

Robert Feuerstein

*Qualitäts- und kosteneffiziente
Integration neuer
Bauelementtechnologien
in die Flachbaugruppenfertigung*

Robert Feuerstein

*Qualitäts- und kosteneffiziente
Integration neuer
Bauelementtechnologien
in die Flachbaugruppenfertigung*

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,
Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung: 11. September 2000
Tag der Promotion: 02. Februar 2001
Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. habil. W. Sauer

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Feuerstein, Robert:

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration
neuer Bauelementtechnologien in die Flachbaugruppenfertigung /
Robert Feuerstein. - Bamberg : Meisenbach, 2001
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 112)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2001
ISBN 3-87525-151-2 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 2001
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls FAPS am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik danke ich herzlich für die großzügige Förderung meiner Arbeiten sowie den persönlichen Freiraum, den er mir gewährte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, dem Leiter des Instituts für Elektronik-Technologie der TU Dresden möchte ich meinen Dank aussprechen für die jederzeit offene und herzliche Zusammenarbeit sowie für die engagierte Übernahme des Koreferats.

Ferner möchte ich mich bei allen Kollegen und Mitarbeitern am Lehrstuhl FAPS für die vergangenen fünf Jahre der Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere Dr.-Ing. Knuth Götz, Dipl.-Ing. Rüdiger Holzmann, Dipl.-Inf. Christoph Felbinger und Dipl.-Ing. Sami Krimi haben mit ihren Ratschlägen und Anregungen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Aus der Reihe der Studenten möchte ich vor allem Manfred Dirscherl, Holger Baldreich und Daniel Eizenhöfer hervorheben, die mich über Jahre hinweg am Lehrstuhl begleitet und durch ihre Mitarbeit an Projekten tatkräftig unterstützt haben.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich von frühester Jugend an gefördert und in meinen Entscheidungen unterstützt haben.

Mein herzlichster Dank gilt schließlich meiner Partnerin Steffi, die durch ihre Verständnis und ihre moralische Unterstützung ganz entscheidend zum erfolgreichen Abschluß dieser Arbeit beigetragen hat.

Erlangen, im März 2001

Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementtechnologien in die Flachbaugruppenfertigung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Auswirkungen neuer Bauelementformen auf die Elektronik- produktion	4
2.1	Situationsanalyse in der Elektronikproduktion	4
2.2	Erweiterung des Gehäusespektrums durch Ball Grid Arrays	6
2.2	Verarbeitung ungehäuster Halbleiter	9
2.3	Einsatz von Chip Scale Packages	15
2.4	Abgeleitete Anforderungen an die Prozess- und Prüftechnik	18
3	Technische Qualifizierung von Prozessen und Prozessfolgen in der Flachbaugruppenfertigung	21
3.1	Der Einfluss spezifischer Einzelprozesse auf die Prozessqualität	21
3.2	Untersuchungen zur Fine Pitch-Tauglichkeit ausgewählter Systeme zum Lotpastenauftrag	24
3.2.1	Parametrisierung der qualitätsbestimmenden Prozesskenngrößen	24
3.2.2	Ermittlung der Dosierfähigkeit eines Präzisions-Dispenssystems	25
3.2.3	Qualifizierung eines Schablonendruckers für Fine Pitch Area Array Bauelemente	31
3.3	Analyse der Prozessfähigkeit eines Präzisionsbestücksystems	34
3.3.1	Module zur Sicherung des Bestückprozesses	34
3.3.3	Komponentenspezifische Einflussgrößen auf die Bestückfähigkeit	34
3.3.3	Prozessspezifische Einflussgrößen auf die Bestückfähigkeit	41
3.3.4	Spezifikation von Fähigkeitsbereichen für den Bestückprozess	47
3.4	Qualifizierung mediengebundener Lötverfahren zur Kontaktierung verdeckter Anschlussstrukturen	52

3.4.1	Einsatz mediengebundener Reflowlötverfahren	52
3.4.2	Bestimmung von Zielgrößen und Maschinenfähigkeiten	53
3.4.2	Lötprofilqualifizierung für Area Array Komponenten	55
4	Analyse der Verarbeitbarkeit von Area Array-Bauelementen ..	59
4.1	Lagerung von Bauelementen	59
4.1.1	Charakterisierung des Benetzungsverhaltens	60
4.1.2	Untersuchung der Benetzbarkeit von Area Array-Bauelementen ..	65
4.1.3	Einfluss der Benetzung auf die Lötstellenqualität	68
4.2	Systembeschreibung und Parametrisierung der Prozesskette	71
4.2.1	Präzisionsprozesskette für feinere Strukturen	71
4.2.1	Parameterfenster für Lotpastenauftrag und Bestückprozess	72
4.3	Systematische Analyse größenabhängiger Wechselwirkungen auf die Lötstellenausbildung	76
4.3.1	Größenabhängige Einflußfaktoren auf die Verbindungsqualität ..	76
4.3.2	Einfluss der Bestückkraft auf das Lötverhalten	83
4.3.3	Weitere, für Area Array-Komponenten signifikante Beobachtungen im Prozessverhalten	88
4.4	Ableitung prozess- und geometriebezogener Wirkmodelle	91
4.4.1	Geometriemodell zur Lötstellenausbildung bei Area Array- Anschlüssen	91
4.4.2	Schädigungsmodell zur Analyse verdeckter Lötstellen	92
4.5	Zusammenfassende Bewertung des Prozessverhaltens	93
5	Prozessoptimierung durch den Einsatz rechnergestützter Informations- und Analysesysteme	95
5.1	Technologieorientierter Ausbau des Informationssystems	95
5.2	Entwicklung einer Methodik zur prozessintegrierten Analyse komplexer Qualitätsdaten	100
6	Ausgewählte Verfahren zur Bewertung neuer Technologien in der Elektronikproduktion	105
6.1	Problemstellung bei der Qualitäts- und Kostenbewertung	105

6.2	Kennzahlen und Kennzahlensysteme	107
6.3	Methoden zur Technologiebewertung	110
6.3.1	Entscheidungs- und Bewertungsstrategien nach VDI 3780	110
6.3.2	Nutzwert-Kosten-Analyse	112
6.3.3	Methoden zur übergreifenden Qualitätsbewertung	116
6.3.4	Qualitätscontrolling und "Return of Quality"	117
6.4	Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung	119
6.4.1	Methoden der Investitions- und Kostenrechnung	119
6.4.2	Simulationsgestützte Kostenanalyse	121
6.4.3	Qualitätskostenmodelle	123
6.4.4	Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Produktionsstrategien	124
6.5	Vergleich der Verfahren und Darstellung der Defizite	126
7	Entwicklung eines Bewertungssystems zur Effizienzanalyse alternativer Prozessketten	129
7.1	Grundlegende Anforderungen aus dem technologischen Umfeld	129
7.2	Struktur der Bewertungsstrategie	131
7.2.1	Definition geeigneter Kennzahlen und Bewertungsprofile	132
7.2.2	Konzept der Technologiewechselbewertung (Prognosesicht) ...	133
7.2.3	Dynamische Effizienzanalyse (Diagnosesicht)	135
7.3	Realisierung des Bewertungssystems "Q-Value"	136
7.3.1	Implementierung des Kernsystems	136
7.3.2	Funktionen der Effizienzbewertung	141
7.3.3	Anbindung an Informations- und Analysensysteme	145
8	Zusammenfassung	149
	Literaturverzeichnis	151

1 Einleitung

Die Produktion elektronischer Baugruppen stellt weltweit eine Schlüsselfunktion zur Sicherung der industriellen Wettbewerbsfähigkeit dar. Die Entwicklungen im Bereich der Elektronikproduktion sind dabei – sowohl aus technologischer wie aus wirtschaftlicher Sicht – treibende Kraft für Innovationen und Weiterentwicklungen aller Industriezweige. Die wirtschaftliche Bedeutung der elektronischen Baugruppe verdeutlicht das rasante Umsatzwachstum in Deutschland von 8 % im Jahr 1999 gegenüber einem allgemeinen Wirtschaftswachstum von 2,5 % [68]. Gleichzeitig hat die Branche mit einem Umsatzvolumen von 42 Mrd. DM eine direkte Ausstrahlung auf die für die deutsche Industrielandschaft maßgebliche sogenannten "5er Gruppe" (Maschinenbau, Elektrotechnik, Feinmechanik, Fahrzeugbau und Büro-/Datentechnik) mit einem konsolidierten Umsatz von ca. 850 Mrd DM [73]. Im internationalen Vergleich liegt Deutschland damit hinter den USA und Japan auf Platz drei hinsichtlich des Weltmarktanteils.

Innerhalb der Flachbaugruppenproduktion nehmen die elektronischen Bauelemente eine besondere Stellung ein. Mit einem Umsatz von 23 Mrd. DM im Jahr 1999 und jährlichen Zuwachsraten von 10 % bestimmt der Bauelementesektor maßgeblich das wirtschaftliche Wachstum der Baugruppenbranche [67]. Damit einher geht ein stetig steigender Anteil hochwertiger Bauelemente an der Baugruppe. Bezogen auf einzelne Branchen wie Automobilindustrie oder Telekommunikation bedeutet das einen wertmäßigen Anteil komplexer elektronischer Bauelemente am gesamten Produktionswert von 25 % und mehr [74].

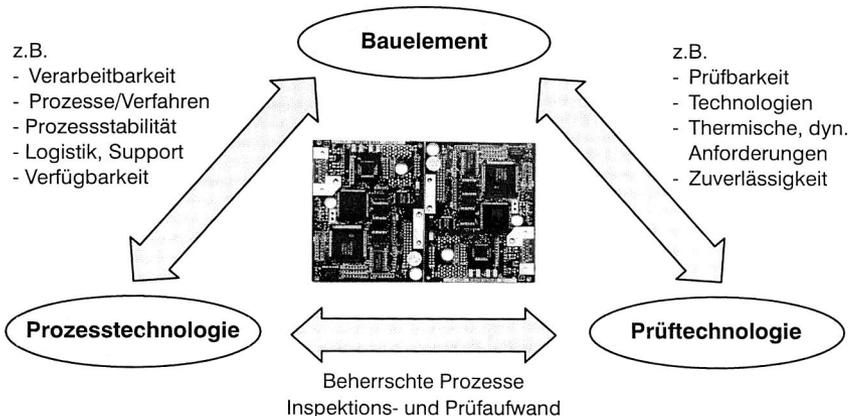


Bild 1: Das Spannungsfeld zwischen Bauelement, Prozesstechnologie und Prüftechnologie bestimmt die elektronische Baugruppe

Dieser wirtschaftlichen Entwicklung wird auf technologischer Ebene mit einer Reihe von Strategien begegnet. Ziel muss es sein, den Anforderungen des Marktes hinsichtlich qualitativ hochwertiger und kostengünstiger Produkte bei steigendem Funktions- und Innovationsgrad zu begegnen.

Strategien wie Null-Fehler-Fertigung, neue Prozesstechnologien oder innovative Prüfverfahren zielen darauf ab, die Produktqualität einer Fertigungslinie zu steigern und gleichzeitig den dafür notwendigen monetären Aufwand zu senken. Darüber hinaus muss jedoch die Integration neuer Bauelement- oder Verbindungstechnologien vorangetrieben werden, da nur durch eine konsequente Umsetzung neuer Komponenten- und Prozesstechnologien mit dem Wettbewerb Schritt gehalten werden kann.

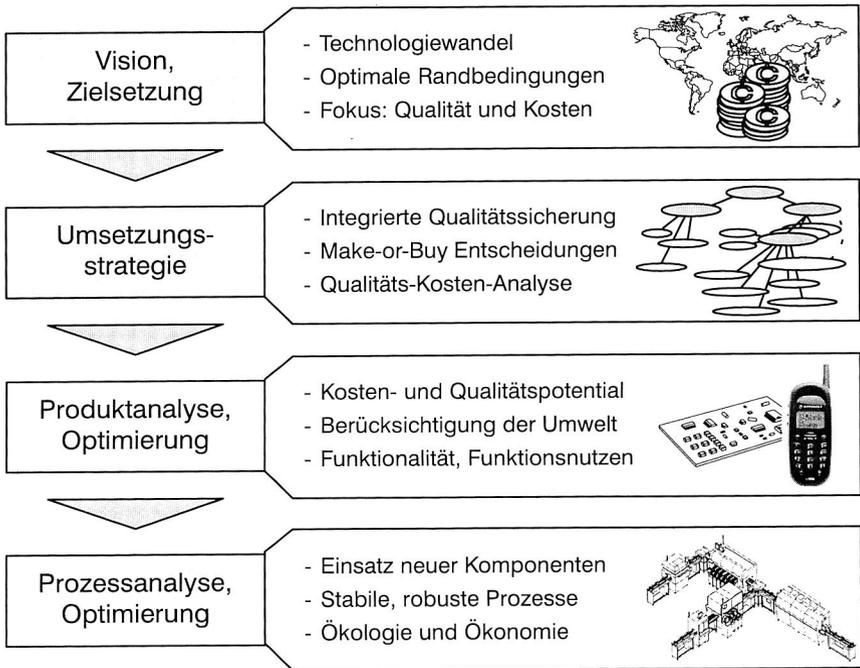


Bild 2: Strukturierte, problemorientierte Vorgehensweise zur qualitäts- und kostenoptimalen Montage elektronische Baugruppen

Die dynamischen Innovationen bei Bauelementen und Schaltungsträgern in der Elektronik führen zu immer neuen Herausforderungen an die Prozessgestaltung und die Qualitätssicherung. Im Mittelpunkt stehen dabei die Bauelemente als Träger mechani-

scher wie elektrischer Funktionen. Feinere Anschlussstrukturen, unterschiedliche Packungsformen und Gehäusetyper stellen vor allem hohe Anforderungen an eine gesicherte Verbindungstechnik mit den Teilprozessen Lotpastenauftrag, Bestücken, Löten. Dazu verstärkt sich insgesamt der Anspruch in der Elektronikproduktion, mit möglichst minimalen Kosten minimale Fehlerraten zu erreichen.

Die Integration neuer Bauelementformen in bestehende Fertigungsumgebungen führt zu spezifischen Problemstellungen hinsichtlich Qualität und Kosten. Die sich daraus ergebenden Aufgaben an die Prozess- und Prüfumgebung zur qualitäts- und kosteneffizienten Baugruppenfertigung werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Dazu werden zuerst die verschiedenen Bauelementtypen und deren Auswirkungen auf die Elektronikproduktion vergleichend bewertet (Kapitel 2). Im Anschluss daran werden umfangreiche experimentelle Untersuchungen dargestellt, innerhalb derer die verschiedensten Einzelprozesse und Prozessketten für die favorisierte Bauelementklasse der Area Arrays analysiert und qualifiziert werden (Kapitel 3). Darauf aufbauend wird eine durchgehende Analyse der Verarbeitbarkeit von Area Arrays vorgestellt, die zu einer umfassenden Bewertung des Prozessverhaltens auf Basis von Wirkmodellen führt (Kapitel 4).

Die Einführung innovativer Bauelementformen kann technologisch durch den Einsatz spezifischer Qualitätssicherungssysteme unterstützt werden. Hierzu wird im anschließenden Abschnitt eine Lösung zur integrierten Informationsbereitstellung und Analyse komplexer Qualitätsdaten vorgestellt (Kapitel 5).

In den beiden folgenden Kapiteln wird die Thematik der Qualitäts-Kostenanalyse vor dem Hintergrund alternativer Bauelementtechnologien wissenschaftlich diskutiert. Dazu werden marktverfügbare Systeme bewertet, deren Defizite aufgezeigt und ein baugruppenspezifisches Anforderungsprofil entwickelt (Kapitel 6). Die Umsetzung dieser Anforderungen in ein umfassendes Effizienzbewertungssystem sowie die Darstellung der Einsatzmöglichkeiten in der Praxis beschließen diese Arbeit.

2 Auswirkungen neuer Bauelementformen auf die Elektronikproduktion

Eine moderne elektronische Baugruppe wird im wesentlichen durch die eingesetzten Bauelemente in ihrer Technologie und Funktionsweise definiert. Die Bauelemente als elementare Funktionsträger jeder elektronischen Schaltung sind oftmals die auslösenden Treiber für Miniaturisierung oder Funktionsintegration. Die Miniaturisierung von elektronischen Baugruppen lässt sich jedoch nur dann gezielt umsetzen, wenn die Funktionen in wenigen, kleinen Bauelementen realisiert werden können. Aus prozesstechnischer wie aus wirtschaftlicher Sicht ist eine gezielte Auswahl der optimalen Bauelement- bzw. Gehäusetechnologie notwendig [44] [54]. Im Folgenden soll daher, ausgehend von einem kurzen Abriss zur Situation der Elektronikproduktion, das derzeit verfügbare Bauelementspektrum analysiert sowie Einsatzpotential und technologische Randbedingungen diskutiert werden.

2.1 Situationsanalyse in der Elektronikproduktion

Die Flachbaugruppenproduktion ist weltweit gekennzeichnet durch Leistungssteigerung, Funktionserhöhung und Kostensenkung [28]. Hauptursache für diesen Trend ist die rasante Entwicklung bei den Bauelementen, insbesondere bei integrierten Schaltkreisen (ICs), deren Marktvolumen trotz starker jährlicher Schwankungen überproportional steigt. Der Einsatz adäquater Substrate oder integrierter Module ist damit eng verbunden.

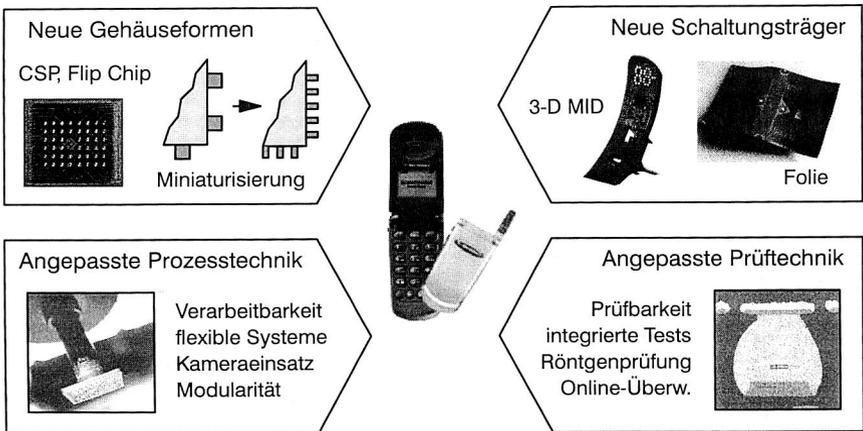


Bild 3: Technologien und Potentiale zur Realisierung hochwertiger Baugruppen

Ausgehend von einer Standardbaugruppe in Mischtechnologie THD/SMD bieten sich dem Baugruppenproduzenten daher verschiedene Möglichkeiten, höherwertige Funktionen zu realisieren (Bild 3). In der Regel wird aus Kosten- und Qualitätsgründen auf den sofortigen Einsatz neuer Komponenten verzichtet. Stattdessen werden verarbeitungstechnologisch ähnliche, jedoch miniaturisierte Bauelemente eingesetzt. Diese Strategie stößt jedoch dort an ihre Grenzen, wo die geforderte Prozesssicherheit bei der Verarbeitung der gewählten Bauelemente nicht mehr gewährleistet werden kann.

Ein heute bereits in der Serienfertigung eingesetztes Bauelement des Typs 0402 besitzt Außenmaße von ca. 1,0 x 0,5 mm und hat damit nur 1/10 der Fläche eines technologisch vergleichbaren 1206. Daraus ergeben sich für die Pads auf der Leiterplatte eine Fläche von ca. 0,6 x 0,3 mm. Ähnliche Dimensionen gelten für QFPs, die bei einem Raster von 0,4 mm reproduzierbare Lotpastendepots im Größenbereich von 180 µm Padbreite erfordern. Diese Geometrien sind im Prozess von den einzelnen Stationen einzuhalten bzw. innerhalb deren Toleranzen zu gewährleisten. Legt man diese Anschlussmaße zugrunde, resultiert daraus beispielsweise für den Bestückprozeß eine minimal notwendige Platziergenauigkeit von $\pm 30 \mu\text{m}$ bei einer Prozesssicherheit von 3σ [92]. Gleichwohl ist sowohl bei aktiven wie bei passiven Bauelementen der Trend zur Verkleinerung der Anschlussstrukturen ungebrochen. Bild 4 soll dies am Beispiel des klassischen Chip-Bauelementes verdeutlichen.

