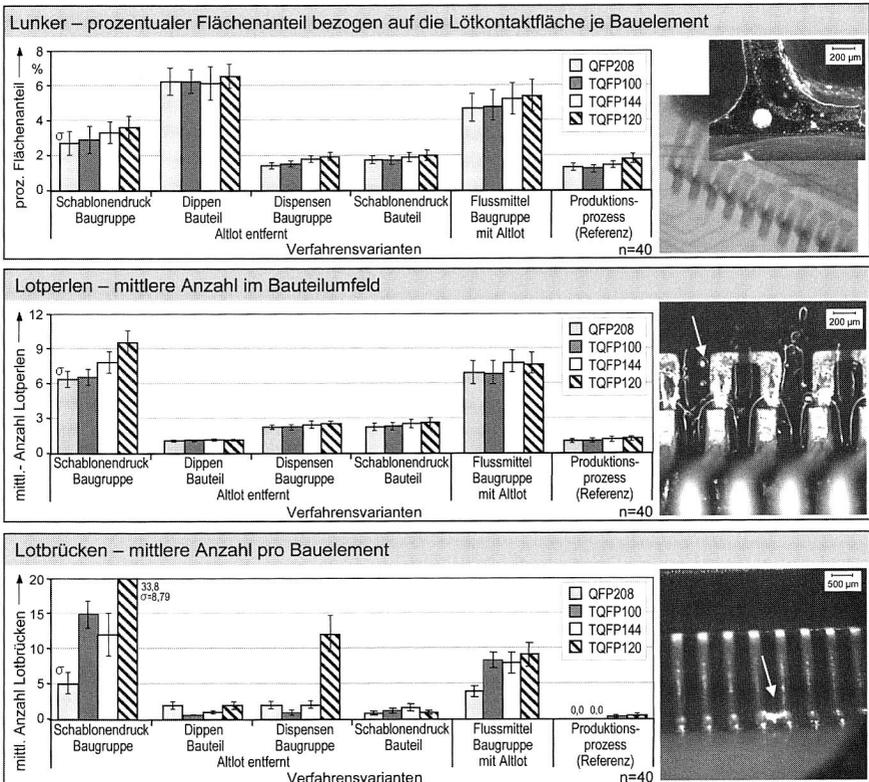


Bild 69: Aufgenommene Fehler je Verfahren bei Lead-Frame Komponenten

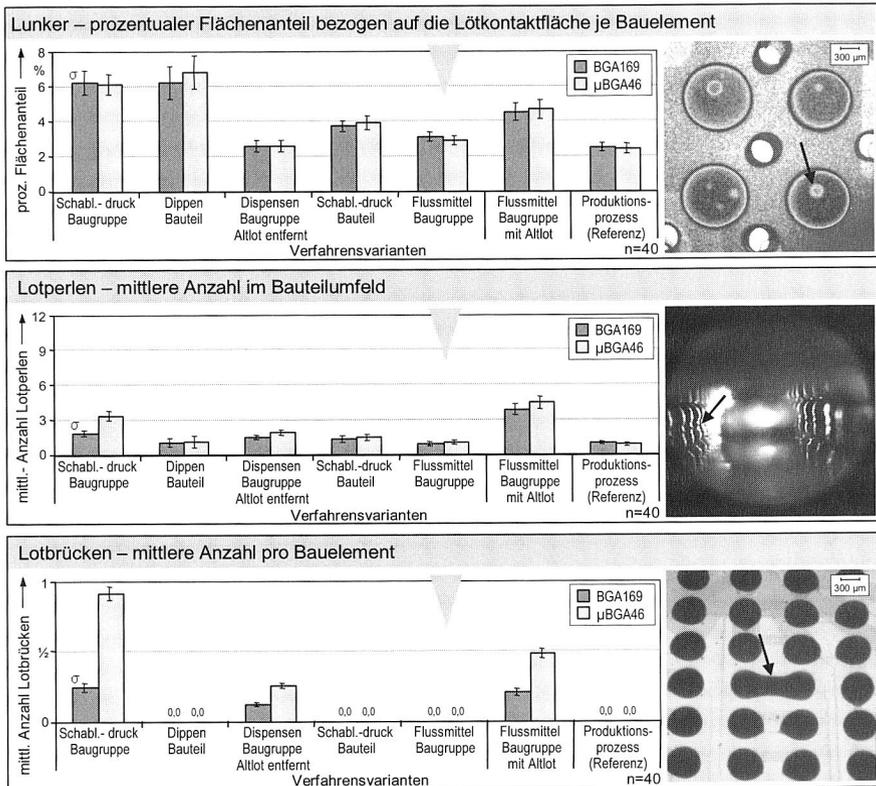


Bild 70: Aufgenommene Fehler je Verfahren bei der Nacharbeit von Area Array Packages

Nachdem eine direkte Gegenüberstellung aller Kennwerte aus Bild 69 und Bild 70 schwer zu interpretieren ist, wurden die Ergebnisse verfahrensspezifisch bewertet. Betrachtet man zunächst die Fehlerverteilungen der Verfahren in Korrelation zum Produktionsprozess, so ist hier folgendes Verhalten festzustellen. Bei allen durchgeführten Untersuchungen konnte in der Nacharbeit das Qualitätsniveau der Serienproduktion, gemessen an der Fehlerzahl, nicht erreicht werden. Diese Tendenz verstärkte sich bei weiter miniaturisierten Bauteilen, für deren Nacharbeit so manche Verfahren als absolut ungeeignet zu betrachten sind. Dies zeigt wiederum die Notwendigkeit, die Prozesse in der Nacharbeit der Oberflächenmontage transparenter zu machen, um beherrschte stabile Prozesse zu etablieren. Die Prozessoptimierung erfordert zunächst die Vorgabe von Empfehlungen, welche Verfahren sinnvoll einzusetzen sind.

Die wohl auffälligste Verfahrensvariante liegt im Einsatz einer Minischablone zum Pastenauftrag auf einen Schaltungsträger. Durch ein aufwendiges Prozesshandling und den zumeist hohen Fehleranteil lassen sich die potenziellen Möglichkeiten dieses Verfahrens in den durchgeführten Studien nicht belegen. Werden zusätzlich die Einschränkungen bei erhöhten Packungsdichten der Baugruppen angeführt, kann dieses, begrenzt in der Praxis eingesetzte Verfahren, in der aktuellen technologischen Ausprägung als nicht empfehlenswert bezeichnet werden. Diese Aussage hängt stark vom eingesetzten Bauelementespektrum ab, konnte aber über alle Bauteilgeometrien der Studien bestätigt werden.

Die weiteren Ergebnisse der Analysen zur Anschlussstellenvorbereitung lassen sich nach Bauelementen mit aufschmelzenden und starren Anschlusskontakt gliedern. Speziell in der Anschlussflächenvorbereitung der Nacharbeit von Area Array Komponenten mit Kontaktballs (Softballs), die eine annähernd gleiche Liquidustemperatur wie das Lotmedium besitzen, sollte auf das Einbringen von Lotpaste verzichtet werden. Vielmehr ist, so die Ergebnisse, die alleinige Verwendung von Flussmittel zu empfehlen. Durch das positionstolerante Aufbringen des Flussmittels gilt dies unabhängig vom Pitchabstand.

Für Lead-Frame Bauelemente mit im Lötprozess starren Kontaktbeinchen ist eine Empfehlung deutlich schwieriger. Die getesteten klassischen Verfahrensvarianten kommen den Ansprüchen an Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit nur bedingt nach. Dies gilt insbesondere für den Fine-Pitch Bereich. Bessere Ergebnisse können gemäß der Untersuchung nur beim automatisierten Dispenspastenauftrag erzielt werden. Diese zusätzliche Maschine, die technologisch eher in den Produktionsprozess zu gliedern ist, kommt besonders aus wirtschaftlichen Gründen selten für die Nacharbeit in Frage. Umso deutlicher wird das Potenzial der entwickelten Verfahrensalternative, die in Kontaktstellenausbildung, Prozessfehlern, Zuverlässigkeit wie Reproduzierbarkeit und der erreichbaren mechanischen Festigkeit überzeugt.

Eben diese mechanische Kontaktfestigkeit blieb in den bisherigen Analysen der Verfahrensalternativen unberücksichtigt. Ursächlich verantwortlich hierfür ist die Messbarkeit der Kontaktfestigkeit, die nur für zweipolige Bauteile durch Scherkraftmessungen in Normschriften beschrieben ist. Zur Prüfung komplexerer Bauteilformen wie Lead-Frame Komponenten müssen alternative Strategien verfolgt werden. In der Literatur sind hier unterschiedliche Konzepte zu finden, die aber ausgehend vom gesamten Bauelement zumeist eine aufwendige Prüfvorbereitung erfordern [86]. So wird beispielhaft empfohlen, die Kontaktfestigkeit dieser Anschlussstrukturen durch den Schältest zu erfassen [143]. Die Schäluntersuchung erfolgt durch eine Zugprüfmaschine. Der Versuch ist vergleichbar mit der Qualifizierung der Haftfestigkeit von Leiterbahnen

auf unterschiedlichen Substraten. Zur Vorbereitung ist es jedoch notwendig den Bauelementkörper von den Schlussbeinchen zu trennen. Hierin besteht auch die Schwierigkeit des Verfahrensansatzes, da die Zerteilung des Bauelements eine Schädigung der Kontaktstruktur verursachen kann. Ebenso ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durch die Probenvorbereitung eingeschränkt.

In Rahmen der Studien wird ein alternatives Verfahren ohne Probenvorbereitung eingesetzt. Das Verfahren folgt dem Prinzip der mechanischen Prüfung von Bonddrähten und wird ebenfalls durch eine Zugprüfung umgesetzt. Grundlage hierfür bildet eine Studie der japanischen Firma ESPEC Corp. zum Thema Zuverlässigkeit von bleifreien Lötverbindungen [156]. Die Messung der relativen Festigkeit von Lötkontakten bei Lead-Frame Komponenten erfordert, wie auch in [143] beschrieben, einen speziellen Prüfaufbau, der eine Zugkraftwirkung auf das Bauteilbeinchen im 45° Winkel einräumt. Durch die Anordnung im 45° Winkel wirkt, nach Aussage beider Berichte, die Kraft direkt auf die Kontaktfläche. So kann die Kontaktfestigkeit annähernd einflussfrei ermittelt werden. Eine Verformung der Bauteilbeinchen gilt bei diesem Konzept als unerheblich, was sich auch in den durchgeführten Messreihen zeigte. Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren liegt vielmehr im Abzug der Anschlussmetallisierung auf dem Schaltungsträger, was verfahrenstechnisch nicht völlig auszuschließen ist. Folglich muss jeder Kontakt nach dem Zug-/Schältest nochmals optisch geprüft werden, ob die Metallisierung beschädigt ist.

Neben dem Aufbau eines Grundträgers, der die Baugruppen im 45° Winkel fixiert, erfordert das Prüfkonzept einen Zughaken. Dieser ist speziell für die Anwendung ausgelegt, um ohne Beeinflussung der Beinchen in den Zwischenraum der Anschlussstruktur eingeführt werden zu können. Bei einem Rastermaß von $400\ \mu\text{m}$ soll der Haken folglich nur eine Breite von $150\ \mu\text{m}$ aufweisen, er muss jedoch seitens der Festigkeit eine Kraft von bis zu $15\ \text{N}$ formstabil übertragen können. Dazu wurde an der Zugprüfmaschine eine $20\ \text{N}$ Kraftmessdose angebracht und diese mit diesem Haken verbunden. Zur Unterstützung des Einführvorgangs des Hakens wurde im Systemaufbau noch ein Mikroskopaufsatz integriert. Um die Beinchen einzeln abzuziehen, ist die aufgespannte Baugruppe über einen Mikro-Koordinatenmesstisch fein justierbar. Dadurch können sehr genaue Positionseinstellungen vorgenommen werden.

Wie in Bild 71 dargestellt, liegen die Messwerte der Lead-Frame Bauteile QFP100, QFP144 und QFP208 für alle untersuchten Verfahrensvarianten auf annähernd gleichem Niveau. Dies lässt sich durch die annähernd gleichen Kontaktgeometrien der Bauteilanschlüsse begründen [84]. Vergleicht man wiederum die als Referenz aufgenommenen Zugkraftwerte mit den Kontaktstellen aus der Serienproduktion, so sind nur bei zwei Verfahren ähnliche Werte zu erreichen.

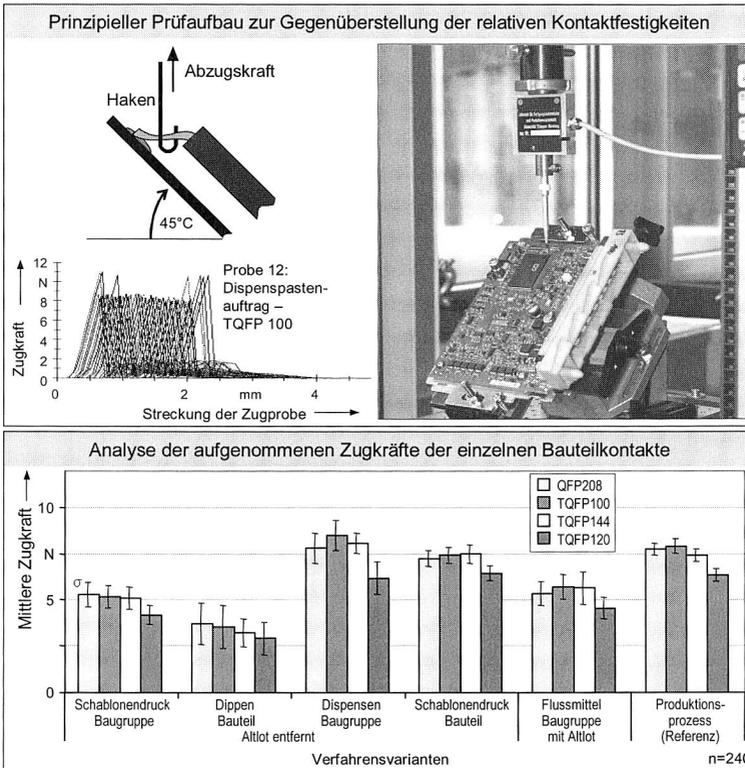


Bild 71: Analyse der mechanischen Festigkeit durch Zugkraftprüfung

In der Gegenüberstellung der Messwerte aus der obigen Abbildung mit den bisherigen Auswertungen kann eine Empfehlung zu Gunsten der Verfahrensvariante 5 getroffen werden. Lässt man die Dispenstechnik und auch das neu entwickelte Verfahren (Pastenauftrag auf die Bauteilseite durch Mini-Schablone) außer Acht, sind bei dieser mit Lotmedium aus der Serienproduktion und zusätzlichem Flussmittel arbeitenden Variante gute Festigkeitswerte zu ermitteln.

Die Untersuchungen wurden jeweils mit und ohne Stickstoffeinsatz im Lötprozess durchgeführt. Vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen Bewertung zeigte der Stickstoffeinsatz eine positive Grundtendenz. Demzufolge beziehen sich die dargestellten Auswertungen jeweils auf die Nacharbeit mit Stickstoff. Eine Bewertung des Stickstoffeinsatzes folgt im Kapitel 6.2.4. Der Einsatz von Stickstoff ist jedoch nur zu empfehlen, wenn technologisch eine entsprechende Flutung der Nacharbeitsstelle zu erreichen ist.

6.2.3 Temperaturprofilierung im Lötprozess der Nacharbeit

Jeder Prozess wird durch die ihn beeinflussenden Parameter bestimmt. Gleiches gilt auch für den Lötprozess in der Nacharbeit. Technologisch können in diesem vier signifikante Prozessparameter unterschieden werden, die je nach Bauteilgeometrie einzustellen sind. Diese sind in der Nacharbeit mit Heißgas, die Temperaturen für Ober- und Unterhitze, die Stärke der Luftströme und die Zeitdauer der Wärmeeinwirkung. [93]

Durch den kommenden Einsatz alternativer Verbindungsmedien mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen ergeben sich neuartige Herausforderungen an die Nacharbeit. Je nach Schmelztemperatur muss ein passendes Lötprofil eingestellt werden. Technologisch werden die bleifreien Pasten durch die unterschiedlichen Schmelzpunkte charakterisiert, wodurch die Einstellungsvorgaben für nahezu alle Bauteile neu bestimmt werden müssen. Um das Qualitätsniveau und die vorhandenen Randbedingungen im Prozess der Nacharbeit bestimmen zu können, ist es zunächst notwendig den bisherigen Prozess zu analysieren und die Auswirkungen auf Bauteile, Verbindungen und Baugruppen zu beschreiben. Diese Untersuchungen bilden die Grundlagen zur Ermittlung der Prozesseinstellungen für bleifreie Lotwerkstoffe.

Um eine Prozessanalyse der Nacharbeit durchführen zu können, ist es notwendig, ein für diesen Anwendungsfall optimiertes Leiterplattenlayout zu entwickeln. Wichtig ist es hierbei, gebräuchliche sowie technologisch anspruchsvolle Bauteile auf der Platine zu integrieren und gleichzeitig die zumeist hohe Packungsdichte entsprechend mit zweipoligen Bauteilen zu simulieren. In den grundlagenorientierten Studien kamen die drei Bauelemente BGA169, CSP46, QFP208 aus Tabelle 11 zur Anwendung. Zur Bewertung des Lötergebnisses der Erstproduktion wurden auf der Testleiterplatte ebenfalls Bereiche für Benetzungs- und Aufschmelztests integriert (vgl. Bild 72).

Ein besonderes Interesse gilt dabei den Area Array Komponenten wie Ball Grid Array (BGA) und Chip Size Package (CSP). Hier sind, wie bereits aus dem Reflowlötprozess der direkten Wertschöpfungskette bekannt, besondere Anforderungen an eine homogene Temperaturverteilung unter dem Bauteil zu stellen [105]. Im Lötprozess muss der sogenannte „Doppel-Drop“ Effekt für alle aufschmelzenden Kontaktierungsstellen (Area Array Balls) nahezu gleichzeitig erfolgen. Unter dem „Doppel-Drop“ Effekt wird in der Baugruppenfertigung ein zweistufiges Einsinken und Zentrieren der Komponenten verstanden. Dies ist im Wesentlichen bei Area Array Komponenten mit Soft Balls zu beobachten. Nur durch das zweistufige Einsinken der Komponenten kommt eine zuverlässige Verbindungsausformung zustande [14]. Für den Nacharbeitsprozess gilt dies in gleicher Weise. Durch den selektiven Charakter des Verfahrens muss jedoch die Prozessregelung den erhöhten Forderungen nach einer homogenen Temperatur-

verteilung folgen. Eine mangelnde Prozessbeherrschung der Nacharbeit kann hier zu einer Vielzahl an Verbindungsfehlern führen.

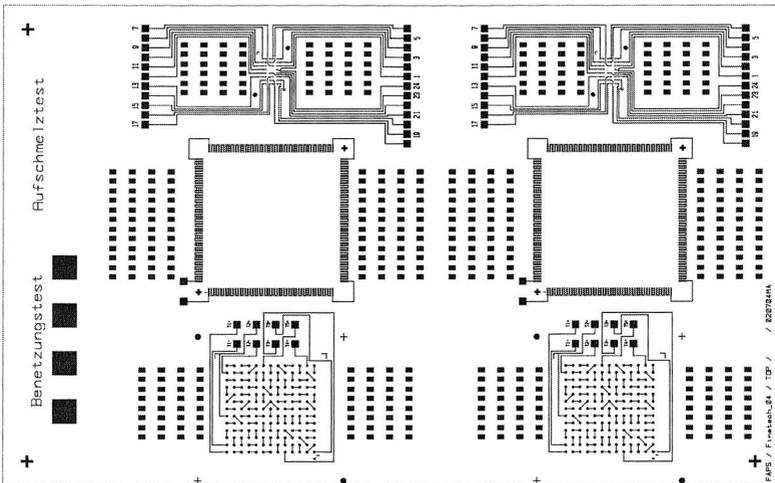


Bild 72: Eingesetztes Testlayout zur Analyse des Lötprozesses in der Nacharbeit

Die zweipoligen Chip Widerstände vom Typ 0805 wurden zur Analyse von Einflüssen des Nacharbeitsprozesses auf benachbarte Bauteile in Reihen neben das zu reparierende Bauelement platziert. Der Abstand in jeder Reihe beträgt 3 mm, so konnte eine Analyse im 1,5 mm Raster erfolgen. Dies ist insbesondere beim Einsatz bleifreier höherschmelzender Verbindungsmedien wichtig, da durch eine Liquidustemperatur von 217°C oder höher mehr Wärmeenergie eingebracht werden muss. Hierdurch kann es zu einer höheren Beeinflussung von benachbarten Bauelementen kommen. Der Ein- und auch Auslötprozess sollte demnach so optimiert werden, dass die Erwärmung der restlichen Baugruppe nicht über dem der standardmäßigen Belastung bei bleihaltigen Lotwerkstoffen liegt.

Um eine qualitätsorientierte Einstellung der Parameter für den Nacharbeitsprozess bleifreier Verbindungsmedien zu ermitteln, wurden die Temperaturen auf der Baugruppe aufgenommen. Hierdurch konnte eine detaillierte Temperaturgrafik erstellt werden, die als Basis für die Wärmeverteilung bei bleifreien Medien herangezogen wurde. Hierfür kam das am Lehrstuhl FAPS zur Verfügung stehende Temperaturerfassungssystem Slim KIC-II zum Einsatz, welches über 12 frei fixierbare Sensoren zur Temperaturentnahme verfügt. Die Fühler wurden so auf der Leiterplatte platziert, dass der mittlere und äußere Bereich der Bauteillandefläche untersucht werden konnte. Weitere

Messpunkte lagen direkt an den Schlussstellen bei frei zugänglichen Bauteilkontakten. Die Erwärmung der gesamten Baugruppe konnte durch einen weiter entfernt liegenden Sensor erfasst werden.

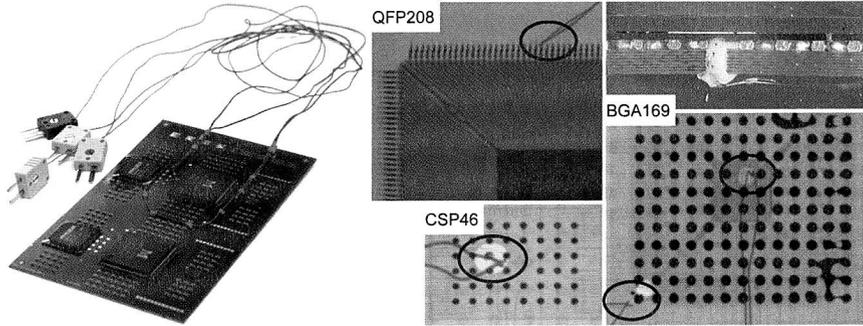


Bild 73: Beispielhafte Testbaugruppe mit integrierten Temperaturfühlern an den Bauteilen BGA, QFP und CSP

Analyse der Temperaturwirkung der Nacharbeit auf die gesamte Baugruppe

Um die unerwünschte thermische Beeinflussung im Umfeld des fehlerhaften Bauteils noch genauer analysieren zu können, wurden bei unterschiedlichen Parametereinstellungen die Oberflächentemperaturen mit einer Thermographie-Kamera aufgenommen. Diese Aufnahmen erlauben eine flächenspezifische Analyse der Temperaturbelastung im Umkreis des zu reparierenden Bauteils (Bild 74). Der von einer Nacharbeitswärmequelle austretende Wärmefluss (Heißluft und Infrarot) kann über die gesamte Prozesszeit verfolgt und so auch wärmebelastete Bereiche erkannt werden.

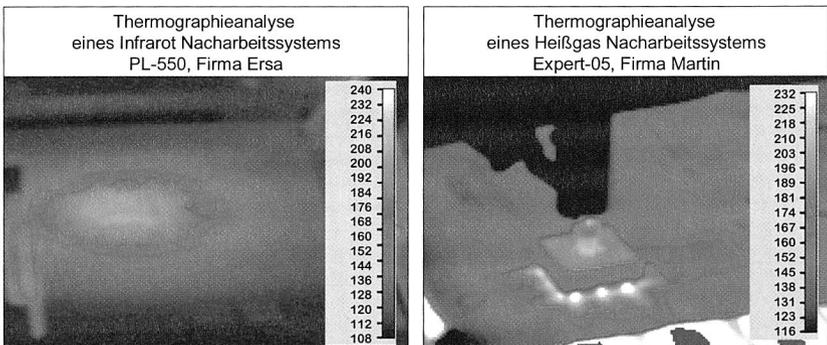


Bild 74: Thermographieaufnahme zur Qualifizierung des Temperatureinflusses auf das Bauteilumfeld

Wie in Bild 74 dargestellt, lassen sich durch die Aufnahmen Unterschiede, abhängig von der Wärmeeinbringung, nachweisen. Gleiches gilt für die Einflüsse durch die Parametervorgabe, sodass keine allgemein gültigen Grenzwerte aus den Untersuchungen abzuleiten sind. Es muss vielmehr abhängig vom Bauteiltyp und ausgehend von einem gebräuchlichen Nacharbeitslötprofil für diesen Bauteiltyp, eine Klassifikation durchgeführt werden.

Um den Einfluss der Wärmeübertragung durch Heißgas in der Nacharbeit detaillierter analysieren zu können, wurden die Kontaktfestigkeiten im Umfeld befindlicher zweipoliger Bauelemente durch Scherkraftmessungen aufgenommen. Der dazu entwickelte mit Bild 73 vergleichbare Testschaltungsträger trägt neben dem Bauelement CR0805 die weiteren Zweipole CR1206, CR0603 und CR0402 im Randbereich der Nacharbeitszonen. Die dabei zu erfassenden Scherkraftwerte sind in Bild 75, bezogen auf die Abstände zur Nacharbeitszone, aufgetragen. Bewertet man nur die Messwerte, so lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Reduzierung der mechanischen Festigkeit im Abstand von 3 mm zum Bauteilrand nachweisbar.
- Nur geringer Einfluss auf kleinere Bauteile (CR 0402).
- Effekt nur bis zu einem Randabstand von 9 mm messbar.

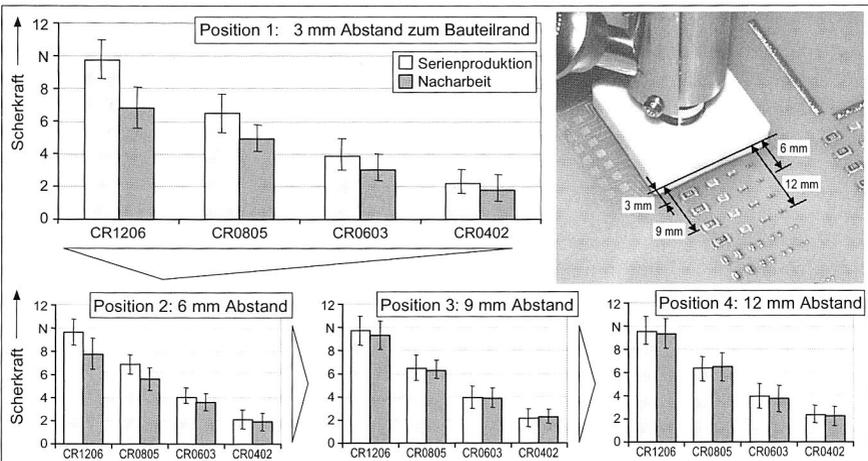


Bild 75: Veränderung der mechanischen Festigkeit durch den Nacharbeitsprozess

Wie Diskussionen mit Anwendern und Experten der Löttechnologie zeigten, lassen sich diese Effekte nicht allein durch die Erwärmung begründen [54] [60]. Mit ebenfalls

durchgeführten wiederholten Lötversuchen dieser Baugruppe in Konvektions-Reflow-Lötanlagen der Serienproduktion ließ sich die deutliche Scherkkraftreduzierung nicht bestätigen. Folglich müssen neben der Wärmeeinwirkung weitere Faktoren hierfür verantwortlich sein. Verfahrensbedingt kann dies beim untersuchten Heißgas-Nacharbeitssystem nur für den Luft- bzw. Gasstrom gelten, der aus dem Nacharbeitswerkzeug austritt und über die Baugruppe streicht.

Die Oberflächenanalysen der Baugruppe durch Weißlichtinterferometrie belegt ein infinitesimales Verkippen beim Bauelementtyp CR1206. Dieser in Bild 76 dargestellte Effekt wird erst nach dem Nacharbeitsprozess deutlich. Ob die Nacharbeit im Rahmen der Anschlussflächenvorbereitung bzw. den Lötvorgängen hierfür verantwortlich ist, konnte nicht zweifelsfrei geklärt werden. Das Verschieben respektive das Wegblasen von Bauteilen sind bereits seit Jahren bekannt und konnten auch in [60] nachgewiesen werden. Eine zu hohe Luftströmung im Temperaturbereich schmelzflüssiger Kontaktstellen ist hierfür verantwortlich, was wiederum die Notwendigkeit einer optimierten Prozessführung in der Nacharbeit unterstreicht.

Berücksichtigt man die Darstellungen der Herren Klein Wassink und Verguld [79], die einen Einfluss durch Wärmewirkung in der Nacharbeit auf die intermetallische Phasenausbildung bereits nachgewiesen haben, so lässt sich die Scherkkraftreduzierung zusammen mit der Bauteilverkipfung begründen. Der diesen Untersuchungen zugrunde liegende Einlötprozess wurde für bleihaltige und bleifreie Lotwerkstoffe optimiert und wurde bauteilspezifisch und systemabhängig mit einem mittleren Gasdurchfluss (10-15 l/min der Firma Martin; 20-25 l/min, Nacharbeitssystem der Firma Finetech) ausgeführt. Kleine Luftmengen können den dargestellten Effekt zwar mindern, eine homogene Temperaturverteilung wäre damit aber nicht zu erreichen. Entsprechend sind optimierte Werkzeuge mit Luftabführung zu empfehlen.

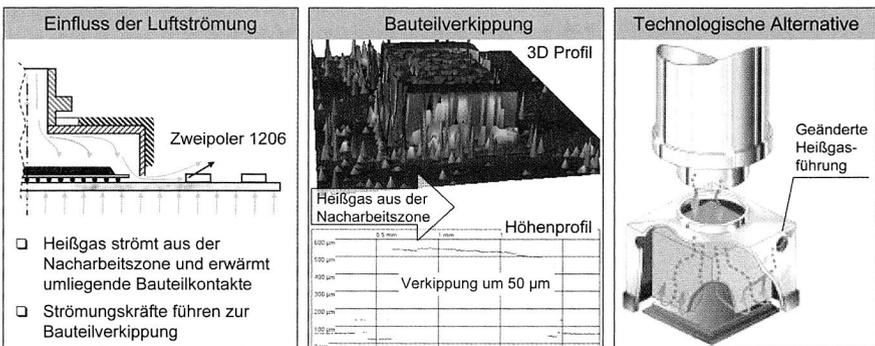


Bild 76: Konstruktion des Einflusses der Nacharbeit auf das Baugruppenumfeld

Verantwortlich für die Bauteilverkippung, wie in Bild 76 zu sehen, sind turbulente Strömungen, die aus der Nacharbeitszone über die Bauteile streichen und damit eine Krafteinleitung verursachen. Daneben führt das heiße Gas zur Aufheizung der Lötkontakte der zweipoligen Bauelemente im Randbereich. Nachdem diese Kontaktstellen zunächst auf der Seite der Nacharbeitszone aufschmelzen, kommt es im Kräftegleichgewicht zu einer Verschiebung (Strömungskraft \geq Kontaktkraft) und folglich zu einer Verkippung des Bauteils. Dieser Effekt wirkt, wie nachgewiesen werden konnte, an höheren Bauelementen deutlicher, da hier die Angriffsfläche für die Gasströmung vergleichsweise größer ist.

Wie bereits erwähnt, steht die Stärke der Gasströmung im direkten Bezug zur Beeinflussung des Nacharbeitsumfeldes. Die Strömungsintensität wiederum ergibt sich aus der Notwendigkeit einer homogenen Temperaturverteilung für jeden Bauteiltyp unterschiedlich. In Tabelle 12 sind einige Bauteiltypen beispielhaft mit den ermittelten Grenzwerten für den Randabstand zusammengefasst. Die Grenzwerteinteilung beruht auf optischen Bewertungen während des Einlötprozesses (Aufschmelzen der Lötverbindung am Zweipoler) und der nachfolgenden Analyse durch Scherkraftmessungen. Als Referenz wurden Scherkraftwerte nach 200 Zyklen Temperaturschocklagerung (-40 °C / +125 °C) herangezogen [161]. So wird der Abstand zur Nacharbeitszone als kritisch angesehen, wenn die ermittelten Scherkraftwerte der Zweipoler im Nacharbeitsumfeld unter den Werten gezykelter Bauteile liegen.

Heißgas Nacharbeitssysteme		Expert 05 (Fa. Martin)	Fineplacer (Fa. Finetech)
		Kritischer Randabstand	
BGA 169	Offener Heißgasgriffel (HGG)	< 3,0 mm	< 3,0 mm
	Geführter Heißgasgriffel	< 4,5 mm	< 3,0 mm
OSP 46	Offener Heißgasgriffel (HGG)	< 3,0 mm	kein Einfluss
	Geführter Heißgasgriffel	< 3,0 mm	–
QFP208:	Offener HGG	< 6,0 mm	< 4,5 mm
QFP256:	Offener HGG	< 7,5 mm	–
TQFP144:	Offener HGG	< 4,5 mm	< 3,0 mm
TQFP100:	Offener HGG	< 3,0 mm	< 3,0 mm
SSOP28:	Offener HGG	< 3,0 mm	< 3,0 mm

Tabelle 12: Kritische Grenzbereiche im Bauteilumfeld der Nacharbeit

Die in der Tabelle dargestellte Unterscheidung zwischen offenen und geführten Heißgasgriffeln bezieht sich auf die Kapselung der Nacharbeitszone. Speziell bei Area Array Komponenten kommen Heißgasgriffel zum Einsatz, die mit so genannten Schützen die Nacharbeitszone soweit möglich kapseln, um eine bessere Temperaturverteilung zu erreichen. Trotzdem sind bei diesen Werkzeugen Auslässe auf der Schaltungsträ-

gerebene vorhanden, aus denen das heiße Nacharbeitsgas über die Baugruppe strömt. Diese Auslässe sind an den drei hellen Punkten in Bild 74 zu erkennen.

Wenn nunmehr auch die Vermutung nahe liegt, die Bleifreiumstellung würde zu einer Verstärkung dieser Beeinflussung führen, muss diese relativiert werden. Durch den höheren Schmelzpunkt, der auch im Umfeld liegenden Kontaktstellen, führten die Untersuchungen zu vergleichbaren Grenzwerten.

Temperaturprofilierung für bleifreie Lotwerkstoffe

Wie in [133] detailliert beschrieben, weichen bleifreie Verbindungsmedien um bis zu 50 Kelvin in der Schmelztemperatur von den bisherigen, bleihaltigen Lotpasten ab. Das dadurch bedingte divergente Temperaturprofil im Lötprozess muss entsprechend dem eingesetzten alternativen Verbindungsmedium angepasst werden. Da ein Trend zum Einsatz von Zinn-Silber-Kupfer Paste (bei höherschmelzenden Pasten) zu beobachten ist, wurde auch in der vorliegenden Studie mit dieser Lotlegierung gearbeitet. Die Legierung besitzt einen Schmelzpunkt von 217°C und die verarbeiteten Medien hatten Korngrößen von 25-45 µm (Typ 3) und von 25-38 µm (Typ 4). Diese Pasten werden von nahezu allen Anbietern vertrieben und sind als druck- bzw. dispensfähige Paste erhältlich.

Stellt man die Lötprozesse in der Nacharbeit dem Konvektions-Reflowlötprozess aus der Serienproduktion gegenüber, lässt sich zunächst eine identische Zielsetzung in der Temperaturprofilierung feststellen [105]. Nachdem für den konventionellen Reflowlötprozess bereits umfangreiche Studien zur Prozessumstellung auf bleifreie Verbindungsmedien verfügbar sind [52] [133], gilt es deren Hinweise zum Lötprozess auch in der Nacharbeit zu nutzen [2]. So sollte der Temperaturgradient auf der Baugruppe in der Vorheizzone eine Steigung von 3 K/s nicht überschreiten [131]. Eine zu schnelle Aufheizung kann die Aktivierung des Verbindungsmediums behindern und so die Qualität der Verbindungskontakte einschränken. Gleiches gilt für die weitere Erwärmung der Baugruppe in der Peakzone. Hier ist der Temperaturgradient in einem Prozesskorridor zwischen 1,5 K/s bis 2,5 K/s zu halten [162]. Bezogen auf eine höhere Liquidustemperatur beim Einsatz bleifreier Medien gilt es ferner, in der Temperaturprofilierung nur kurzzeitig Bereiche über der allgemeinen Bauteilbelastungsgrenze von 250 °C zu erreichen [167] [170]. Schließlich ist es speziell in der bleifreien Nacharbeit durch die erhöhten Löttemperaturen erforderlich, auf die bereits angesprochene homogene Temperaturverteilung über alle Anschlussstellen zu achten.

Folglich besteht für eine zuverlässige Prozessbeherrschung die Notwendigkeit die unterschiedlichen Lötzonen auch regeln zu können [35]. Faktisch bedeutet dies, in den Bereichen Vorheizung, Aktivierungsphase, Peakzone und Kühlung den Prozess aktiv

steuern zu können. Zu diesem Zweck bietet die in der Studie analysierte Anlage Finelplacer der Firma Finetech eine dynamische Anpassung über frei wählbare Regelstufen an. Zur Veranschaulichung sind die regelbaren Stellgrößen nochmals in Tabelle 13 zusammengestellt.

Stufe	Oberheizung (OHZ)				Unterheizung (UHZ)	
	Temperaturrampe [K/s]	Gastemperatur [°C]	Plateauzeit [s]	Luftstrom [l/min]	Gastemperatur [°C]	Luftstrom [%]
1	1 – 10	90 – 380	0 – 300	10 – 70	90 – 360	20 – 100
2						
...						

Tabelle 13: Parametermatrix zur Einstellung des in den Studien eingesetzten Nacharbeitssystems

Das Potenzial durch Regelung einen gleichmäßigen und für die Baugruppe schonenden Lötprozess zu erreichen, erfordert aber auch vom Bediener mehr Prozessverständnis, um gegenseitige Wechselbeziehungen zwischen den Parametern richtig zu bewerten. Für die bisherigen Arbeiten mit bleihaltigem Lotmedium sind entsprechende Kenntnisse bei den Anwendern vorhanden. Bedingt durch größere Prozessfenster sind jedoch vergleichsweise geringe Anforderungen seitens einer zuverlässigen Prozessführung damit verbunden.

Folglich ist es zwingend erforderlich eine Wissensbasis zur Verarbeitung bleifreier Lotlegierungen zu schaffen, die auf grundlegenden Analysen gebräuchlicher Bauteilgeometrien fußt. Davon abzuleiten, können Grundregeln auf Wechselwirkungen im Prozess hinweisen und damit eine Optimierung der Stellgrößen einleiten. Die wohl größten Herausforderungen an eine Prozessoptimierung in der Nacharbeit stellen Area Array Komponenten [17]. Daher soll die Strategie zur bleifreien Lötprozesseinstellung auch beispielhaft an der BGA169 Komponente gezeigt werden.

Grundlage für die Profilloptimierung ist die klassische Temperaturprofilierung für eine Liquidustemperatur von 183 °C (bleihaltiges Lot). Diese liegt um 34 °C unter der Schmelztemperatur der eingesetzten alternativen Lotlegierung (Sn96,5Ag3Cu0,5). Daher gilt es, zunächst das Temperaturprofil zu erhöhen, ohne die Prozesszeit entsprechend zu verlängern. In Bild 77 sind diesbezüglich drei Temperaturprofile dargestellt, die zur Einstellung der bleifreien Nacharbeit bei der BGA169 Komponente aufgenommen wurden. Das erste Profil (Bild oben) wurde unter dem Fokus der Temperaturerhöhung konfiguriert und ist als Profil der Grundeinstellung zu verstehen. In dieser Grundeinstellung werden die Anforderungen an die Optimierung deutlich. Im Einzelnen sind dies, die Homogenität der Temperatur zwischen einem Anschlusspunkt am Bau-

teiltrand und der Bauteilmitte, der Temperaturgradient und die Zeit über der Schmelztemperatur. Im Vergleich der Profile 1 und 2 wird deutlich, wie durch die Anpassung der Vorheizzone auch die Profilierung der Peakzone optimiert werden kann. Dies gilt insbesondere für flächige Bauelemente, da hier eine verzögerte Erwärmung der Anschlussstrukturen in der Bauteilmitte vorliegt. Korrespondierend ist in Profil 3 eine Anpassung aller Zonen vorgenommen worden, um eine höhere Löttemperatur zu erreichen. Die Profile signalisieren nicht aufeinander folgende Optimierungsschritte in der Studie, sondern sollen vielmehr beispielhaft das Vorgehen und die Anforderungen an die Prozesseinstellung skizzieren.

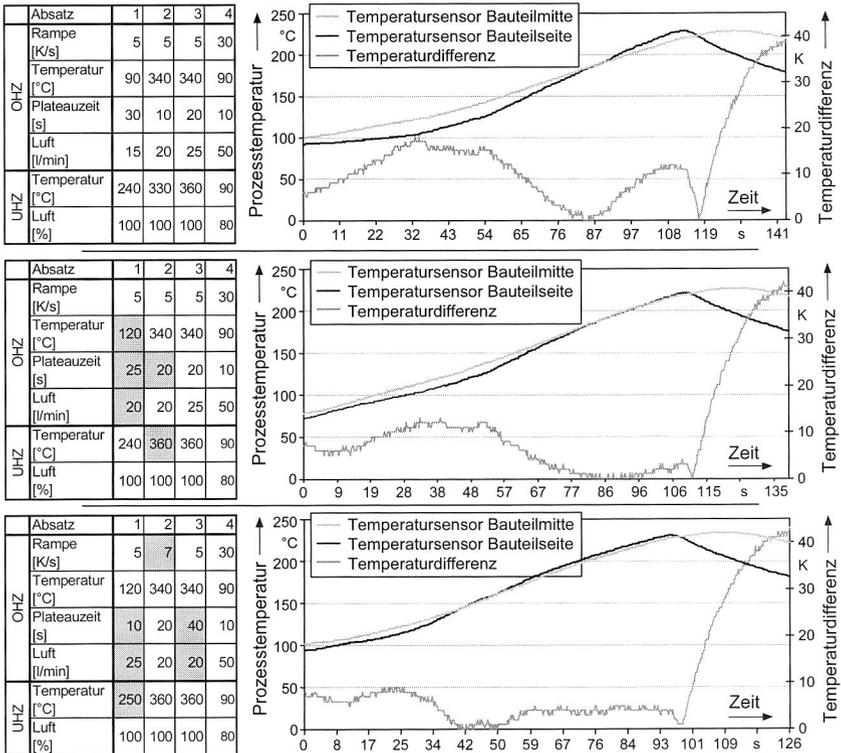


Bild 77: *Temperaturaufnahmen zur bleifreien Prozesseinstellung der untersuchten BGA-Komponente*

Neben den Prozessparametern ist als eine Prozessgröße auch die Baugruppentemperatur vor dem Nacharbeitsprozess anzuführen. Durch die Aufspannung im System und

die Systemabwärme im Standby-Status kann es zu einer Erwärmung der Baugruppe kommen, die auch eine differente Temperaturprofilierung nach sich zieht. So sind nach der Systemaktivierungszeit des Nacharbeitsprozesses Starttemperaturen zwischen 40°C und 80°C zu messen. Abhängig von der Starttemperatur ergeben sich jedoch unterschiedliche Lötprofile, die wie in folgender Abbildung dargestellt, Auswirkungen auf Temperaturhomogenität und Aufheizgradienten haben.

Im Vergleich der Temperaturwerte in Bild 78 mit den Profilen in Bild 77 wird das Potenzial einer optimierten Lötprozesseinstellung deutlich. Trotzdem werden bei der Profileinstellung Nr. 26 nicht alle Herausforderungen an eine gute Temperaturführung erfüllt. Kann das dargestellte Profil in Bild 78 oben als nahezu ideal bezeichnet werden, so sind bei geringeren Anfangstemperaturen Einschränkungen in der Temperaturdifferenz, den Aufheizgradienten und der Peaktemperatur zu belegen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit zur weiteren Verbesserung der Systemeinstellung und spiegelt die Herausforderungen bei der Verarbeitung bleifreier Lotwerkstoffe wider.

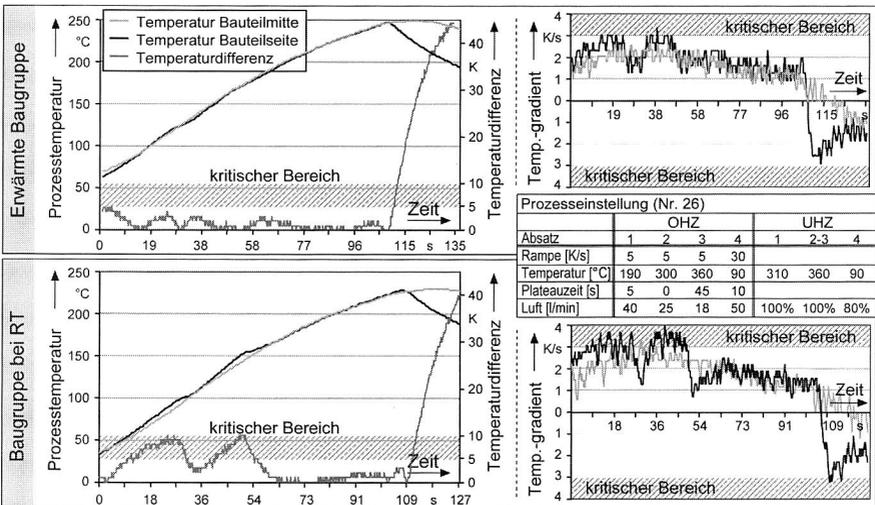


Bild 78: *Temperaturaufnahmen bei unterschiedlichen Anfangstemperaturen der Bauteilkontakte*

Zur Umsetzung einer guten Lötprofilierung ist es aber nur bedingt zweckmäßig die Profilierung für ein spezielles Bauteil zu optimieren, vielmehr müssen allgemein gültige Vorgehensweisen extrahiert werden. Dazu ist in der folgenden Abbildung eine Verket-

tungsmatrix dargestellt, welche die Auswirkungen der Prozesseinstellungen und der Wechselwirkungen auf den Nacharbeitsprozess abstrahiert.

Folgen auf den Prozess		Positive: +		Negative: -			
		Positive: +		Negative: -			
Temperaturhomogenität (Area Array)		-	-	+	-	+	
Peaktemperatur		+	+	-	-	+	+
Temperaturgradient		-		+		+	
Ausbildung eines Lötsattelprofils		+		+			
Wärmeeinbringung bei großen Bauteilen		-	+	+	-		-
Gefügeausbildung		-		+		+	+
Intermetallische Phasenausbildung		-	+	+		+	
Erwärmung Nacharbeitsumfeld			-		-	+	
Prozesszeit		+	-	-	-	-	-
Werterhöhung +		OHZ				UHZ	
Prozessparameter		Rampe	Temperatur	Plateauzeit	Luft	Temperatur	Luft
Wertreduzierung -							
Temperaturhomogenität (Area Array)		+	-	-	+		+
Peaktemperatur		-	-	-	-	+	+
Temperaturgradient		+		-	-	+	
Ausbildung eines Lötsattelprofils		-		-			
Wärmeeinbringung bei großen Bauteilen			-	-	+		
Gefügeausbildung		+	-	+	-	+	+
Intermetallische Phasenausbildung			-	+		+	
Erwärmung Nacharbeitsumfeld		-	+	+	+	+	
Prozesszeit		-	-	+		-	-

Bild 79: Wechselwirkungen der Parameter und deren Einfluss auf den Prozess

Die zusammengestellte Matrix soll eine einfachere Prozessoptimierung ermöglichen und wurde bereits zur weiteren Optimierung des Lötprofils der untersuchten BGA Komponente eingesetzt. Gleiches gilt für die Profileinstellung der anderen Bauelementtypen. In der Matrix wurde zwischen Reduzierung und Erhöhung der Einstellungsparameter unterschieden und die Auswirkungen auf die wichtigsten Prozesseigenschaften

ten übertragen. Zur Darstellung von Wechselwirkungen zwischen den Einstellungsfaktoren wurde soweit möglich eine Verkettungslogik generiert, die dem Anwender Hinweise auf einen verstärkenden oder abschwächenden Einfluss der Parametervariation geben soll. Auf eine Abbildung der optimierten Profile kann hier verzichtet werden, da sich die Profile aus den bereits dargestellten Zielsetzungen, wie Temperaturhomogenität, kurze Prozessdauer, maximale Löttemperatur und Temperaturgradienten ergeben.