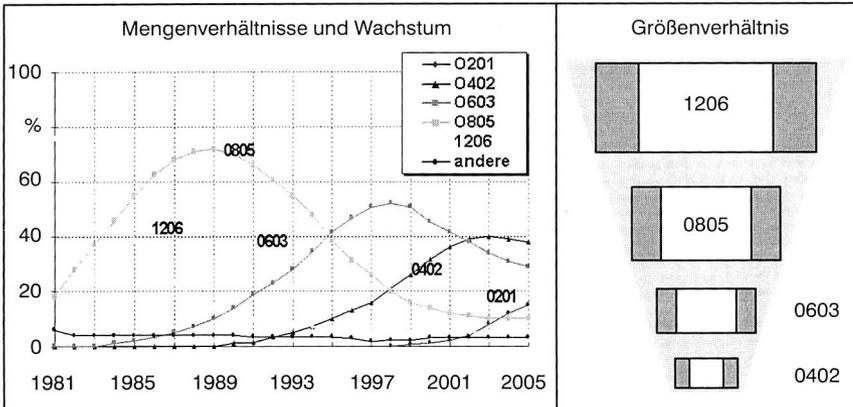


Bild 4: Mengen- und Größenverlauf bei elektronischen Bauelementen am Beispiel der Gehäuseform "Chip" [32]

Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Foliensubstrate [50] [94] oder die Integration von Widerständen in die Substratzwischenlagen [24] erhöhen zwar die Leistungsfähig-

keit des Schaltungsträgers, stellen jedoch auch neue Herausforderungen an die Prozess- und Prüftechnik. Andererseits sind Rastermaße bei herkömmlichen QFP-Bauelementen von 0,4 mm und kleiner technologisch und wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll verarbeitbar, sodass letztlich neue Gehäuseformen mit einem besseren Verhältnis Anschlusszahl zu Bauelementgröße eingesetzt werden müssen.

2.2 Erweiterung des Gehäusespektrums durch Ball Grid Arrays

Anschlusstechnologien für Ball Grid Arrays

Als Ball Grid Arrays (BGAs) werden Halbleiterbausteine bezeichnet, deren elektrische Kontaktierung über ein flächiges Anschlussraster von Lotkugeln auf der Gehäuseunterseite erfolgt [51] [62]. BGAs werden wie herkömmliche SMT-Bauelemente auf Lotpastendepots gesetzt und im Reflowlötverfahren verarbeitet [43]. Jeder einzelne Kontakt wird dabei durch auf der Unterseite des Bauelementes gelötete Lotkugeln realisiert, sodass sich eine flächige Anschlussstruktur ergibt (Bild 5).

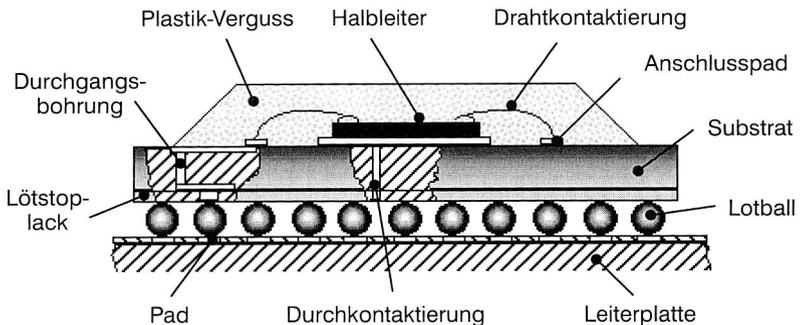


Bild 5: Gehäuseaufbau und Anschlussstruktur bei Ball Grid Arrays

Im Gegensatz zu Fine Pitch-Bauelementen, bei denen sich die Anschlussbeinchen an den vier Gehäuseseiten befinden, kann durch die Ausnutzung der gesamten Gehäusefläche ein wesentlich größeres Raster bei gleicher Gehäusegröße realisiert werden. Ein quadratisches Bauelement der Kantenlänge L besitzt eine Länge des umlaufenden Randes von $4L$ und kann somit $4L/a$ Anschlüsse im Rastermaß a umfassen. Bei flächiger Anordnung lässt sich eine Anschlusszahl von L^2/a^2 erreichen. Daraus ergibt sich mathematisch ein 4 x größeres Rastermaß bei gleicher Gehäusegröße und Anschlussanzahl. In der Praxis werden heutzutage vielfach hochpolige Bauelemente des Typs QFP im

Rastermaß 0,5 mm durch BGAs im Rastermaß 1,5 - 2 mm ersetzt. Dadurch ergeben sich die in der folgenden Tabelle 1 aufgeführten Größenvorteile:

Kennzahlen:	QFP	BGA
Anschlusszahl	208	225
Anschlussraster	0,5 mm	2,0 mm
Gehäusemaße	31,2 x 31,2 mm	32,0 x 32,0 mm
Gehäusehöhe	3,4 mm	2,3 mm
Flächenbedarf	973 mm ²	729 mm ²
Gehäuse- : Chipfläche	5 - 7 : 1	3 - 5 : 1
Anschlusspad	2,0 x 0,3 mm	0,7 mm Ø

Tabelle 1: Größervergleich zwischen QFP und BGA [43] [37]

Die interne elektrische Kontaktierung erfolgt über zwei Ebenen, wie sie in Bild 5 dargestellt sind. Der Halbleiter als eigentliches Schaltelement wird über Direktchipkontaktierung (siehe auch Kap.2.3) mit einem Zwischensubstrat kontaktiert. Dieses Zwischensubstrat fungiert als Träger für die Anschlussflächen, die wiederum auf der Leiterplatte kontaktiert werden.

Je nach Ausführung von Zwischensubstrat und Lotkugelmateriale werden die folgenden wichtigsten BGA-Varianten unterschieden [62] [43]:

PBGA (Plastic Ball Grid Array) ist der am häufigsten eingesetzte Typ. Als Zwischensubstrat dient ein handelsübliches Leiterplattensubstrat (FR4), der Chip wird mittels Wire Bonding mit dem Chipträger verbunden. Die Lotkugeln bestehen aus eutektischem Zinn/Blei (Sn60Pb40).

CBGA (Ceramic Ball Grid Array) basieren auf einem Multilayer-Substrat aus anorganischen Materialien. Die Anschlusskugeln sind sowohl aus eutektischen wie aus hochschmelzenden Zinn/Blei-Loten (Sn10Pb90) ausgeführt. Dadurch sind die Bauelemente sehr präzise gefertigt und hochtemperaturbeständig.

TBGA (Tape Ball Grid Array) zeichnen sich durch ein Trägersubstrat aus beschichteter Folie (z.B. Polyimid) aus. Dadurch soll bei ähnlichen technologischen Eigenschaften eine sehr geringe Bauhöhe erreicht werden.

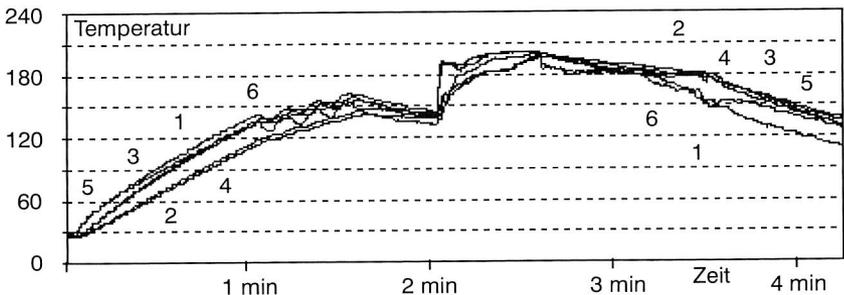
Aus der Gestaltung der inneren und äußeren Kontaktierungstechnologie definiert sich die Verarbeitung der jeweiligen BGA-Variante. Die jeweils einzusetzende Prozess- und Prüftechnologie wird in wesentlichem Maße durch das Bauelement bestimmt.

Prozess- und Prüftechnologie – Montage- und Verbindungstechnik

BGAs können problemlos in herkömmliche SMT-Prozessketten integriert werden, dabei erfolgt die elektrische und mechanische Kontaktierung im Reflowlötverfahren. Bedingt durch die Anordnung der Anschlüsse ist die Verwendung des Wellenlötens ebenso wie die Verarbeitung von THT-Bauelementen ausgeschlossen.

Für die Parametrisierung der einzelnen Prozessschritte Lotpastenauftrag, Bestücken, Reflowlöten ist zu beachten, dass BGAs zwar aufgrund ihres größeren Rastermaßes wesentlich unkritischer zu verarbeiten sind; gleichwohl ist jedoch eine hohe Präzision während des gesamten Fertigungsprozesses notwendig, da die eigentliche Fügestelle nach der Kontaktierung nicht mehr einsichtig ist. Der Lotpastenauftrag ist hierbei als unkritisch einzuschätzen, da die größeren Rastermaße entsprechend größere Toleranzen beim Schablonendruck erlauben. Daher werden für BGAs vorwiegend geätzte Schablonen eingesetzt, die gegenüber lasergeschnittenen oder galvanisch aufgebauten Schablonen eindeutige Kostenvorteile besitzen [96].

Der Bestückprozess als zentraler Prozessschritt bei der BGA-Verarbeitung muss die einwandfreie Platzierung der Bauelemente auf der Leiterplatte gewährleisten. Dazu gehört neben der positionsgenauen Bestückung eine vorherige Kontrolle der Anschlussballs sowie die Selektion von Bauelementen mit fehlenden oder beschädigten Balls. Diese Funktionen übernehmen in der Regel integrierte Kamerasysteme, mit denen eine automatische Bildauswertung direkt vor der Bestückung möglich ist [11].



Messfühleranordnung:

- 1, 6: BGA, Gehäuseoberfläche
- 2, 4: BGA, Unterseite mittig (verdeckt)
- 3, 5: BGA, Unterseite am Rand (verdeckt)

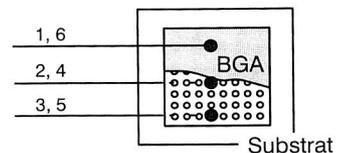


Bild 6: Temperaturprofil beim Dampfphasenlöten, aufgenommen mit Messfühlern an verschiedenen Stellen eines Ball Grid Arrays

Für den eigentlichen Verbindungsschritt, das Löten, kommen im Wesentlichen die mediengebundenen Lötverfahren Dampfphasen- und Konvektionslöten zum Einsatz [18]. Aus thermodynamischen Gründen (ein BGA verhält sich wie ein schwarzer Körper mit hoher Wärmekapazität) ist der Einsatz von Strahlungswärme nur sehr eingeschränkt möglich. Gegenüber dem Vollkonvektionslöten verursacht das Dampfphasenlöten eine geringere thermische Belastung einzelner Bauteile innerhalb komplexer Baugruppen. Bild 6 zeigt das Temperaturprofil einer Dampfphasen-Lötanlage, wie es für eigene Versuche eingesetzt wurde. Die geringe Belastung der Baugruppe läßt sich auf die homogene Temperaturverteilung zurückführen, die maximale Temperaturdifferenz zwischen Substratoberfläche und BGA-Unterseite beträgt im Schmelzbereich 15 K.

Für die der Montage nachgelagerten Prüfbereiche ergeben sich aus der verdeckten Anordnung der Lötstellen zusätzliche Herausforderungen. Da eine optische Kontrolle der Anschlüsse nicht mehr möglich ist, müssen röntgenoptische Verfahren zur Begutachtung der Lötverbindungen eingesetzt werden [47] [102]. In den letzten Jahren haben sich Verfahren auf Basis dreidimensionaler Bildauswertung durchgesetzt, da hier neben einfachen Qualitätsaussagen genauere Analysen zu Prozessinstabilitäten getroffen werden können [64]. Der Einsatz der Röntgentechnik ist jedoch noch immer mit hohen zusätzlichen Kosten verbunden.

Die Reparatur defekter Lötverbindungen stellt einen weiteren technisch und wirtschaftlich aufwendigen Prozessschritt dar. Während bei QFPs eine einzelne Lötstelle nachgearbeitet werden kann, bedingt eine defekte Lötverbindung bei BGAs ein Entfernen des gesamten Bauelementes. Dies bedingt jedoch zusätzlichen Freiraum auf der Baugruppe aus Gründen der Zugänglichkeit sowie eine lokal verteilte Temperaturbelastung während des Entlötvorganges [76]. Moderne Nacharbeitsplätze stellen technologisch akzeptable Lösungen zur Reduzierung der Stressbelastung der Baugruppe zur Verfügung. Die Auswirkungen eines Reparaturvorganges auf die Langzeitstabilität der Baugruppe sind bisher jedoch noch nicht hinreichend erforscht.

2.3 Verarbeitung ungehäuster Halbleiter

Die direkte Montage ungehäuster Halbleiter auf der Leiterplatte kann zu erheblichen Leistungssteigerungen hinsichtlich Performance und Integrationsdichte führen, erfordert jedoch spezielle Prozesstechnologien für die Handhabung und Verarbeitung [52]. Ausgehend von den ersten Entwicklungen in den 60er Jahren haben sich die drei wesentlichen Technologien "Chip & Wire", "Tape Automated Bonding" und "Flip Chip" etabliert, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll. Gemeinsam ist allen Chip on Board-Alternativen (COB) die Direktkontaktierung des Halbleiters auf dem Substrat. Für die einzelnen Verfahren ist die Umsetzung der elektrischen und mechanischen Kontaktierung charakteristisch.

Verfügbarkeitsproblematik

Die Herstellung von Halbleiterbauelementen erfolgt in zwei wesentlichen Schritten [52]. Im Front-End wird aus einem Silizium-Einkristall in einer komplexen Abfolge chemischer und photolithographischer Schritte die strukturierte Wafer-Scheibe hergestellt. Im Back-End werden die einzelnen Bausteine separiert, in ein Gehäuse montiert und getestet. Dieser Endtest umfasst Funktions- und Belastungstests, mit denen unter anderem Frühausfälle oder Designschwächen erkannt werden können [90].

Im Gegensatz zu Halbleiterbausteinen in BGA- oder QFP-Ausführung, deren Funktionalität somit uneingeschränkt testbar ist, stellt sich bei Halbleitern in ungehäuseter Form die Problematik der Testbarkeit. Diese sogenannten Dice (von engl. "die", dt. Würfel) können nur auf Waferlevel hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Funktion getestet werden. Die üblicherweise mithilfe von Nadelkarten oder Testadaptern durchgeführten zusätzlichen Belastungstests sind nur bedingt aussagefähig und können darüber hinaus zu Beschädigungen der strukturierten Dice führen. Eine echte Überprüfung der Langzeitfunktionalität ist derzeit nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich und wird von den Halbleiterherstellern in der Regel nicht angeboten [106].

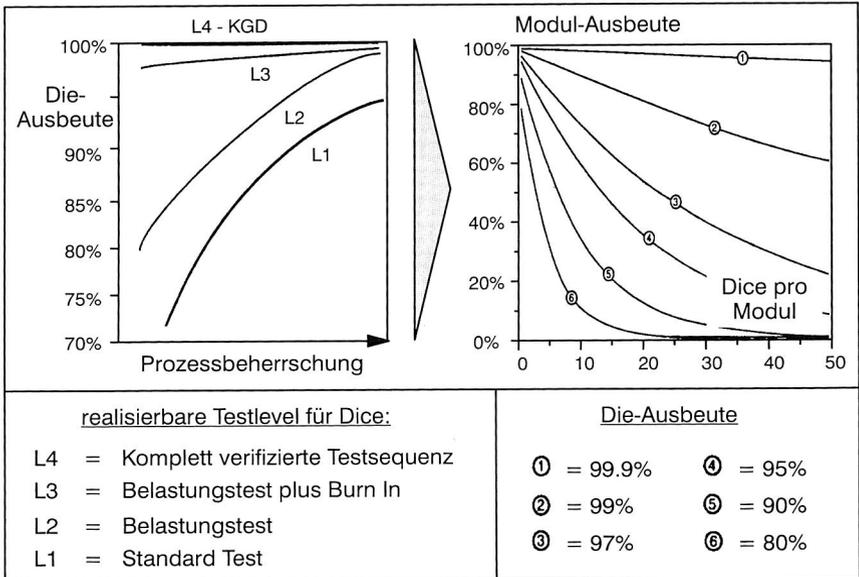


Bild 7: Potentiell hoher Anteil fehlerhafter Baugruppen als Folge der eingeschränkten Testbarkeit ungehäuseter Halbleiter auf Waferlevel [106]

Für den Verarbeiter ungehäuster Halbleiter ergibt sich somit die Situation, dass er auf den Einsatz als fehlerfrei identifizierter Bausteine (sog. "Known Good Dice", kurz KGD) verzichten muss und zwangsläufig einen Anteil fehlerhafter Bausteine von ca. 1-5 % verarbeitet [117]. Im Vergleich dazu liegt die Ausbeute klassischer QFP-Bausteine bei mind. 99 % und kann zudem vor dem Platzieren explizit getestet werden.

Kritisch kann sich dies insbesondere bei Baugruppen mit mehreren ungehäusten Halbleitern auswirken, wie in Bild 7 für verschiedene Szenarien dargestellt ist. Eine Baugruppe mit drei ICs, deren jeweilige Ausfallwahrscheinlichkeit bei 5 % liegt (Ausbeute 95%), erreicht eine Gesamtausbeute von lediglich 86 %. Je nach realisierter Testtiefe lässt sich die Qualität des einzelnen Bausteins stark erhöhen, letztendlich bestimmen jedoch Montageaufgabe und Komplexität der Baugruppe die erforderliche Die-Qualität.

Chip & Wire - Verbindungstechnologie

Die am Häufigsten eingesetzte Variante der Nacktchipverarbeitung ist das Chip & Wire-Verfahren. In einem zweistufigen Prozess wird zuerst der Chip mittels Leitkleber auf dem Substrat montiert, ehe die elektrische Verbindung der Anschlusspads mit den Leiterplattenpads durch Drahtkontaktierung erfolgt [90]. Die mechanische Fixierung (sog. *Diebonden*) dient dabei zusätzlich zur Wärmeabfuhr und zur Masseverbindung bzw. Abschirmung. Nach dem Bestücken und Aushärten des Leitklebers wird der Chip mit dem Substrat elektrisch verbunden. Dazu werden sequentiell einzelne Anschlussstellen des Chips mit den Pads der Leiterplatte kontaktiert, indem ein dünner Gold- oder Aluminiumdraht gezogen wird (sog. *Wirebonden*). Das hierzu verwendete Thermosonic-Verfahren basiert auf der Kombination von Druck, Temperatur und Ultraschall-Einwirkung zur Fixierung der 33 - 50 µm starken Drähte [49].

Nachdem der Chip vollständig kontaktiert wurde, kann er getestet und mit Epoxidharz vergossen werden. Dieses als Glob Top bezeichnete Verfahren schützt den Chip vor äußeren Einflüssen und erleichtert die Weiterverarbeitung der Baugruppe, da der nackte Chip und die empfindlichen Drähte vollständig von der Umgebung abgeschlossen werden.

Die wesentlichen Vorteile dieser Verbindungstechnologie liegen zum einen in der hohen technologischen Flexibilität, es können auch Lösungen mit nur wenigen Wirebonds problemlos realisiert werden. Zum anderen ist die Chip & Wire-Montage ein Verfahren, das im Besonderen bei Klein- und Mittelserienfertigung wirtschaftlich und ohne Qualitätseinbußen eingesetzt werden kann.

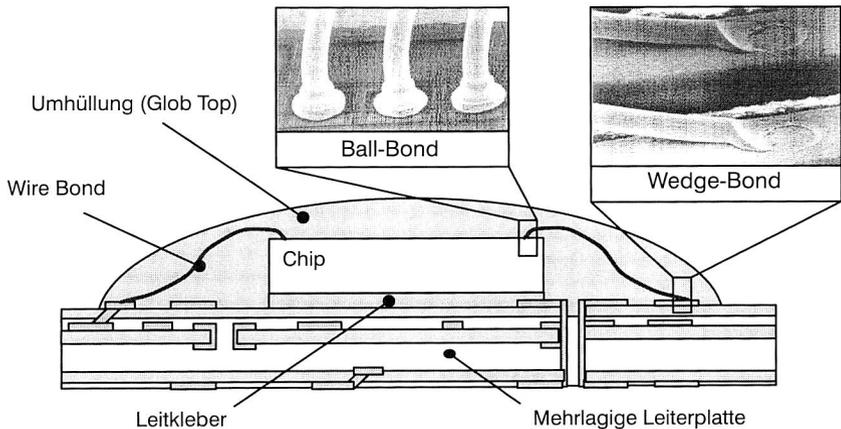


Bild 8: Chip & Wire - Verbindungstechnologie

Gegen das Wirebonding spricht die zeitaufwendige, weil sequentielle Verdrahtung der Chips sowie die Notwendigkeit zusätzlicher Investitionen in spezifische Prozesseinrichtungen sowie in die erforderlichen reinraumähnlichen Fertigungsbedingungen. Trotz dieser Hindernisse hat sich Chip & Wire als Verfahren der Wahl für einfache Nackchipkontaktierungen (z.B. im Bereich der Smart Cards [78]) etabliert.

Tape Automated Bonding - Verbindungstechnologie

Elektrisches Verbindungselement beim Tape Automated Bonding (TAB) ist ein metallischer Trägerfilm (sog. *Tape*), der das feinstrukturierte Zuleitungsmuster zwischen Chip und Substrat enthält [33]. Der Trägerfilm wird in zwei Prozessschritten zuerst mit dem Die und dann mit dem Substrat verbunden, wobei der erste Kontaktierungsschritt oftmals vom Halbleiterhersteller übernommen wird. Für dieses sogenannte *Inner Lead Bonding* muss der Chip mit Lotbumps versehen sein, über die die elektrische und mechanische Verbindung zwischen Chip und Zuleitungsmuster hergestellt wird. Nachdem das Tape über die Bumps des Chip positioniert wurde, lötet ein beheizter Bügel im Thermokompressionsverfahren simultan alle Verbindungen zwischen Folie und Chip (Bild 9).