6.2.4 Einsatz von Stickstoff als Lötunterstützung in der Nacharbeit

Neben der optimalen Temperaturführung bzw. Aufheizstrategie wird immer auch der Einsatz der vorherrschenden Atmosphäre für das Konvektionslöten diskutiert. Durch die Zugabe von Stickstoff als inertes Gas in den Prozessraum können der vorherrschende Anteil an Luftsauerstoff und damit auch störende Oxidationsvorgänge während des Lötens reduziert werden. Typische sich durch den Einsatz von Stickstoff beim Löten eröffnete Vorteile, sind ein verbessertes Benetzungs- / Ausbreitungsverhalten des Lotmediums und damit höhere Benetzungskräfte sowie eine deutlich feinere Oberflächenstruktur und eine gute Meniskenausbildung [79] [86] [143].

Folglich gewinnen diese positiven Wirkmechanismen auch für den Lötprozess in der Nacharbeit an Bedeutung. Beim Lötprozess unter interner Atmosphäre wird in der Serienproduktion ein Restsauerstoffgehalt von unter 400 ppm gefordert [131]. Nur so kommen die unterstützenden Effekte im Lötprozess zur Wirkung. Die Frage, ob diese umfassende Flutung, die bei Lötöfen durch abgeschlossene Prozesskammern erfolgt, auch in der Nacharbeit zu realisieren ist, konnte bisher nicht vollständig geklärt werden [49] [94]. Entscheidend sind der Systemaufbau, die Heißluft- bzw. Heißgasführung und die Nacharbeitsgriffelgestaltung. Diese Stellgrößen der Nacharbeitssysteme sind den Herstellern bekannt und dementsprechend werden Systeme zumeist mit optionalem Stickstoffmodul angeboten. Nachdem im Rahmen der Nacharbeitsstudien keine Systementwicklung durchgeführt wurde, soll hier nicht der Beweis erfolgen, inwieweit eine Stickstoffanwendung bei Heißluft-Nacharbeitssystemen wirksam wäre. Vielmehr wurde die Wirkung des Stickstoffs bei optimierten Lötprozessen analysiert.

In den hierfür durchgeführten Untersuchungen wurden Bauelemente der Kategorie Area Array und Lead Frame in der Nacharbeit unter Stickstoff und Luft verarbeitet. Bei den Teilprozessen Bauteilauflöten sowie dem Absaugen von Lotresten bei der Anschlussflächenvorbereitung erweist sich die Wirkung des Stickstoffs als sekundär. Weder eine vereinfachte Prozessführung noch eine Verbesserung im Resultat ließ sich nachweisen. Ganz im Gegensatz wird der Stickstoffeinsatz, wie Bild 80 zeigt, beim Einlöten einer neuen Komponente deutlich.

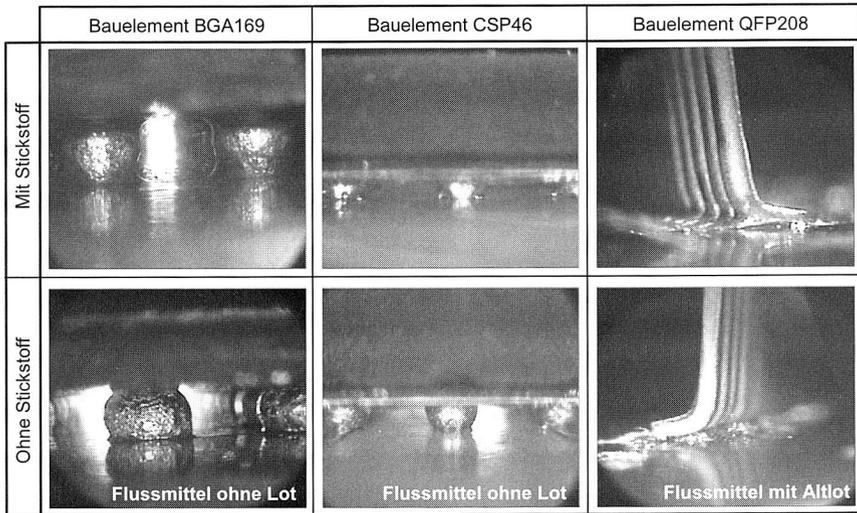


Bild 80: Gegenüberstellung von Kontaktstellen – mit bzw. ohne Stickstoff gelötet

Die aus dem Reflowlötprozess bekannten Vorteile wirken nachweisbar auch in der Nacharbeit. So lässt sich die verbesserte Benetzung an den Kontaktstellen der Lead Frame Komponenten zeigen und auch die Kontaktoberfläche der Area Array Komponenten zeigt ebenfalls eine feinere Struktur. Im Rahmen der Untersuchungen wurde keine Prozessoptimierung durchgeführt, sodass ein mittlerer Gasstrom als geeignet für eine ausreichende Prozessraumflutung angesehen werden kann.

6.3 Zuverlässigkeit nachgearbeiteter Baugruppen

Bisher liegen nur vereinzelt Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit nachgearbeiteter Lötverbindungen speziell mit alternativen Lotwerkstoffen vor [133]. Während herkömmliche Lötverbindungen auf Basis bleihaltiger Standardlegierungen weltweit seit Jahrzehnten untersucht werden und es somit umfangreiche Erfahrungen zur Verarbeitung und Zuverlässigkeit gibt, sind alternative Lote im industriellen Umfeld bisher nur auf wenige Sonderanwendungen begrenzt. Im Zuge des anstehenden Verbotes bleihaltiger Lotwerkstoffe und aggressiver Marktstrategien im globalen Wettbewerb gilt es die Herausforderungen durch alternative Medien aufzunehmen. Dies betrifft die Serienproduktion, deren Umstellung bis zum 31.06.2006 erfolgen muss, aber vielmehr auch die Nacharbeit. Wie gezeigt werden konnte, ist der Prozess unter Berücksichtigung kleiner werdender Prozessfenster zu beherrschen. Die Fragestellung der Zuverlässigkeit im Feldeinsatz kann jedoch damit nicht beantwortet werden.

6.3.1 Belastungsarten zur Abschätzung der Zuverlässigkeit im Feldeinsatz

Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit eines Produktes oder einer Baugruppe ihre Funktionen zu gegebenen Bedingungen über einen bestimmten Zeitraum zu erfüllen, wobei eine bestimmte Fehleranzahl zu tolerieren ist. Folgt man dieser Definition der Zuverlässigkeit nach IPC-970 ist eine Aussage faktisch erst nach der Lebensdauer eines Produktes zu treffen. Im globalen technologisch-wirtschaftlichen Wettbewerb, der durch immer schnellere Produktwechsel und der damit verbundenen Produktneueinführung bestimmt wird, müssen Aussagen zur Zuverlässigkeit vor dem realen Produktlebenszyklus vorliegen. Demzufolge ist eine Simulation der erwarteten Beanspruchungen der Baugruppen erforderlich. Unterschiedliche Belastungsspektren, wie Temperaturwechsel, -schock bzw. Temperatur-Feuchte Lagerungen, werden hierfür herangezogen. Erkenntnisse über die Produktzuverlässigkeit sind so nach einer definierten Belastungszeit bzw. nach entsprechenden Belastungszyklen zu erhalten.

Die wohl bedeutendste Schädigungsart von Lötverbindungen liegt in der Ermüdungsrissbildung. Die Ursachen der Ermüdung lassen sich durch thermische Wechselbeanspruchungen begründen, die entweder durch die Eigenerwärmung von Bauelementen, durch Änderungen der Umgebungstemperatur oder einer Kombination beider Vorgänge hervorgerufen werden. Durch die Wirkung unterschiedlicher thermischer Dehnungskoeffizienten der verbundenen Stoffe sowie Temperaturgradienten im Systemaufbau resultieren aus diesen Temperaturwechseln mechanische Beanspruchungen. Es ist folglich anzustreben, dass im betreffenden Temperaturbereich alle verbundenen Komponenten den gleichen thermischen Dehnungskoeffizienten aufweisen. In diesem nicht erreichbaren Idealfall können Spannungen nur aus Temperaturunterschieden im Aufbau resultieren, deren Größe dann von den Temperaturgradienten und dem wirksamen Dehnungskoeffizienten abhängt. Für reale Lötverbindungen sind jedoch stets Differenzen zwischen den thermischen Dehnungskoeffizienten vorhanden, die teilweise selbst temperaturabhängig sind und die im Allgemeinen die Ermüdungsbeanspruchung dominieren. Zur Verdeutlichung der Unterschiede sind in Bild 81 ausgewählte Dehnkoeffizienten und deren Wirkungsbereiche zusammengefasst. [64]

Ungeeignete Kombinationen an Dehnkoeffizienten können folglich frühzeitig zu Ausfällen führen. Um dies und auch Unzulänglichkeiten in der Verarbeitung feststellen zu können, bieten die angesprochenen Belastungsspektren eine breite Analysebasis.

So sind scharfe Temperaturwechselbeanspruchungen (Temperaturschocklagerung) mit großem Temperaturhub ein gängiges Prüfverfahren für sicherheitsrelevante Beanspruchungen. Die Versuchsbeschleunigung ist hoch, somit ist es möglich eine Ausfall-Datenbasis in Versuchszeiten zwischen 2 bis 6 Monaten zu erhalten. Diese Beanspru-

chungsvariante der schnellen Temperaturwechsel erzeugt hohe mechanische Spannungen, die häufig zum Versagen durch Verbindungs- bzw. Bauteilbruch führen. Einsatz findet diese Belastungsart beispielsweise bei Baugruppen des Automotive Sektors, die im Temperaturhub zwischen -40 °C und +125 °C in Einzelfällen auch 150 °C mit bis zu 1800 Zyklen belastet werden [107]. Ziel ist es kritische Kontaktstellen zu ermitteln, Prozesse zu qualifizieren und günstige Werkstoffpaarungen zu finden [140].

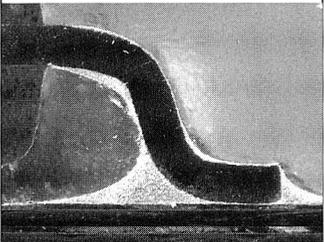
<p>Schaltungsträger</p> <p>FR4 a = 11-15 ppm/K FR5 a = 11-15 ppm/K PI a = 30 ppm/K PEEK a = 25 ppm/K</p>	<p>Fehlanpassung über den Lötkontakt</p> 	<p>Verbindungsmedien</p> <p>Sn37Pb a = 24,0 ppm/K Sn3.5Ag a = 21,5 ppm/K Leitkleber a = 25,0 ppm/K</p>
<p>Bauelemente</p> <p>QFP100 a = ppm/K BGA169 a = 7 ppm/K CR1206 a = 6 ppm/K SO8 a = 21 ppm/K</p>		<p>Phasen in der Lötstelle</p> <p>Wesentlich von der Stärke der Phase und deren Bestandteile bestimmt. reines Sn a = 23,5 ppm/K</p>

Bild 81: Unterschiedliche Dehnungskoeffizienten in der Aufbau- und Verbindungstechnik als Ursache der thermomechanischen Ermüdungsbeanspruchung

Im Gegensatz dazu ermöglichen langsamere Temperaturwechsel eine weitgehende Spannungsrelaxation im Lot [99]. Im Gegensatz zum Temperaturschock liegt die Zielsetzung dieser Belastungsart in einer Lebensdauerabschätzung. Dabei wird die anzuwendende Temperaturamplitude wesentlich durch die realen Einsatzbedingungen bestimmt. Prinzipiell sollte jedoch die maximale Temperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur vom FR4-Basismaterial liegen und die untere Temperaturgrenze nur auf eine Kriechverformung im Lot abzielen [24]. Unterschiedliche Modelle nach Coffin-Manson, Engelmaier bzw. Morrow sind heranzuziehen, um auf der Basis einer bestimmten Belastungszeit auf die simulierte Lebensdauer zu schließen [115].

6.3.2 Verhalten nachgearbeiteter Kontakte nach zyklischer Temperaturschockbelastung

Nachdem die Lebensdauer aber oftmals nur eine positive Einschätzung der Funktionsfähigkeit liefert, ist dieser Test zur Beurteilung neuer Verfahren, Bauelemente bzw. Verbindungsmedien weniger geeignet [160]. Bei vielen aktiven Bauelementen wie den Lead Frame Packages (QFPs) verringert sich die globale Fehlanpassung zusätzlich durch die Anschlussform, wodurch weniger Spannungen ins Lot induziert werden. Folglich wurde zur Analyse der Nacharbeit der erhöhte Belastungstest mit schnellen Temperaturwechseln (Schock) zwischen -40° und 125°C herangezogen [133].

Durchgeführte Versuchsreihen mit nachgearbeiteten Komponenten lassen sich jedoch erst bewerten, wenn parallel auch der Ausgangszustand der Serienproduktion bekannt ist. So wurden in Bild 82 die Gefügestrukturen am Bauteil QFP100 bei chem. Gold (Nickel-Gold) und chem. Zinn Metallisierung dem Seriengefüge gegenübergestellt.

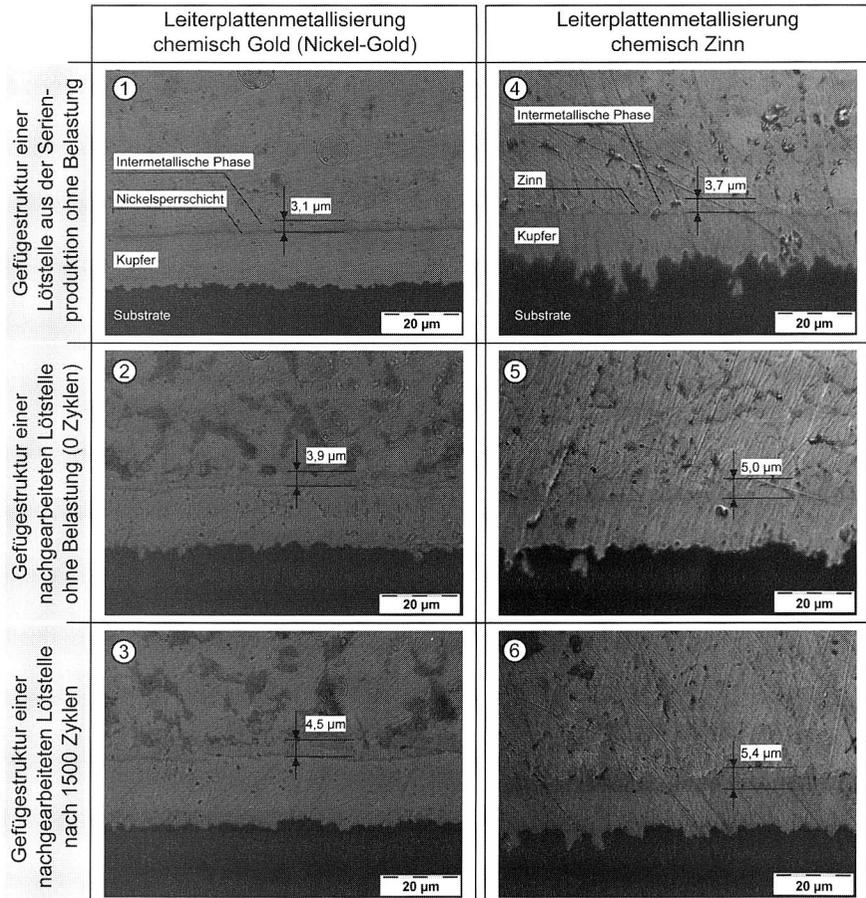


Bild 82: Analyse der Gefügestruktur und der Ausbildung einer intermetallischen Phase bei unterschiedlichen Metallisierungen (Anschlussflächenvorbereitung durch vollautomatischen Dispenspastenauftrag, Löten unter Stickstoff)

Auffällig ist in der Abbildung zunächst eine deutlich breitere intermetallische Phase an nachgearbeiteten Kontaktstellen. Dies konnte an allen Proben unabhängig vom Ver-

fahren und der Metallisierung bestätigt werden. Daneben lässt sich der Einfluss der Anschlussflächenvorbereitung während der Nacharbeit nachweisen. Deutlich wird dies insbesondere bei Chemisch Gold Metallisierungen auf dem Schaltungsträger. Durch den Reflowlötprozess der Serienfertigung geht nach übereinstimmender Meinung die Goldschicht (0,1 - 0,2 µm) eine Verbindung mit Bestandteilen der Lotlegierung ein [128]. Folglich ist im Schliff (1) nur eine dunkle Schicht zwischen Kupfer und intermetallischer Phase zu erkennen. Hierbei handelt es sich um die bei einer Chemisch Gold Metallisierung eingesetzte Nickelschicht, die als Sperrschicht ausgeführt ist [165]. Bei nachgearbeiteten Kontaktstellen (Schliff (2)) wird eine Reduzierung der Nickelschicht deutlich. Dies kann im Wesentlichen auf das Absaugen des Lots aus der Serienproduktion zurückgeführt werden, da entsprechend beim Einsatz von Altlot die Nickelschicht nahezu erhalten bleibt. Diese Schwindung an Nickel lässt sich wiederum durch Ablegerungseffekte während des Lötprozesses begründen. Gleiches gilt für die Zinnschicht bei den chemisch verzinnnten Anschlussmetallisierungen (Schliff (4)-(6)). Die Auswirkungen der Temperaturschockbelastungen auf das Phasenwachstum liegen im erwarteten Rahmen. Einflüsse durch die Nacharbeit sind nicht zu sehen [91]

Um die Zuverlässigkeit an quantifizierbaren Größen messen zu können, wurden des Weiteren Scherkräftmessungen an QFP Bauteilen durchgeführt. Die folgenden zwei Grafiken zeigen zusammenfassend die Ergebnisse ausgewählter Messreihen.

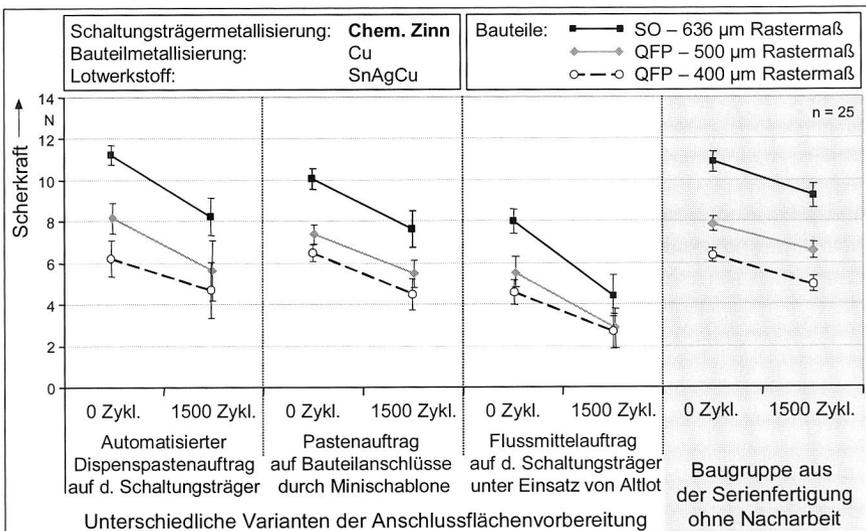


Bild 83: Quantifizierung des Einflusses der Temperaturschocklagerung auf die Festigkeit der Lötkontakte einer QFP208 Komponente (Metallisier.: chem. Zinn)

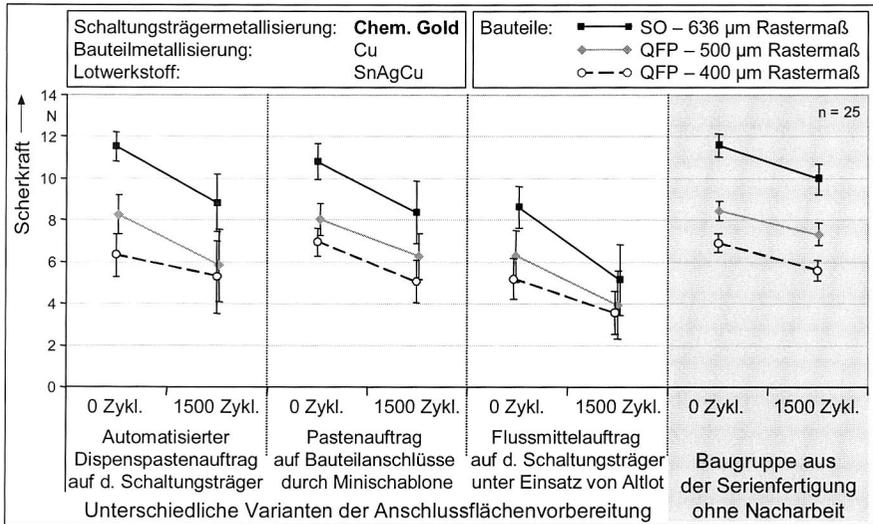


Bild 84: Quantifizierung des Einflusses der Temperaturschocklagerung auf die Festigkeit der Lötkontakte einer QFP208 Komponente (Metallisier.: chem. Gold)

Betrachtet man zunächst die Kraftwerte von Kontaktstellen aus der Serienproduktion, die als Referenz in die Analysen miteinbezogen wurden, so ist folgendes Verhalten festzustellen: Die mittleren Scherkräfte nehmen bei beiden Metallisierungen im Vergleich zum Ausgangszustand durch die Temperaturschocklagerung ab. Die Abnahme von bis zu 20% der Scherkraft lässt sich durch die Fehlanpassung bedingten Spannungen begründen, die zur Schädigung der Verbindungsstelle führen.

Dieses bei Kontaktstellen aus der Serie beschriebene Verhalten ist im Wesentlichen auch für die untersuchten Kontakte nachgearbeiteter Bauelemente zu erkennen. Zusammenfassend können darüber folgende Aussagen getroffen werden:

- Kontaktstellen auf einer chemisch Gold Metallisierung mit Nickel Sperrschicht besitzen auch im nachgearbeiteten Zustand eine höhere mechanische Festigkeit. Führt die Temperaturschockbelastung zu einer Zerstörung der Sperrschicht ist eine geringere Scherkraft zu verzeichnen (hohe Messwertstreuung).
- Speziell bei der Nacharbeit unter Einsatz des Restlotes aus der Serienproduktion (sowie Flussmittel) sind die geringsten Scherkräfte zu messen. Die Kontaktschwächung liegt demgegenüber prozentual nur gering über den Referenzwerten (Serie).
- Beim vollautomatischen Dispenspastenauftrag und beim neu entwickelten Verfahren sind unabhängig von der Metallisierung die größten Scherkräfte zu messen.

7 Strategien zur Qualitätsverbesserung durch Prozessdatenanalysen

Die grundsätzliche Ausrichtung der heutigen Fertigung liegt in der wirtschaftlichen Herstellung technologisch beherrschter Produkte, die während der Lebensdauer durch ihre Zuverlässigkeit überzeugen [124]. Im turbulenten Umfeld der Elektronikproduktion, die durch stetige Innovationen ein immer breiteres Anwendungsfeld erschließt, ist diese Zielsetzung nur durch höchste Anstrengungen zu erreichen [38]. Hintergrund sind die durch das schnelle Innovationstempo wachsenden Herausforderungen an Prozessstabilität und -beherrschung. Denn auch unter Berücksichtigung der im letzten Kapitel angeführten Aspekte zur optimierten Nacharbeit wird von einer wirtschaftlichen Produktion ein nur minimaler Fehler- und damit Nacharbeitsanteil gefordert.

Die besondere Aufgabe in der Elektronikproduktion zeigt sich in der Vielzahl der voneinander abhängenden Fertigungsschritte und in den Auswirkungen, die durch den hochintegrierten Aufbau der Baugruppen hervorgerufen werden. Da die Funktion der Baugruppe vom komplexen Zusammenspiel zwischen allen vorhandenen Bauelementen und deren Verbindung mit der Leiterplatte abhängt, führt schon ein einziger Fehler an einer Verbindungsstelle unweigerlich zum Ausfall der gesamten Baugruppe. Um ein Qualitätsniveau zu erreichen, das es ermöglicht, eine hohe Ausbringung funktionsfähiger Baugruppen zu erzielen, ist es nicht mehr ausreichend nur die einzelnen Prozesse zu beherrschen. Es sind darüber hinaus umfassende Maßnahmen zur Prüfung der gefertigten Baugruppen erforderlich.

Verschärft werden die Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit der Baugruppen noch dadurch, dass diese in immer stärkerem Maß in Hochzuverlässigkeitsanwendungen – wie zum Beispiel in der Automobilelektronik und der Medizintechnik – eingesetzt werden. In diesen Einsatzbereichen darf keine einzige der ausgelieferten Baugruppen versagen, da der Ausfall sicherheitsrelevanter Funktionen eine Gefährdung für Bediener und Umfeld darstellt. Entsprechend hohe Anforderungen sind daher an die Zuverlässigkeit der Prozesse zu stellen.

Zusätzlich muss dem Trend entgegengewirkt werden, dass die Prüfkosten gegenüber den Herstellungskosten immer stärker ansteigen. Schon heute fallen ungefähr 30 % - 50 % der Fertigungskosten für Prüfmaßnahmen an, mit denen die Qualität der hergestellten Baugruppen überwacht werden soll [41]. Einem weiteren Kostenanstieg kann nur durch die Umsetzung engmaschiger Regelkreise um jede einzelne Prozessstation entgegengewirkt werden. Zusätzlich müssen die Ergebnisse der Qualitätsüberwachung an den einzelnen Stationen für die darauf folgenden Prozesse aufbereitet und

genutzt werden. Dies sollte möglichst aufwandsneutral geschehen und vor allem keine zusätzliche Hardware benötigen, die in das Datenverarbeitungskonzept der SMT-Linie integriert werden muss.

7.1 Konzepte zur Online-Produktionsdiagnose

Die schnelle Analyse von Prozess- oder Prüfdaten wird in allen Industriezweigen verfolgt. Durch Prüfstrategien von einfachen Messprotokollen über vorgegebene Toleranzbänder bis hin zu optischen und funktionsorientierten Inspektionsverfahren soll das Ziel fehlerfreier Endprodukte erreicht werden. Ergänzend dazu werden kontinuierlich Maschinenprotokolle verfasst, die den aktuellen Maschinenzustand beschreiben. Die Gesamtheit an Daten wird jedoch selten kontinuierlich bewertet bzw. Diagnosen durchgeführt. Lediglich im Fehlerfall wird darauf zurückgegriffen.

Das Schlagwort einer Online-Produktionsdiagnose macht die Herausforderung deutlich, Datenanalyse und Bewertung stetig fortzuschreiben. Damit wären Regeleingriffe an den Maschinen bereits vor der Herstellung fehlerhafter Baugruppen möglich. Teilt man das Schlagwort, so werden die notwendigen Aufgaben einer Realisierung deutlich. Unter „Online“ wird die direkte Verknüpfung der Daten aus Prozessen und Prüfungen („Produktion“) verstanden, die eine entsprechende Systemvernetzung erforderlich macht. In der „Diagnose“ werden ermittelte Symptome aus der Datenermittlung zur Erkenntnisgewinnung genutzt und damit ein geschlossener Regelkreis ermöglicht. Damit wird die Notwendigkeit eines mehrstufigen Analysekonzeptes deutlich, welches speziell auf die Belange der Elektronikproduktion zugeschnitten entwickelt wurde und im Folgenden konzeptionell vorgestellt wird. Die Umsetzung und Potenziale der entwickelten Methodik werden in nächsten Kapiteln dargestellt. [139] [142] [159]

7.1.1 Methoden zur Prozessbewertung in der Elektronikproduktion

Um diese Herausforderung seitens der Qualitätssicherung aufzunehmen, wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Methoden entwickelt bzw. auf die Anwendungsfelder der Elektronikproduktion optimiert. Schwerpunkt dieser Arbeiten bildet immer noch die Prüftechnik, die jeweils den Indikator für Qualitätsmängel darstellt und nach der Theorie dieser Methoden umfangreiche Prozessoptimierungen zur Folge hat [130]. Gerade diese Optimierungen werden in der Baugruppenfertigung nur sehr selten umgesetzt [114]. Gründe hierfür sind sehr vielschichtig. Zumeist sind Kommunikationsbarrieren oder zu lange Regelschleifen zwischen Prüffeld, Qualitätsverantwortlichem und den Mitarbeitern in der Produktion vorhanden. Dies führt zu kostenintensiver Nacharbeit fehlerhafter Baugruppen. Die Zuverlässigkeit eines Produktes wird aber nicht durch die Fehler charakterisiert, sondern durch die Prozessfaktoren bestimmt.

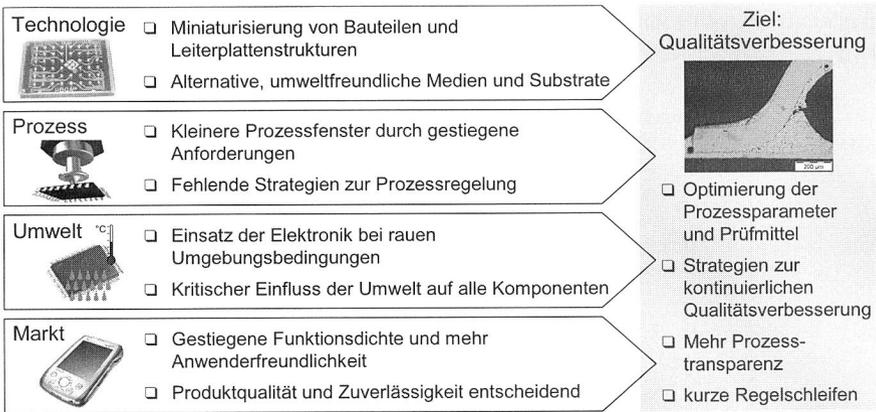


Bild 85: Anforderungen an die Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

Neben den Parametereinstellungen bestimmen vielmehr externe Störgrößen das Wirkgefüge zuverlässiger Prozesse in der Elektronikproduktion [146]. Dieses Spannungsfeld zwischen Parametern und Störgrößen war bisher ein Hauptargument für schlechte Regelbarkeit und fehlende Prozesskenntnis. Prozesswissen und Transparenz der Vorgänge sind aber ursächlich verantwortlich für fähige und beherrschte Prozesse im Sinne der Qualitätssicherung [164]. Daher haben die Maschinenhersteller in den letzten Jahren weitreichende Anstrengungen unternommen, möglichst viel Prozessinformation über Maschinenzustände dem Bediener mitzuteilen. Als Schnittstelle zu nennen, ist beispielsweise das GEM-Protokoll, das durch entsprechende Transaktionsberichte eine umfassende Charakterisierung einzelner Prozessstufen erlaubt. Jedoch ist es dem Maschinenbediener durch die Vielzahl an Informationsmeldungen bisher nicht möglich, diese zur Prozessbeschreibung zu nutzen. Daher werden die meisten Prozessinformationen, darunter auch Fehlermeldungen und Maschinenstörungen, nicht zur Qualitätsverbesserung genutzt [31] [159].

Die aktuelle Herausforderung für die Qualitätssicherung besteht daher in der effektiveren Nutzung und Bewertung dieser Prozessdaten [40]. Grundlegende Voraussetzung hierfür ist ein geschlossenes und prozessübergreifendes Informationssystem mit dem alle Maschinendaten protokolliert werden können. Das System muss die logische Verkettung zwischen Baugruppen und Maschinen herstellen, um die zeitlich getaktete Produktion der Flachbaugruppen systemtechnisch abbilden zu können [62]. Das bedeutet, alle Prozessschritte und Prüfprotokolle einer Flachbaugruppe sind zu einem Datentupel im Prozessdatenpool zu verketten. Hierfür kommt das entwickelte Qualitätsdaten-Informationssystem zum Einsatz (vgl. Bild 86). Prinzipiell verknüpft dieses

System die reale Produktionskette der eingesetzten Maschinen mit der Verarbeitungslogik aller Komponenten und spiegelt diese Verknüpfung auf die Prozessdaten.

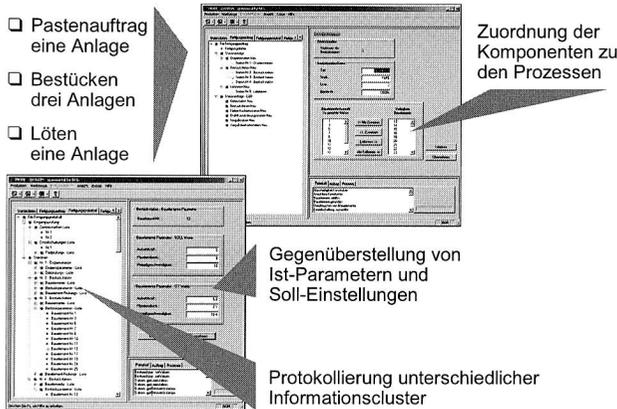


Bild 86: Prozessdaten als Analysegrundlage [47]

Dieses dreistufige System bildet nur die Grundlage einer ganzheitlichen Prozessanalyse. Entscheidend sind Erkenntnisse zur Prozessregelung, die aus den zusammengeführten Daten zu extrahieren sind. Methoden der klassischen Versuchsmethodik haben sich hierzu bereits mehrfach als wenig geeignet erwiesen [61]. Die großen Datenmengen der Elektronikproduktion und die entsprechenden Wechselwirkungen zwischen den Prozessen erfordern Analyseverfahren, mit denen mehr als drei bzw. vier Prozessparameter zu betrachten sind. Eine Reduzierung der Einflussgrößen auf die signifikanten Werte, wie sie nach Taguchi oder Shaining anzustreben sind, kann in der Baugruppenmontage zu fehlerhaften Einschätzungen führen. Andere Ansätze wie beispielsweise das Prinzip der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) bzw. der statistischen Prozessregelung (SPC) sind für kontinuierliche Prozesse sowie für schnelle Analysen der Prozessdaten nicht sinnvoll einzusetzen [47] [138].

Alternative Ansätze mittels neuronaler Modelle bzw. der Fuzzy Logik erlauben im Gegensatz hierzu eine Bewertung größerer Datenmengen [100]. Speziell bei neuronalen Modellen konnte bereits mehrfach konzeptionell die Vorteilhaftigkeit nachgewiesen werden [146]. Die Potenziale dieser Analysetechnologie liegen in einer schnellen Datenbewertung, in zielgerichteten Ergebnismodellen und einer breiten Toleranz bei der Verarbeitung verrauschter Daten [173]. Dies ist maßgeblich für eine Verarbeitung realer Prozessdaten. Nicht ein Versuchsplan, sondern das Abbild der Produktion steht damit für die Güte der entsprechend ermittelten Aussagen. Damit sind die in der Elek-

tronikproduktion geforderten kurzen Prozessregelschleifen erstmals praktisch umsetzbar. Einzige Voraussetzung ist das Grundverständnis der Technik neuronaler Modelle, was den praxisorientierten Einsatz bisher auf einzelne Anwendungen beschränkte.

7.1.2 Grundprinzip der Analysemethode

Ein neuronales Simulationsmodell kann im Allgemeinen als eine formale Struktur bzw. ein Netz aufgefasst werden [173]. Daher wird auch oft bei dieser Technik von neuronalen Netzen gesprochen. Kurz zusammengefasst, ermöglicht die neuronale Technik die Berechnung eines Ergebniswertes oder Vektors auf der Basis einer vorher bestimmten Anzahl von Eingabewerten. Ähnlich wie bei einer algebraischen Formel, nur dass die Zusammenhänge wesentlich komplexer sein können. Die Berechnungs- bzw. Abbildungslogik neuronaler Analysesysteme basiert auf der Verknüpfungsstruktur. Die Struktur muss problemspezifisch für jede Anwendung einmalig entwickelt werden [148]. Die Verknüpfungspunkte sind als einfache Automaten oder Prozesse anzusehen. Das Zusammenspiel der einzelnen Verknüpfungen führt somit zur Abbildung des neuronalen Modells. Die Verarbeitung läuft vollständig parallel und unabhängig voneinander. In der Modellarchitektur unterscheidet man zwischen Eingabeeinheiten, versteckten bzw. inneren Schichten und Ausgabeeinheiten. Zustand und Ausgabe der inneren Einheiten sind von außen nicht zu erfassen [173].

Die innere Schicht stellt die Berechnungsebene dar. Für die Abbildungslogik des neuronalen Modells sind in dieser Schicht zwei Faktoren entscheidend: Die Gewichtung der Verbindungen und die Aktivierungsfunktion der Verknüpfungspunkte. Die Aktivierungsfunktionen werden vor der Analyse vorgegeben und beschreiben den funktionellen Zusammenhang zwischen den aufsummierten Eingabewerten und dem Ausgabewert [13]. Es sind dabei verschiedenste Funktionen anwendbar, wobei am gebräuchlichsten lineare oder sigmoide Funktionen bzw. die lineare Schwellwertfunktion eingesetzt werden. Zur Veranschaulichung der Rechenoperationen in einem neuronalen Modell ist die Logik in Bild 87 anhand der XOR-Funktionalität aufgezeigt.

In der neuronalen Technik lassen sich mehrere Anwendungsvarianten unterscheiden. Bei der am häufigsten eingesetzten Technik wird die Gewichtung der Verbindungsstruktur durch eine Modelltrainingsphase selbständig ermittelt [148]. Diese Variante wird im Allgemeinen als selbstlernend bezeichnet. Durch die relativ einfache Anwendbarkeit wurde diese auch zur Analyse der Prozesse in der Elektronikproduktion herangezogen. Das Ziel des Lernvorgangs ist, die Abbildungslogik so zu bestimmen, dass das neuronale Modell bei bestimmten Eingaben vorgegebene Ausgaben bzw. Ergebnisse ermittelt. Auf diese Weise soll auch auf neue unbekannte Eingabewerte mit geeigneten Ergebnissen geantwortet werden. Um dies zu erreichen, werden verfügbare Eingabemuster durch das Modell propagiert. Die erzeugten Ausgaben werden darauf

hin mit den realen Ergebnissen verglichen und durch eine aktive Veränderung der Gewichtung eine Minimierung möglicher Ergebnisfehler erreicht. Dies wird im neuronalen Simulationsprogramm ohne Benutzereingriff umgesetzt.

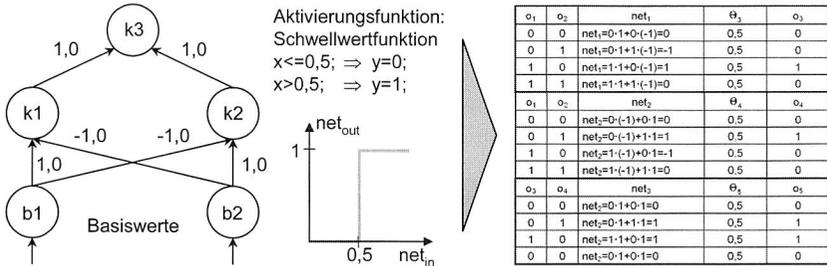


Bild 87: Exemplarisches neuronales Modell der XOR-Funktion und rechnerisch ermittelte Werte der Verknüpfungspunkte (Knoten)

Um das Prinzip in der Elektronikproduktion anwenden zu können, ist es notwendig, vor der Analysephase einen Trainingsdatensatz zu ermitteln. Dieser Datensatz sollte möglichst viele Prozesszustände, auftretende Fehler und Qualitätsschwankungen umfassen. So lässt sich mit dem Simulationsmodell eine nahezu ideale Abbildung des realen Prozessverlaufs erreichen.

Vor der neuronalen Analyse von Prozessen steht folglich eine ganzheitliche Betrachtung der erfassbaren Daten, die zur Entwicklung des neuronalen Bewertungsalgorithmus benötigt werden. Damit verbunden, wird auch die Datenstruktur für die Prozessdiagnose festgelegt. Fehlen wesentliche Daten zur Prozessbeschreibung, führt dies in der Trainingsphase des neuronalen Modells zu Abbildungsschwierigkeiten oder in Ausnahmefällen sogar zu unzureichenden Analyseergebnissen. Daher ist eine ganzheitliche Datenvernetzung anzustreben.

7.2 Datentechnische Vernetzung von Prozessstufen

Das strukturierte Vorliegen von Prozessdaten, wie in Bild 86 gezeigt, macht eine vorhergehende Datenerfassung erforderlich. Die Datenvernetzung soll dazu die Verknüpfung zwischen den Produktionsanlagen und den gefertigten Baugruppen liefern. Nachdem die Daten an den Anlagen vorliegen, gilt es, diese möglichst effizient zur Analyse zusammenzuführen. Der zur Prozessanalyse eingesetzte Rechner kann als Leitsystem zusätzlich die Steuerung des Informationsflusses übernehmen. Trotzdem sind Rechnerkapazitäten an den Anlagen zu belegen, die zur Kommunikation benötigt werden. Da die Rechnerleistung der Maschinensteuerung zu entziehen ist, muss sehr sorgfältig

mit den verwendeten Systemressourcen umgegangen werden. Die in der Datenverarbeitung immer vorherrschende Frage, mehr Aufwand in die Hardware zu stecken oder einen höheren Programmieraufwand zu betreiben, ist für eine Anlagenvernetzung in der Elektronikproduktion nicht relevant. Eine Hardwareerweiterung stellt einen direkten Anlageeingriff dar, der zwar möglich ist, aber aus Gründen der Übertragbarkeit der Datenvernetzung und wirtschaftlichen Gründen absolut zu vermeiden ist. Die Kommunikation gilt folglich als die erste wesentliche Herausforderung für eine Datenauswertung.

7.2.1 Konzeption einer Kommunikationsstruktur

Die Datenübertragung muss auf standardisierten Protokollen (wie zum Beispiel TCP/IP oder FTP) aufbauen, um den Entwicklungsaufwand niedrig zu halten und eine möglichst hohe Kompatibilität zu anderen Programmen zu erreichen. Es ist ebenso nur auf diese Weise möglich, dass Daten nicht nur im lokalen Netz ausgetauscht werden, sondern dies auch über das Internet geschehen kann. Auf diese Weise kann die Software auch zur Telediagnose ganzer Anlagen oder zur Überprüfung der Fertigung in anderen Werken verwendet werden [39]. Weiter sollten die zur Kommunikation implementierten Protokolle möglichst einfach und sicher gestaltet werden. Absolut zu vermeiden ist dabei ein Datenverlust. Sobald ein Fehler auftritt, ist es erforderlich, die Kommunikation ab dem letzten bekannten, korrekten Zustand wiederholen zu können.

Dies geschieht auf niedriger Ebene durch das zugrunde liegende Protokoll, auf höherer Ebene muss es durch die Kommunikationssoftware selbst geregelt werden. Die übliche Methode, die Daten mit Prüfsummen zu versehen und die Korrektheit der Prüfsummen zu überprüfen, ist in diesem Umfeld nicht nötig. Aufgrund der kleinen Datenmengen genügt es, beim Auftreten eines Fehlers – zum Beispiel eines zusammengebrochenen Kommunikationskanals – die gesamte Übertragung des aktuellen Datensatzes zu wiederholen. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass ein Datensatz entweder komplett und richtig ankommt oder überhaupt nicht ankommt und zu einem späteren Zeitpunkt übertragen wird. Somit ist die Konsistenz der übertragenen Daten gewährleistet. Eine Falschübertragung an fremde Rechner muss durch die oberste Ebene des Protokolls verhindert werden, die es anderen Rechnern als dem Server unmöglich macht, Daten anzunehmen, wenn sie nicht über das Protokoll verfügen.

Ein sehr wichtiger Aspekt der Kommunikation ist die Belastung des Netzes, über welches die Daten verschickt werden. Die durch das Programm entstehende Netzlast sollte so gering wie möglich sein, da es sich hierbei zumeist um universelle Netze handelt, die zu weiteren Kommunikationsaufgaben dienen. Wie effizient die Daten durch das

Netz geleitet werden können, hängt sehr stark von der Architektur und dem zugrundeliegenden Protokoll ab. Da zumeist ein auf dem Protokoll TCP/IP basierendes Ethernet-Netzwerk verwendet wird, wurde die Übertragungslogik an diesem ausgerichtet.

Das TCP/IP-Protokoll verwendet das Verfahren CSMA/CD⁴ [28]. Damit können mehrere Benutzer „gleichzeitig“ über das Netz kommunizieren und das Netz stellt die Übertragung zum entsprechenden Empfänger sicher. Dazu wird ein Trägersignal verwendet. Bevor ein Rechner Daten sendet, muss er feststellen, ob das Trägersignal eines anderen sendenden Rechners vorliegt. Wenn dies der Fall ist, muss er auf das Freiwerden der Leitung warten. Ist die Leitung frei, kann er sein Trägersignal senden und seine Daten an den entsprechenden Empfänger verschicken.

Falls zwei Rechner nahezu gleichzeitig feststellen, dass kein Trägersignal vorliegt und gleichzeitig zu senden beginnen, kommt es zu einer Kollision. In diesem Fall sind alle gesendeten Daten unbrauchbar, da sich in der Leitung beide Signale überlagern und eine Trennung nicht mehr möglich ist. Wenn solch eine Kollision eintritt, werden beide Übertragungen abgebrochen und alle gesendeten Daten für ungültig erklärt. Das System stellt diesen Fehler selbständig fest und löscht die Informationen in den Übertragungskanälen. Dazu informiert es alle angeschlossenen Rechner, dass die Daten, die sie gerade empfangen haben, ungültig und zu löschen sind.

Die effizienteste Möglichkeit Daten unter Verwendung dieses Protokolls zu übertragen ist folglich diejenige, die die wenigsten Kollisionen erzeugt, weil sowohl die Wartezeit als auch das Reinigen des Übertragungskanals Zeit kosten. Da Kollisionen nur am Anfang eines Datenpakets auftreten können, sollten die Pakete möglichst groß sein, damit weniger Paketanfänge vorliegen. Bei der Programmierung der Datenerfassungssoftware wurde deshalb speziell darauf geachtet, immer möglichst große Datenpakete zu verschicken, um das Netz möglichst wenig zu belasten. Nach der Anmeldung werden immer alle Daten, die übertragbar sind, auf einmal gesendet. Dadurch entstehen teilweise sehr große Pakete, die das System aber problemlos und ohne Beeinflussung von anderen Benutzern überträgt, da es diese bei Bedarf jederzeit in kleinere Pakete unterteilen kann. Die effiziente Nutzung des Netzes ist bei der Übertragung der Qualitätsdaten relativ einfach, da hier auf einmal eine ganze Datei, die normalerweise wenige Kilobyte groß ist, zu übermitteln ist. Bei der Anmeldung eines Clients am Server werden allerdings immer nur sehr geringe Datenmengen übertragen. Um auch hier eine möglichst effiziente Nutzung des Netzes zu erreichen, werden

⁴ Carrier Sense Multiple Access Collision Detect

alle verfügbaren Daten zusammengefasst und als ein großes Datenpaket übertragen. Dieses Vorgehen führt zwar zu Mehraufwand auf der Sender- und Empfängerseite, entlastet aber das Netz, die langsamste und damit geschwindigkeitsbestimmende Komponente, deutlich.

Nachdem die Kommunikationskanäle vom Server geöffnet wurden, können sich die Clients an den jeweiligen Sockeln anmelden und die Dienste des Servers in Anspruch nehmen (vgl. Bild 88). Als erstes fordern die Clients die für sie bestimmten Metadaten an, die ihre Aufgabe beschreiben. Dazu wird vom Server an jeden Client der Inhalt von dessen Konfigurationsdatei übertragen. Diese Dateien müssen sich im Stammverzeichnis der Software am Server befinden. Nachdem die Clients ihre Konfigurationsdateien angefordert haben, benötigen sie für die Datenaufnahme von der Maschinensteuerung noch die Information, welche Dateien seit der letzten Archivierung geändert wurden. Auch diese sind am Server gespeichert. Sie wurden nicht in die Konfigurationsdatei integriert, da die Altersinformationen aller überwachten Dateien einen relativ großen Umfang annehmen können und vom Bediener nicht manuell verändert werden sollten.

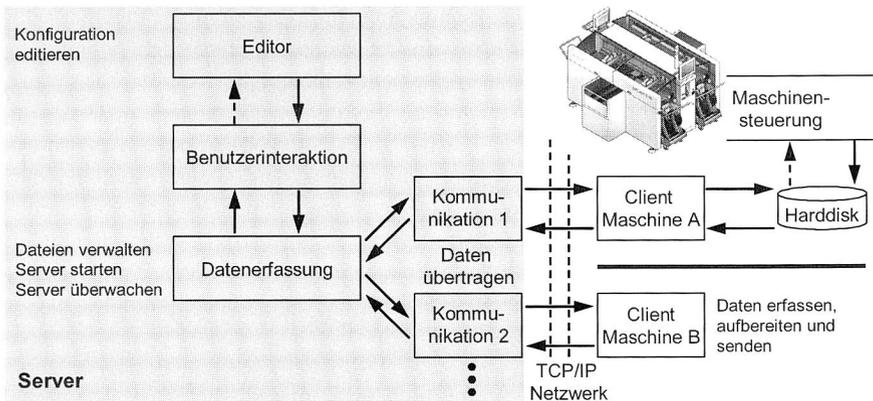


Bild 88: Darstellung des Datenflusses und der Aufgaben der einzelnen Klassen auf Client und Serverseite

Zusätzlich werden diese Daten, anders als die Konfigurationsdaten, sehr häufig geändert. Wenn während dieser Schreibzugriffe ein Fehler auftritt, besteht die Gefahr, dass die Daten, die in der gerade geschriebenen Datei gespeichert sind, verloren gehen. Der Verlust der Altersdaten ist leicht zu verschmerzen, da dadurch lediglich einige schon vorhandene Dateien erneut übertragen würden. Der Benutzer würde von die-

sem Fehler wenig bemerken. Ohne die Informationen aus der Konfigurationsdatei ist das System allerdings nicht in der Lage, mit diesem Client zusammenzuarbeiten.