Im zweiten Schritt wird der Verbund Chip-Zuleitungsmuster beim Baugruppenhersteller aus dem Endlosband separiert und im *Outer Lead Bonding* auf der Leiterplatte montiert. Der Lötprozess wird in der Regel mit bekannten Reflow- oder Einzelpunktlotverfahren durchgeführt [90]. Durch das im Vergleich zu Chip & Wire relativ grobe Raster ist der

Montageprozess als unkritisch einzustufen, berücksichtigt man die für feinere Strukturen notwendigen sauberen Umgebungsbedingungen.

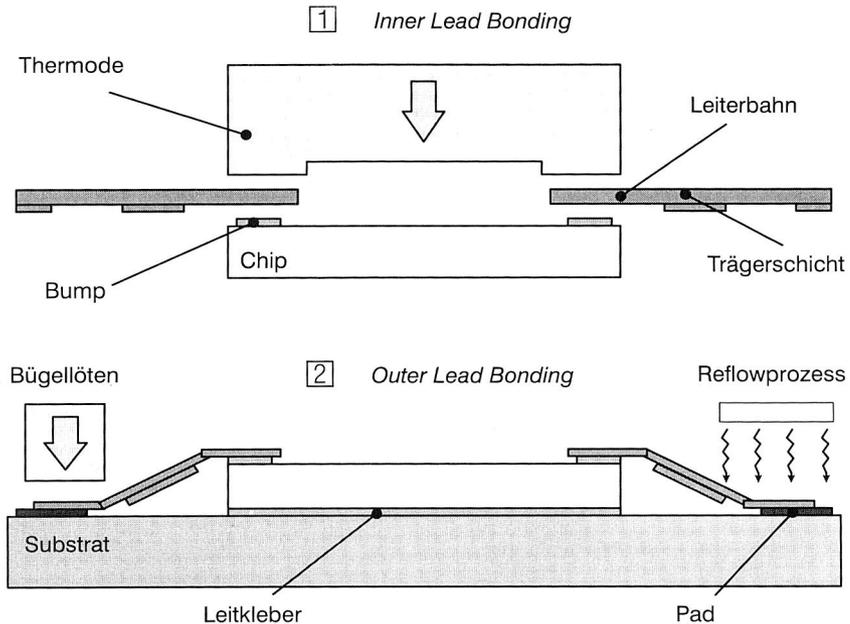


Bild 9: Tape Automated Bonding - Verbindungstechnologie

TAB ist ein klassisches Großserienverfahren, das seinen Anwendung vorwiegend in Asien in der Massenfertigung von Uhren, Taschenrechnern und anderen Konsumgütern findet. Mit der TAB-Technologie sind hohe Investitionen sowie die Notwendigkeit einer Fließfertigung verbunden, da die einzelnen Bauelemente meist direkt von der Rolle herab in separaten Prozessschritten verarbeitet werden. Im Gegensatz zu den konkurrierenden COB-Verfahren wird ein Teil der Kontaktierung auf den Halbleiterhersteller verlagert, was zu anderen Kostenstrukturen und einer geringeren Flexibilität führt. Für Anwendungen mit hohen Stückzahlen bei geringen technologischen Anforderungen ist TAB ein bewährtes Verfahren, um einen Chip schnell und zuverlässig auf dem Substrat zu kontaktieren.

Aufgrund dieser Randbedingungen eignet sich TAB ebenfalls sehr gut für Smart Card Applikationen, bei denen minimale Bauhöhe und hohe Produktivität des eingesetzten Kontaktierungsverfahren zwingend erforderlich sind.

Flip Chip - Verbindungstechnologie

Die Flip-Chip-Montage hat unter den COB-Technologien die größte Verwandtschaft zum herkömmlichen SMT-Prozess, lediglich die Strukturen sind wesentlich kleiner. Die aktive Fläche des Halbleiters wird mit Bumps versehen und der Chip kopfüber ("geflippt") auf das Substrat aufgesetzt. Die Kontaktierung erfolgt mittels Reflowlöten. Die Vorbereitung der Flip Chips erfolgt beim Halbleiterhersteller, der die Chips auf Waferebene mit den Lotbumps versieht und dem Verarbeiter gegurtet oder in speziellen Plastikgehäusen (sog. *Waffle Packs*) bereitstellt.

Der Baugruppenhersteller kann Flip Chips wie BGAs mit den Montageschritten Lotpastenauftrag, Bestücken und Reflowlöten behandeln. Die Integration in bestehende Fertigungslinien ist somit unter Berücksichtigung der sehr feinen Anschlussabmessungen bis zu Rastermaß unter 200 μm möglich [38]. Zur Unterstützung der engen Toleranzen werden in den Bestückprozess integrierte Visionssysteme sowie verschiedene flussmittel nutzende und flussmittelfreie Lötvarianten eingesetzt [107]. Um Risse oder Ermüdungsbrüche der Lötstellen aufgrund thermischer Fehlanpassungen zu verhindern, hat sich eine Unterfüllung aus Epoxidharz zwischen Chip und Substrat bewährt.

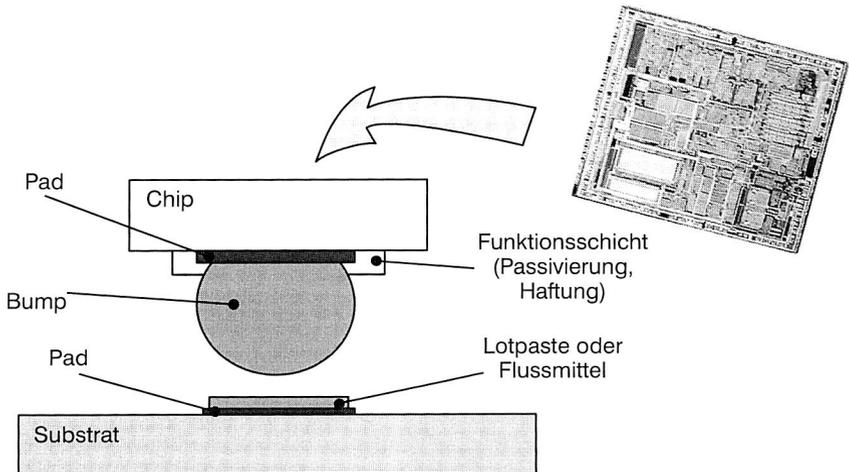


Bild 10: Flip Chip - Verbindungstechnologie

Herausragendes Merkmal der Flip Chip-Verbindungstechnologie ist die sehr gute Kompatibilität zum SMT-Prozess. Auf eine kostenintensive Reinraumumgebung kann verzichtet werden, der einzige zusätzliche Prozessschritt, das Auftragen des Underfillers

kann mit herkömmlichen Klebstoffdispensern durchgeführt werden. Da der Chip komplett über peripher angeordnete Lotbumps kontaktiert wird, ergeben sich eine optimale Nutzung der Fläche auf dem Substrat sowie sehr kurze Signalwege. Hindernisse für den größeren Einsatz dieser Technologie stellen die Verfügbarkeit gebumpfter Chips in der erforderlichen Qualität sowie die Test- und Reparaturproblematik fixierter Flip Chip-Verbindungen dar.

Ausgehend von den guten Erfahrungen bei der Verarbeitung von Flip Chips wurden in den letzten Jahren verstärkt internationale Forschungsaktivitäten zur Realisierung neuer höchstintegrierter Gehäuseformen eingeleitet. Ziel der Entwicklungen war es, die elektrischen Vorteile von Flip Chips mit den Vorteilen gehäuseter Bauelemente hinsichtlich Verfügbarkeit, Handhabung und Montage zu vereinen. Diese Gehäuseform wurde unter dem Begriff *Chip Scale Package* eingeführt.

2.4 Einsatz von Chip Scale Packages

Gehäuseaufbau und Anslusstechologie

Als Chip Scale Packages (CSPs) werden all diejenigen Halbleiterbauelemente bezeichnet, deren Grundfläche maximal 20 % größer als die Fläche des integrierten Die ist [105]. Nähert sich das Flächenverhältnis von Gehäuse zu Halbleiter 1:1, spricht man auch von Chip Size Packages. Beiden gemeinsam ist der prinzipielle Bauelementaufbau, der – im Gegensatz zu Flip Chip – immer ein Gehäuse und eine Zwischenschicht zur Kontaktierung benötigt (siehe auch Bild 11).

Bei CSPs handelt es sich um eine relativ junge Gehäuseform, erste Publikationen stammen aus dem Jahre 1994. Die Vielzahl an entwickelten Gehäuseaufbauten sowie die starke Nachfrage nach Prozess- und Systemlösungen belegen die Bedeutung, die diesem neuen Gehäuse seither beigemessen wird [79]. Technologisch motiviert wurde die Entwicklung von CSPs durch den Zwang nach einem miniaturisierten Bauelement für integrierte Schaltungen, das trotz geringster Abmessungen ein Gehäuse besitzen und somit SMT-kompatibel sein sollte.

Bedingt durch frühzeitig einsetzende Patente und die Vielfalt an konkurrierenden Anslusstechologien konnte bis heute keine vollständige Standardisierung wesentlicher Gehäusemerkmale abgeschlossen werden. Derzeit konzentrieren sich die Normungsaktivitäten in Asien auf die EIAJ EE-13 CSP und in Westeuropa bzw. den USA auf die JEDEC CSP JC-11 [72]. Allgemeine Trends sind Rastermaße von 0,4 bis 1,0 mm, Kontaktdurchmesser von 0,2 bis 0,4 mm und Gehäusehöhen von 0,8 bis 1,5 mm. Die innere Kontaktierung erfolgt dabei mit den klassischen COB-Verfahren, woraus sich im wesentlichen die in Bild 11 dargestellten vier Aufbauvarianten entwickelt haben.

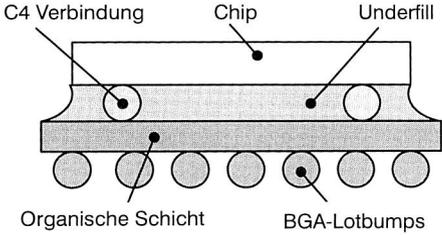
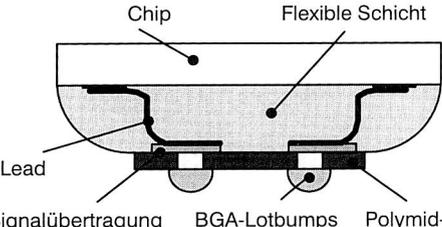
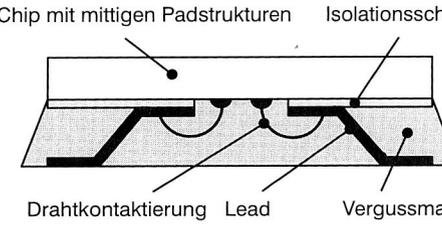
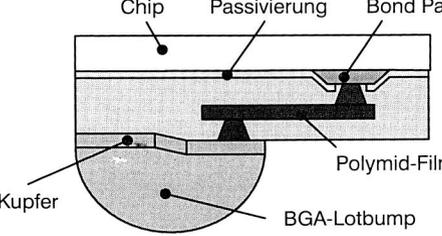
 <p>C4 Verbindung Chip Underfill</p> <p>Organische Schicht BGA-Lotbumps</p>	<p><u>Miniature Mold Package:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Starres, meist organisches oder Keramiksubstrat - Innere Kontaktierung erfolgt im Flip Chip-Verfahren - Für höchste Zuverlässigkeit und Anforderungen geeignet
 <p>Chip Flexible Schicht</p> <p>Lead</p> <p>Signalübertragung BGA-Lotbumps Polyimid-Film</p>	<p><u>Micro-BGA:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Umverdrahtung auf flexiblem Polyimid-Zwischensubstrat - Innere Kontaktierung durch Wire Bonding oder mittels Beam Leads - Sehr flexible Bauform
 <p>Chip mit mittigen Padstrukturen Isolationsschicht</p> <p>Drahtkontaktierung Lead Vergussmasse</p>	<p><u>Lead-on-Chip Package:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Modifizierte Leadframe-Kontaktierung in Kombination mit Wire Bonding - Periphere Anschlüsse - Kostengünstige Bauform für geringe Anschlusszahlen
 <p>Chip Passivierung Bond Pad</p> <p>Kupfer Polymid-Film BGA-Lotbump</p>	<p><u>Wafer Level Package:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Innere Kontaktierung sowie Bumping erfolgt direkt auf der Waferoberfläche - Prozesstechnisch seltene, anspruchsvolle Bauform - Echtes "Chip Size Package"

Bild 11: Aufbauvarianten für CSPs [9] [99]

Verarbeitung im SMD-Prozess

Gegenüber den im vorherigen Kapitel vorgestellten Verfahren zur Nacktchipkontaktierung besitzen CSPs wesentliche Vorteile bei der Verarbeitung. Durch die Ausführung als gehäutes Bauelement sind sie in bestehende SMT-Montagelinien integrierbar, die bei COB auftretenden Probleme hinsichtlich Handhabung und Montage ungehäuster Dice treten nicht auf. Durch die Verfügbarkeit verschiedener Kontaktierungsalternativen gewinnt der Verarbeiter zusätzliche Flexibilität bei der technologischen Auslegung und Parametrisierung seiner Prozesskette.

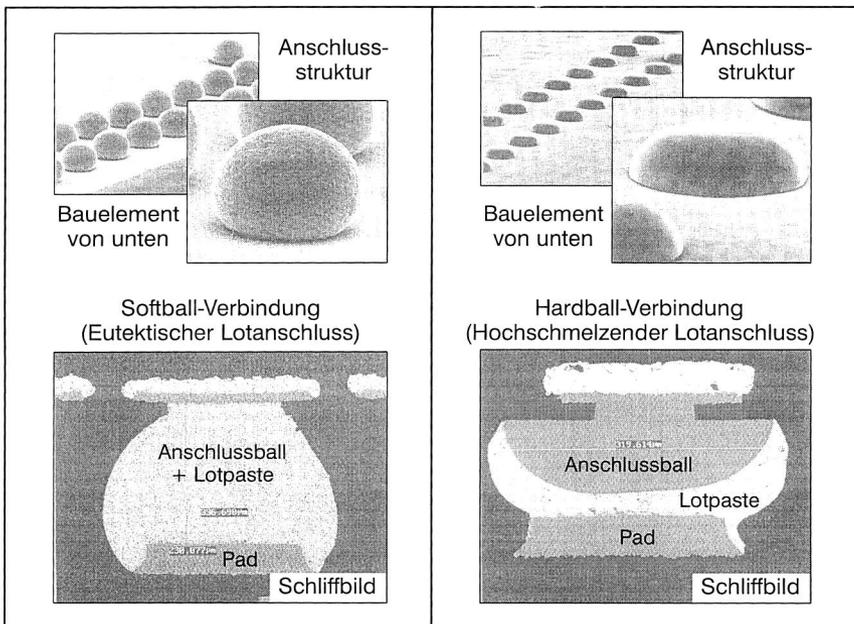


Bild 12: Gegenüberstellung der beiden Kontaktierungsalternativen mit eutektischen und mit hochschmelzenden Lotballs

Gleichwohl stellt die Verarbeitung von CSPs hohe Anforderungen an die beteiligten Prozesse. Insbesondere Lotpastenauftrag und Bestückprozess sind auf die miniaturisierten Anschlussstrukturen abzustimmen [10] [65]. Da die Prozessführung infolge der zunehmenden Komplexität der Baugruppen auf ein großes Spektrum an Bauelementen angepasst werden muss, wird die Prozessqualität kritischer Bauelemente über integrierte oder nachgeschaltete Inspektionssysteme realisiert. Mit optischen Systemen ist

eine direkte Überprüfung der Lagegenauigkeit von applizierter Lotpaste oder CSP-Bauelement möglich, während der Einsatz röntgenoptischer Systeme der Überprüfung innerer Defekte in Lötverbindungen dient [101]. Diese Systeme haben sich für den Einsatz bei CSPs bewährt, da die verdeckten Lötstellen auf optischem Wege nicht mehr prüfbar sind.

Prozesstechnisch unterscheidet man bei CSPs – ähnlich wie bei BGAs – zwischen *Softballs* und *Hardballs*. CSPs mit Softballs sind in ihrem Prozessverhalten robuster, da die Anschlussballs aus eutektischem Lot aufgebaut sind und im Reflowofen aufschmelzen. Platzierungsgenauigkeiten können somit durch den stärker wirkenden Selbstzentriereffekt ausgeglichen werden. Im Gegensatz dazu bestehen die Kontaktierungen bei CSPs mit Hardballs aus hochschmelzenden Lotlegierungen. Dies führt zu Fügstellen mit höherer Zuverlässigkeit, allerdings muss der Montageprozess in engeren Prozessfenstern geführt werden [30]. In Bild 12 sind die beiden Kontaktierungsalternativen mit den dazugehörigen Verbindungsstellen gegenübergestellt. Deutlich ist links die für Softballs typische tonnenförmige Form der Lötstelle zu erkennen, die sich aus dem gleichzeitigen Aufschmelzen von Lotpaste und Anschlussball ergibt. Im Gegensatz dazu zeigt das rechte Schlibbild, dass der nicht aufschmelzende Ball auch nach dem Lötprozess bestehen bleibt. Der Kontakt zwischen Substrat und Bauelement wird hier über eine größere Menge an applizierter Lotpaste realisiert.

2.5 Abgeleitete Anforderungen an die Prozess- und Prüftechnik

Vergleichende Bewertung der Bauelementformen

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen hochintegrierten Bauelementformen werden im Folgenden gegenübergestellt und hinsichtlich technologisch und wirtschaftlich relevanter Kriterien bewertet. Daraus werden die Anforderungen an die Prozess- und Prüfumgebung abgeleitet, die sich aus dem spezifischen Einsatz einer Bauelement- oder Gehäuseform ergeben. Wesentlich ist dabei die Betrachtung der erreichbaren Prozess- wie Produktqualität und der dazu notwendigen Kosten.

Aus der Gegenüberstellung in Tabelle 2 ist ersichtlich, dass insbesondere die Nacktchipkontaktierungstechnologien nur mit hohem technologischen und wirtschaftlichen Aufwand zu realisieren sind. Zusätzliche Investitionen für Reinraumumgebung oder erweiterte Prozesstechnik hemmen eine schnelle Einführung dieser Technologien vor allem im Mittelstand. Das größte Potential besitzt die Flip Chip-Technologie, da hier prozesseitig auf dem bekannten Bauelement BGA aufgebaut werden kann. Im Gegensatz zu Europa werden in den USA Reinraumbedingungen für die Flip Chip-Montage nicht als zwingend notwendig angesehen, sodass kostengünstige Prozesslösungen auf

Basis eutektischer Anschlüsse im Reflowlötverfahren schon seit einigen Jahren erfolgreich eingesetzt werden [53].

Technologie \ Kriterien	BGA	TAB	Chip&Wire	FlipChip	CSP
					
Anforderungen an die Prozesstechnik	++	-	-	●	+
Anforderungen an die Prüftechnik	+	+	--	-	●
Integrations- und Zukunftsfähigkeit	-	●	+	++	+
Wirtschaftlichkeit	+	+	-	●	●
Qualitätsfähigkeit	+	●	●	●	+

Tabelle 2: Gegenüberstellung alternativer Bauelementformen hinsichtlich prozesstechnischer und wirtschaftlicher Kriterien

BGAs besitzen demgegenüber deutliche Vorteile in der Verarbeitung. Die Anforderungen an die Prozesstechnik sind bedingt durch das vorhandene Gehäuse und das große Rastermaß vergleichsweise gering. Die Integration in bestehende SMD-Linien ist zwar mit zusätzlichem Prüfaufwand zur Kontrolle der verdeckten Anschlüsse verbunden, die robuste Ausführung sowie Selbstzentriereffekte während des Aufschmelzvorganges sorgen jedoch für sehr zuverlässige Lötverbindungen.

Die langfristig interessanteste Alternative zur Häusung und Verarbeitung höchstintegrierter Bauelemente stellen CSPs dar. Durch die Kombination aus BGA-Gehäusetechnologie und Flip Chip-Anschlussstechnologie steht ein hochinnovatives Bauelement zur Verfügung, das trotz der geringen Baugröße ohne zusätzliches Spezialequipment verarbeitet werden kann. Voraussetzung für eine effiziente Verarbeitung von CSPs ist allerdings die Beherrschung der eingesetzten Prozessschritte.

Konsequenzen für die Baugruppenmontage hinsichtlich Qualität und Kosten

Aus der favorisierten Technologie ergeben sich vielfältige Anforderungen hinsichtlich Bauelement, Maschinen- und Prozessumgebung. Technologisch betrachtet müssen

alle beteiligten Komponenten in ihrer Qualitätsfähigkeit beherrscht sein. Für die Elektronikproduktion mit ihren vielfältigen Wechselwirkungen bedeutet dies, dass einerseits die einzelnen Prozessmodule – unabhängig von der aktuell gewählten Technologie – technisch qualifiziert sein müssen. Andererseits muss die gesamte Prozesskette im Zusammenspiel mit dem gewählten Bauelementspektrum die geforderte Prozessqualität liefern, um dem Anspruch einer Elektronikproduktion mit minimalen Kosten bei maximaler Qualität gerecht zu werden.