7.2.2 Realisiertes System zur flexiblen Anlagenvernetzung

Die Produktion elektronischer Baugruppen ist seit Jahren geprägt durch hochdynamische Entwicklungen bei Komponenten, aber auch den Systemen und Anlagen. Die konzipierte Kommunikationsstruktur spiegelt dies im modularen Aufbau der Server – Client Architektur. Diese ist flexibel um Bereiche erweiterbar und unterstützt die Integration neuer Systeme, die als Clients aufgenommen werden können. Diese Flexibilität gilt es auch in der Umsetzung zu erhalten. Nachdem in den Produktionsanlagen der Elektronikproduktion bisweilen sehr unterschiedliche Betriebssysteme zum Einsatz kommen, sollte folglich ein systemunabhängiger Ansatz in der Programmierung verfolgt werden.

Die Programmiersprache JAVA unterscheidet sich von den konventionellen Sprachen dadurch, dass nicht versucht wird, jedes einzelne übersetzte Programm an das Betriebssystem anzupassen. Das ausführbare Programm, es wird als JAVA-Bytecode bezeichnet, läuft nicht in der Betriebssystemumgebung, sondern in der Virtual Machine, die einen virtuellen Computer simuliert, der die Ressourcen des Rechners nutzt, in den er eingebettet ist. Dieser Computer verfügt virtuell über eigene Geräte, über die er frei verfügen kann und nur auf diese kann der Programmierer zugreifen. Die Virtual Machine leitet diese Zugriffe dann an die realen Geräte weiter. Dadurch ist die Arbeitsumgebung, in der ein JAVA-Programm läuft, immer gleich. Dieser Zustand wird als WORE⁵ bezeichnet und stellt eine große Erleichterung beim Erstellen von portablem Code dar. Das Programm muss folglich nicht an ein System angepasst werden, da die Virtual Machine, die es anspricht, immer gleich ist. Damit ist diese Programmiersprache ideal für die Client Systeme der Vernetzung geeignet und wurde für das Gesamtsystem eingesetzt.

Nachdem der Anwender nicht an der Vernetzung, sondern vielmehr an den Daten interessiert ist, kann eine einfache Benutzerschnittstelle die zentralen Aufgaben übernehmen. Maßgeblich für Benutzerkommunikation ist die Serverseite. Das hierfür realisierte Steuerungsfenster ist in Bild 89 dargestellt. Die Kommunikationsbasis an den Anlagen wird durch Batchprogramme geleistet, die nach dem Start dauerhaft im Hintergrund der Hauptanwendungen laufen. Das Steuerungsprogramm auf dem Server betreffend,

⁵ write once run everywhere

sollen hier nur die wesentlichen Funktionen angesprochen werden. Mit dem Programmstart wird eine erste Initialisierung der angemeldeten Clients durchgeführt. Die Liste der dem Server bekannten Clients wird dann im Textausgabefenster im oberen rechten Bereich des Bildschirms angezeigt. Zur Reduzierung der Netzlast besteht nur eine Verbindung zwischen den Rechnern, wenn ein Client neue Daten übertragen will. Die Ausgabe im Feld „angemeldete Maschine“ bezieht sich folglich darauf, für welche Clients der Server einen Kommunikationssockel bereitstellt. Daher kann die Grundinitialisierung im Programm wiederholt werden, um neue Clients zu erkennen und die Kommunikation zu beginnen.

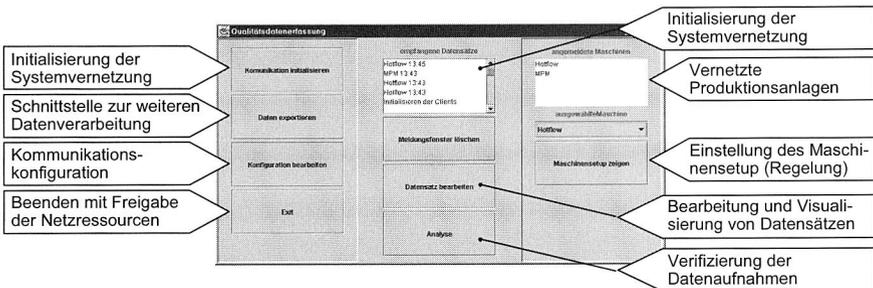


Bild 89: Hauptfenster des Programms am Server, das die meiste Benutzerinteraktion ermöglicht und zusätzlich über eine einfache Benutzerführung durch Hilfstexte verfügt

Die meisten weiteren Funktionen, die im Hauptfenster gewählt werden können, beziehen sich auf einen bestimmten Client beziehungsweise auf die von diesem übertragene Daten. Die Festlegung, für welchen Client die nächsten Benutzereingaben gelten, kann über das Auswahlmeneü unterhalb der Liste angemeldeter Maschinen erfolgen. Solange dort die Startkonfiguration „Maschinen auswählen“ steht, können die meisten anderen Funktionen nicht aufgerufen werden. Nachdem eine Maschine ausgewählt wurde, wird der Name der momentan aktiven Maschine als Beschriftung auf diesem Auswahlmeneü angezeigt.

Hervorzuheben ist dabei die Funktion „Maschinensetup bearbeiten“, die eine direkte Bearbeitung der Konfigurationsdatei der Maschinensteuerung gestattet. Neben der elementaren Aufgabe der Datenübertragung erschließt dies eine schnelle Prozessregelung. Der Bediener am Leitrechner ist dadurch in der Lage, die Prozessparameter direkt zu verändern. Die veränderte Konfigurationsdatei wird beim nächsten Kontakt mit dem Client zu diesem übertragen. Eine ähnliche Ausrichtung besitzt die Funktion „Konfiguration bearbeiten“ im linken Abschnitt des Hauptfensters. Hier wird ein Editor

gestartet, in dem eine Konfigurationsdatei bearbeitet werden kann. Diese bezieht sich auf die Kommunikation zwischen Client und Server sowie auf die Parameter, mit denen der Client Daten von der Maschinensteuerung übernimmt.

Eine wesentliche Funktion für die Analyse ist allerdings der Datenexport. Über einen Dateiauswahldialog gelangt man in das Verzeichnis, aus dem die Daten exportiert werden sollen. Dort können mittels Auswahlfenster die Daten des aktiven Clients markiert und damit für den Export selektiert werden. Die Vorgehensweise, eine eigene Auswahlroutine anstatt des Standard-Dateiauswahldialogs zu verwenden, wurde gewählt, um den Restriktionen des Dateiauswahldialogs zu entgehen, bei dem alle gewünschten Dateien auf einmal ausgewählt werden müssen. Die realisierte Methode ist für den Benutzer deutlich komfortabler, da er die Gruppe der Dateien, die entfernt werden sollen, im rechten Fenster zusammenstellen kann.

7.3 Implementierung eines rechnergestützten Analysewerkzeuges

In der Trainingsphase des Modells und in der nachfolgenden Analyseanwendung sind die eingesetzten Prozessdaten von entscheidender Bedeutung. Für die Analyse von verrauschten Prozessdaten, wie sie in der Elektronikproduktion zumeist erfasst werden, ist die neuronale Technik sehr gut geeignet. Es müssen aber trotzdem die Prozessdaten vor der Eingabe in das neuronale Modell entsprechend aufbereitet werden. Hierfür sind einige Regeln zu beachten. Wesentlich ist die korrekte Zuordnung der Analysedaten, insbesondere beim Training des Simulationsmodells.

7.3.1 Aufbereitung der gesammelten Prozess- und Prüfdaten

Ein weiterer, wichtiger Faktor für ein erfolgreiches Training neuronaler Modelle ist die gleichmäßige Verteilung der Prozessdaten im gesamten Untersuchungsintervall. Nur so können alle prozessspezifischen Qualitätseinflüsse anhand von Prozessinformationen auf das Modell abgebildet werden. Falls die realen Prozessdaten technologisch nicht optimal im Werteintervall verteilt sind, kann ein Ausgleich durch die Anwendung von Substitutionsfunktionen erreicht werden. Oftmals ist es auch ausreichend unterrepräsentierte Datensätze wiederholt in das Datenmuster einzutragen, um ein gleichmäßiges Training zu gewährleisten.

Die Anwendung neuronaler Techniken wird trotz zahlreicher Vorteile durch den Aufwand für Datenaufbereitung und Konvertierung bisher nur begrenzt eingesetzt. Daher wurden für die Belange der Elektronikproduktion verschiedene rechnergestützte Werkzeuge entwickelt, die eine teilautomatisierte Datentransformation unterstützen. Neben den bereits beschriebenen Programmen zur Datenaufnahme, wurden spezielle An-

wendungen zur Extraktion wichtiger Informationen aus Maschinen- und Prüfprotokollen implementiert (vgl. Bild 90). Dabei gilt es, die maschinenspezifischen Protokollskripte soweit zu gliedern, um die relevanten Daten kontinuierlich zu erfassen.

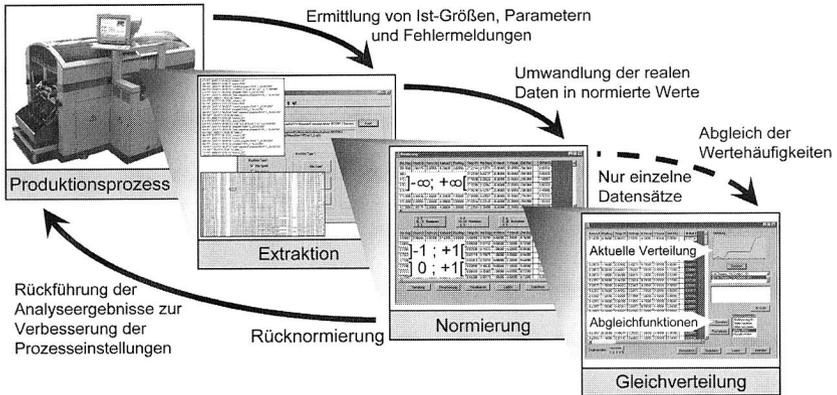


Bild 90: Rechnergestütztes Werkzeug zur Datenaufbereitung

Nach der Datenextraktion liegen die Produktionsdaten in den realen Wertebereichen vor. Diese unterscheiden sich zum Teil deutlich in Intervallumfang und Größenordnung. Eine Vergleichbarkeit ist damit nur bedingt gegeben. Eine Bewertung kann aber nur, und dies gilt auch für die neuronale Analysetechnik, durch die Gegenüberstellung normierter Zahlenwerte erfolgen. Maßgeblich für die Güte der Normierung ist es, den gesamten Wertebereich der Parameter abzubilden, um so ein Verrauschen der Daten zu vermeiden. Übertragen auf neuronale Modelle liegt der normierte Wertebereich definitionsgemäß zwischen -1 und 1 bzw. zwischen 0 und 1 . Der Bezug zu den realen Prozesswerten erschließt sich damit nur durch eine Rücknormierung. Daher gilt es, die Normierungsvorschrift für jeden Datenfaktor algebraisch einfach aufzubauen, um durch die Umkehrfunktion eine Regelung der Prozesse nach einer neuronalen Analyse zu ermöglichen.

Wie bereits dargestellt, wird in der neuronalen Technik zwischen einer Modellbildungs- (Trainings-) und einer Analysephase unterschieden. Ausschlaggebend sind dabei die Modellbildung und die dafür zugrunde gelegten Datensätze. Eine unregelmäßige Verteilung der Intervalle einzelner Analysewerte führen in der Trainingsphase zur geringen Abbildung der unterrepräsentierten Werte. Einflüsse sind damit in den Analysen nur bedingt auf die Ergebnisse der Analyseaussage zu spiegeln. Daher muss als abschließender Schritt zur Datenvorbereitung eine Gleichverteilung einzelner Datensätze nur für die Modellbildung vorgenommen werden.

Die Definition von Analyseergebnissen gestaltet sich über die Datenaufbereitung hinausgehend für die jeweilige Untersuchungsaufgabe unterschiedlich. Je nach gesuchten Informationen können hier einzelne Werte oder Vektoren zur Modellbildung vorgegeben und bei der Analyse abgefragt werden. Zur ganzheitlichen Analyse der Produktionskette wurde der Ansatz eines Qualitätswertes (Q) gewählt, der anhand aufgenommener Inspektionsinformationen eine Beschreibung des Qualitätsniveaus ermöglicht. Die konzipierten Werte zu den einzelnen Prozessstufen sind im Folgenden dargestellt.

Qualitätsniveau nach dem Pastenauftrag		Durchschnittliche Padabdeckung 1	Minimale Padabdeckung 1	Durchschnittliche Padabdeckung 2	Minimale Padabdeckung 2	...	Mittelwerte Padabdeckung
	BG _n						
	BG _{n+1}						
	...						
		Konzipierter Wert zur Beschreibung des Qualitätsniveaus nach dem Pastenauftrag:		$Q_{\text{Pastenauftrag}} = \left(22 - 0,21 \cdot \left[\frac{\sum \text{Padabdeckungswerte}}{i} \right] \right)^{-1} \quad (10)$			
Qualitätsniveau nach der Bauteilbestückung		Fehleranzahl AOI-Bestückungsinspektion	Fehlerbewertung AOI-Bestückungsinspektion	Fehleranzahl Endinspektion (AOI, ICT, FT)	Fehlerbewertung Endinspektion (AOI, ICT, FT)	Fehlerwert (FW)	
	BG _n	0 – 3 (mehr)	0 – 2	0 – 3 (mehr)	0 – 2	∑	
	BG _{n+1}	Fehler mit 3 bewertet	(aufsteigend bewertet)	Fehler mit 3 bewertet	(aufsteigend bewertet)	∑	
	...	einfach gewichtet	einfach gewichtet	achtfach gewichtet	achtfach gewichtet	∑	
		Konzipierter Wert zur Beschreibung des Qualitätsniveaus nach der Bauteilbestückung:		$Q_{\text{Bestückung}} = \frac{3}{10^6} \cdot FW_n^3 - \frac{3}{25 \cdot 10^3} \cdot FW_n^2 - \frac{2}{10^2} \cdot FW_n + 1 \quad (11)$			
Qualitätsniveau der Produktionslinie		Fehleranzahl Endinspektion (AOI, ICT, FT)	Fehlerbewertung Endinspektion (AOI, ICT, FT)	Fehlerwert (FW)			
	BG _n	0 – 3 (mehr)	0 – 2	∑			
	BG _{n+1}	Fehler mit 3 bewertet	(aufsteigend bewertet)	∑			
	...	einfach gewichtet	einfach gewichtet	∑			
		Strategischer Wert zur Beschreibung des Qualitätsniveaus der gesamten Produktionslinie:		$Q_{\text{Produktion}} = \frac{1}{49} \cdot FW_n^2 - \frac{2}{7} \cdot FW_n + 1 \quad (12)$			

Bild 91: Konzipierter Zielwert „Qualitätsniveau“ der Analyse zur Bewertung der aktuellen Prozesslage und der Beurteilung von parameterbedingten Qualitätsschwankungen (BG: Baugruppe)

Über die Qualitätswerte hinaus gestatten weiterentwickelte Modelle auch Informationen zu fehlerhaften Bauelementen. Dabei ist eine erweiterte Analysetiefe erforderlich, die zu Lasten der Modellbildung und der Analysegeschwindigkeit geht und nicht immer zu realisieren ist.

7.3.2 Konzeptioneller Aufbau

Neben einer ausreichenden Anzahl an Analysedaten setzt die Modellbildung eine entsprechende neuronale Netzarchitektur voraus. Mit der Zielsetzung möglichst guter

Analyseeigenschaften erfordert jede Analyseaufgabe ein spezifisches Modell. Für die Elektronikproduktion umfasst dies im Wesentlichen die Prozessschritte Lotpastenauftrag, Bestücken und Löten, die anlagenspezifisch zu erweitern sind. Zusätzlich müssen die umfangreichen Wechselwirkungen auch in der Modellarchitektur berücksichtigt werden, da durch eine vorherige Zusammenführung von Wertegruppen eine vereinfachte Abbildung der realen Produktionszusammenhänge im Modell erzielt wird. Dies führt zu kürzeren Trainingsphasen und zu schnelleren Analysen im späteren Einsatz.

Der Strukturaufbau lässt sich dabei an den folgenden Faktoren festmachen. So gilt es, die logische Struktur der Prozessdaten zu berücksichtigen. Zumeist können Datengruppen gebildet werden, die in dieser Form auch in das Modell zu übertragen sind. Die weitere Strukturentwicklung hängt wesentlich von der Anzahl der zu bewertenden Eingangsgrößen ab. Von Interesse ist hierbei insbesondere die Anzahl der Verknüpfungsschichten (siehe Bild 92). Als Anhaltspunkt wird in vielen Veröffentlichungen auf die Faustformel verwiesen, für jeweils 8 Eingabedaten eine weitere Analyseschicht einzuplanen [75] [148] [173]. Hingegen ist die Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Schicht von der Komplexität der Abbildung abhängig und muss aufgabenspezifisch bei der Entwicklung der Modelle erprobt werden.

In der Elektronikproduktion liegt der Fokus der Modellbildung auf einem Vergleich zwischen der aktuellen Maschinsituation, den Produktspezifikationen und dem resultierenden Qualitätsniveau. Diese Wechselbeziehung erscheint einfach zu modellieren, da nur drei Bestandteile der realen Welt das künstliche Modell beschreiben. Andererseits wird jede Maschine, jeder Prozess und jedes Produkt durch mehrere Parameter, Störgrößen und Klimafaktoren beeinflusst. Nur wenn all diese Faktoren durch das Modell umschrieben werden, kann eine zuverlässige Bewertung der Prozesse erfolgen.

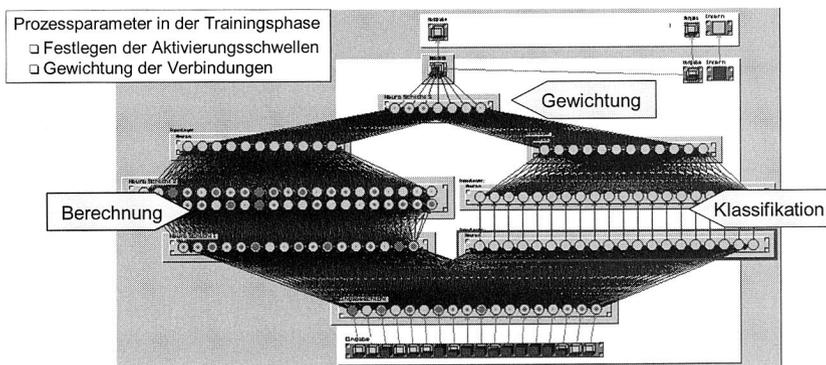


Bild 92: Beispielfhafte Konstruktion eines neuronalen Analysemodells

Die Modellentwicklung wird dabei durch die Abbildungsqualität während der Lernphase verifiziert. Es gilt Modelle so zu entwickeln, dass diese möglichst ohne Fehler die Realität zwischen Eingabedaten und Trainingsvorgaben abbilden. Insbesondere die korrekte Abbildung der Wechselbeziehungen zwischen Störungen und Störungsursachen sind für die spätere Analyseanwendung entscheidend.

Für den Bestückprozess bedeutet dies beispielsweise ein Modell für 38 Datenwerte zu entwickeln. Dies ist auch für neuronale Analysen eine größere Wertemenge. Um trotzdem das Modell in angemessener Zeit trainieren und auch analysieren zu können, wurden drei Parametergruppen gebildet. Es zeigte sich, dass diese Clusterbildung die Generierung des Modellalgorithmus wesentlich vereinfacht. Vergleichbare Optimierungsarbeiten waren auch für die anderen Prozessschritte erforderlich. So wurden während der Entwicklungsphase über 30 Modelle aufgebaut und getestet. Für die Belange der Elektronikproduktion konnten schließlich nur neun Varianten die Anforderungen erfüllen. Die Abbildungsgüte dieser Modelle wurde durch den durchschnittlichen Fehleranteil quantifiziert, der bei jeder der abschließenden neun Varianten unter 6 % lag. In Bild 93 ist die Graphik einer Modellvalidierung dargestellt. Gegenüber dem Trainingsdatensatz beinhaltet dieser zur Verifizierung eingesetzte Analysedatensatz für das Modell nicht bekannte Eingabewerte. Trotzdem lassen sich nur kleine Abweichungen zwischen realen Werten und den berechneten Ergebnissen nachweisen, die aber seitens der Analysequalität nicht relevant sind.

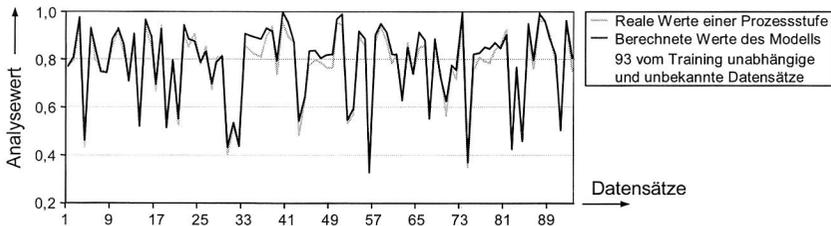


Bild 93: Gegenüberstellung von Prozesswerten mit den berechneten Ergebnissen

Der Aufwand für die Modellentwicklung ist bei neuronalen Modellen nicht zu unterschätzen. Er liegt jedoch mit Sicherheit nicht höher als bei einer aussagekräftigen Analyse mit klassischen Versuchsmethoden. Im Gegensatz dazu muss ein Modell nur einmalig erstellt werden. Danach können die im Training entwickelten Algorithmen fortwährend zur Analyse der Prozesse eingesetzt werden. Zudem sind für die Anwendung keinerlei Erfahrungen im Umgang mit der neuronalen Analysetechnik notwendig.

7.3.3 Anwendung des Moduls zur Prozessanalyse

Für den Aufbau und das Modelltraining stehen am Markt verschiedene Simulationswerkzeuge zur Verfügung. Ihrer Aufgabe entsprechend liegt der Schwerpunkt dieser Programme in der Modellentwicklung. Für die Anwendung bereits fertiger, neuronaler Analysemodelle sind diese Programme zwar ebenfalls geeignet, aber für einen Benutzer ohne Erfahrungen mit dieser Technik nicht funktionell.

Der produktionsnahe Einsatz macht entsprechend eine angepasste Benutzersoftware erforderlich. Die Herausforderungen liegen dabei in einer möglichst einfachen und praxisorientierten Bedienung, verbunden mit einer schnellen Berechnung der Analyseergebnisse. So kann beispielsweise nicht dem Bediener die Bewertung der Analyseergebnisse überlassen werden. Vielmehr muss eine Filterfunktion eine komprimierte Darstellung der Ergebnisse übernehmen. Zur schnellen Auswertung müssen die neuronalen Modelle direkt in das Softwarekonstrukt integriert werden.

Der eingesetzte neuronale Simulationsgenerator „NeuroGraph“ gestattet einen Modellexport, der durch modularartige Klassen des Analysemodells, eine Anwendung unabhängig vom Simulator gestattet. Die Entscheidung zur Anpassung dieses Codes an eine Programmiersprache fiel wegen der Modulararchitektur auf die Programmiersprache „C++“. Hier konnte eine Benutzeroberfläche geschaffen werden und gleichzeitig war eine schnelle Analyse im Hintergrund zu gewährleisten. Schwerpunkt des entwickelten, rechnergestützten Werkzeuges bildet die Verwaltung der unterschiedlichen Modelle, die prozessspezifisch vom Benutzer eingelesen werden können. In Bild 94 ist die Funktionalität der Software strukturiert zusammengefasst.

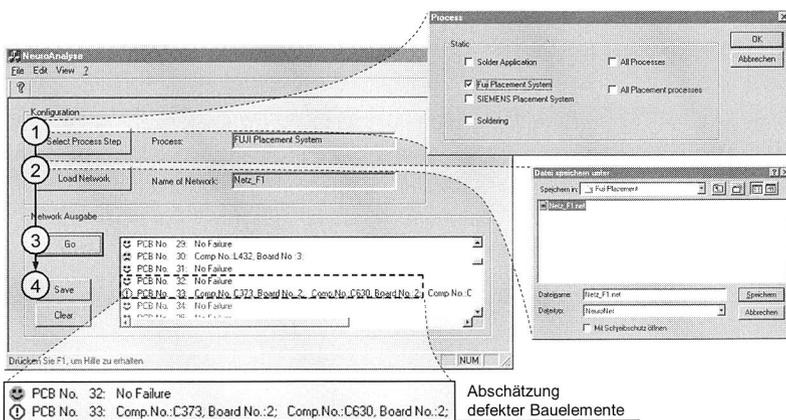


Bild 94: Analysesoftware - Anwendung des neuronalen Modells im Hintergrund

Wie dargestellt, lässt sich die Softwareanwendung in 4 Schritte gliedern. Zuerst muss der zu analysierende Prozessschritt gewählt werden. Es sind die Einzelprozesse Pastenauftrag, Bestücken (abhängig vom Maschinentypen) und Löten implementiert. Daneben kann auch eine Gesamtprozessanalyse durchgeführt werden. Im zweiten Schritt ist das Analysemodell auszuwählen. Anschließend kann die Untersuchung durchgeführt werden. Nach Berechnungszeiten zwischen 3 bis 10 Sekunden wird eine Ergebniszeile ausgegeben. Für Langzeitbetrachtungen und weitere Analysen können die Ergebnisse in das Excelformat konvertiert werden. Der Datenexport umfasst alle im Modell generierten Ergebnisse und kann daher auch für detaillierte Fehlerdiagnosen herangezogen werden.