Der Flachbaugruppenproduzent wird diejenige Technologie vorziehen, die sich seiner Meinung nach mit minimalem Aufwand in bestehende SMD-Linien integrieren lässt. Unterliegt er technologischen Zwängen, wird er unter Umständen die anspruchsvollere, aber kostenintensivere Lösung vorziehen. Die Auswahl der geeigneten Anschluss- und Kontaktierungstechnologie ist damit gleichermaßen von technologischen wie von wirtschaftlichen Faktoren abhängig, der konkrete Anwendungsfall zusammen mit dem vorhandenen Prozesswissen entscheidet zwischen den verfügbaren Varianten.

In den folgenden Kapiteln dieser Arbeit wird die qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementtechnologien in die Flachbaugruppenfertigung intensiv vorgestellt. Dazu wurden umfangreiche Untersuchungen sowohl zu den prozesstechnischen wie zu den strategischen Faktoren, die die Auswahl und Qualifizierung der bestgeeigneten Gehäusetechnologie beeinflussen, durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen sollen, zusammen mit den entwickelten rechnergestützten Werkzeugen, den Entscheidungsträger bei der Auswahl und bei der Einführung der für ihn optimalen Bauelementform wesentlich unterstützen.

3 Technische Qualifizierung von Prozessen und Prozessketten in der Flachbaugruppenfertigung

Grundvoraussetzung für die Produktion hochwertiger Elektronikbaugruppen ist die Sicherstellung der technischen Fähigkeit der eingesetzten Systeme. Vor dem Hintergrund sehr komplexer und variantenreicher Produkte müssen die einzelnen Prozess- und Prüfeinheiten technisch qualifiziert und, falls notwendig, an die aktuellen qualitätsrelevanten Randbedingungen angepasst werden. Ziel ist hierbei die Definition und Ermittlung objektiver, vergleichbarer Kennzahlen zur Beschreibung der Qualitätsfähigkeit eines Prozesses oder einer Prozesskette.

Im nun folgenden Kapitel werden daher die in der SMD vorherrschenden Prozessschritte Lotpastenauftrag, Bestücken und Reflowlöten hinsichtlich ihrer relevanten Einfluss- und Zielparameter analysiert sowie deren Qualitätsfähigkeit untersucht. Die technische Qualifizierung verschiedener Systeme zur Flachbaugruppenfertigung wird mit Hilfe umfangreicher experimenteller Untersuchungen durchgeführt. Daraus werden Prozessparameter und Fähigkeitsbereiche für den Einsatz dieser Prozesse bei feineren oder verdeckten Anschlussstrukturen abgeleitet. Auf Basis der so ermittelten Kennzahlen wird eine durchgängige, prozesskettenbezogene Fähigkeitsanalyse entworfen und exemplarisch für eine am Lehrstuhl aufgebaute Fine Pitch-Prozesskette realisiert.

3.1 Der Einfluss spezifischer Einzelprozesse auf die Prozessqualität

Wie bereits im vorherigen Kapitel ausführlich dargestellt, besteht die Elektronikproduktion aus den drei technischen Kernprozessen Lotpastenauftrag, Bestückprozess und Reflowlötprozess. Jeder dieser drei Prozesse kann dabei wiederum mehrere sequentielle Einzelprozesse beinhalten, die von der Komplexität der zu montierenden Baugruppe bestimmt werden [26]. Da in der Regel der Bestückprozess logistisch und technisch die Engstelle darstellt, werden üblicherweise verschiedene Bestückssysteme in einem Verbund eingesetzt. Hinzu kommen maschinenintegrierte oder in die Linie eingebundene Inspektionssysteme, deren Aufgabe die direkte Qualitätskontrolle des vorgelegten Prozessschrittes ist. Diese prozessintegrierte Strategie der Qualitätssicherung gewinnt zunehmend an Bedeutung, da eine 100%-Kontrolle am Ende der Linie aus wirtschaftlichen wie technischen Gründen nicht mehr realisierbar ist [31] [14].

Daraus ergibt sich die in Bild 13 skizzierte Referenzprozesskette, die in dieser Form auch für die Verarbeitung innovativer Bauelementformen wie BGA, Flip Chip oder CSP Gültigkeit besitzt (vergleiche Kapitel 2).

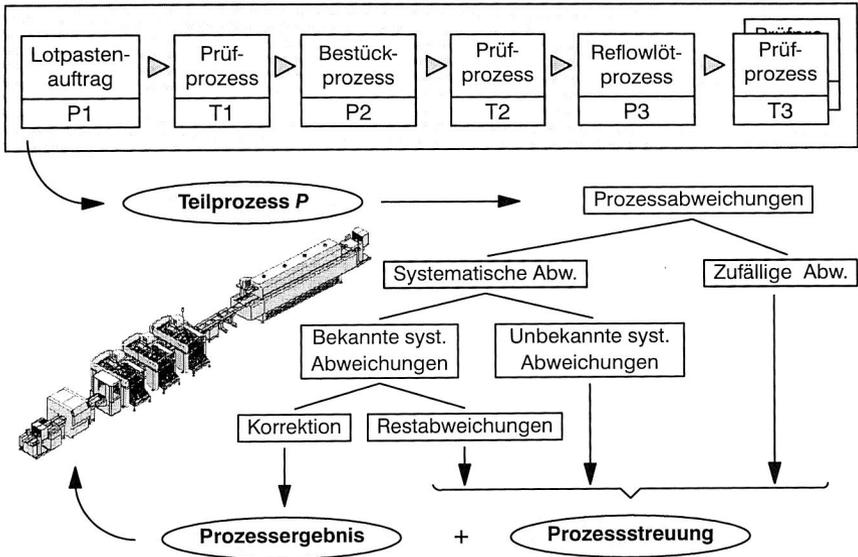


Bild 13: Schematische SMD-Referenzprozesskette sowie die möglichen zufälligen und systematischen Zielgrößenschwankungen

Jeder Prozessschritt P arbeitet mit einer in der Regel unbekanntem Fehlerrate p_i und jeder Test- oder Inspektionsschritt T verursacht weitere Fehler t_i (Pseudofehler und Fehlerschlupf). Die Verknüpfung sequentieller, voneinander unabhängiger Einzelschritte erfolgt für das in Bild 13 dargestellte Beispiel nach folgender Formel [7]:

$$P_{\text{ges}} = 1 - ((1 - p_1) \times \dots \times (1 - p_i) \times \dots \times (1 - p_n) \times (1 - t_1) \times \dots \times (1 - t_j) \times \dots \times (1 - t_m));$$

- mit P_{ges} Resultierende Gesamtfehlerrate
 p_i Fehlerrate eines einzelnen Prozessschrittes
 t_j Fehlerrate eines einzelnen Prüfschrittes

$$p = 1 - a$$

a Prozessausbeute (Anzahl Gutteile / Gesamtzahl produzierter Teile)

Um Aussagen zur Qualitätsfähigkeit von Prozessschritten ableiten zu können, müssen diese Fehlerquoten erfasst und systematisiert werden. Aus technischer Sicht resultieren Fehler aus Parameterschwankungen, d.h. aus Abweichungen der Istwerte definierter Stellgrößen von deren vorgegebenen Sollwerten. Diese Abweichungen können systematischer oder zufälliger Natur sein (Bild 13). Systematische Fehler (wie das Wandern

der Bestückposition aus der Sollposition) können meist mittels geeigneter Messverfahren ermittelt und abgestellt, bzw. in engen Grenzen gehalten werden (z.B. durch regelmäßiges Kalibrieren) [89]. In der industriellen Praxis werden für kritische Prozesse Prozessfenster definiert, innerhalb deren Toleranzgrenzen ein Parameter ohne negative Folgen auf die Prozessqualität schwanken kann. Die Überwachung dieser Prozessgrenzen erfolgt dabei mit Methoden und Werkzeugen der statistischen Prozessregelung (SPC) [77].

Zu berücksichtigen bei der Betrachtung der Prozessqualifizierung ist hierbei zum einen der große Einfluss einzelner Fehlerquoten, die starken Schwankungen unterliegen, zum anderen aber auch die Gesamtfehlerquote, die sich aus der kombinatorischen Aneinanderreihung mehrerer Einzelprozesse ergibt. Ein anschauliches Beispiel für die Komplexität heutiger Prozessketten liefert der Herstellungsprozess mikroelektronischer Bauteile, der sich aus bis zu 500 Arbeitsschritten zusammensetzt (Bild 14). Die einzelnen Spezifikationen müssen peinlich genau eingehalten werden, um letztlich eine Ausbeute von ca. 80% zu erreichen. Bei 450 Prozessschritten muss hierfür jedes Prozessfenster zu 99,95 % eingehalten werden; schon bei nur 99% Toleranzerfüllung je Teilschritt sinkt die Ausbeute statistisch auf 1% herab.

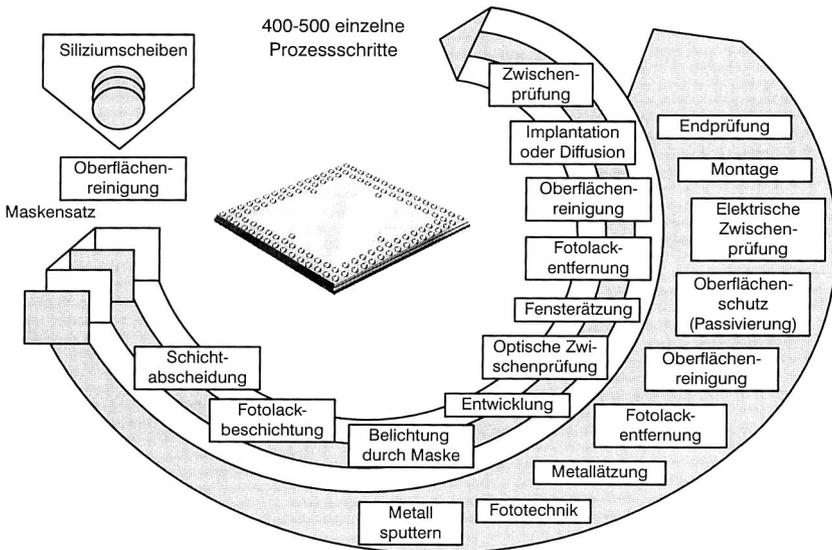


Bild 14: Die Komplexität iterativer Prozesse in der Elektronikproduktion am Beispiel des Herstellungsprozesses mikroelektronischer Bauteile [59]

Daneben treten weitere, in der Regel zufällige Fehler auf, die zu Schwankungen des gewünschten Qualitätsniveaus führen können. Die zu Grunde liegenden Randbedingungen sind vielfach unbekannt oder können nicht erfasst werden. Störeinflüsse seitens des Bedienpersonals, klimatische oder dynamische Veränderungen sind nur schwer rückverfolgbar und damit für Regelungsstrategien ungeeignet. So konnte beispielsweise in früheren Arbeiten der Einfluss der Umgebungstemperatur während des Lotpastenauftrags auf die Qualität der Lötverbindung nachgewiesen werden [31].

Die überwiegende Zahl dieser sekundären Einflussparameter auf die Prozessqualität ist allerdings noch nicht hinreichend quantitativ beschrieben, sodass die Forderung nach qualitätsfähigen, beherrschten Einzelprozessen umgesetzt werden muss. In den folgenden Kapiteln werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten methodischen und experimentellen Untersuchungen zu Fragen der Qualitätsfähigkeit und technischen Qualifizierung ausführlich vorgestellt.

3.2 Untersuchungen zur Fine Pitch-Tauglichkeit ausgewählter Systeme zum Lotpastenauftrag

3.2.1 Parametrisierung der qualitätsbestimmenden Prozesskenngrößen

Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass 60-70 % aller im Prozess verursachten Fehler auf den Lotpastenauftrag zurückzuführen sind [35] [55]. Demgegenüber beträgt der Kostenanteil der Lotpaste – bezogen auf die Gesamtkosten einer elektronischen Baugruppe – weniger als 0,3 % [82], die Kosten für den Prozessschritt Lotpastenauftrag betragen ca. 15–20 % der gesamten Prozesskosten [31]. Dieses Missverhältnis zwischen Wertschöpfung, Kosten- und Fehlerverursachung hat bisher zu einer starken Fokussierung auf die späteren Prozess- und Prüfschritte geführt.

Erst in der jüngeren Vergangenheit werden verstärkt Systeme eingesetzt, mit denen auch eine direkte Überprüfung des Lotpastendrucks möglich ist [91]. Diese meist lichtoptisch arbeitenden Inspektionssysteme basieren auf der zweidimensionalen Messung prozessrelevanter Zielgrößen wie Dottdurchmesser oder Versatz von Lotpastendruck zum Pad.

Für die hier angestrebte Prozessqualifizierung des Lotpastenauftrags sind jedoch flächig arbeitende Systeme unzureichend, da die wahre dreidimensionale Gestalt des Lotpastendrucks nur indirekt erfasst werden kann. Die Messbarkeit der Zielgrößen Form und Volumen muss über direkte 3D-bildverarbeitende Verfahren erfolgen, wobei verschiedene Messstrategien eingesetzt werden können (Bild 15).

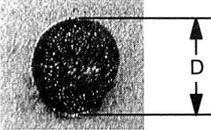
Direkte Messung	Indirekte Messprinzipien und -verfahren	
 <p data-bbox="128 424 373 460">Optische Vermessung der dreidimensionalen Kontur</p>	 <p data-bbox="434 424 642 460">Optische 2D-Messung und math. Analyse</p>	 <p data-bbox="696 424 930 460">Erfassung nichtoptischer Größen und Analyse</p>
<ul style="list-style-type: none"> + 3D-Bildverarbeitung + Hochgenaue Verfahren + Direkte Auswertung und Weiterverarbeitung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> + Schnelle Datenerfassung und -auswertung + Einfache, wirkungsvolle Messprinzipien + Bekannte und beherrschbare Technik 	
<ul style="list-style-type: none"> - Technisch anspruchsvolle Verfahren und Anlagen - Nur bedingt inline-fähig - Teure Systemlösungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur für einfache Geometrien einsetzbar - Keine direkte Auswertung des Messobjektes - Eingeschränkte physikalische Genauigkeit 	

Bild 15: Ausgewählte technische Möglichkeiten zur Bestimmung dreidimensionaler Größen beim Lotpastenauftrag am Beispiel des Dotvolumens

Je nach Einsatzgebiet und den zu messenden Geometrien können ebenso maschinenintegrierte Messsysteme eingesetzt werden, die eine schnelle Kontrolle der Geometrie mittels indirekter Messverfahren durchführen (Bild 15 rechts). Zur quantitativen Auswertung werden jedoch fast ausnahmslos dreidimensional arbeitende, externe Systeme eingesetzt, die hochgenau die Oberflächenkontur erfassen und direkte Aussagen zu den Prozesskenngrößen Volumen und Form liefern. In den folgenden Kapiteln werden anhand zweier Beispiele der Einsatz eines integrierten 2D-optischen Systems und die Möglichkeiten eines externen 3D-fähigen Systems dargestellt sowie die daraus resultierenden Ergebnisse bei der Prozessqualifizierung zweier Systeme zum Lotpastenauftrag diskutiert.

3.2.2 Ermittlung der Dosierfähigkeit eines Präzisions-Dispenssystems

Der Auftrag von Lotpaste kann sequentiell im Dispensverfahren oder simultan-kontinuierlich im Druckverfahren erfolgen. Dispensverfahren zeichnen sich gegenüber Druckverfahren durch hohe Flexibilität hinsichtlich Position und Menge sowie durch eine gezielte Regelung der Zielgröße Lotdepotvolumen aus. Die verschiedenen zum Einsatz kommenden Verfahren und deren spezifische Vor- und Nachteile wurden bereits aus-

fürlich wissenschaftlich untersucht, wobei die Vorteile volumenkonstant arbeitender Dispenser (z.B. Rotationsschraubendispenser, Peristaltik-Ventil-Dispenser) nachgewiesen wurden [58].

Die besonderen Anforderungen bei der Untersuchung der Fine Pitch-Tauglichkeit von Dispenssystemen ergeben sich aus dem komplexen Zusammenwirken von Lotpaste, Substrat und Maschine, die eine genaue Abstimmung prozessstabilisierender Maßnahmen notwendig macht [31]. Zum anderen muss das bereits im vorherigen Kapitel andiskutierte Problem der prüftechnischen Erfassung und Messbarkeit kleiner Volumina gelöst werden.

Für die hier durchgeführte Qualifizierung eines Rotationsschrauben-Dispenssystems wurde daher eine gekoppelte Strategie entwickelt, mit der ohne Einsatz dreidimensionaler Bildverarbeitungssysteme eine quantitative Aussage zur Dosierfähigkeit getroffen werden kann. Die grundlegende Vorgehensweise lässt sich in folgende Teilschritte gliedern:

- Voreinstellung von Systemparametern zur Erzielung reproduzierbarer Dots
- Direkte, maschinenintegrierte Erfassung des Dottdurchmessers
- Analyse des zugehörigen Dottvolumens mittels externen Messsystemen
- Entwicklung eines mathematischen Modells zur Ableitung des Dottvolumens aus den vorliegenden geometrischen und technischen Parametern
- Prozessqualifizierung des Dispensers über direkt messbare Stell- und Zielgrößen

Im ersten Schritt wurden durch systematische Untersuchungen die technischen Randbedingungen des Dispenssystems optimiert, die für die Erzielung eines reproduzierbaren Ergebnisses als relevant erachtet wurden. Hierzu gehörten die Stellparameter Verfahrensgeschwindigkeit, Dispenszeit, Dispensoffset und Nadeldurchmesser sowie deren Einfluss auf die Zielgrößen Dispensform und -position.

Wie in Bild 16 exemplarisch für verschiedene Dottvolumina dargestellt, wurde zur Formanalyse eine Formzahl definiert, die eine vergleichende Aussage zur geometrischen Bewertung der Dots ermöglicht. Es zeigte sich im vorliegenden Fall, dass sich die Dotform durch Abstimmung der Parameter Dispenszeit und Offset einer idealen, halbkugelähnlichen Form annähern lässt (Formzahl ca. 4-5), sodass eine spätere Parametrisierung des Volumens über eine kombinierte Höhen- und Durchmessererfassung möglich ist.

Zusätzlich wurde der Einfluss der Verfahrensgeschwindigkeit auf Dotform, Positioniergenauigkeit und Mengenleistung untersucht, wobei sich die Stärken des zu Grunde liegenden Präzisionspositioniersystems zeigten. Durch die maschinenseitige Kopplung des Dispenskopfes an einen Bestückkopf sowie den Einsatz eines taktilen Höhen-

sensors zur Messung des wahren Offsets von Leiterplatte zu Dispensnadel konnte eine sehr hohe Positioniergenauigkeit verifiziert werden. Bild 16 zeigt exemplarisch die Mengenleistung in Abhängigkeit von Verfahrensgeschwindigkeit und Höhensensor; weitere Untersuchungen zur Plaziergenauigkeit finden sich in Kapitel 3.3. Der eingesetzte Höhensensor senkt die Mengenleistung um ca. 10%.

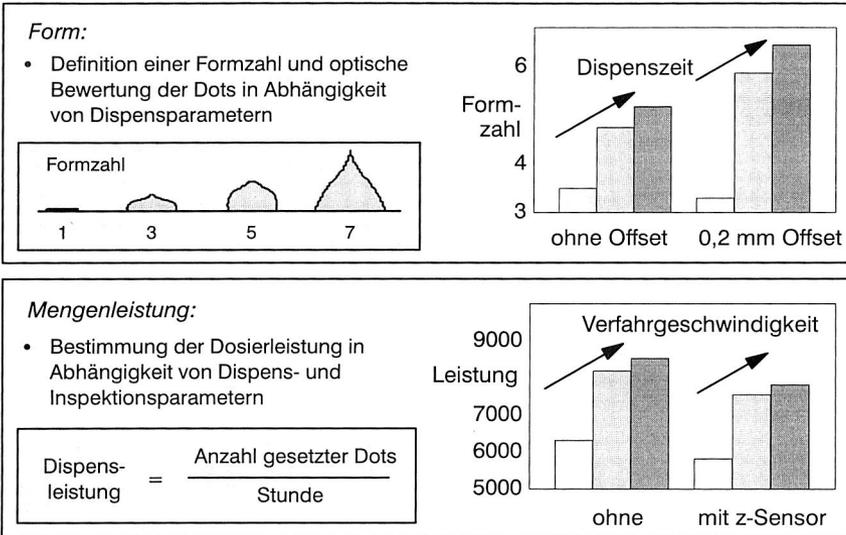


Bild 16: Experimentelle Bewertung der Kenngrößen Dotgeometrie und Mengenleistung als Stellparameter für die Volumenanalyse

Auf Basis der erfolgten Grundparametrisierung wurden im Folgenden Korrelationen zwischen den inline gemessenen Dotdurchmessern und den dazugehörigen, definierten Systemparametern aufgebaut. Dazu wurden in ausführlichen experimentellen Untersuchungen die Dispenszeit, der Dispensnadel-Innendurchmesser sowie der Lotpastentyp variiert und die resultierenden Dotdurchmesser gemessen. Die Ermittlung des Durchmessers erfolgte mit einem automatisierten, in der Maschine integrierten Visionsystem, das über CCD-Kamera und Graubildauswertung eine zweidimensionale Auswertung vornimmt und den gesuchten Durchmesser direkt ermittelt (siehe auch Kapitel 3.3.3).

Aus den ermittelten und in Bild 17 exemplarisch für eine Lotpasten/Offset-Kombination dargestellten Durchmessern lässt sich mathematisch über einfache Modelle auf das dispenste Volumen zurückschließen.

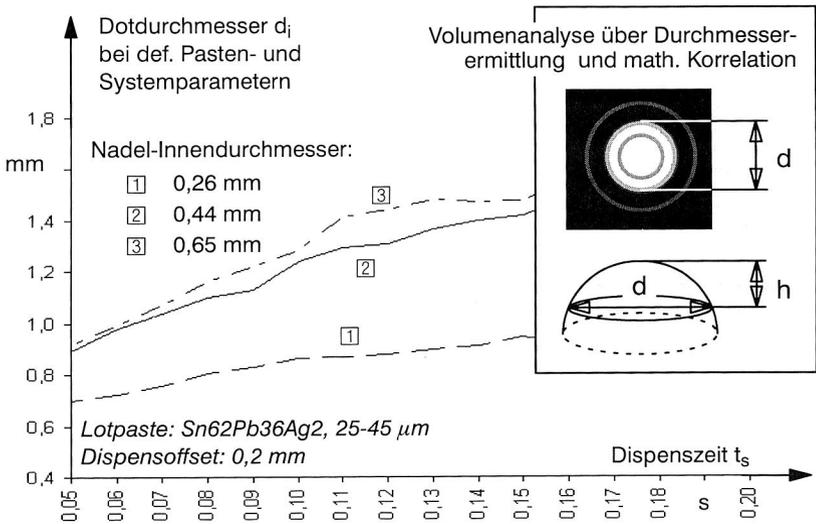
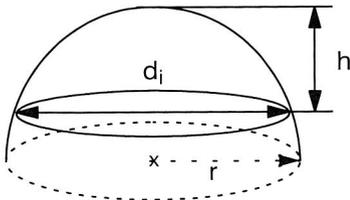


Bild 17: Bestimmung des Dotdurchmessers in Abhängigkeit der Dispenszeit unter Einsatz eines maschinenintegrierten Visionssystems

Eine einfache mathematische Darstellung des Dispensdots als Halbkugel ist für SMD-Anwendungen sicherlich zulässig [31], für eine Fine Pitch-Qualifizierung des Dispensprozesses ist jedoch eine möglichst exakte mathematische Beschreibung notwendig. Da sich ein Dot geometrisch als abgeflachte Halbkugel, bzw. als Kugelsegment darstellt (Bild 17), ist eine Parametrisierung von Durchmesser und Höhe notwendig, damit das reale Volumen nach folgender Formel berechnet werden kann [7]:



Modellgeometrie Kugelsegment:

$$1) V = \frac{h^2 \pi}{3} \times (3r - h) ;$$

$$2) r = \frac{r_i^2 + h}{2h} ;$$

Diese mathematischen Zusammenhänge zwischen Kugelradius r , messbarem Durchmesser d_i und Höhe h sind nur bei Kenntnis einer weiteren Geometriegröße auflösbar. Daher wurde im Verlauf der Experimente zusätzlich das Volumen ausgewählter Dots

mittels Lasertriangulation vermessen (Bild 18). Über die direkte Darstellung des Traganteils als Maß für das bezogene Volumen ist eine Korrelation zum ermittelten Durchmesser möglich.

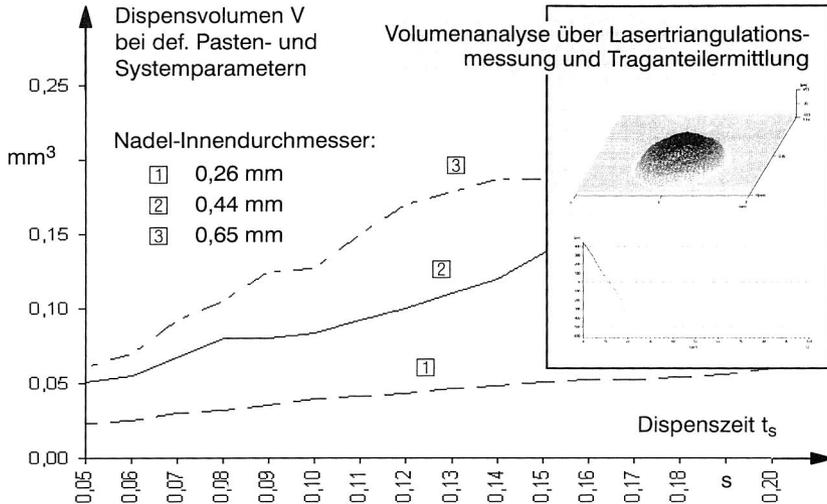


Bild 18: Bestimmung des Dotvolumens in Abhängigkeit der Dispenszeit und dreidimensionale Auswertung mit Hilfe von Lasertriangulation

Ausgehend von diesen experimentell ermittelten Daten für Volumen und Durchmesser lässt sich durch Regressionsanalyse ein mathematischer Zusammenhang entwickeln, der eine Ableitung des Dotvolumens aus den vorliegenden geometrischen und technischen Kenngrößen realisiert.

Parametrisierung des Dotvolumens:

$V = \pi/6 \times (k_1 r_1^2 + k_2)$ <p>mit $k_1, k_2 = f(d, d_i, h, t_s)$ Konstanten, lotpasten- und technologieabhängig</p>		$V = 0,3 \text{ mm} \times r_1^2 + 0,005 \text{ mm}^3$ $V = 0,95 \text{ mm}^2/\text{s} \times t_s + 0,015 \text{ mm}^3$ <p>Lotpaste: Sn62Pb36Ag2, 25-45 μm Dispensoffset: 0,2 mm</p>
--	--	--

Bild 19: Zusammenhang Volumen-Durchmesser-Dosierzeit und dessen Anwendung für die in Bild 17 und Bild 18 untersuchten Randbedingungen (Gültigkeitsbereich von $t_{smin} = 0,05\text{s}$ bis $t_{smax} = 0,20\text{s}$)

Mittels der hier vorgestellten Systematik ist eine Qualifizierung des Dispensprozesses auf Basis des Dotvolumens möglich, wobei die Bestimmung des Volumens durch integrierte Messung des Durchmessers bei vorgegebenen technischen Randbedingungen durchgeführt wird. Die notwendige Festlegung der technologischen Konstanten erfolgt dabei zu Anfang durch ausgewählte experimentelle Analysen.

Für das analysierte Rotationsschrauben-Dispenssystem konnte die Prozessfähigkeit für den Einsatz bei BGAs nachgewiesen werden. Ausgehend von dem auf der Leiterplatte strukturierten Paddurchmesser von 0,65 mm sollte eine geforderte flächenbezogene Padüberdeckung von 125 % bei einem akzeptablen Dotvolumen von ca. 0,65 - 0,75 mm³ realisiert werden. Daraus lässt sich mit den entwickelten mathematischen Zusammenhängen ein Dotdurchmesser von 0,8 mm und eine Dispenszeit von 0,07 s ermitteln. Diese Parameter konnten in mehreren Versuchsreihen verifiziert werden, es wurde im Mittel eine auf die Fläche bezogene Padüberdeckung von 124 % gemessen.

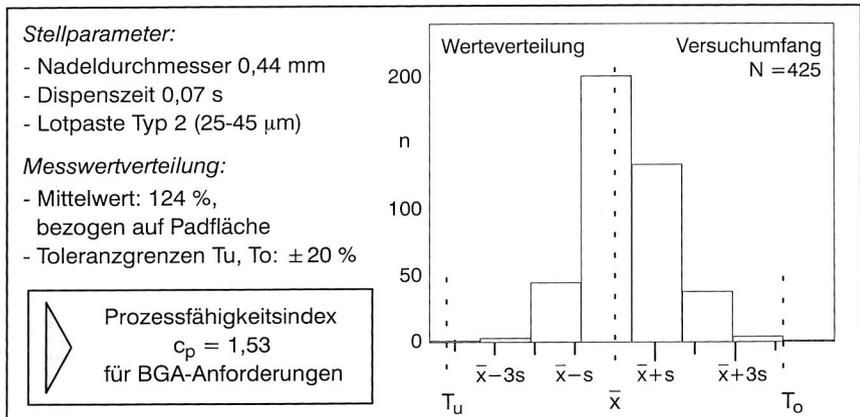


Bild 20: Messwertverteilung und Prozessfähigkeitsindex zur Qualifizierung des Präzisions-Dispenssystems für BGAs

Daraus lässt sich, wie in Bild 20 dargestellt, ein Prozessfähigkeitsindex von $c_p = 1,53$ ermitteln, bei Festlegung der Toleranzgrenzen T_o und T_u bei ± 20 %. Bei Annahme normalverteilter Versuchsergebnisse kann man aus diesem Kennwert eine Aussage zur theoretischen Fehlerquote treffen [89]. In dem hier untersuchten Fall liegt die theoretische Wahrscheinlichkeit bei ca. XX dpm, dass ein einzelner Dispenspunkt unter obigen Randbedingungen außerhalb der Toleranzgrenzen fällt.

Ähnlich aufgebaute Untersuchungen analysierten die Dosierfähigkeit des vorgestellten Dispensers für den Einsatz bei CSPs. Die hier geforderten Lotpastenvolumina von ca.

0,01 mm³ bei einem Paddurchmesser von 250-300 µm stellen die Leistungsgrenze des Dispenssystems dar. Wie auch andere Untersuchungen belegen, sind Dottdurchmesser von 300 µm und kleiner nicht mehr reproduzierbar im Dispensverfahren aufzutragen, sodass dann der Schablonendruckprozess eingesetzt werden muss [58]. Als untere Grenze für das hier untersuchte System konnte ein Dottdurchmesser von ca. 0,7 mm verifiziert werden, was einem Dottvolumen von ca. 0,025 mm³ entspricht. Hierbei wurde die kleinste beim Hersteller verfügbare Dispensnadel (Innendurchmesser 0,26 mm) und eine Dispenszeit von 0,05 s eingestellt. Kleinere Dispenszeiten führten zu nicht mehr reproduzierbaren Messergebnissen aufgrund starker Volumenschwankungen.

3.2.3 Qualifizierung eines Schablonendruckers für Fine Pitch Area Array-Bauelemente

Im Rahmen eines Industrieprojektes wurde ein Schablonendruckprozess innerhalb der SMD-Linie qualifiziert, wobei zusätzlich zum bisher verarbeiteten Bauelementenspektrum der Bauelementtyp Chip Size Package eingesetzt werden soll. Forderung des Industriepartners war es weiterhin, die Integration der CSPs ohne Änderung prozessrelevanter Parameter wie Lotpastentyp, Leiterplattenmetallisierung oder der Stellparameter des Schablonendrucks durchzuführen. Auch bekannte Randbedingungen, wie die fortschreitende Alterung der Lotpaste im Drucker, wurden bewusst nicht parametrisiert, da sich diese Effekte als unabhängig vom gewählten Anschluss- oder Baugruppenspektrum zeigen [55].

Im Gegensatz zu dem im vorherigen Kapitel vorgestellten Dispensprozess handelt es sich beim Druckprozess um ein simultan-kontinuierliches Verfahren, bei dem alle Lotpastendepots einer Leiterplatte gleichzeitig gesetzt werden. Ein direkter Abgriff der qualitätsbestimmenden Stellgrößen und deren Zuordnung zu einem Dot ist somit nicht möglich [60]. Damit reduzieren sich die Eingriffsmöglichkeiten für qualitätsbeherrschende Maßnahmen auf die am Druck beteiligten Komponenten Raket, Schablone und Leiterplatte/Lotpaste. Vor dem Hintergrund der vom Industriepartner geforderten Beibehaltung der Prozessparameter stand im Wesentlichen die Optimierung der Metallschablone zur Verfügung.

Die zu beurteilenden Qualitätskriterien Position, Form und Volumen des Lotpastendepots sind rein geometrischer Natur und können – durch Variation der Schablonengeometrie – selektiv für den zu qualifizierenden Prozess analysiert und optimiert werden. Bild 21 zeigt die im Laufe der Untersuchungen analysierten Prozessparameter Geometrie, Schnittqualität und Gestalt der Schablonendurchbrüche.

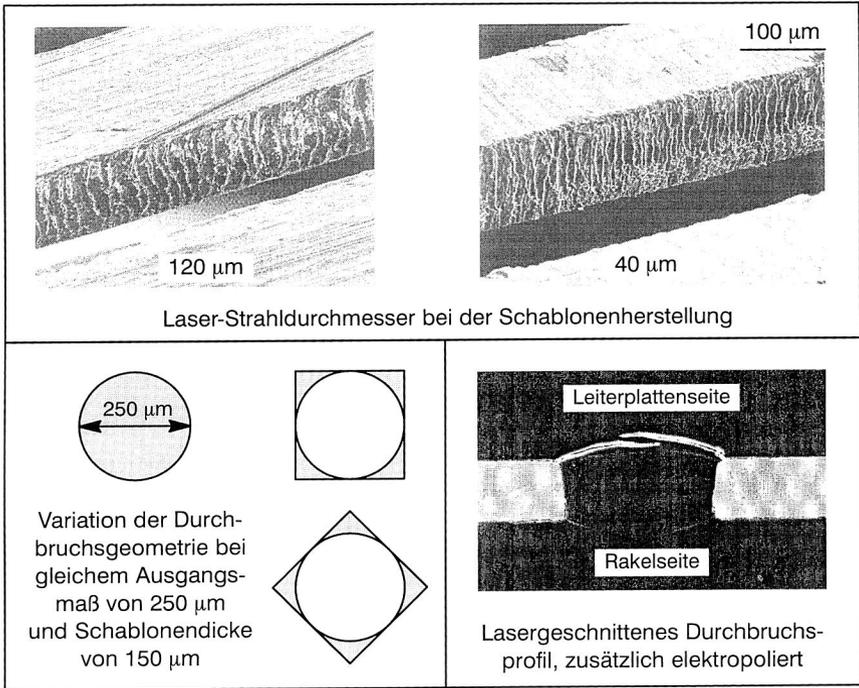


Bild 21: Ausgewählte Einflussparameter der Druckschablone, die bei der CSP-Qualifizierung des Druckprozesses analysiert und verifiziert wurden

Die verwendete Schablone wies eine Fertigungstoleranz von $\pm 20 \mu\text{m}$ auf der Rakelseite bzw. $\pm 10 \mu\text{m}$ auf der Leiterplattenseite auf, bei Verwendung eines Lasers mit $40 \mu\text{m}$ Strahldurchmesser (Bild 21 oben rechts). Die anfangs eingesetzten Schablonen mit größerer Fertigungstoleranz und einem Strahldurchmesser von $120 \mu\text{m}$ genügten nicht den geforderten Ansprüchen (Bild 21 oben links). Gegenüber geätzten Schablonen weisen lasergeschnittene Schablonen gerade Flanken und eine leicht konische Öffnung auf, die eine optimale Auslösung der Lotpaste aus der Metallschablone gewährleistet (Bild 21 unten rechts).

Zusätzlich wurde eine Nachbearbeitung der Schablone durch Elektropolierverfahren betrachtet, da man sich hierbei ein besseres Verhältnis zwischen Padadhäsionskräften und Innenwandungskraften versprach. Je kleiner dieses Verhältnis wird, desto besser löst sich im Allgemeinen die Lotpaste aus den Durchbrüchen.

Als quantitative Zielgröße wurde der *Auslösegrad* definiert, der als Maß für das Verhältnis von Ist- zu Sollvolumen gedruckter Lotpaste eine Aussage zur Qualität des Druckprozesses ermöglicht. Das ideale Sollvolumen definiert sich dabei aus der Schablonengeometrie; das Istvolumen wurde mit einem beim Industriepartner verfügbaren Lichtschnittmikroskop ermittelt, mit dem das Lotpastendepot in drei Achsen vermessen werden konnte. Die Auswertung des Auslösegrades in Abhängigkeit verschiedener Schablonenparameter ist in Bild 22 dargestellt.

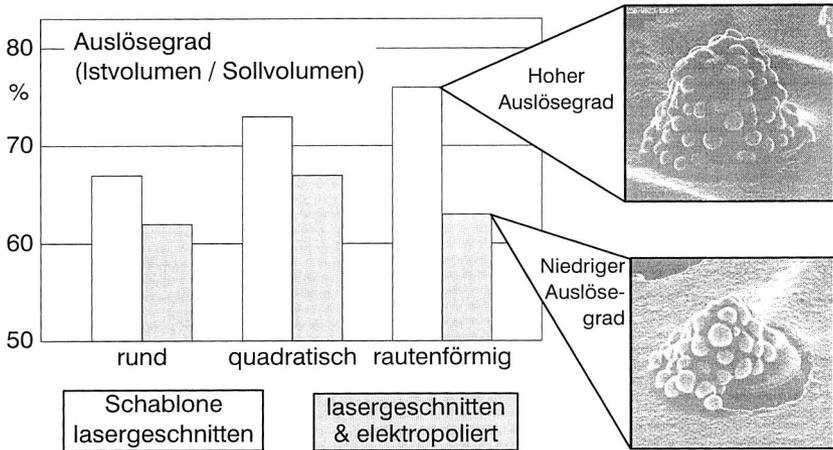


Bild 22: *Auslösegrad in Abhängigkeit der Parameter Schablonentyp und Durchbruchgeometrie*

Daraus lassen sich folgende Aussagen zur Qualifizierung des untersuchten Schablondruckers ableiten:

- Rechteckige Durchbrüche sind runden Durchbrüchen sowohl im Auslösegrad als auch bei den absoluten Pastenvolumina vorzuziehen.
- Der höchste Auslösegrad wurde mit quadratischen, um 45° gedrehten Durchbrüchen erzielt. Hier werden die Ecken der Durchbrüche sauber ausgedruckt.
- Das Elektropolieren der Schablone wirkt sich negativ auf das Druckergebnis aus. Bei zu glatter Oberfläche rutschen die Pastenpartikel, anstatt gleichmäßig den Durchbruch entlang zu rollen.
- Für die bei CSPs notwendigen Strukturen empfehlen sich lasergeschnittene Schablonen, da geätzte Schablonen zu große Fertigungstoleranzen aufweisen
- Unter Beachtung der vorgeschlagenen Designrichtlinien für die Druckschablone, kann der Drucker als für die Verarbeitung von CSPs qualifiziert eingestuft werden.

3.3 Experimentelle Analyse der Prozessfähigkeit eines Präzisionsbestücksystems

3.3.1 Module zur Sicherung des Bestückprozesses

Eine fehlerfreie Bestückung bedeutet, dass das richtige Bauelement in der richtigen Lage an der richtigen Position auf den Schaltungsträger gesetzt wird. Hierzu ist ein einwandfreies Zusammenspiel der Komponenten Bestücksystem, Bauelement und Leiterplatte erforderlich. Zusätzlich zum eigentlichen Fügeprozess kommen weitere, die Prozesssicherheit steigernde Inspektions- und Optimierungsprozesse (z.B. elektrischer Test der Bauelemente oder Leiterplattenausrichtung). Damit stellt der Bestückprozess den technologischen und wirtschaftlichen Kernprozess der Baugruppenfertigung dar.

Die direkte Fehlerwirksamkeit des Bestückprozesses ist im Vergleich zum Lotpastenauftrag gering, gleichwohl impliziert das große Spektrum an verarbeiteten Bauelementen und die daraus resultierende Komplexität der Bestückaufgabe ein hohes Fehler- und Kostenpotential. Zu berücksichtigen ist dabei unter anderem, dass materialeitig die reinen Beschaffungskosten einer elektronischen Baugruppe zu ca. 50% zu Lasten der hochwertigen, aktiven Bauelemente gehen, prozesseitig der Bestückprozess ca. 70% der gesamten Prozessinvestitionen beträgt [35] [90].

Auf Systemebene werden daher zunehmend Strategien zur auftragsoptimalen Auslastung und zur Rüsto Optimierung eingesetzt [86], während auf Maschinen- und Prozessebene der Einsatz komplexer Systeme mit mechanischer und optischer Unterstützung der Prozesssicherheit notwendig ist. Typische Kennwerte heutiger Hochleistungsbestücksysteme unterstreichen die Anforderungen an diese Module zur Sicherung des Bestückprozesses (IHerstellangaben):

- Positioniergenauigkeit zwischen 20 und 50 μm bei 3σ
- Bestückleistungen bis zu 50.000 BE/h
- Betriebszeit bis zum Auftreten einer Störung zwischen 2000 und 4000 h
- Integrierte Visionsysteme mit Subpixelrechnung und Auflösungen von 1-2 μm
- Hohe Rüst- und Umrüstflexibilität durch frei programmierbare Feeder, Wechselstationen und Komponentenbibliotheken

Wesentlichen Anteil an der hohen Präzision und Zuverlässigkeit des Bestückprozesses haben die verschiedenen optischen Systeme, die zur Kontrolle und Ausrichtung von Bauelementen und Schaltungsträgern eingesetzt werden. Zu unterscheiden sind hierbei Systeme, die im Bestückkopf selbst das aktuelle Bauelement kontrollieren und ausrichten, sowie externe Inspektionsmodule, die spezielle Aufgaben der Lagekorrektur wahrnehmen, aber zu einer niedrigeren Mengenleistung führen.