7.4 Potenziale zur Prozessoptimierung

7.4.1 Diagnose möglicher Prozessfehler

Um die praktische Anwendbarkeit des entwickelten Analysemodells nachzuweisen, wurden in Zusammenarbeit mit einem industriellen Partner umfangreiche Prozessuntersuchungen durchgeführt [62]. Zur Verdeutlichung des Potenzials hinsichtlich Prozessanalyse und Qualitätsbewertung werden im Folgenden ausgewählte Ergebnisse aufgezeigt und deren Diagnose diskutiert.

Wie bereits in den Kapiteln 3 und 4 dargestellt, wird in der Fertigungskette der Elektronikproduktion immer häufiger der Pastenauftrag als der kritische Prozessschritt angesehen. In Verbindung zu den dort ermittelten Ergebnissen galt es insbesondere den Medienauftrag grundsätzlich zu untersuchen. Hier wurde unter anderem die Faktorkombination „Positionskorrektur von Schablone zum Schaltungsträger“ herangezogen. Prozesstechnisch werden bei der Positionskorrektur drei Parameter angepasst. Diese sind die X-/Y-Versatzkorrektur und die Winkelversatzkorrektur. Die erste Analyse konzentrierte sich auf mögliche Effekte durch die Achsenkorrekturen. Hier konnte keine Beeinflussung der Prozessqualität aufgezeigt werden. Im Gegensatz dazu war eine deutliche Veränderung des Qualitätsniveaus bei der Analyse der Winkelverdrehung nachweisbar. Wie in Bild 95 (links) dargestellt, lässt sich ein Optimum bei einer Verdrehung um $1,4^\circ$ belegen. In der Diagnose wurde festgestellt, dass dieser Effekt nicht direkt durch Parametereinstellungen begründbar ist. Auch Störgrößen konnten nicht als Einflussfaktoren nachgewiesen werden. Vielmehr handelt es sich wahrscheinlich um einen systematischen Fehler bezüglich der Nullausrichtung der Schablone.

Die zweite in Bild 95 (rechts) dargestellte Ergebnisgraphik zeigt eine Auswertung bezüglich der Prozessstandzeiten. Die Anlage zum Pastenauftrag arbeitet mit einem geschlossenen Raketkopfsystem. Gegenübergestellt wurden die Maschinenstandzeiten

bei der Prozesssituation Rakelkopf in oberer Position, d.h. nicht auf der Schablone aufgesetzt und der Situation Rakelkopf in unterer Position (auf der Schablone aufgesetzt). Es zeigte sich, dass die Position des Rakel einen wesentlichen Einfluss auf die Prozessqualität hat. Als Ursache kann auf eine stärkere Trocknungstendenz der Lotpaste in der oberen Warteposition geschlossen werden, da der prinzipiell geschlossene Rakelkopf in der oberen Position an der Kopfunterseite offen ist. Bei einer Standzeit von über 30 Sekunden ist gemäß der Analyse mit einer Verschlechterung des Druckergebnisses zu rechnen.

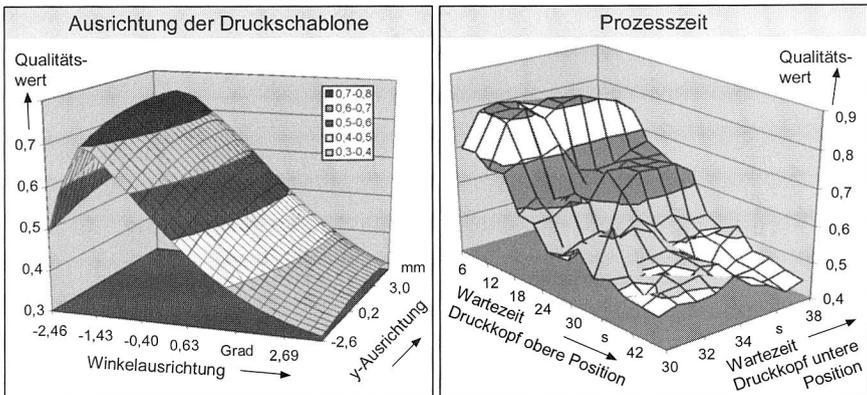


Bild 95: Analyse von Prozessdaten beim Pastenauftrag

Neben dem Pastenauftrag konnten Wirkzusammenhänge auch für die Bauteilbestückung und den Lötprozess ermittelt werden. So ließ sich beim Bestückprozess ein signifikantes Ergebnis den Bestückkopf betreffend darlegen. Die zur Analyse eingesetzte Anlage hatte einen Karussellbestückkopf mit 20 Pinolen, die sequentiell die Bauteilaufnahme und Bestückung übernahmen. Die hauptsächliche Anwendung dieses Anlagentyps liegt in der Verarbeitung einfacher Bauteile bzw. Zweipoler, welche während der Analyse bis zu einer minimalen Größe von CR0402 verarbeitet wurden.

Hierbei ist die Verarbeitung aller Bauteile mit gleich bleibender Qualität entscheidend. Dies betrifft insbesondere die unterschiedlichen Pinolen. Speziell hierfür eignet sich die neuronale Analyse durch die Bewertung des Qualitätsniveaus. Bei der Untersuchung wurden alle anderen Parameter konstant auf einen Mittelwert festgelegt, um nur den Einfluss durch die Bestückpinolen bewerten zu können. Zur Überprüfung des Ergebnisses sind weitere Analysen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen durchgeführt worden. Die Auswertungen ergaben jeweils mit Bild 81 vergleichbare Bewertungen der unterschiedlichen Bestückpinolen. Die Abbildung zeigt, dass drei Pinolen ein

wesentlich geringeres Qualitätsniveau aufweisen. Eine Relation zwischen einem bestimmten Bauteil und einer Pinole ließ sich nicht nachweisen. Die Analyse unterstreicht jedoch, dass statistisch gesehen, häufiger Fehler beim Einsatz dieser Pinolen auftraten. Daraufhin durchgeführte Wartungsarbeiten zeigten Verschmutzungen an einzelnen Bestückdüsen (Nozzle) und bestätigten somit die Analyseergebnisse.

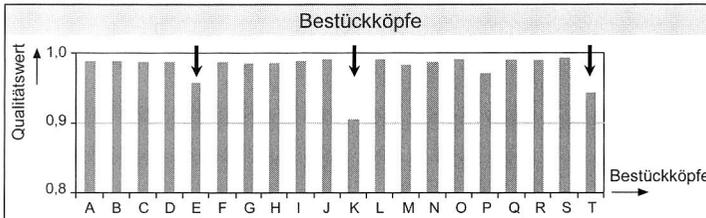


Bild 96: Parameteranalyse am Beispiel eines Karussellbestückkopfes mit 20 Pinolen

7.4.2 Gewichtung der Prozessparameter in der Oberflächenmontage

Neben der Ermittlung optimaler Prozesseinstellungen ist es für die Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion maßgeblich von Interesse, inwieweit die unterschiedlichen Parameter die Prozesse beeinflussen. Der Maschinenbediener könnte sich dann im Wesentlichen auf die kritischen Parameter konzentrieren. Auch hier können neuronale Simulationsmodelle eingesetzt werden.

Basis für die Einflussbewertung bildet die Gewichtungsstruktur der Modellverbindungselemente (Netzverbindungen). Abhängig vom Eingabedatensatz des Analysemodells wird auf diese Weise jeder Parameter einzeln bewertet. Für die Analyse ist es jedoch notwendig, die interne Struktur des Modells aufzubrechen und die Verbindungsgewichte zu analysieren. Durch die Gewichtung der ersten Verbindungsschicht kann so eine Tendenz abgeleitet werden. Anhand des komplexen Aufbaus neuronaler Modelle ist es nicht möglich, die Analyse interner Strukturen automatisch oder mit einem benutzergeführten Werkzeug durchzuführen. Die Gewichtung der Einflussfaktoren wurde also nur auf den Wissensstand nach dem Modelltraining bezogen und einmalig für jedes Modell durchgeführt. Den Pastenauftrag und die Bauteilbestückung betreffend ergaben sich die in Bild 97 dargestellten Diagramme. Alle Faktoren nehmen zweifelsohne Einfluss auf die Prozessqualität, aber gemäß der Auswertung in diesem speziellen Anwendungsfall konnten einzelne Parameter hervorgehoben werden. Beim Pastenauftrag sind dies insbesondere die Faktoren Winkelkorrektur, Maschinenstandzeit im oberen Haltepunkt und beide Rakeldruckwerte. Im Vergleich zu den analysierten Parameterkombinationen in Bild 95 lässt sich der Einfluss auf das Qualitätsniveau, folglich auch in der Parametergewichtung, zeigen.

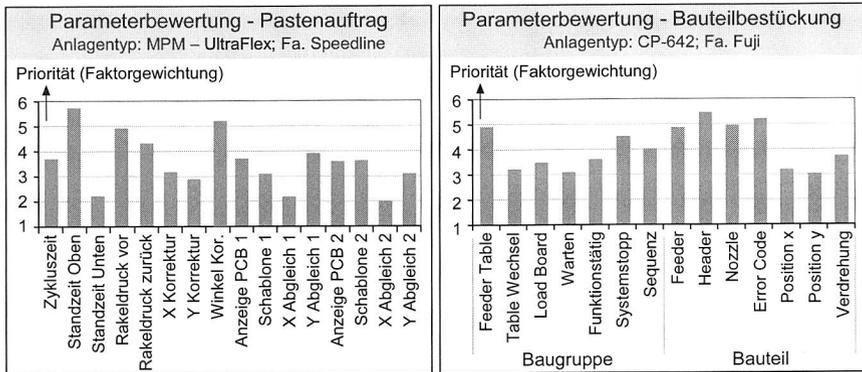


Bild 97: Gewichtung der Prozessfaktoren nach Auswertung des neuronalen Modells

Für die Bauteilbestückung lassen sich Unterschiede in der Parameterbewertung schwieriger ausmachen. Durch die Vielzahl von Faktoren pro Baugruppe ist die Gewichtung in der ersten Analyseschicht noch uneinheitlich. Am Beispiel der untersuchten Anlage CP-642 (Fa. Fuji) stehen Analysefaktoren Feeder-Tisch, Bestückkopf und Fehlercode vorne an. Teilweise konnten dadurch weitere Einflüsse auf die Bestückqualität ermittelt werden.

7.5 Gesamtbewertung des Einsatzpotenzials neuronaler Analysemethoden für die Elektronikproduktion

Die Technologie neuronaler Simulationsmodelle eröffnet für die Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion einen absolut neuen Weg zur Prozessanalyse. Wesentliche Vorteile sind der einfache Einsatz entsprechend aufgebauter Analysemodelle, die schnelle Durchführbarkeit von Analysen und die Einsatzmöglichkeit direkt aus dem Prozess abgenommener Parameter bzw. Prozessinformationen. Durch diese Technik ist es erstmals möglich kurze Regelschleifen zur Prozessoptimierung aufzubauen. So kann der Prüfaufwand verringert und Fehler frühzeitig im Prozess erkannt werden, um diese kosteneffizient nacharbeiten zu können.

Notwendig für den erfolgreichen Einsatz dieser Technik ist eine entsprechende Vorleistung für die Modellgenerierung und das Modelltraining. Hier muss vom Anwender die Analysebasis durch Prozessdatenerfassung und Aufbereitung geschaffen werden. Dies gilt jedoch ebenso für Analysen mit anderen Methoden. Hilfreich für einen effektiven Einsatz neuronaler Analysemodelle ist eine datentechnische Verkettung der Prozesse und Prüfsysteme. Eben hier liegt heute noch die wesentliche Barriere für eine schnellere und bessere Anwendbarkeit dieser vorteilhaften Analysetechnik.

8 Zusammenfassung

Die große Innovationskraft im Bereich elektronischer Baugruppen und Komponenten hat zur Integration dieser in nahezu allen Produktbereichen geführt. Eine erweiterte Funktionsintegration verbunden mit der kontinuierlich fortschreitenden Miniaturisierung erschließen immer neue Einsatzpotenziale, die weltweit für den wirtschaftlichen Erfolg neuer Produkte und Anwendungen stehen. Hierzu zählen auch mechatronische Systemlösungen, die in den letzten Jahren durch die Kombination von elektronischen mit mechanischen Komponenten eine umfassende Flexibilitätssteigerung in den Anwendungen eröffneten. Darauf aufbauend ergeben sich neue Ansätze in der Nanotechnologie. Dies führt beispielsweise durch nanoskalige Bauelemente zu erheblichen Herausforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik. Daher ist es entscheidend, die Elektronikproduktion mit dem Ziel zuverlässiger Baugruppen zu beherrschen, um den zukünftigen technologischen Anforderungen begegnen zu können. Dies spiegelt sich auch im zentralen Kundenanspruch nach zuverlässigen und damit funktionstüchtigen Produkten wider, welcher sich auf die gesamte zu erwartende Lebensdauer bezieht. Nur wenn die neuen Technologien auch mit dem Grundsatz der Produktzuverlässigkeit korrelieren, ist ein weiterer wirtschaftlicher Erfolg zu erwarten.

Nachdem die Produktqualität direkt durch die Produktion und deren Eingangskomponenten bestimmt wird, gilt es Erkenntnisse, Methoden sowie Strategien in der Qualitätssicherung zu ermitteln, die zu einer zuverlässigen Baugruppenfertigung führen. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Zielsetzung im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte verfolgt, deren gemeinsame Ausrichtung prozessbezogen bzw. auch strategisch auf der nachhaltigen Verbesserung von Qualität und Zuverlässigkeit bei der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen lag.

Daher wurde zu Beginn der Untersuchungen die Eingangsgröße „Verbindungsmedium“ unter dem Gesichtspunkt alternativer Legierungskonfigurationen bewertet und hinsichtlich der unterschiedlichen Verarbeitungseigenschaften gegenübergestellt. Ein Schwerpunkt lag unter anderem auf der Ermittlung möglicher Qualitätsschwankungen, die durch zeitlich diskontinuierliche Verarbeitung der Verbindungsmedien hervorgerufen werden. Es konnten konkrete zeitliche Grenzen ermittelt werden, deren Berücksichtigung in der Produktion Fehler und Verarbeitungsprobleme vermindern. So wurde ebenfalls dargestellt, dass speziell für bleifreie Medien die Einhaltung der Vorgaben entscheidend ist, da diese durch grundsätzlich schlechtere Benetzungseigenschaften empfindlicher auf längere Verarbeitungszeiten reagieren.

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde der Pastenauftrag, der laut Studien für die Mehrzahl von Produktionsfehlern in der Elektronikproduktion verantwortlich ist, in der

Wirkung auf die sich ausbildenden Lotdepots analysiert. Nachdem viele Fehler durch unzureichendes Lotvolumen zu erklären sind, wurde der technologische Ansatz mehrstufiger Schablonen grundlegend untersucht. Neben der Ausbildung entsprechender Lotdepotformen und Volumengrößen standen auch Designrichtlinien im Vordergrund der Analysen. Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass sich die Technologie „Stufenschablone“ für hochintegrierte Baugruppen anbietet. Einerseits liegt dies am positiv zu bewertenden Auftrag bauteilspezifischer Lotmengen, andererseits an den nur geringfügigen Designeinschränkungen durch die Stufenübergänge. Ergänzt wurden die Untersuchungen durch Analysen alternativer Öffnungsgeometrien bei klassisch planaren Schablonen.

Mit der Ausrichtung – Qualität und Zuverlässigkeit in der Elektronikproduktion – nachhaltig zu verstärken, kommt der Baugruppeninspektion eine entscheidende Stellung zu. Nachdem Fehler aus technologisch-wirtschaftlichen Gründen nicht auszuschließen sind, sollten Qualitätsmängel früh im Produktionsprozess möglichst ohne Fehlerschlupf bzw. Pseudofehler ermittelt werden. Im Rahmen umfangreicher Untersuchungen konnte eine Matrix des Inspektionseinsatzes entwickelt werden, die anwendungsspezifische Prüfstrategien eröffnet. Eine Inspektionsstrategie bietet aber nur produktionstechnische Potenziale, wenn eine angepasste Nacharbeit die Fehler näher spezifiziert und auch beheben kann. Aufbauend auf grundlegenden Betrachtungen der technologischen Alternativen konnten kritische von eher beherrschten Teilprozessen in der Nacharbeit unterschieden werden. Die so adressierten Prozesse der Anschlussflächenvorbereitung und des Bauteileinlötens wurden durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen analysiert. Neben neuen Lösungsansätzen konnten auch Vorgaben zur Prozessführung angegeben werden, die nachweislich zur ganzheitlichen Optimierung dieses Prozesses beitragen.

Gemessen an der gesamten Prozesskette der Elektronikproduktion sind weitere Qualitätsverbesserungen nur durch prozessübergreifende Betrachtungen möglich. Dazu wurden Strategien zur Prozessdatenanalyse konzipiert und in einem rechnergestützten Werkzeug umgesetzt. So konnten Fehler anhand kontinuierlich aus den Produktionsanlagen ausgelesener Daten zeitnah ermittelt und eine erste geschlossene Regelschleife in der Elektronikproduktion aufgebaut werden.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten konnte ein maßgeblicher Beitrag zu Qualitätsverbesserung und Zuverlässigkeitssteigerung in der Aufbau- und Verbindungstechnik geleistet werden. Dabei wurden elementar wichtige Erkenntnisse zur Prozessverbesserung vorgestellt und neue Prozessansätze gezeigt, die auch bei zukünftigen Anforderungen eine zuverlässige Elektronikproduktion erschließen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Ahrens, T.: Automatische optische Inspektion in der Fertigung elektronischer Baugruppen. Vortrag zur Sitzung der FED Regionalgruppe Nürnberg, Auerbach, 04/2002
- [2] Ahrens, T.; Schimanski, H.; Pontow, J.; Prochota, D.: Bleifreies Reparaturlöten – Lötprofile an erster Stelle. Kolloquium „Bleifreies Löten“, DVS Bericht Band 227, DVS Verlag, Düsseldorf, 12/2003
- [3] Albrecht H.-J.: Zuverlässigkeit Pb-freier Elektronikbaugruppen. GMM-Fachbericht 44, "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", VDE Verlag Berlin, 2/2004, S. 35-41
- [4] Ammon, G.; Andretzky, P; Blosssey, S.; Bohn, G.; Ettl, P.; Habermeier, H.; Harand, B.; Häusler, G.: KORAD - new modifications of white light interferometry for large object shape acquisition. Proceedings of the EOS Topical Meeting on Optoelectronics Distance Measurements and Applications, 1997
- [5] Ayoub, G.: Statistical Process Control evolves into closed loop, real-time SPC. Global SMT & Packaging, Trafalgar Publications Ltd., Glastonbury, UK, 4/2001
- [6] Barajas, L; et al.: A closed-loop control algorithm for stencil printing. Proceedings of SMTA Congress, Third Annual Advanced Technology Symposium, Boston, USA, 6/2002
- [7] Basaran, C.; Ye, H.; Johnson, R.; et al: Moiré interferometry for inspecting BGA solder ball - pad interfaces for manufacturing defects. Global SMT & Packaging, Trafalgar Publications Ltd., Glastonbury, UK, 4/2002
- [8] Baur, A.; Händel-Mattes, G.: Die richtige Route finden. Per Landkarte vom Element zum prozessorientierten Qualitätsmanagement mit ISO 9000:2000. Fachzeitschrift Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), Carl Hanser Verlag München, 4/2000, S. 417-422
- [9] Bechtold, M.: Managementsysteme in der Praxis - DIN EN ISO 9001:2000 und das Prozessmodell. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 3/2000, S. 481-485
- [10] Beine, H.: Schablonendrucktechnik: Neuentwicklungen im Detail. Productronic – Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 5/1999, S. 16-18
- [11] Beine, H.: SMT-Druckschablonen in Lasertechnik. Productronic – Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 5/6/2001, S. 26-27

- [12] Beitinger, G.: Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg 1999
- [13] Bishop, M. C.: Neural Networks for Pattern Recognition. Clarendon Press, Oxford, 1995
- [14] Cannon, M.: Bleifreie Erstmuster im Visier. Productronic – Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 4/ 2004, S. 38-42
- [15] Coleman, W. E.: Stencil Design and Performance for Flip-Chip / Wafer Bumping. Proceedings of APEX IPC Printed Circuits Expo, Anaheim, 2/2004
- [16] Czaplicki, B.: Automation and conductive heating are essential for effective rework of tiny 0201s and beyond. CIRCUITS ASSEMBLY, CMP Media Inc., Manhasset, NY, USA, 4/2003
- [17] Dalrymple, T., W.; Milkovich, C.: Rework process for microBGA and CSP components. Surface Mount Technology Magazine v14, July 2000
- [18] Diatcu, E.; Armas, I.: Quality and Reliability Management of the Integrated Technological Process in Electronics and Microelectronics, International Spring Seminar on Electronics Technology, Dresden 1999
- [19] Diersing, T.; Gailing, E.; Holzmann, R.; et al.: Einfluss von bleifreiem Lot auf den Test. GMM-Fachbericht 44, "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", VDE Verlag Berlin, 2/2004, S. 251-264
- [20] Directive 2002/95/EC: Directive of the European Parliament and of the Council on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). Official Journal of the European Union, Brussels, 01/2003
- [21] Directive 2002/96/EC: Directive of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal of the European Union, Brussels, 01/2003
- [22] Doyle D.: Challenges for Second Generation Automated Optical Inspection (AOI) Solutions. Proceedings of NEPCON Shanghai SMTA conference, Shanghai, 4/2003
- [23] Egger, H.: Traceability in der Elektronikfertigung. VTE Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik, DVS-Verlag, Düsseldorf, 10/2003

- [24] Eisenbarth, M.: Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 2003
- [25] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.; Schmitt, P.: Reliable 2-D X-Ray Inspection by Intelligent Pad Design for BGA and CSP Packages. IEEE, CPMT, Area Array Packaging Technologies, 4th International Workshop on Flip Chip and Ball Grid Arrays, Berlin, 4/2002
- [26] Engelhardt, M.; Fuhl, M.: AXI- Systeme - richtig ausgewählt. EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 11/2002, S. 48-50
- [27] Esterlaken, E.: The Characterization of Printing Properties of Solder Paste, 3. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, Mallorca, 2000
- [28] Farrel, A.: The Internet and Its Protocols. Morgan Kaufmann, 2004
- [29] Feldmann, K.: Assembly and disassembly of micro-mechatronic products. Proceedings of TMCE 2003 (Tools and Methods of Competitive Engineering), Lausanne, 2003
- [30] Feldmann, K.; Boiger, M.; Krimi, S.: Bestückungssysteme für räumliche Schaltungsträger. SFB 356 - Produktionssysteme in der Elektronik. Bericht des Forschungsverbundes - Forschungszeitraum 1999-2001, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 267-304
- [31] Feldmann, K.; Felbinger, C.; Feuerstein, R.: Götz, K.,: Modell zur prozessbegleitenden Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion. Aus Feldmann, Geiger (Hrsg.): Produktionssysteme in der Elektronik, Meisenbach Verlag GmbH, Bamberg 1999, S. 307-346
- [32] Feldmann, K.; Felbinger, C.; Reichenberger, M.; Wölflick, P.: Process Development and Quality Assurance of Flip-Chip for Optimized Process Results. Annals of the German Academic Society for Production Engineering WGP, Volume IX, Issue 1, Berlin, 2002, pp. 33-38
- [33] Feldmann, K.; Feuerstein, R.: Process Optimization for Assembly of Advance Packages at optimal Quality and Costs. Proceedings of Nepcon West, Anaheim, 2000
- [34] Feldmann, K.; Holzmann, R.: Leitleben und Lötten. S. 640-655, Ehrenstein, G.W. (Hrsg.), Kunststoff – Verbindungstechnik, Carl Hanser Verlag, München, 2004