In Bild 23 ist exemplarisch ein am Lehrstuhl verfügbares Präzisionsbestücksystem mit den relevanten Modulen zur Erhöhung der Prozesssicherheit dargestellt. Die vom Hersteller angegebene Platziergenauigkeit von $12\ \mu\text{m}$ bei 3σ konnte in Zusammenarbeit mit einem Dienstleister hinreichend genau nachgewiesen werden [20] [42]. Danach wurden folgende Platziergenauigkeiten verifiziert (direkt nach Anschaffung der Maschine):

- X-Richtung: Versatz $0,0\ \mu\text{m}$, Standardabweichung $22,89\ \mu\text{m}$
- Y-Richtung: Versatz $0,0\ \mu\text{m}$, Standardabweichung $24,35\ \mu\text{m}$
- Systematischen Abhängigkeiten der Platziergenauigkeit von der Bauelementerotation waren nicht nachweisbar.

Prozess-Randbedingungen:

- Einsatz des Moduls zur bestücksimultanen Lagekorrektur mittels Laserzentrierung (Bild 23 oben links, Bestückkopf mit aufgenommenem Bauelement)
- Verwendung üblicher 1206-Bauelemente sowie einer Spezial-Glasleiterplatte

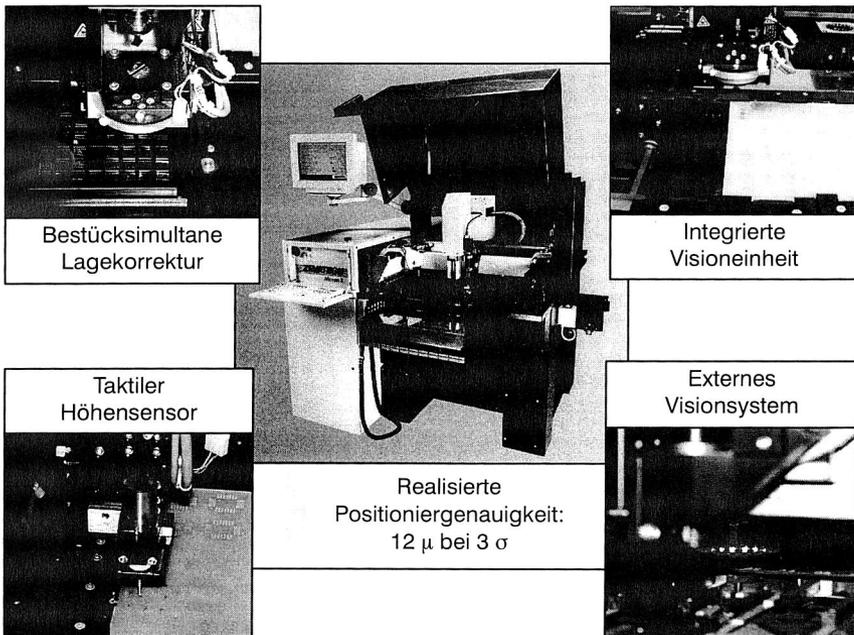


Bild 23: Präzisionsbestückautomat Mikron 2 und die dort verfügbaren Module zur Erhöhung der Prozesssicherheit (Quelle: Zevatech)

Aus diesen Einzelergebnissen lassen sich jedoch nur unzureichend anschluss- oder bauelementspezifische Folgerungen ableiten. Für die praktische Umsetzung ist die Fragestellung interessanter, welche prozess- und komponentenseitigen Parameter einen relevanten Einfluss auf den Bestückprozess haben. Definiert man die Qualität des Bestückprozesses über die Kenngrößen Bestückgenauigkeit und -leistung, dann müssen darüber hinaus die vor- und nachgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Wie in Bild 24 dargestellt, sind Betrachtungen zur Qualifizierung des Systems Bestückprozess durchaus notwendig und sinnvoll. Bei übergreifenden Analysen zum Prozessverhalten spezifischer Gehäuseformen, wie sie in Kapitel 4 am Beispiel der Area Array-Bauelemente ausführlich behandelt werden, müssen zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemen berücksichtigt werden.

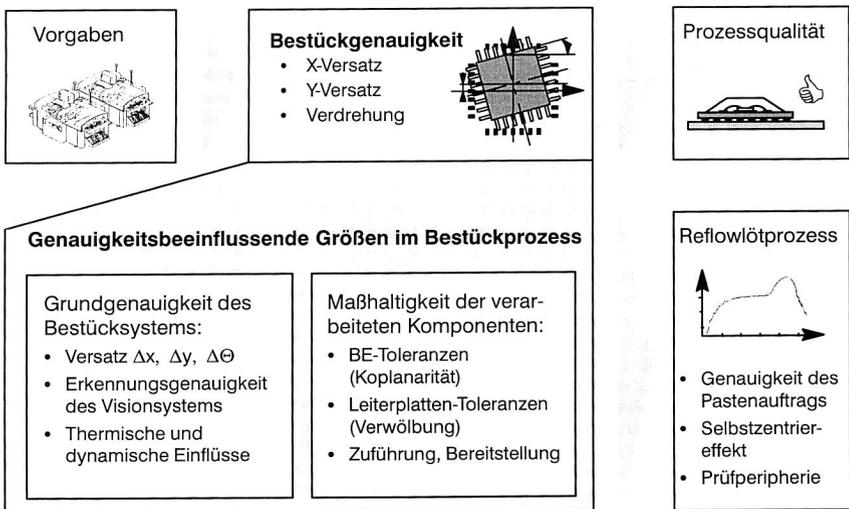


Bild 24: Teilsysteme im Bestückprozess und deren Einfluss auf die Bestückgenauigkeit

Ausgehend von diesen Überlegungen werden im Folgenden die beiden Teilbereiche der komponenten- und der prozessrelevanten Einflussgrößen auf die Bestückfähigkeit untersucht sowie gehäusespezifische Stellgrößen und Grenzwerte abgeleitet. Anschließend wird auf Basis dieser und weiterer Kennzahlen eine durchgängige Prozessfähigkeitsanalyse entwickelt und angewandt.

3.3.2 Komponentenspezifische Einflussgrößen auf die Bestückfähigkeit

Die Kenntnis der Anschlussgeometrie der Fügepartner Bauelement und Schaltungsträger ist sowohl für die Beurteilung der Bestückqualität als auch für die spätere Ausbildung der Lötstelle von großer Bedeutung. Paddurchmesser oder Beinchenabstände im Bereich einiger 100 µm resultieren in Plaziergenauigkeiten von 30-60 µm (als Faustregel gilt, dass die Platziergenauigkeit höchstens ein Achtel des kleinsten Anschlussrasters betragen sollte, d.h. bei 0,4 mm Raster ergeben sich ±25 µm). Das bedeutet, dass auch die bauteilseitigen Anschlussgeometrien wie Balldurchmesser oder Rastermaß erfasst und verifiziert werden müssen.

Bauelemente

Die Vermessung der Anschlussgeometrie erfolgt in der Regel erst zum Zeitpunkt des Bestückens und umfasst sowohl selektive wie optimierende Aufgaben. Daraus leiten sich die in Tabelle 3 dargestellten Messaufgaben und -prinzipien im Bestückprozess ab.

Gehäusotyp	Rastermaß	Zu messende Geometrie	Messprinzip
Chip, Melf	–	(Gehäuseposition)	(intern, Zentriermodul)
SO, SOT	0,635 - 1,27	Gehäuseposition	intern, Zentriermodul
QFP	0,4 - 0,8	Koplanarität Beinchen	extern, Auflichtmessung
		Position	intern, Zentriermodul extern, Auflichtmessung
BGA	1,0 - 1,5	(Lage, Anwesenheit Balls)	(Auflichtmessung)
		Gehäuseposition	intern, Zentriermodul extern, Auflichtmessung
FC, CSP	0,1 - 0,5	Lage, Anwesenheit Balls	extern, Auflichtmessung
		Gehäuseposition	extern, Auflicht- oder Durchlichtmessung
Bare Die	(0,1 - 0,5)	Gehäuseposition	extern, Auflicht- oder Durchlichtmessung

Tabelle 3: Gebräuchliche Bauelementformen und die dazugehörigen Messaufgaben (Angaben in Klammern: nicht übliche Messaufgaben)

Einfache Zweipoler wie 1206 oder Melf werden heutzutage ohne weitere optische Inspektion direkt aus dem Gurt heraus bestückt. Bei Bauelementen mit seitlich angeordneten Anschlüssen (SO, QFP) steht die Messung der Koplanarität zur Diskussion, da verbogene Beinchen im späteren Prozessverlauf zu Brücken oder offenen Lötstellen

und damit zum Totalausfall der Baugruppe führen können. Demgegenüber sollen die durchgeführten Inspektionen natürlich auf ein Minimum reduziert werden, um Verluste in der Mengenleistung zu minimieren. Daher wird meist die in den Bestückprozess integrierte Lagekorrektur mittels Laserzentrierung durchgeführt.

Im Gegensatz zu QFPs ist bei der Verarbeitung von Area Array-Bauelementen wie BGA oder CSP zwischen der Ballkontrolle und der Messung der Gehäusetoleranzen zu unterscheiden. Die Vollständigkeit der Anschlussballs muss unter allen Umständen gewährleistet sein, da ein fehlender Ball eine offene Lötstelle und damit Funktionsausfälle zur Folge hat. Das Problem fehlender Balls lässt sich allerdings durch den Einsatz externer Kameras mit Auflichtbeleuchtung umgehen. Da diese Visionsysteme oftmals ohnehin zur exakten Positionierung von hochpoligen Bauelementen eingesetzt werden müssen, bietet sich hier eine erweiterte Überprüfung an (z.B. Missing Ball- oder Ball One-Erkennung zur Erfassung der Bauelementlage bei der Zuführung).

Für die angestrebte Prozessqualifizierung wurden exemplarisch Bauelemente der Bauform CSP sowie ungehäuste Halbleiter vermessen, wobei sowohl die Visionsysteme des Bestückers als auch ein externes 3d-fähiges optisches Messsystem eingesetzt wurde. Grundsätzlich wurden für alle gemessenen Größen die vom Hersteller angegebenen bzw. geforderten Werte eingehalten. Es zeigte sich jedoch, dass die in der Praxis häufig eingesetzte Umrissmessung von Bauelementen im Durchlichtverfahren problematisch ist, da ohne zusätzliche Vermessung der Balls kein direkter Bezug der Gehäuse- zur Anschlussgeometrie hergestellt werden kann. Außerdem weisen ungehäuste Halbleiter immer gewisse Säger toleranzen auf, die im vorliegenden Fall in der Größenordnung von 20 - 30 μm bei einer Sollgröße von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ermittelt wurden. Die Koplanarität der Anschlüsse oder Verwölbungen entlang des Gehäuses werden dagegen in der Regel nicht berücksichtigt. Ähnlich wie bei der Leiterplatte kann es jedoch auch hier zu herstellungsbedingten Verwölbungen kommen, die sich bei BGAs im Größenbereich von bis zu 100 μm entlang der Anschlussseite bewegen. Bei nackten Chips hingegen sind die inneren Verwölbungen, aufgrund der hohen Steifigkeit des Basismaterials Silizium, vernachlässigbar gering. Die in Tabelle 4 aufgeführten geometrischen Kennwerte wurden hierzu experimentell verifiziert und berücksichtigt:

Gehäusotyp	Gemessene Geometrie	Meßprinzip	Ergebnis
CSP 172, 0,5	Umriss Gehäuse	Auflichtverfahren	$\pm 20 \mu\text{m}$
	Verwölbung Gehäuse	extern, 3d-optisch	$\pm 25 \mu\text{m}$
	Koplanarität Balls	extern, 3d-optisch	$\pm 5 \mu\text{m}$
Bare Die	Umriss Chip	Auflichtverfahren	$\pm 20 - 25 \mu\text{m}$

Tabelle 4: Geometrische Kennwerte der verarbeiteten Bauelemente

Schaltungsträger

Die Maßhaltigkeit der Anschlussstrukturen auf dem Schaltungsträger wird zum einen von der Qualität des aufgetragenen Layouts, zum anderen vom Verzug des Schaltungsträgers bestimmt. Die Präzision des Schaltungslayouts kann dank moderner Strukturierungs- und Metallisierungsverfahren (z.B. Laserbohren, Plasmaätzen, Einsatz von Nickel/Gold Oberflächen) ohne weiteres gewährleistet werden. Demgegenüber werden oftmals die thermischen und mechanischen Belastungen vernachlässigt, denen die Leiterplatte während der einzelnen Prozessschritte ausgesetzt ist.

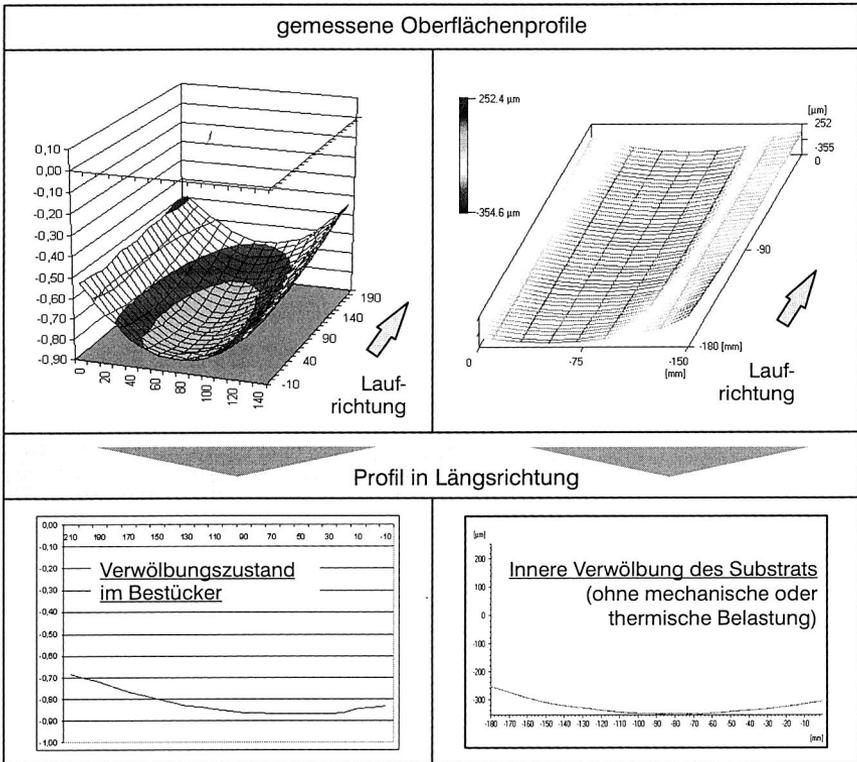


Bild 25: Bewertung der Verwölbungsmessungen am Schaltungsträger
(links im eingespannten Zustand, rechts ohne Belastung)

Insbesondere die mechanischen Spannungen und die daraus resultierenden Formänderungen des Substrats sind hier zu berücksichtigen und den in Richtlinien festge-

legten Grenzwerten gegenüberzustellen. Die international geltende Norm IPC-D-300 definiert für FR4-Substrate eine zulässige Verwölbung von 1% entlang der längsten Abmessung, was bei einer Leiterplatte im Doppelleuroformat (233 x 160 mm²) ca. 2,3 mm Durchbiegung bedeutet.

Zur Bewertung der Formänderung wurden die im Bestückprozess auftretenden Verwölbungen quantitativ erfasst und der Ausgangsverwölbung des Schaltungsträgers gegenübergestellt (Bild 25). Die Messung des Verwölbungszustandes im Bestücker wurde dabei mit einem im Bestückkopf integrierten Höhensensor durchgeführt (wie in Bild 25 unten links dargestellt), die Messung des Ausgangszustandes erfolgt mittels Lasertriangulation. Eine ähnliche Vorgehensweise ist in [29] für den Lötprozess ausführlich beschrieben. Für die hier am Bestücker durchgeführte berührende Messung muss zusätzlich der Einfluss des taktilen Sensors berücksichtigt werden. In Vorversuchen konnten durch Messungen an frei aufliegenden Referenzplatten systematische Verwölbungen in negativer Z-Richtung von ca. 5 µm nachgewiesen werden. Diese wurden bei den folgenden Ausführungen berücksichtigt.

Die Messergebnisse wurden zur übersichtlichen Darstellung und Auswertung in Längs- und Querrichtung aufgeteilt und jeweils separat bewertet. Es zeigte sich, dass die untersuchten Leiterplatten durchwegs eine Grundverwölbung aufwiesen, die aber die aus der IPC vorgegebenen Grenzwerte nicht überschritt. Für die exemplarisch in Bild 25 dargestellte Leiterplatte (Material FR4, Größe 233 x 160 x 1,6 mm) lag die gemessene innere Verwölbung entlang der Y-Achse (Längsrichtung) bei 100 µm, entlang der X-Achse (Querrichtung) bei 500 µm. Die Verwölbung im eingespannten Zustand betrug längst 180 µm, quer 350 µm. Diese Ergebnisse sind repräsentativ für die untersuchten Glasfaserverbundwerkstoffe, es liegen relativ großflächige Verwölbungen in regelmäßiger, konkaver Gestalt vor. Keramische Substrate wiesen wesentlich geringere Verwölbungen auf. Dies lässt sich mit der höheren Steifigkeit des Basismaterials erklären.

Daraus lassen sich folgende Thesen zum Einfluss des Schaltungsträgers auf den Bestückprozess ableiten:

- Die Leiterplattenverwölbung ist keine feste Stellgröße, sondern wird im Bestückprozess von mechanischen und thermischen Spannungen sowie von der vorhandenen Eigenverformung beeinflusst.
- Die kraftschlüssige Einspannung entlang der Laufrichtung führt zu einer Verformung des Schaltungsträgers mit direkter Auswirkung auf die Fügeebene beim Bestücken.
- Zu berücksichtigen sind im Besonderen die Verwölbungen quer zur Laufrichtung, die die Schichtdicke applizierter Lotpaste von 150 µm überschreiten können.
- Die Verwölbung führt dabei nicht nur zu einer Änderung der Bestückhöhe, sondern auch zu einer geringen, jedoch messbaren Streckung des Layouts, die von der Verwöblungslinie ausgeht.

- Daher sollten direkt in der Prozessstation die relevanten geometrischen Größen erfasst und der Prozess entsprechend parametrisiert werden (z.B. durch Höhenmessung mit optischen oder taktilen Sensoren).
- Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konnte kein signifikantes Überschreiten der vorgegebenen Grenzwerte festgestellt werden

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Maßhaltigkeit der verarbeiteten Komponenten (Bauelement und Schaltungsträger) einen erheblichen Einfluss auf die Prozessqualität des Teilprozesses Bestücken ausübt. Die relevanten Geometrie-Größen können jedoch durch integrierte Messsysteme erfasst und somit für den Bestückprozess berücksichtigt werden. Dadurch ist eine gehäuse- bzw. anschlussgeometrie-spezifische Qualifizierung des Bestückprozesses unter Beachtung der vorliegenden geometrischen Randbedingungen durchführbar.

3.3.3 Prozessspezifische Einflussgrößen auf die Bestückfähigkeit

Um den dedizierten Einfluss der Bestückerinheit auf die Prozessqualität quantitativ analysieren zu können, muss das zu betrachtende System von äußeren Einflüssen freigeschnitten werden. Ziel dieser separierten Betrachtung ist es, thermische und dynamische Einflüsse auf das Maschinenverhalten zu minimieren sowie komponentenspezifische Faktoren (z.B. Schwankungen der Anschlussgeometrien) zu reduzieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher das in Bild 26 dargestellte Testlayout entwickelt und mittels hochpräziser Strukturierungsverfahren auf einer Leiterplatte von einem externen Industriepartner realisiert. Verwendet wurde als Basismaterial ein extrem formstabiler Glaswerkstoff und ein Laserstrukturierungsverfahren, mit dem Geometrien mit einer Genauigkeit von $0,5\ \mu\text{m}$ strukturiert werden können. Damit befindet sich die Lage- und Formstabilität des für die Bestückuntersuchungen eingesetzten Schaltungsträgers oberhalb der Positioniergenauigkeit des Achssystems des Bestückers. Die Bestückbewegung selbst erfolgt bei diesen Präzisionssystemen durch Positionierung des Achssystems über Glasmaßstäbe und Visionsysteme, sodass sich optische, geometrische und mechanische Einflüsse auf die Endposition überlagern.

Im Folgenden soll anhand der Untersuchungen verschiedener systeminterner Einflussfaktoren aufgezeigt werden, wie die Prozesszielgrößen Bestückgenauigkeit und Bestückleistung optimal an das zu verarbeitende Bauelementspektrum angepasst werden können. Hierzu muss unter anderem das Verhalten der integrierten Kamerasysteme bekannt sein, mit denen bei heutigen Bestückeraufgaben im Präzisionsbereich die Ist- mit der Soll-Position abgeglichen wird. Im Zusammenhang damit steht die Auswahl von Lage und Anzahl der optischen Marken, die sowohl Bestückgenauigkeit, als auch Bestückleistung stark beeinflussen.

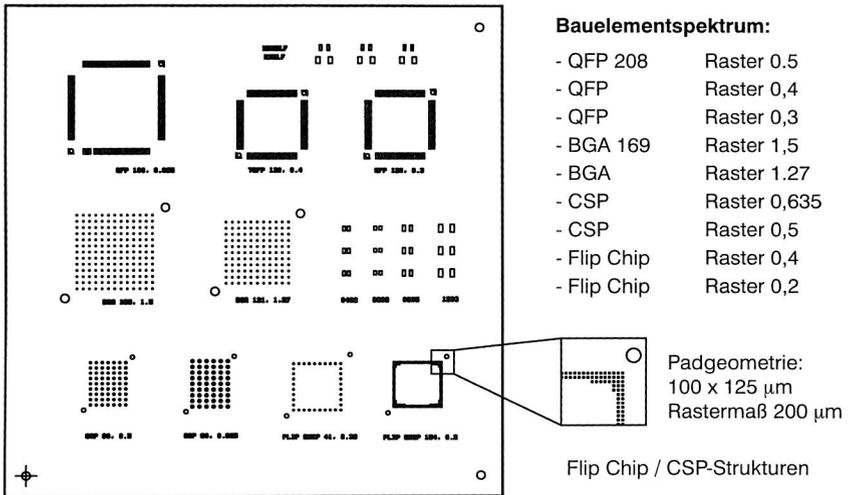


Bild 26: Eingesetzte Testleiterplatte für Bestückanalysen (Basismaterial spezialgehärtetes Glas, ätzstrukturiert und oberflächenbehandelt)

Ein typischer Bestückvorgang setzt sich aus der optischen Erfassung der Leiterplatte, der Bauelementaufnahme, der optischen Erfassung relevanter Bauelementgeometrien und dem Absetzen des Bauelementes auf der Leiterplatte zusammen. Die a priori-Vermessung des Schaltungsträgers dient dabei zur internen Definition eines lokalen Koordinatensystems, welches dann zur exakten Bestimmung der Ist-Bestückposition herangezogen wird.

Im Vorfeld durchgeführte Referenzmessungen zur Qualifizierung des Visionsystems ergaben Positionsstreuungen von 1-2 µm, die sich direkt auf die Bilderfassung und -auswertung zurückführen lassen. Diese minimalen Streuungen sind rein mathematischer Natur, da ein reales Kamerapixel bedingt durch das Sichtfeld ca. 7,8 x 7,8 µm groß ist und die Bildauswertung mit Subpixelrechnung für höhere Auflösungen arbeitet [36].

Im nächsten Schritt wurde der Parameter Fiducial (das heißt die auf der Leiterplatte befindlichen Marken zur optischen Lageerkennung) variiert, wobei zwischen globalen und lokalen Passmarken unterschiedlicher Form und Anzahl zu unterscheiden ist. Dazu wurde als Referenzposition das in Bild 27 dargestellte CSP 46 auf die oben beschriebene Leiterplatte bestückt. Diese Bestückposition wurde nun unter Variation der Fiducial-Parameter mit dem im Bestückkopf integrierten Visionsystem direkt vermessen und ausgewertet.

Grundsätzlich konnte die bereits in Kapitel 3.3.1 belegte hohe Positioniergenauigkeit des Achssystems verifiziert werden. In Bild 27 sind exemplarisch für den Fiducial-Typ "Kreis, dunkel auf hell" Versatz und Streuung dargestellt, wobei drei Varianten globaler bzw. lokaler Fiducials gegenübergestellt sind. Es zeigt sich, dass Anzahl und Position der Fiducials keinen signifikanten Einfluss auf die Platziergenauigkeit des Bestückungssystems aufweisen, das aus den Fiducialpositionen intern errechnete Koordinatensystem ist hinreichend genau. Desweiteren sind auch systematische Abweichungen (hier die größere Streuung in Y-Richtung als in X-Richtung) unabhängig vom Parameter Fiducial.

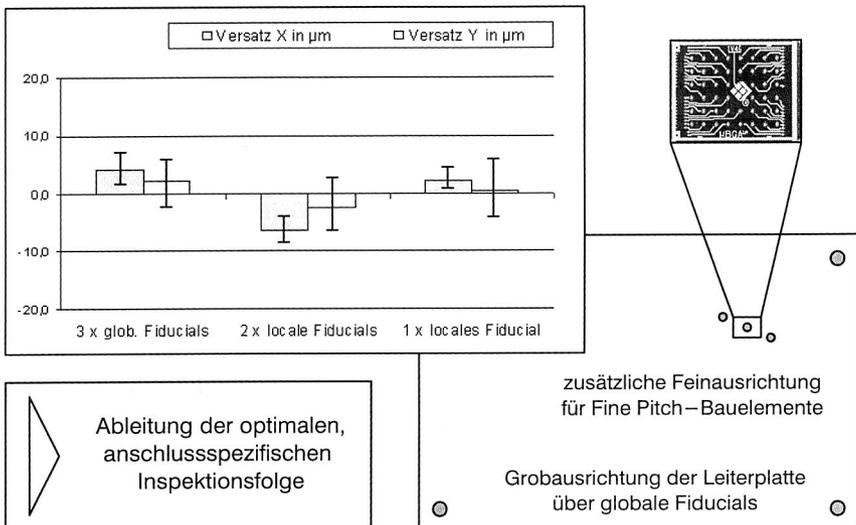


Bild 27: Bewertung der Bestückgenauigkeit und Korrelation mit dem Fiducialeinsatz

Insbesondere konnte keine Erhöhung der Platziergenauigkeit durch den Einsatz lokaler Fiducials nachgewiesen werden. Dies ist insofern bemerkenswert, da in der industriellen Praxis häufig zur sicheren Platzierung von Fine Pitch-Bauelementen zusätzliche Fiducials eingesetzt werden, was zwangsläufig zu einer Senkung der Bestückleistung führt. Hier ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass selbst auf komplexen, feinstrukturierten Leiterplatten die geometrische Qualität des aufgetragenen Layouts schwankt.

Die Auswertung von Vergleichsmessungen an Substraten mit galvanisch aufgetragenen Fiducials erwies sich als wesentlich streuungsbehafteter. Die reine Positionsstreuung aufgrund von Referenzmessungen des Visionsystems wurde mit ca. 25 µm ermittelt, die sich direkt auf die Bilderfassung und -auswertung der "unscharfen" Fiducials zurückführen lassen. Diese Streuungen können bei der Platzierung von CSPs oder

Flip Chips durchaus zu Problemen führen, wenn Verbindungswerkstoffe wie z.B. Leitkleber eingesetzt werden, die nicht den für eutektische Lotpaste typischen Selbstzentriereffekt aufweisen [58].

Folgende Ergebnisse lassen sich aus den durchgeführten Untersuchungen für die Auswahl der Fiducials ableiten:

- Die Auswahl der Fiducials beeinflusst sowohl Positioniergenauigkeit wie Bestückleistung, sodass für das zu bestückende Bauelementspektrum ein Suboptimum gefunden werden muss.
- Anzahl und Lage der Fiducials haben keinen signifikanten Einfluss auf die Positioniergenauigkeit, da heutige Systeme durch Vision-Unterstützung eine hohe Grundgenauigkeit aufweisen.
- Ebenso ist die Verwendung lokaler Passmarken beim Einsatz entsprechender Bestückungssysteme nicht notwendig, sie erhöhen lediglich die Zeit für den Bestückvorgang.
- Entscheidend ist das Zusammenspiel zwischen optischem Inspektionssystem und optisch zu erfassender Marke; als wesentlicher Faktor wurde dabei die Qualität der aufgebrachten Marken identifiziert.

Moderne Präzisionsbestückautomaten verfügen in der Regel über mehrere, separat einsetzbare Systeme zur Bild- oder Lageerfassung. Das im vorherigen Kapitel eingesetzte integrierte System zur optischen Erfassung der Passmarken wird dabei durch laseroptische Systeme sowie weitere, externe CCD-Kamerasysteme ergänzt, mit denen Bauelemente bei erhöhter Präzision von unten vermessen werden können (siehe auch Bild 23). Die spezifischen Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme sowie deren Auswirkungen auf die Zielgrößen Bestückleistung und Bestückgenauigkeit sollen im Folgenden anhand experimenteller Untersuchungen diskutiert werden.

Die Bestückmaschinenhersteller setzen bei der Systemauswahl zunehmend auf aktive und flexible Systeme, die ohne direkten Benutzereingriff Leiterplatten oder Bauelemente vermessen und die korrigierten Werte direkt in den Bestückablauf integrieren. Bei der Lagekorrektur von Bauelementen mit einfacher Geometrie (z.B. Chipbauelemente oder niedrigpolige Transistoren) werden fast ausschließlich bestücksimultane Systeme auf Basis von Laserzentrierung durchgeführt, wie sie in Bild 28 dargestellt ist. Hierbei wird das Bauelement mit der Saugpipette aufgenommen und während der Positionierbewegung um die eigene Achse rotiert. Die Erfassung dieser Drehbewegung erfolgt im Bestückkopf und ist durch einen Linienlaser realisiert, der hierzu rotationsparallel den "Schatten", d.h. die Signale des im Laservorhang rotierenden Bauelementes auswertet. Je nach Zeitpunkt variiert dieses Signal entlang des aufgebauten Linienlasers und liefert somit Messwerte zum erfassten Seitenprofil sowie zum Mittelpunkt des Bauelementes.

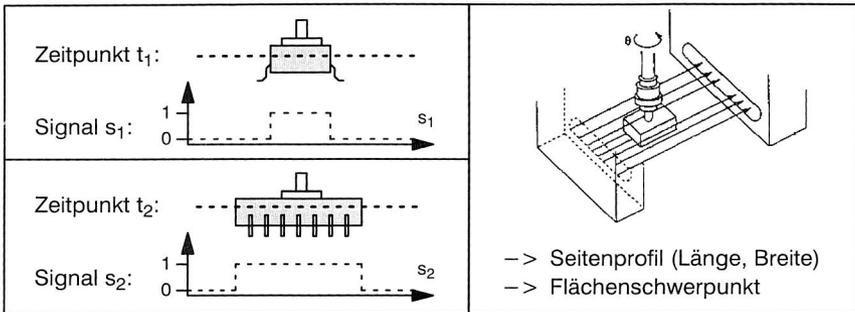


Bild 28: Bestücksimultane Lagekorrektur mittels Laserzentrierung
(Quelle: Zevatech)

Der entscheidende Vorteil dieses Systems liegt in der bestücksimultanen Durchführung, die per se zu keinem spürbaren Absinken der Bestückleistung führt. Bild 29 verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen dem eingesetzten Inspektionssystem zur Lagekorrektur des Bauelementes und den dabei erzielten Bestückleistungen. Die Untersuchungen wurden an dem bereits vorgestellten Bestückssystem durchgeführt, um dessen Flexibilität unter verschiedenen Inspektionsaufgaben einsetzen zu können. Als Bauelement wurden ungehäuste Halbleiter direkt vom Wafer auf eine Leiterplatte bestückt; die Bestückleistung wurde in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3712/1 ermittelt.

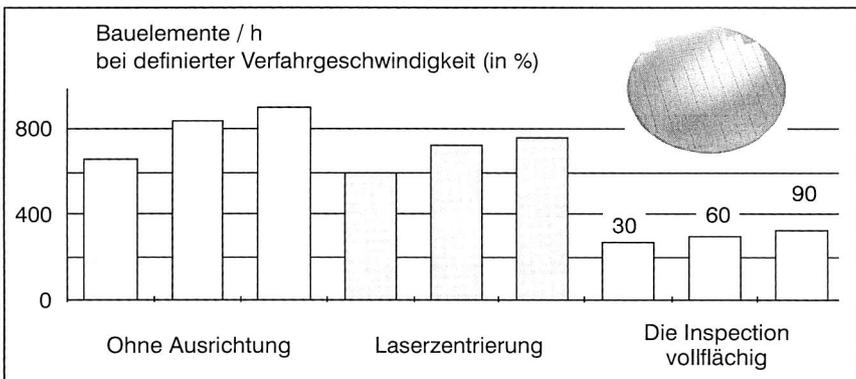


Bild 29: Realisierbare Bestückleistung in Abhängigkeit von Inspektionssystem und Verfahrensgeschwindigkeit bei der Bestückung direkt vom Wafer

Deutlich ist zu erkennen, dass der Einsatz eines externen Visionsystems zu einer Reduzierung der Bestückleistung um bis zu 50 % führt. Externes Visionsystem bedeutet hier, dass das Bauelement zwischen der Aufnahme- und der Bestück-Bewegung über eine am Bestücker fest installierte Kamera gefahren wird, die die Geometrie des Bauelementes vermisst und eine Lagekorrektur durchführt. Die Laserzentrierung führt dagegen zu keiner merklichen Reduzierung der Bestückleistung. Geringe Verluste bei höheren Verfahrensgeschwindigkeiten ergeben sich aus dem engen Zeitfenster, das für die Lagekorrektur zur Verfügung steht. Die Bestückposition wird unter Umständen erreicht, bevor das Bauelement sauber vermessen und lagekorrigiert werden konnte.

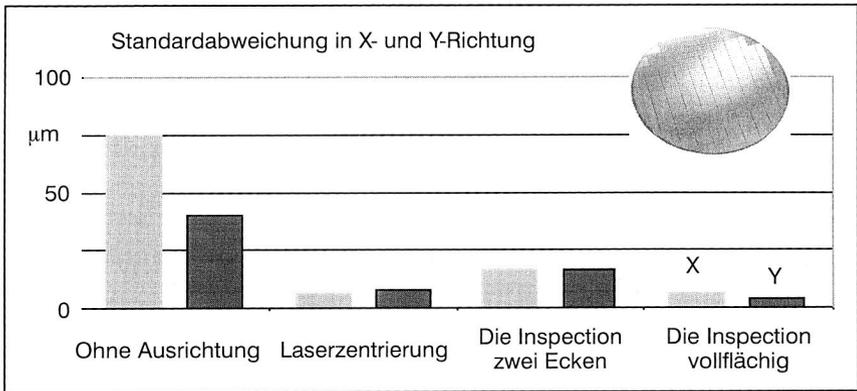


Bild 30: Bewertung der dazugehörigen Platzergenauigkeit für X- und Y-Achse

Stellt man diesen Werten die dazugehörige Bestückgenauigkeit beim Platzieren der Dies entgegen, so ergibt sich die in Bild 30 dargestellte Verteilung. Die bestücksimultane Laserzentrierung arbeitet hier mit einer sehr hohen Genauigkeit, die Standardabweichung liegt unterhalb von 10 µm. Die wesentlich zeitintensivere Lagekorrektur mit einem externen Kamerasystem führt dagegen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Man hätte vermutet, dass das externe System, das die Dies über zwei gegenüberliegende Ecken von unten vermisst, mit einer geringeren Streuung arbeitet als die Laserzentrierung. Für diese Versuchsreihen wurden jeweils einzelne, neue Dies verwendet, die vom Wafer herab platziert wurden. Das bedeutet jedoch, dass die Schwankungen in den Außenabmaßen berücksichtigt werden müssen. Messungen zeigten, dass die Dies Größertoleranzen um bis zu 25 µm aufwiesen. Diese Schwankungen in der Außengeometrie werden offensichtlich vom Laserverfahren besser kompensiert, da hier Mittelpunkt und Verdrehwinkel über eine Vermessung der gesamten Außenkante ermittelt werden. Beim optischen Ausrichten über die Bauteilecken werden dagegen nur zwei

Eckenbereiche ausgewertet, die nicht exakt rechteckige Geometrie führt zu den hier aufgezeigten Abweichungen.

Weitere Messreihen mit einer vollflächigen Auswertung der Außenkontur der Dies bestätigten diese Vermutungen. Wie in Bild 30 rechts aufgetragen, ergaben sich unter Ausnutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Geometrie Standardabweichungen im Bereich von 5 μm . Zum anschaulichen Vergleich wurde die Bestückung ohne Einsatz eines Inspektionssystems in das Diagramm aufgenommen; es zeigt sich, dass die Verarbeitung ungehäuster Halbleiter, direkt vom Wafer herab, zu einer Platziergenauigkeit mit vertretbar niedriger Standardabweichung bzw. Streuung (entspricht dem Quadrat der Standardabweichung) führt.

Die Streuung, als Maß für die Abweichung der Ist-Position von der Soll-Bestückposition, ist hierbei ein geeigneter Parameter, um Aussagen zur Güte der Platziergenauigkeit zu treffen. Die Angabe der Bestückgenauigkeit als Offset, d.h. als Abweichung von der Sollvorgabe würde hingegen die systematischen und in der Regel vom Inspektionsverfahren unabhängigen Fehler beinhalten. Es ist stets eine zusätzliche Angabe (Vertrauensbereich, Streuung) notwendig, die Güte des Offsets und damit die Maschinenfähigkeit zu quantifizieren [89].

Vergleichbare Untersuchungen mit CSPs bestätigten die Ergebnisse, dass die effektiv erzielbare Positioniergenauigkeit gleichermaßen vom eingesetzten Inspektionssystem und von der geometrischen Qualität der Bauelemente abhängig ist. Auch bei der Verarbeitung von Bausteinen wie CSPs oder BGAs gilt es abzuwägen, ob eine reine Geometrieaussage über die Außenkanten zum gewünschten oder notwendigen Platziererfolg führt. Erlaubt es die Taktung der Linie, ist eine optische Erfassung der Balls sicherlich der stabilste Weg. Kann auf die Kontrolle der Balls verzichtet werden (z.B. infolge lagegenauer Zuführung und hoher Lieferqualität), bietet sich das Laser Alignment als schnelles und hocheffizientes Verfahren an.

3.3.4 Spezifikation von Fähigkeitsbereichen für den Bestückprozess

Die analytische Beschreibung der Positioniergenauigkeit eines Bestücksystems basiert auf der Ermittlung von Kennwerten, mit denen eine Aussage zur Prozesscharakteristik in Relation zu definierten zulässigen Toleranzen vorgenommen wird. Je nach betrachtetem Objekt wird zwischen Maschinenfähigkeit, Prozessfähigkeit und Prüfmittelfähigkeit unterschieden; Grundvoraussetzung bei allen Fähigkeitsbetrachtungen sind stabile, beherrschte Prozesse mit normalverteilten Prozessergebnissen ohne systematische Störungen [114]. Für nichtnormalverteilte Merkmale müssen die Berechnungsvorschriften stark modifiziert werden. Insbesondere attributive Merkmale ("gut" - "schlecht") sind mit messenden Prüfungen in der Regel nur unzureichend erfassbar und müssen daher mit anderen Ansätzen betrachtet werden [88].

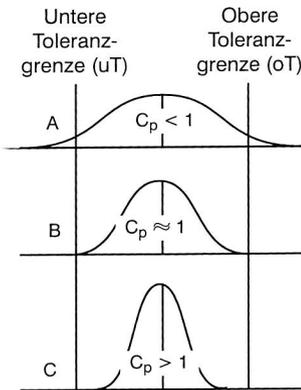
Definition von Maschinen- und Prozessfähigkeit

Bei der Ermittlung der Maschinenfähigkeit wird die prinzipielle, kurzzeitige Fähigkeit einer Maschine beurteilt, Qualität unter idealen Randbedingungen zu produzieren. Eine Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) an Bestückautomaten erfolgt daher idealerweise unter Einsatz hochgenauer Keramikbausteine und Glasleiterplatten, mit denen unter Ausschaltung thermischer oder mechanischer Einflüsse eine leichte Bestimmung der Positioniergenauigkeit mittels CCD-Kamerasystemen durchgeführt werden kann [42]. Im Gegensatz dazu wird bei der Bestimmung der Prozessfähigkeit (PFU) das gesamte System aus Bestückautomat, Bauelement- und Leiterplattenspektrum in die Analyse der Positioniergenauigkeit mit eingeschlossen. Eine PFU wird daher meist in laufenden Prozessen zur Absicherung der Qualitätsfähigkeit einer Bestückstation durchgeführt.

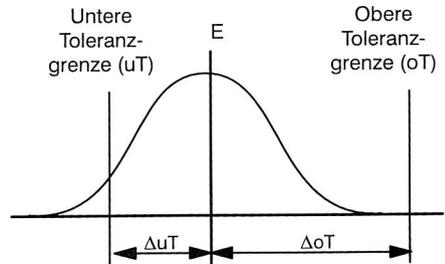
$$C_p = \frac{\text{zulässige Toleranzweite}}{\text{Prozessstreuung}} = \frac{oT - uT}{(6\sigma)} ;$$

$$C_{pk} = \frac{\text{minimale Prozessgrenznähe}}{\text{halbe Prozessstreuung}} ;$$

$$C_{pk} = \frac{\min|E-GW|}{3\sigma} ;$$



- A = Nicht fähiger Prozess
- B = Prozess im Grenzbereich
- C = Bedingt fähiger Prozess



- $\Delta uT = E - uT$
- $\Delta oT = oT - E$
- E ... Erwartungswert
- σ ... Standardabweichung
- GW ... Grenzwert oT bzw. uT

Bild 31: Kennwerte der Prozessfähigkeit c_p und c_{pk}

Bild 31 zeigt die relevanten Definitionen zur Ermittlung der Prozessfähigkeitsindizes c_p und c_{pk} . Ein Prozess gilt als fähig, wenn die Indizes innerhalb des geforderten Toleranzbereiches liegen (Fall C). Ein Prozess wird nach Taguchi als robust bezeichnet, wenn

er auf den angestrebten Zielwert eingestellt ist und unempfindlich gegenüber Störgrößen oder Schwankungen der Einstellgrößen reagiert [77]. Die Prozessfähigkeit c_p gibt die Fähigkeit an, die der robuste Prozess maximal erreichen kann. Die kritische Prozessfähigkeit c_{pk} berücksichtigt zusätzlich noch die Schwankungen des Prozesses innerhalb des Toleranzbereiches. Deshalb ist c_p fast immer größer als c_{pk} [114].