- [35] Feldmann, K.; Holzmann, R.: Prozessintegrierte Qualitätssicherung durch zielgerichtete Regelungsstrategien. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, 4/2003, Bad Saulgau, S. 635-639
- [36] Feldmann, K.; Holzmann, R.: Rework Process Development and Reliability Analysis for Quality Improvement in Electronics Production. Annals of the German Academic Society for Production Engineering WGP, Volume IX/2, Issue 2, Berlin, 2002, S. 127-132
- [37] Feldmann, K.; Holzmann, R.; Felbinger, C.: System zur prozessbegleitenden Qualitätssicherung bei feineren Strukturen. SFB 356 - Produktionssysteme in der Elektronik. Bericht des Forschungsverbundes - Forschungszeitraum 1999-2001, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 349-387
- [38] Feldmann, K.; Holzmann, R.; Kunze, A.: Rationalisierungspotenziale und Produktionskonzepte für elektronische Baugruppen. media mind GmbH & Co. KG, 2004
- [39] Feldmann, K.; Neuhoff, H.: Internetbasierte Telediagnose zur effizienten Betreuung von Produktionssystemen. VDI-Seminar: Fertigungsautomatisierung im Wandel, Stuttgart, 02/2001
- [40] Feldmann, K.; Zhou, Y.; Christoph, F.; Schlögl, W.: Integrated Simulation in Development of Electronics Production Facilities based on PDM Systems. Proceedings of the 3. International Conference on Electronic Commerce Engineering (ICECE2003), Hangzhou, China, 10/2003
- [41] Feuerstein, R.: Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementtechnologien in die Flachbaugruppenfertigung. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 2001
- [42] Fishburn, J.: Colour highlight AOI – the bigger picture. Omron, Global SMT & Packaging, Trafalgar Publications Ltd, Glastonbury, UK, 11/2003, S. 24-25
- [43] Frank, U. E.: Zwei in einem. System kombiniert 2D- und 3D-Röntgeninspektion. Fachzeitschrift Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), Carl Hanser Verlag München, 9/2003, S. 919-921
- [44] Franke, C.; Ciupek, M.; Seliger, G.: Computer Aided Rough Disassembly Sequence Design (CARDIS). In: Proceedings of IPAS'2003 International Precision Assembly Seminar. Bad Hofgastein, Österreich, 3/2003
- [45] Frölich D., Martin, A.: Technisches Datenblatt zur stufengeätzten Ausführung von Schablonen für die SMT Technik. Fa. Ätztechnik Herz GmbH & Co., Epfendorf, 2002

- [46] Gailing, E.; Holzmann, R.; et al.: Einfluss von bleifreiem Lot auf den Test elektronischer Baugruppen – Teil1 und 2. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 10,11/2003, S. 1527-1531,1766-1770
- [47] Götz, K.: Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach-Verlag, Bamberg 1998
- [48] Handke, R.: Verborgene Fehler aufspüren. Hochauflösende Röntgenprüfung. Fachzeitschrift Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), Carl Hanser Verlag München, 3/2004, S. 47-49
- [49] Hanreich, G.; Wolter, K.-J.; Nicolocs, J.: Rework of Flip-Chip Populated PCBs by Laser Desoldering. Proceedings of ISSE, Calimanesti-Caciulata, Rumänien, 5/2001
- [50] Hansen, P.: Methoden für Boundary-Scan. F + M Magazine Heft 12, Carl Hanser Verlag, München 1998, S. 894-896
- [51] Heimsch, R.: Latest Advancements in Screen Printing Technology. OnBoard Technology, On Publishing SA, Bruxelles, 6/2004, pp. 20-23
- [52] Herzog, T.; Berek, H.; Georgiev, G.; Schubert, G.: Zuverlässigkeit bleifreier Lötverbindungen und Verarbeitbarkeit im SMT-Prozess. GMM-Fachbericht 44, "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", VDE Verlag Berlin, 2/2004, S. 173-180
- [53] Hobby, A.: Die wahren Ursachen. EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 11/2001, S. 30-32
- [54] Holzmann, R.: Einflussgrößen und Qualitätssicherung im Nacharbeitsprozess bei feineren Strukturen. Tagungsunterlagen zum FAPS TT-Seminar, Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Erlangen, 12/2001
- [55] Holzmann, R.: Ganzheitliche Technologiebewertung zum elektrisch leitfähigen Kleben. Tagungsunterlagen zum Fachseminar „Alternative Verbindungstechnik“, Rahn-Seminare, Fa. SEHO, Kreuzwertheim, 03/2002 und ZVE, Oberpfaffenhofen, 03/2003
- [56] Holzmann, R.: Optimierungspotentiale im Pastenauftrag durch Modifikation der Schablonengeometrie. Tagungsunterlagen zum FAPS TT-Seminar, Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Erlangen, 12/2002

- [57] Holzmann, R.: Zuverlässigkeitsanalyse bleifreier Baugruppen nach Temperaturwechselbelastung. Tagungsunterlagen zum BMK Technologieforum, Augsburg, 10/2004
- [58] Holzmann, R.; Enser, W.; Wölflick, P.: Trends und Entwicklungen in der Fertigung mechatronischer Schaltungsträger. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, 1/2003, Bad Saulgau, S. 260-266
- [59] Holzmann, R.; Feldmann, K.: Ganzheitliche Analyse von Anwendungspotenzialen und Technologiegrenzen mehrstufiger Druckschablonen beim Pastenauftrag. GMM-Fachbericht 44, "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", VDE Verlag Berlin, 2/2004, S. 349-354
- [60] Holzmann, R.; Feldmann, K.: Qualitätsoptimierung des Nacharbeitsprozesses durch die Analyse des Zuverlässigkeitsverhaltens alternativer Reparaturstrategien. GMM-Fachbericht 37, "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", VDE Verlag, Berlin, 2/2002, S. 295-302
- [61] Holzmann, R.; Feldmann, K.; Schaller, A.: Accompanying Quality Assurance with intelligent process coordination. Proceedings of Surface Mount Technology Association (SMTA 2001), Session Process Control, Chicago, USA, 10/2001
- [62] Holzmann, R.; Schaller A.: Process Quality Improvement using Neural Simulation Models. Poster session Hermes Symposium, Ft. Lauderdale, USA, 2000
- [63] Holzmann, M.: AOI in a High-Mix/Low-Volume Environment. Circuits Assembly, The Journal for Surface Mount and Electronics Assembly, UP Media Group, Ausgabe Vol. 15, No. 6, Atlanta, USA, 2004, pp. 33-35
- [64] Hwang, J. S.: Environment-friendly Electronics: Lead-free Technology. Electrochemical Publications LTD, Port Erin, Great Britain, 2001
- [65] IEEE 90: Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries. New York, 1990.
- [66] IPC-7525: Stencil Design Guidelines. IPC – Association Connecting Electronics Industries, Northbrook, IL, USA, 5/2000
- [67] IPC-7711: Rework of Electronic Assemblies. IPC – Association Connecting Electronics Industries, Northbrook, IL, USA, 2/1998
- [68] IPC-A-610C: Acceptability for Electronic Assemblies. IPC – Association Connecting Electronics Industries, Northbrook, IL, USA, 1/2000

- [69] IPC-SM-782A: Surface Mount Design and Land Pattern Standard. IPC – Association Connecting Electronics Industries, Northbrook, IL, USA, 4/1999
- [70] IPC-SM-785: Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments. IPC – Association Connecting Electronics Industries, Northbrook, IL, USA, 4/1999
- [71] Jansen, J.: Hochpräzise Druckschablonen für komplexe Baugruppen in Mischbauweise mit Ultra-Fine-Pitch Strukturen. Tagungsunterlagen zum FAPS TT-Seminar, Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Erlangen, 12/2001
- [72] Jess, J.: Additivschablonen für Ultra-Fine-Pitch-Lotpastendruck mit unterschiedlichen Pastenhöhen. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 1/2002, S. 47-53
- [73] Jess, J.: Schablone für mehrere Pastenhöhen. EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 5/2002, S. 36-38
- [74] Johnson, A.; Fabian, K.; Boyes, B.: Stencil Printing Basics Equipment, Material and Process Considerations. Cookson Electronics Assembly Materials, 2003
- [75] Kanstein, A.: Possibility Neural Networks for Process Modeling. Dissertation an der Universität Dortmund, VDE-VERLAG, Berlin, 1999
- [76] Kay, R.; Desmulliez, M.; Stoyanov, S.; Glinski, G.; et al.: Advanced microsystems assembly using screen printing technology. Weiterentwickelte Mikrosystem-Montage auf der Grundlage von Siebdruckverfahren. Proceedings of Micro Systems Technologies 2003, International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components, München, 10/2003
- [77] Kelley, R.; Clark, D.: 3-D Solder Paste Inspection, SMT - Surface Mount Technology, PennWell Corp., Tulsa, USA, 1/2001
- [78] Klein Wassink, R. J.: Weichlöten in der Elektronik. Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1992
- [79] Klein Wassink, R. J.; Verguld, M.: Manufacturing Techniques for Surface Mounted Assembly. Electrochemical Publications LTD, Port Erin, Great Britain, 1995
- [80] Koenen, C.: Mehr als eine Stufenschablone. EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 9/2003, S. 16

- [81] Krems, K.: Auftrag von Lotpasten und SMT Klebstoffen mittels geschlossenen Transfersystemen. Tagungsunterlagen zum FAPS TT-Seminar, Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Nürnberg, 12/2003
- [82] Krippner, P.; Beer, D.: AOI Prüfpositionen im Vergleich (Teil 1/2). Productronic – Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 10 & 11/ 2004, S. 52-54 & 92-93
- [83] Lange, B.: IC-Leiterplatten- und Schablonendesign. Productronic – Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 7/8 2002, S. 19-20
- [84] Laphen, K.: Components Catalog. Practical Components, Los Alamitos, CA, USA, 2004
- [85] Lasky, R. C.: Real Time Costing as a Tool to Improve Profitability, Apex 2000, Long Beach, California 2000
- [86] Lau J. H.: Solder Joint Reliability: Theory and Applications. Verlag Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- [87] Lea, C.: A Scientific Guide to Surface Mount Technology. Electrochemical Publications Limited, 1988
- [88] Ledden, J. W.: Test Strategies for the Modern PCB Manufacturer. Proceedings of Nepcon West 2000, Anaheim California 2000
- [89] Ließ, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, München, 2002
- [90] Liukkonen, T.; Tuominen A.: Decreasing variation in paste printing using statistical process control. Microelectronics Reliability, Volume 43, Issue7, Elsevier Group plc, London, UK, 7/2003, pp. 1157-1161
- [91] Maiwald, W. J.: Lötfehler – Metallografische Untersuchungen über Ausfälle von Weichlotverbindungen mit geringen Lotmengen. Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2001
- [92] Manassis, D.; Patzelt, R.; Ostmann, A.: Stencil printing technology for 100µm flip chip bumping. Global SMT & Packaging, Trafalgar Publications Ltd., Glastonbury, UK, 2/2004, pp. 10-14
- [93] Martin, B.: Qualitätsmanagement für den Reparaturprozess von Baugruppen. VTE, Heft 2, S. 72-75, DVS-Verlag, Berlin 1999
- [94] Martin, B.: Rework-Station für Boards mit Advanced-Packaging-Komponenten, Praxisnahe Baugruppen-Reparatur. EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Heft 4/5/2002, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 2002

- [95] Masing, W.: Handbuch Qualitätsmanagement. Carl Hanser Verlag, München, 1999
- [96] McCall, P.: Process Considerations when Reworking Area Array Packages. Proceedings of Nepcon West Conference, Anaheim, CA, USA, 2000
- [97] McTernan, B.: In Search of Zero Defects VI. Electronic Production, Vol. 29 Issue 1 January 2000, pp. 13-14
- [98] Meyer, H. W.: Fahrer bewerten Elektronik trotz Pannenanfälligkeit positiv. VDI nachrichten, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Ausgabe 14.05.2004, S. 14
- [99] Meyna, A.; Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, Quantitative Bewertungsverfahren. Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [100] Michels, M.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Nürnberger, A.: Fuzzy-Regelung. Springer Verlag, Berlin, 2002
- [101] Miller, D. S.: Yield Enhancement Solutions with AOI. SMT - Surface Mount Technology, PennWell Corp., Tulsa, USA, 5/2004, pp. 60-64
- [102] Montgomery, D. C.: Introduction to Statistical Quality Control. 4th ed., Wiley Verlag, New York, USA, 2000
- [103] Moylan, B.: Surface Mount Rework Techniques. OK International Ltd., Hampshire, 2004
- [104] Moser, K. H.: Technologiebroschüre – SMT-Schablonen. Fa. Koenen GmbH, Ottobrunn, 2002
- [105] Müller, W.; Müller J.-U.: Löttechnik. DVS Verlag, Düsseldorf, 1998
- [106] N.N.: Marktzahlen nach Segmenten – Elektronische Baugruppen. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Frankfurt, 2004
- [107] N.N.: Qualitätsrichtlinien für Lieferanten. Firma Webasto, Stockdorf, 10/2003
- [108] N.N.: General Information on Solder Paste. Koki Company Limited, Tokyo, Japan, 2004
- [109] Naugler, D.: Thermal Process Development for Rework Using Auto Profile Software. Nepcon West 2000, Anaheim, CA, USA, 2000
- [110] Neues, A.: SMT – Prozessqualifizierung, Notwendiges über AOI & Co hinaus. Productronic – Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 02 / 2001

- [111] Niedermayer, G.; Wege, S.: Qualifizierung von Lotpasten anhand ihres Verhaltens im Reflowprozess. VTE Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik, DVS-Verlag, Düsseldorf, 8/2001, S. 220-223
- [112] Niermeyer, T.: 3D-Pasteninspektionstechnologie. In-Line fähig, In-Line notwendig. Vergleich 2D-3D Pasteninspektion. Tagungsunterlagen zum Fachseminar Inspektion in der Baugruppenfertigung, Fraunhofer ISIT, Itzehoe, 4/2004
- [113] Nolting, F.: Patchwork im Schablonendruck. EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 4/2001, 46-49
- [114] Norris, M.: Qualitätssicherung durch Prozessinspektion in der SMT. Productronic – Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 08 / 2000, S. 33-36
- [115] Nüchter W.: Anforderungen und Methoden für die Freigabenerprobungen hochbelasteter Baugruppen. GMM-Fachbericht 44, "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", VDE Verlag Berlin, 2/2004, S. 281-286
- [116] Oppermann, M.; Sauer, W.; Kaiser, G.: Qualitätskostenoptimierung in der Elektronikproduktion. Tutorial zum Kongress „SMT/HYBRID/PACKAGING“, Nürnberg, 2002
- [117] Owen, M.; Hawthorne, J.: Process Control for Solder Paste Deposition. Session Process Control, Proceedings of Surface Mount Technology Association (SMTA 1999), San Jose, California 1999
- [118] Pandher, R. S.; Shea, C.: Optimizing Stencil Design for Lead-free SMT Processing. Proceedings of Surface Mount Technology Association (SMTA 2004), Session Process Control, Chicago, Illinois, 10/2004
- [119] Pape, U.; Ahrens, T.; Wege, S.: Einfluss der Prozessparameter auf die Porenbildung. GMM-Fachbericht 44, "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", VDE Verlag Berlin, 2/2004, S. 361-366
- [120] Paproth, A.; Wolter, K.-J.: Model of Process Capability of Solder Paste Printing. Session SMT Manufacturing and Assembly, SMTA 1999, San Jose, California, 1999
- [121] Patelay, W. et al.: EPP Spezial, Sieb- und Schablonendruck, 6/2001, Konradin Verlagsgruppe
- [122] Pawelka, H.: Verarbeitung und Lagerung dispensfähiger Lotpaste. EPP Elektronik Produktion & Prüftechnik, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, Heft 6/7, 2002

- [123] Peck, D. J.: The Selection Process for BGA Rework Systems. Proceedings of Nepcon West 2000, Anaheim, USA, 2000
- [124] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement, Strategien, Methoden, Techniken. Carl Hanser Verlag, München 2001
- [125] Pfeifer, T.; Schmitt, R.; Münnich, R.: Produkt- und Prozessqualität - Prüfmittelmanagement und Prüfmittelüberwachung. VDI-Berichte 1727, VDI Verlag Düsseldorf, 2002, S. 5-12
- [126] Ponischil, J.: Quality Assurance Agreement (QAA) / Qualitätssicherungsvereinbarung (QSV). Firma ZF Sachs AG, Schweinfurt, 08/2003
- [127] Poschmann H.: Etwas Entschärfung, aber keine Entwarnung: Entwurf der deutschen Umsetzung von WEEE und RoHS erschienen. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 4/2004, S. 650-653
- [128] Prasad, R. P.: Surface Mount Technology. Principles and Practice. 4th printing, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Niederlande, 2000
- [129] Prasad, R. P.: Solder Paste Printing Process and Equipment, SMT - Surface Mount Technology, PennWell Corp., Tulsa, USA, 4/2001
- [130] Ragland, T.: Test Effectiveness: A Metric for Comparing Test Equipment and Test Processes. Proceedings of Surface Mount Technology Association (SMTA 2001), Session Process Control, Chicago, USA, 10/2001
- [131] Rahn, A.: Bleifrei löten, Ein Leitfaden für die Praxis. Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2004
- [132] Reddy, M.S.; Wong, L.T.; Gill, G.; Raj S.: AOI Experience: In A Contract- Manufacturing Factory. OnBoard Technology, On Publishing SA, Bruxelles, 2/2003, pp. 30-33
- [133] Reichenberger, M.: Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT). Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 2001
- [134] Reichl H.: Direktmontage. Handbuch über die Verarbeitung ungehäuster ICs. Springer Verlag, Berlin, 1998
- [135] Restle, J.: Optimierung der Weißlichtinterferometrie für die Vermessung zylindrischer Objekte, Fachzeitschrift TM – Technisches Messen, Oldenbourg Verlag, München, 10/2003, S. 482-488

- [136] Riemenschneider, M.: Vermessung von Oberflächen in hoher Auflösung. Fachzeitschrift Qualität und Zuverlässigkeit, Carl Hanser Verlag, München, 04/2002, S. 418-420
- [137] Ries, B.: New Advances in AOI Technologies. SMT - Surface Mount Technology, PennWell Corp., Tulsa, USA, 1/2001, pp. 62-66
- [138] Rinnagl, M.; Holzmann, R.; Eisenbarth, M.: Arbeitskreis Qualitätsmanagement. SFB 356 - Produktionssysteme in der Elektronik. Bericht des Forschungsverbundes - Forschungszeitraum 1999-2001, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 477-482
- [139] Rinne, H.; Mittag*, H. J.: Statistische Methoden der Qualitätssicherung. Carl Hanser Verlag, München, 1991
- [140] Ross, W. M.; Giovanni, L.; Pole-Baker M.: A Comprehensive Guide to the Design and Manufacture of Printed Board Assemblies. Volume 1 - Components and Assembly, Volume 2 - Manufacture, Quality Assurance and the environment, Electrochemical Publications Limited, Isle of Man, GB, 1996
- [141] Rowland, R.: Stencils: foiled again! SMT - Surface Mount Technology, PennWell Corp., Tulsa, USA, 5/2000, pp. 7-8
- [142] Sauer, W.: Prozesstechnologie der Elektronik, Modellierung, Simulation und Optimierung der Fertigung, Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [143] Scheel, W.: Baugruppentehnologie der Elektronik. Montage. Verlag Technik, Berlin, 1999
- [144] Seliger, G.; Basdere, B.: Disassembly Factories for Electrical and Electronic Products To Recover Resources in Product and Material Cycles, Journal of Environmental Science & Technology, American Chemical Society, Vol. 37, Issue 23, 12/2003, Washington, USA, pp. 5354-5362
- [145] Sentker, A.; Krauter, R.: Innovationen in Deutschland. DIE ZEIT, Zeitverlag Gerd Bucerius, Hamburg, Ausgabe 26, 2004
- [146] Schmidberger, E.; Neher, J.: Machbar: fehlerfreie Produktion, Mit neuronalen Netzen zyklische Produktionsprozesse regeln. Fachzeitschrift Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), Carl Hanser Verlag München, 2/2004, S. 67-68
- [147] Scholz, O.; Eisenbarth, M.; Hanke, R.; Bigl, T.; Schmitt P.: „In-situ realtime x-ray quality assessment of BGA and μ BGA connections during soldering“, Proceedings SPIE 8th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, San Diego, March 2003

- [148] Schöneburg, E.: Industrielle Anwendung Neuronaler Netze, Verlag Addison-Wesley, München, 1993
- [149] Sellhorst, M.: Kohärenzradar – ein optischer 3D-Sensor mit einer Genauigkeit von 1 µm. Ergebnisbericht zum Förderprojekt 13N6667 (BMFT), Info-Börse Laser, VDI Technologiezentrum physikalische Technologien, Düsseldorf, 1999
- [150] Shea, C.; Moloznik, B.; Hemmelgarn, D.: Printing and Profiling Fine Feature Devices. Proceedings of APEX IPC Printed Circuits Expo, Anaheim, 3/2003
- [151] SMEMA 5: Screen Printing Terms and Definitions. IPC SMEMA COUNCIL – Surface Mount Equipment Manufacturers Association, IL, USA, 11/2000
- [152] Spliethoff, F.: µScan - der Lösungsansatz. Tagungsunterlagen zum 3. SMT Symposium Nürnberg, 1999
- [153] Spraul, M., et. al.: Comparison of lifetime predictions with 3D Finite Element models of a high density flip chip without underfill on LTCC, Proceedings of Eurosime, Aix-en-Provence, 2003
- [154] Stein, A.: ISO 9000:2000 ff.: Erste Anwendungserfahrungen. Bundesverwaltungsamt, Referat VIII/1, Köln, 2003
- [155] Stobbe, I.; Schrank, K.; Weickardt, C.; Griese, H.; Reichl, H.: Reuse through In-House-Repair - Quality Assured Disassembly of Electronic Boards and Components. SFB 281 - Colloquium e-ecological manufacturing, 27-28.03.2003, Verlag uni-edition GmbH, Berlin, 2003
- [156] Tanaka, H.; Aoki, Y.; Katayanagi H.: Evaluation results on reliability of lead-free solder, ESPEC Technology Report No. 11, Tabai Espec Corp., Osaka, Japan, 2001, pp 9-18
- [157] Tiggelen-Aarden, v. I.: Kosteneffizientes Testverfahren zur QS von Lotpasten – Teil 1., Productronic – Fachzeitschrift für Elektronik-Fertigung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 10/2003, S. 18-20
- [158] Verma, A.: Optimising test where ICT access is limited. Printed Circuit Europe, Conference Service srl., Bologna, Italy, No. 30, 10/2002, pp. 26-29
- [159] Wagner, Th.: Prozesskennzahlen im Griff. Fachzeitschrift Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), Carl Hanser Verlag München, 8/2000, S. 1000-1002
- [160] Wallace, R. B.; Murthy, D. N.: Reliability. John Wiley & Sons, Inc., Wiley Inter-Science, Hoboken, NJ, USA, 5/2000
- [161] Wang, P. P. E.: Rework Process Development and Solder Joint Analysis for Fine Pitch Connectors, Apex 2000, Long Beach, California 2000

- [162] Wege, S.; Lauer, Th.: Erfahrungen zum bleifreien Lötten im ZVE. Tagungsunterlagen zum ZVE-Technologieforum, Der Lötprozess mit bleifreien Loten, Oberpfaffenhofen-Weßling, 03/2004
- [163] Welden, T.: Optimised SMT stencil printing. Global SMT & Packaging, Trafalgar Publications Ltd., Glastonbury, UK, 4/2004, pp. 24-28
- [164] Westkamper, E.; Mai, C. (Hrsg.): Q-Jahrbuch 98/99, Qualitätsmanagement in Industrie und Dienstleistung. Carl Hanser Verlag, München, 1998
- [165] Wiemers, A.: Leiterplatten Handbuch, Ausgabe 7.3, Feinstleitertechnik. Firma ILFA Feinstleitertechnik, Hannover, 2002
- [166] Willis, B.: What is a Printed Circuit Board Pad? Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2/2002, S. 294-297
- [167] Wittke, K; Scheel, W.; Nowotnick, M.: Auslöttemperatur von Lötverbindungen – Wesen und technische Bedeutung. GMM-Fachbericht 44, "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", VDE Verlag Berlin Offenbach, Februar 2004, S. 349-354
- [168] Wohlrabe, H.: Maschinen- und Prozessfähigkeit von Bestücksausrüstungen der SMT Elektronik-Technologie in Forschung und Praxis, Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin 1999
- [169] Wölflick, P.; Feldmann, K.: Lead-Free Low-Cost Flip-Chip Process Chain: Layout, Process, Reliability. 27th International Electronics Manufacturing Technology Symposium (IEMT), IEEE, CPMT and SEMI, Semicon West 2002, San Jose, CA, USA, July 2002, p. 27-34
- [170] Wood, P.; Park, M.: 10 Steps to lead-free Array Package Rework. Global SMT & Packaging, Trafalgar Publications Ltd., Glastonbury, UK, 1/2004, pp. 10-15
- [171] Zahn, M: Technisches Datenblatt zur Auslegung einer Laminatschablone. Fa. DEK Printing Machines GmbH, Bad Vilbel, 2002
- [172] Zarrow, P.: Solder Paste Performance Testing. ITM Inc., Durham, New Hampshire, USA, 1998
- [173] Zell, A.: Simulation neuronaler Netze. R. Oldenbourg Verlag, München 1994

Anhang

Anhang A Bandbreite der Bauteilplatzierung

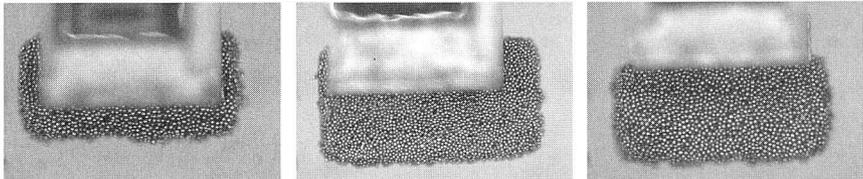
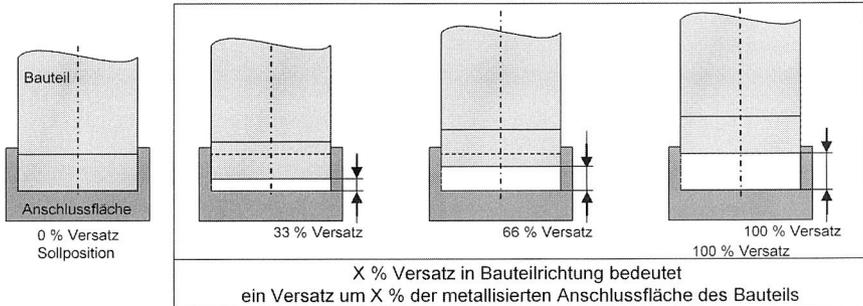
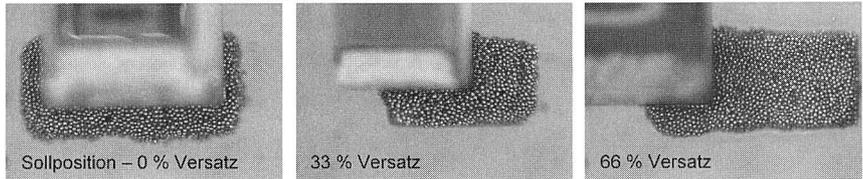
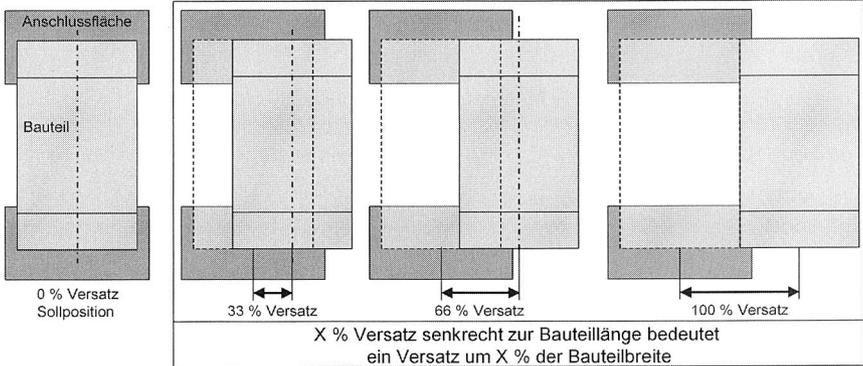


Bild: Bauteilplatzierung

Anhang B Anbieter von Stufenschablonen

Hersteller	Herstellungsverfahren der Stufenschablonen
LaserJob GmbH Grafrath	Patchwork Schablonen
Cookson Electronics Assembly Materials – Rotec Turnhout; Belgien	Stufengeätzte Schablonen; Laminatschablonen; Galvanisch aufgebaute Schablonen
Ätztechnik Herz GmbH & Co. Epfendorf	Stufengeätzte Schablonen
CADiLAC Laser GmbH Hilpoltstein	Laminatschablonen; Galvanisch aufgebaute Schablonen
Cookson Electronics Assembly Materials – Alpha-Fry Technologies Duisburg	Laminatschablonen; Galvanisch aufgebaute Schablonen; Polymerschablonen
DEK Printing Machines GmbH DirEKt Process Solutions Bad Vilbel	Laminatschablonen; Galvanisch aufgebaute Schablonen
Koenen GmbH, Ottobrunn	Stufengeätzte Schablonen
LPKF Laser & Electronics AG Garbsen	Patchwork Schablonen
Metaq GmbH, Wuppertal	Laminatschablonen; Stufengeätzte Schablonen
rei-tec Ingenieur-Büro Lutherstadt Eisleben	Polymer-Stufenschablonen
Stork Head office - Stork N.V. Naarden, Niederlande	Galvanisch aufgebaute Schablonen
Tecan Ltd Weymouth Dorset, United Kingdom	Laminatschablonen

Tabelle: Anbieter – Stufenschablonen

Anhang C Prüfung der Normalverteilung durch Chi²-Abschätzung der Lotvolumenmesswerte aus Kapitel 6.2.2

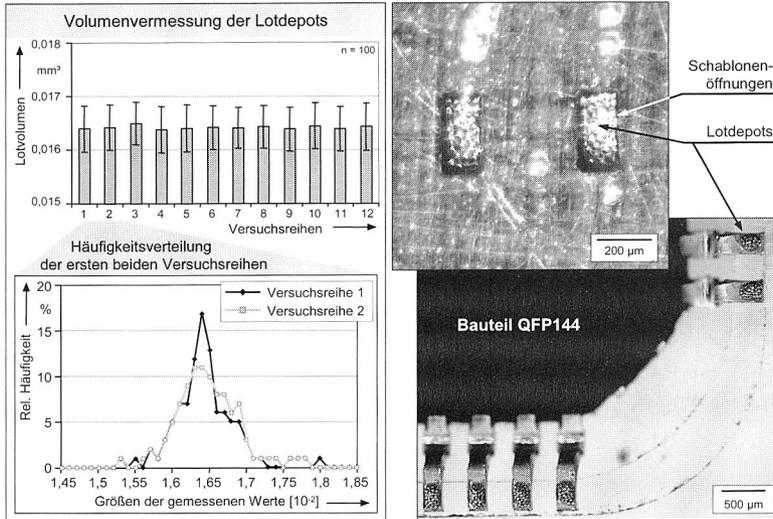


Bild: Ermittelte Lotvolumen nach dem Pastenauftrag durch Minischablone direkt auf die Bauteilanschlüsse

Aussagen zur Prozessfähigkeit von Verfahren können standardmäßig nur bei normalverteilten Messwerten getroffen werden. Durch einen Chi-Quadrat-Anpassungstest soll der Nachweis über die Normalverteilung an zwei der durchgeführten Messreihen erfolgen. Die Messreihen umfassen jeweils 100 Messwerte (n), wodurch sich die Klassenanzahl (k) auf 8 bestimmen lässt:

$$k = 1 + 3,322 \cdot \log(n) = 8;$$

Die Messwerte der Versuchsreihe 1 und 2 aus der obigen Abbildung ergeben im Wertebereich zwischen 0,0158 mm³ und 0,017 mm³, die in Tabelle C1 aufgelisteten Häufigkeitsverteilungen. Daraus lassen sich, wie folgt, Mittel- und Varianzwerte ermitteln:

Mittelwert:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k t'_i \cdot h_i ;$$

t'_i = Klassenmitte für die Einzelwerte der Klasse i

h_i = Absolute Häufigkeit der i-ten Klasse

i	Messwerte	Substituierte Klassenwerte	Häufigkeit B _i	
			Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
1	bis 0,0158	[0 ; 2]	5	5
2	0,0158 - 0,016	]2 ; 2,5]	7	8
3	0,016 - 0,0162	]2,5 ; 3]	12	16
4	0,0162 - 0,0164	]3 ; 3,5]	29	22
5	0,0164 - 0,0166	]3,5 ; 4]	18	18
6	0,0166 - 0,0168	]4 ; 4,5]	14	14
7	0,0168 - 0,017	]4,5 ; 5]	9	10
8	über 0,017	]5 ; +∞]	6	7

Tabelle C1: Häufigkeitsverteilung der Versuchsreihen 1 und 2

Versuchsreihe 1:

$$\hat{\mu}_1 = \frac{1}{100} (1,0 \cdot 5 + 2,25 \cdot 7 + 2,75 \cdot 12 + 3,25 \cdot 29 + 3,75 \cdot 18 + 4,25 \cdot 14 + 4,75 \cdot 9 + 5,0 \cdot 6);$$

$$\hat{\mu}_1 = 3,4775;$$

Der umgerechnete Mittelwert von Versuchsreihe 1 ergibt sich zu:

$$\hat{\mu}_1' = 1,6391 \text{ mm}^3;$$

Varianzen:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k (t'_i)^2 \cdot h_i - \hat{\mu}^2 ;$$

$$\hat{\sigma}_1^2 = 0,8726 ; \quad \hat{\sigma}_1 = 0,93414 ;$$

Mit diesen Daten kann durch den Chi²-Test ermittelt werden, ob mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ die Volumenwerte der Lotdepots normalverteilt sind.

Normalverteilung für die obere Klassengrenze $t_{i,o}$ und die absolute Häufigkeit:

i	$t_{i,o}$	$u_{i,o} = \frac{t_{i,o} - 3,4775}{0,93414}$;	$\Phi(u_{i,o})$ Anhang D	Erwartete rel. Häufigkeit p_i	Erwartete absolute Häufigkeit $E_i = n \cdot p_i$
1	2,0	-1,58	0,0571	0,0571	5,71
2	2,5	-1,05	0,1469	0,0898	8,98
3	3,0	-0,51	0,305	0,1581	15,81
4	3,5	0,02	0,508	0,203	20,3
5	4,0	0,56	0,7123	0,2043	20,43
6	4,5	1,09	0,8621	0,1498	14,98
7	5,0	1,63	0,9484	0,0863	8,63
8	∞	-	1,00	0,0516	5,16
Summe				1,0	100,00

Tabelle C2: Kennwerte des Chi²-Anpassungstests – Versuchsreihe 1

Berechnung der Prüfgröße:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(B_i - E_i)^2}{E_i} ; \quad X_1^2 = 5,67733513 ;$$

Der kritische Wert $X_{1-\alpha, v}^2$ ergibt sich aus der Chi²-Verteilung:

$$X_{1-\alpha, v}^2 = 11,070 ;$$

Damit liegt die berechnete Prüfgröße für die Versuchsreihe 1 unter dem kritischen Wert der Chi²-Verteilung. Damit kann die Versuchsreihe 1 als normalverteilt gelten.

Für die Versuchsreihe 2 lassen sich folgende Ergebnisse ermitteln:

$$\hat{\mu}_2 = 3,4800 ;$$

Der umgerechnete Mittelwert von Versuchsreihe 2 ergibt sich zu:

$$\hat{\mu}_2' = 1,6392 \text{ mm}^3 ;$$

$$\hat{\sigma}_2^2 = 0,9446 ;$$

$$\hat{\sigma}_2 = 0,97191 ;$$

i	t _{i,0}	$u_{i,0} = \frac{t_{i,0} - 3,48}{0,97191}$;	$\Phi(u_{i,0})$ Anhang D	Erwartete rel. Häufigkeit p _i	Erwartete absolute Häufigkeit E _i =n·p _i
1	2,0	-1,52	0,0643	0,0643	6,43
2	2,5	-1,01	0,1562	0,0919	9,19
3	3,0	-0,49	0,3121	0,1559	15,59
4	3,5	0,02	0,508	0,1959	19,59
5	4,0	0,54	0,7054	0,1974	19,74
6	4,5	1,05	0,8531	0,1477	14,77
7	5,0	1,56	0,9406	0,0875	8,75
8	∞	-	1,00	0,0594	5,94
Summe				1,0	100,00

Tabelle C3: Kennwerte des Chi²-Anpassungstests – Versuchsreihe 2

Berechnung der Prüfgröße:

$$X_2^2 = 1,3406275 ;$$

Damit liegt auch die Prüfgröße für die Versuchsreihe 2 unter dem kritischen Wert der Chi²-Verteilung. Die Versuchsreihe 2 kann damit ebenfalls als normalverteilt gelten.

Anhang D Summenfunktion der standardisierten Normalverteilung

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^u e^{-\frac{\tau^2}{2}} d\tau$$

$$\Phi(u) = 1 - \Phi(-u)$$

Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,50000	0,50399	0,50798	0,51197	0,51595	0,51994	0,52392	0,52790	0,53188	0,53586
0,1	0,53983	0,54380	0,54776	0,55172	0,55567	0,55962	0,56356	0,56749	0,57142	0,57535
0,2	0,57926	0,58317	0,58706	0,59095	0,59483	0,59871	0,60257	0,60642	0,61026	0,61409
0,3	0,61791	0,62172	0,62552	0,62930	0,63307	0,63683	0,64058	0,64431	0,64803	0,65173
0,4	0,65542	0,65910	0,66276	0,66640	0,67003	0,67364	0,67724	0,68082	0,68439	0,68793
0,5	0,69146	0,69497	0,69847	0,70194	0,70540	0,70884	0,71226	0,71566	0,71904	0,72240
0,6	0,72575	0,72907	0,73237	0,73565	0,73891	0,74215	0,74537	0,74857	0,75175	0,75490
0,7	0,75804	0,76115	0,76424	0,76730	0,77035	0,77337	0,77637	0,77935	0,78230	0,78524
0,8	0,78814	0,79103	0,79389	0,79673	0,79955	0,80234	0,80511	0,80785	0,81057	0,81327
0,9	0,81594	0,81859	0,82121	0,82381	0,82639	0,82894	0,83147	0,83398	0,83646	0,83891
1,0	0,84134	0,84375	0,84614	0,84850	0,85083	0,85314	0,85543	0,85769	0,85993	0,86214
1,1	0,86433	0,86650	0,86864	0,87076	0,87286	0,87493	0,87698	0,87900	0,88100	0,88298
1,2	0,88493	0,88686	0,88877	0,89065	0,89251	0,89435	0,89617	0,89796	0,89973	0,90147
1,3	0,90320	0,90490	0,90658	0,90824	0,90988	0,91149	0,91309	0,91466	0,91621	0,91774
1,4	0,91924	0,92073	0,92220	0,92364	0,92507	0,92647	0,92785	0,92922	0,93056	0,93189
1,5	0,93319	0,93448	0,93574	0,93699	0,93822	0,93943	0,94062	0,94179	0,94295	0,94408
1,6	0,94520	0,94630	0,94738	0,94845	0,94950	0,95053	0,95154	0,95254	0,95352	0,95449
1,7	0,95543	0,95637	0,95728	0,95818	0,95907	0,95994	0,96080	0,96164	0,96246	0,96327
1,8	0,96407	0,96485	0,96562	0,96638	0,96712	0,96784	0,96856	0,96926	0,96995	0,97062
1,9	0,97128	0,97193	0,97257	0,97320	0,97381	0,97441	0,97500	0,97558	0,97615	0,97670
2,0	0,97725	0,97778	0,97831	0,97882	0,97932	0,97982	0,98030	0,98077	0,98124	0,98169
2,1	0,98214	0,98257	0,98300	0,98341	0,98382	0,98422	0,98461	0,98500	0,98537	0,98574
2,2	0,98610	0,98645	0,98679	0,98713	0,98745	0,98778	0,98809	0,98840	0,98870	0,98899
2,3	0,98928	0,98956	0,98983	0,99010	0,99036	0,99061	0,99086	0,99111	0,99134	0,99158
2,4	0,99180	0,99202	0,99224	0,99245	0,99266	0,99286	0,99305	0,99324	0,99343	0,99361
2,5	0,99379	0,99396	0,99413	0,99430	0,99446	0,99461	0,99477	0,99492	0,99506	0,99520
2,6	0,99534	0,99547	0,99560	0,99573	0,99585	0,99598	0,99609	0,99621	0,99632	0,99643
2,7	0,99653	0,99664	0,99674	0,99683	0,99693	0,99702	0,99711	0,99720	0,99728	0,99736
2,8	0,99744	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807
2,9	0,99813	0,99819	0,99825	0,99831	0,99836	0,99841	0,99846	0,99851	0,99856	0,99861
3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99897	0,99900
3,1	0,99903	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929
3,2	0,99931	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950
3,3	0,99952	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965
3,4	0,99966	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976

Tabelle: Normalverteilung – Z-Werte

Anhang E Einteilung der Verfahren zur Anschlussflächenvorbereitung (Kapitel 6.2.2)

Werkzeug		Schablone	Dippen	Dispensen	Schablone	Flussmittelauftrag		
Ort		Leiterplatte	Bauteil	Leiterplatte	Bauteil	Leiterplatte	Beibehalten	
n=50		Entfernung des Alllots					des Alllots	
QFP 208	Einsatz	4	3	2	2		2	
	Optik	3	4	2	2		3	
TQFP 100	Einsatz	4	3	2	2		2	
	Optik	4	4	2	3		3	
TQFP 144	Einsatz	4	3	3	2		3	
	Optik	4	5	2	3		3	
TQFP 120	Einsatz	5	4	3	3		4	
	Optik	5	5	3	3		5	
SSOP 28	Einsatz	3	3	2	2		1	
	Optik	2	3	2	2		2	
BGA 169	Einsatz	3	3	2	2		1	2
	Optik	2	3	1	2		2	3
CSP46 (μ BGA)	Einsatz	5	4	3	3		1	3
	Optik	4	5	2	3		3	5

Tabelle: Kennwerte der Verfahrensvarianten;
Qualitative Bewertung aufsteigend von 1 nach 5 (Notenprinzip).

Bewertungsschemata – Einsatz:

Komplexität der Anwendung	1: Verfahren sofort mit guten Resultaten umsetzbar 3: Verfahren mit Übung umsetzbar 5: Verfahren auch mit viel Übung nicht umsetzbar
Flexibilität beim Einsatz	1: Verfahren übergreifend einsetzbar 3: Verfahren an jede Bauteilgruppe anzupassen 5: Verfahren an jedes Bauteil anzupassen
Positionsgenauigkeit der Lotpaste	1: Standardeinrichtungen ermöglichen Positionierung 3: Positionierung mit zusätzlichen Geräten möglich 5: Keine reproduzierbare Positionierung möglich
Wiederholbarkeit	1: Sehr gute Wiederholbarkeit 3: Abhängig von den Erfahrungen 5: Wiederholbarkeit nicht gegeben
Wirtschaftlichkeit / Zeit:	1: Angepasst an den Nacharbeitsprozess 3: Zusätzliche Teilprozesse und daher zeitintensiv 5: Aufwendig und daher zeitintensiv

Bewertungsschemata – Optik:

Ausbildung Lötmeniskus / Lötkontakt

- 1: Meniskus gut ausgebildet mit wenigen Störfaktoren
- 3: Meniskus gut ausgebildet mit mehr Störfaktoren
- 5: Lötkontakt ungenügend ausgebildet

Optischer Eindruck der Lötverbindung / Reststoffe

- 1: Keine Reststoffe, guter optischer Eindruck der Verbindung
- 3: Reststoffe, befriedigender optischer Eindruck der Verbindung
- 5: Viele Reststoffe (Flussmittel) und optischer Eindruck mäßig

Gleichförmigkeit der Lötverbindung

- 1: Verbindungsstellen gleichmäßig auch bei feinen Strukturen
- 3: Verbindungsstellen bei feinen Strukturen abweichend
- 5: Verbindungen sind nicht an allen Kontaktstellen ausgebildet

Gleichförmigkeit der aufbereiteten Anschlussflächen

- 1: Mit der Serienproduktion vergleichbares Ergebnis
- 3: Verbindungsmedien nicht gleichmäßig aufgetragen
- 5: Teilweise Beschädigungen der Metallisierung

Summary

The tremendous innovation rate within the field of electronic assemblies and components has led to their integration into nearly all product areas. The increasing range of functions together with continuously progressive miniaturization has opened up new areas of application, which stands for the world-wide economic success of new products and applications. This also applies to mechatronic system solutions, which in recent years has resulted in a significant increase in the level of flexibility through the combination of electronic and mechanical components. On this basis, the emerging nano-technology field has the potential to offer an immense array of new applications. However, these lead, for example due to the nano-scaled components, to considerable challenges for the assembly and interconnection technologies in electronics. It has therefore become even more important to accurately control the production of reliable electronic assemblies to be able to fulfill future technological requirements. This is also reflected in the customer's central requirement of reliability and she has come to expect full functionality over the entire product life time. Further economic success can be only achieved if the new technologies attain the required level of reliability.

Product quality is determined by both the production chain and the entrance components. It is therefore necessary to develop knowledge, methods as well as strategies in quality assurance that supports the manufacture of reliable electronic assemblies. In the present work, this objective was pursued in the context of selected process-oriented research projects and strategies with the aim to improve the quality and reliability of the production of highly integrated printed circuit boards (PCBs).

Therefore, within the initial investigations, the input parameter 'interconnection medium' was evaluated with respect to the selected alloy compositions and the different manufacturing configurations. One of the main areas of focus was the determination of possible quality fluctuations caused by the intermittent processing of the interconnection medium. Concrete time limits were determined, whose consideration in production can prevent errors and insufficient solder contact. This work also revealed that when using lead-free solder pastes, it is critical to adhere to the manufacturer's guidelines since they exhibit poorer wetting characteristics and react more sensitively to longer process times.

Based on these results, the solder application process was analyzed in detail because numerous studies have identified that this step is responsible for the majority of errors in electronics production. Since many defects can be attributed to insufficient solder volume, the use of multi-level step stencils was examined. In addition to analyzing solder geometry and volume development, design guidelines were proposed and dis-

cussed. It was shown that for the production of highly integrated printed circuit boards, step stencils offer numerous advantages. On the one hand, they enable a component specific quantity of solder to be applied and on the other the restrictions imposed by correctly designed stage transitions are minimal. These investigations were supplemented by analyzing a range of selected opening geometries on classical planar stencils.

The inspection process plays a key role in improving the quality and reliability of electronics production. Defects can not be completely eliminated due to technological-economical reasons. As a result, it is necessary to determine deficiencies in quality as early as possible in the production chain ensuring any errors or pseudo errors are identified and resolved. Within the framework of the comprehensive investigations, a matrix of inspection techniques was developed that enables user-specific test strategies to be devised. An inspection strategy only offers potential if an adapted rework system is capable of repairing any defects that are identified. Based on the results from alternative rework technologies, critical and non-critical sub processes were differentiated from one another. Since this concerns especially the preparation of the surface pattern on the PCB and the soldering process of a new component, comprehensive experimental analyses were undertaken. New solutions were developed and default values for processes were established, which contributed a holistic optimization of the process.

Further improvements in quality with respect to the whole electronics production chain can only be achieved through adopting a process accompanying quality assurance strategy. In this respect, strategies for the process data analysis were conceived and implemented in a computer aided tool. This enabled the continuous detection of production line defects in real time and a first closed loop for process control to be configured.

In the context of this work, an important contribution could be made to the improvement of quality and reliability of assembly and interconnection technologies. Important fundamental findings were presented and new technological concepts developed that support the future demands and optimization requirements of reliable electronics production.

Lebenslauf

Rüdiger Holzmann

Geburtsdatum: 06.02.1971

Geburtsort: Nürnberg

Familienstand: verheiratet

Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung

09/1977 – 07/1981	Grundschule Laufamholz	Nürnberg
09/1981 – 06/1990	Geschwister Scholl Gymnasium	Röthenbach/Peg.
07/1990 – 06/1991	Grundwehrdienst – 1./Sanitätsbataillon 4	Regensburg
11/1992 – 01/1998	Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Studiengang: Maschinenbau Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)	Erlangen-Nürnberg

Berufstätigkeit

02/1998 – 01/1999	Projektingenieur in selbständiger Tätigkeit Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper Prof. Dr.-Ing. Rolf Dieter Schraft	Stuttgart
02/1999 – 10/2004	Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der FAU Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann	Erlangen-Nürnberg
01/2003 – 10/2004	Oberingenieur des Lehrstuhlbereichs "Elektronikproduktion"	Nürnberg
Seit 11/2004	Fachreferent Technologie und Prozesse Conti Temic microelectronic GmbH	Nürnberg

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: Ditlef 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-Prozessekte
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 Huffless
**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 Schaltungssträger (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 Steinwasser
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 Pfestorf
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 Meßner
**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 Löten 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 Schuberth
**Regelung der Fokusalge 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. 1999.
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 laserstrahlesinterter 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
**Oberflächenausbildung 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. 2001.
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 Eßler
**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 Negendanck
**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 –
Verfahrensintegration 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 Laserstrahlchneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten 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