PF-Index c_p	Prozessbeurteilung	theor. Fehlerrate in dpm	Sprechweise
1,00	nicht qualitätsfähig	2700 (0,27%)	3 sigma
1,33	bedingt qualitätsfähig	63,34	4 sigma
1,67	qualitätsfähig	0,574	5 sigma
2,00	qualitätsfähig	0,002	6 sigma

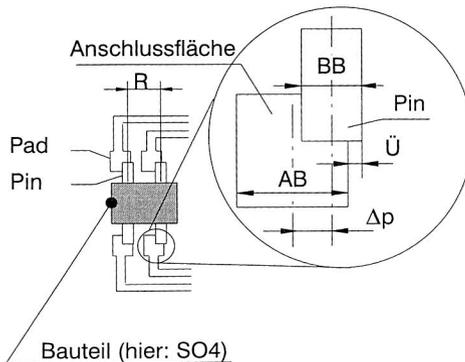
Tabelle 5: Gegenüberstellung von Prozessfähigkeit und theoretisch zu erwartender Fehlerrate

In Tabelle 5 sind gebräuchlich Prozessbeurteilungen bzw. -fähigkeiten mit den dazugehörigen, theoretischen Fehlerraten gegenübergestellt. Diese Angaben sind jedoch nur bei exakt normalverteilten Prozessergebnissen gültig und sollten nicht kommentarlos übernommen werden. Gefordert wird heutzutage von der Elektronik-Zulieferindustrie der Nachweis von Prozessfähigkeiten $c_{pk} > 1,33$.

Toleranzfenster und Fähigkeitsbereiche

Der Übergang von der reinen Maschinenfähigkeit des Bestückers zur aktuellen Prozessfähigkeit eines Bestücksystems bedingt die Definition der am Prozess beteiligten Fügepartner Bauelement und Leiterplatte. Der mathematische Zusammenhang zwischen Anschlussgeometrie der Bauelemente, Padgeometrie der Leiterplatte und geforderter Platziergenauigkeit ist dabei hochgradig von den spezifischen Größen bzw. Toleranzen der Komponenten abhängig. Der in Bild 32 dargestellte Zusammenhang zur Bestimmung des zulässigen Bestückversatzes je nach Rastermaß verdeutlicht dies. Für ein Bauelement mit Rastermaß 0,5 mm ergibt sich somit ein maximal zulässiger Versatz von 100 μm . Bei Berücksichtigung üblicher Geometrietoleranzen der Fügepartner in Anlehnung an [5] reduziert sich dieser Wert auf ca. 80 μm .

Aus diesen einfachen mathematischen Zusammenhängen lässt sich die notwendige Platziergenauigkeit des Bestücksystems in Abhängigkeit der Fügepartner ermitteln. Daraus lassen sich, wie bereits oben gezeigt, Fähigkeitsindizes ableiten. Als Eingangsgrößen werden die bekannten Fügepartnergeometrien eingesetzt, Zielgröße sind die Qualitätsfähigkeit eines Bestücksystems, ausgedrückt in c_m , c_{mk} oder bauelementbezogenen Fähigkeiten.



Geometriegleichung:

$$\Delta p = 0,5 AB - 0,5 BB + \ddot{U}$$

reduziert mit (*) zu

$$\Delta p = 0,2 R$$

Δp Versatz

R Rastermaß

BB Breite des Beinchen (Pin)
(typischerweise $0,4 R$)*

AB Breite Anschlussfläche
(typischerweise $0,6 R$)*

\ddot{U} : Überstand

Bild 32: Bauelementabhängige Genauigkeitsanforderungen und deren Ableitung aus den geometrischen Verhältnissen an der Fügestelle [5]

Mathematisch betrachtet ist andererseits auch eine Umkehrung obiger Korrelationen möglich und sinnvoll. Ziel kann dann beispielsweise die Ermittlung baugruppenspezifischer Toleranzfenster eines Bestückers sein. Diese im Folgenden "Fähigkeitsbereiche" genannten Geometriefenster spezifizieren eine Erweiterung der eindimensionalen Qualitätsfähigkeiten auf Basis folgender Annahmen:

- Der Bestückprozess ist ein geschlossenes System. Betrachtet werden nur die in diesem System wirksamen Merkmale von Bestückerinheit, Bauelement und Leiterplatte.
- Alle bestückgenauigkeitsrelevanten Subsysteme (u.a. optische Systeme zur Lagevermessung, Grundgenauigkeit der Achsen) werden spezifiziert und in die mathematischen Betrachtungen integriert.
- Alle am Bestückprozess beteiligten Komponenten besitzen normalverteilte Merkmale. Damit ist die Anwendung bekannter Formeln der Fähigkeitsberechnung zulässig, mehrere Merkmale können über Additionstheoreme verknüpft werden.
- Die in Bild 32 ausgeführte Geometriegleichung für den seitlichen Versatz wird normalverteilt modifiziert und zur Korrelation von Platziergenauigkeiten und Geometrietoleranzen eingesetzt. Die prinzipielle mathematische Vorgehensweise hierzu wird in [114] diskutiert.
- Fähigkeitsbereiche definieren sich aus der mathematisch-vektoriellen Darstellung des Geometriegleichung bezüglich des gewählten Bauelementspektrums und der zugehörigen Bestücksequenzmerkmale. Die bauelementspezifischen Toleranzfelder werden analog ermittelt, wobei vorbestimmte Fähigkeitsbereiche als Basis herangezogen werden.

Im praktischen Einsatz können mit der in Bild 33 dargestellten erweiterten Vorgehensweise Fragestellungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit eines Bestückers beantwortet werden, die insbesondere aus Sicht der Qualitätssicherung relevant sind. Bei bekanntem Maschinenverhalten (Maschinenfähigkeit, Spezifikation von Visionsystemen und Positionieralgorithmen) lässt sich ein definierter Fähigkeitsbereich eines Bestückersystems für eine baugruppenspezifische Bestückaufgabe ermitteln. Der Fähigkeitsbereich kann dabei Kennwerte zur maximal erlaubten Geometrietoleranz der zu verarbeitenden Bauelemente ebenso ausdrücken, wie die Wahrscheinlichkeit einer Platzierung eines Bauelementes innerhalb des zulässigen Versatzes bei bekannten Geometrietoleranzen.

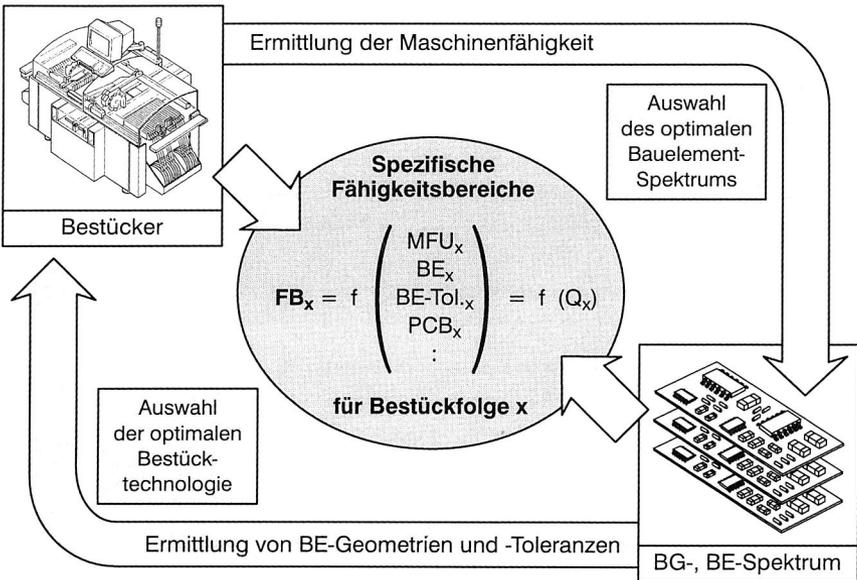


Bild 33: Strategie zur Verknüpfung von Maschinenfähigkeiten und baugruppenspezifischen Toleranzketten zur Definition von Fähigkeitsbereichen

Die Spezifikation von Fähigkeitsbereichen bietet somit die Möglichkeit, beide Richtungen bei der Qualifizierung des Bestückprozesses zu betrachten (Bild 33). Einerseits wird der Bestücker an sich über eine MFU analysiert und mit aussagekräftigen Kenngrößen qualifiziert. Andererseits wird der Prozessschritt Bestücken mit einer konkreten Baugruppe korreliert und diese hinsichtlich ihrer Bestückqualität quantifiziert.

3.4 Qualifizierung mediengebundener Lötverfahren zur Kontaktierung verdeckter Anschlussstrukturen

3.4.1 Einsatz mediengebundener Reflowlötverfahren

In der SMD-Montagetechnik werden im Prozessschritt "Reflowlöten" simultan die elektrischen und mechanischen Kontaktierungen zwischen Bauelement und Schaltungsträger erzeugt. Im Gegensatz zum Wellenlöten werden dabei der Lötwerkstoff (in Form von Lotpaste) und die zur Kontaktierung notwendige Wärme in zwei Prozessschritten aufgebracht. Die drei wesentlichen Verfahren Infrarotlöten, Zwangskonvektion und Dampfphasenlöten dominieren mit mehr als 75%, während das Wellenlöten zunehmend an Bedeutung verliert oder durch Selektivlötverfahren substituiert wird.

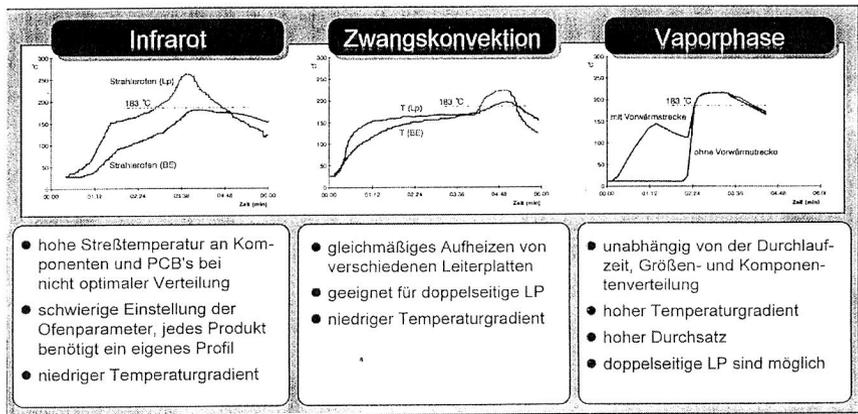


Bild 34: Übersicht und verfahrensspezifische Merkmale bei Reflowlötverfahren [25]

Die Reflowverfahren Zwangskonvektion und Dampfphase (engl. Vaporphase) können unter dem Obergriff "mediengebundene Lötverfahren" zusammengefasst werden [18], da beiden Verfahren der Einsatz eines wärmeübertragenden Mediums (Luft/Schutzgas bzw. eine kondensierende Flüssigkeit) gemeinsam ist. Dies führt im Gegensatz zum IR-Löten zu einer homogenen Temperaturverteilung auf der Baugruppe bei erheblich reduzierten Temperaturdifferenzen in der Peakzone. Weitere verfahrensspezifische Merkmale sowie charakteristische Temperatur-Profile sind in Bild 34 dargestellt.

Mediengebundene Lötverfahren sind für den Einsatz bei komplexen Baugruppen oder bei Area Array Bauelementen dem traditionellen IR-Löten eindeutig vorzuziehen. Das

IR-Löten verfügt nicht über die notwendigen Regelungsmechanismen zur gezielten Temperatureinstellung, die Wärmeübertragung ist verfahrensbedingt vom Absorptionskoeffizient des jeweiligen Materials abhängig. Insbesondere BGAs lassen sich somit nur bei deutlich erhöhten Temperaturen verarbeiten, da hier Abschattungseffekte und thermisch Differenzen zwischen Bauteilober- und -unterseite überwunden werden müssen.

Bei jedem Reflowlötverfahren gilt jedoch, dass das jeweilige Temperatur-Zeitprofil für die aktuelle Baugruppe optimiert werden muss. Hierzu gehört die Anpassung der einzelnen Temperaturenzonen ebenso wie die Festlegung geeigneter Zielgrößen, anhand derer das ermittelte Profil validiert werden kann.

3.4.2 Bestimmung von Zielgrößen und Maschinenfähigkeiten

Die Bestimmung von Zielgrößen und damit die Strategie bei der Qualifizierung eines Reflowlötverfahrens orientiert sich am angestrebten Untersuchungsergebnis. Ist es Ziel, ein neues Verbindungsmedium (z.B. eine bleifreie Lotpaste) auf einer bestehenden Baugruppe zu qualifizieren, so muss nicht nur der Lötprozess, sondern die gesamte Prozesskette anhand der erzeugten Fügestelle optimiert werden. Hier spielen Fragen zu Zuverlässigkeit oder Prozesswechselwirkungen eine Rolle, die über die separate Betrachtung und Qualifizierung des Lötprozesses hinausgehen. Beispiele für diese "nachschaletete" Optimierung von Reflowlötverfahren anhand der Verbindungsqualität ausgewählter Bauelement- oder Lotpastentypen finden sich u.a. in [12], [80], [96].

Schwierigkeiten bereitet hauptsächlich die Festlegung normierter, quantitativer Parameter, anhand derer die Verbindungsqualität bewertet und auf den Lötprozess zurückgeführt werden kann. Gebräuchliche, in der Praxis eingesetzte Kriterien zur Beurteilung der Lötstellenqualität sind unter anderem:

a) Qualitative Kriterien:

- Optisches Aussehen der Lötstelle (Glanz, flussmittelverteilung)
- Lötstellenverlauf (Form, Meniskus)
- Röntgenbildvergleich

Problematisch ist hierbei vor allem, dass keine objektiv messbaren Aussagen möglich sind. Damit ist die Bestimmung und Vergleichbarkeit von Merkmalen nicht gegeben, es können nur attributive Aussagen abgeleitet werden.

b) Quantitative, nicht direkt bewertbare Kriterien:

- Benetzungsverhalten von Bauelement und Leiterplatte
- Bauelementposition nach dem Lötprozess (Lage, Verdrehung)

Aus den gemessenen Größen kann oftmals kein direkter Rückschluss auf das Lötergebnis gezogen werden. Eine eindeutige Aussage zur Prozessbewertung ist nicht

möglich, da die Wirkzusammenhänge zwischen dem gemessenen Parameter und dem Prozessergebnis nicht hinreichend erforscht bzw. zu komplex sind.

c) Quantitative, direkt bewertbare Merkmale:

- Offensichtliche Lötfehler (Brückenbildung, Lotperlen, etc.)
- Elektrische oder mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Leitfähigkeit, etc.)
- Funktionsfehler (In Circuit Test, Boundary Scan, Funktionstest)

Eine eindeutige Bewertung der Merkmalsausprägungen ist auch hier kritisch, da Einzelparameter unter Umständen keine signifikante Aussage erlauben. Schertests und andere zerstörende Verfahren sind außerdem nur für Laboruntersuchungen oder Stichprobenprüfungen geeignet.

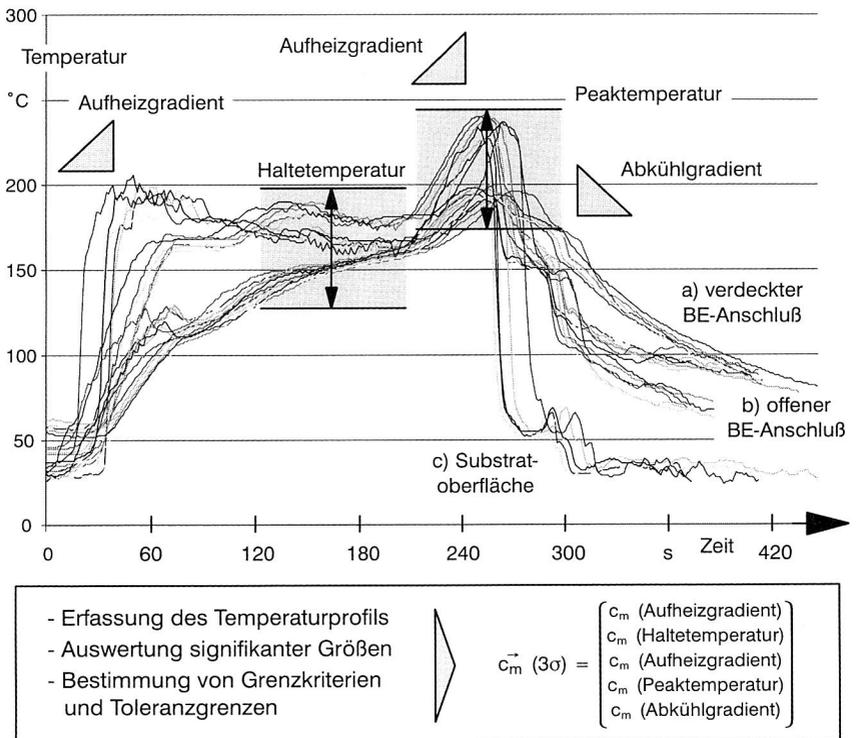


Bild 35: Exemplarische Temperatur-Zeitprofile mehrerer Referenzpunkte a) – c) auf einer Baugruppe und abgeleitete Kennwerte der Maschinenfähigkeit

Es ist also notwendig, den Reflowlötprozess anhand objektiv messbarer, baugruppen-unabhängiger Grenzkriterien zu qualifizieren. Das entscheidende Kriterium dieser "vorgeschalteten" Beurteilung eines Lötprozesses ist der Temperatur-Zeitverlauf während des Durchlaufs der Baugruppe durch den Ofen. Dieses Profil kann mithilfe eines Daten-trackers mit Messfühlern erfasst und extern ausgewertet werden (Bild 35).

Aus den Kurvenverläufen lässt sich das unterschiedliche Aufheiz- und Abkühlverhalten von Substratoberfläche und Bauelementanschlüssen nachvollziehen. Für die qualitativ hochwertige Ausbildung der Lötstelle ist eine homogene Erwärmung der Baugruppe sowie eine ausreichend lange Verweildauer in der Peakzone notwendig. Gleichzeitig beeinträchtigt eine zu starke Temperaturbelastung Funktionalität und Lebensdauer einzelner Komponenten. Daher wird zusätzlich der Aufheizgradient in der Vorheiz- und Peakzone ausgewertet, um Aussagen über die Lötgeschwindigkeit und damit das Beetzungsverhalten ableiten zu können [25]. In eigenen Untersuchungen konnten hierzu signifikante Korrelationen zwischen der Lotperlenanzahl als Fehlerkriterium und dem Temperaturgradient in der Aufheizphase verschiedener Reflowlötverfahren nachgewiesen werden [19].

Zur Ermittlung der Fähigkeit des Lötprozesses werden qualitätsrelevante Temperaturgradienten und -fenster aus den experimentell erfassten Temperatur-Zeitverläufen signifikanter Referenzstellen einer Testbaugruppe ermittelt. Diese können zu den jeweiligen Toleranzfeldern korreliert werden, um den Fähigkeitsvektor des Lötprozesses zu bestimmen (Bild 35 unten). In der Literatur werden Fähigkeiten für einzelne Temperaturgrößen von $c_m = 1,67$ gefordert, wobei jedoch direkt steuerbare Zonentemperaturen mit nur messbaren Boardtemperaturen vermengt werden [34].

3.4.3 Lötprofilqualifizierung für Area Array Komponenten

Zur prozesssicheren Kontaktierung verdeckter Anschlüsse (BGA, CSP, Flip Chip) wird am Institut unter anderem eine Dampfphasenlötanlage in Batchbetrieb eingesetzt. Das Dampfphasenlöten besitzt gegenüber anderen mediengebundene Lötverfahren den Vorteil, dass das Medium (gesättigter Dampf) in feinste Zwischenräume eindringt und eine homogene Erwärmung der Baugruppe gewährleistet. Die geforderte maximale Temperaturdifferenz von 15 K zwischen zwei beliebigen Punkten der Baugruppe im Lötprofil wird somit gewährleistet.

Das Lötgut wird zunächst in eine Vorheizzone gefahren, in der es eine definierte Zeit aufgeheizt wird. Das Aufheizen erfolgt über Infraroterwärmung. Anschließend fährt der Werkstückträger in eine Zone gesättigten Dampfes (100% Schutzgasatmosphäre), dessen Temperatur vom Siedepunkt der Flüssigkeit (perfluorierte Polyetherkomplexe) bestimmt wird und nicht überschritten werden kann. Sie liegt typischerweise in einem

Bereich von 200°C bis 215°C. Für niedrigschmelzendes Lot kann auf eine Flüssigkeit mit Siedepunkt von ca. 150°C umgestellt werden. Der heiße Dampf kondensiert auf dem Lötgut ab und überträgt optimal die Wärme des Dampfes auf die Lötverbindungen der Bauelemente und die Leiterplatte. Dies geschieht unabhängig von der Masse oder Komplexität der Baugruppe. Nach dem Löten fährt die Baugruppe in eine kühlere Zone, um überschüssiges Medium abdampfen zu lassen. Die Baugruppe wird dann trocken aus der VP-Zone in die integrierte Kühlstation transportiert, wo sie abkühlt.

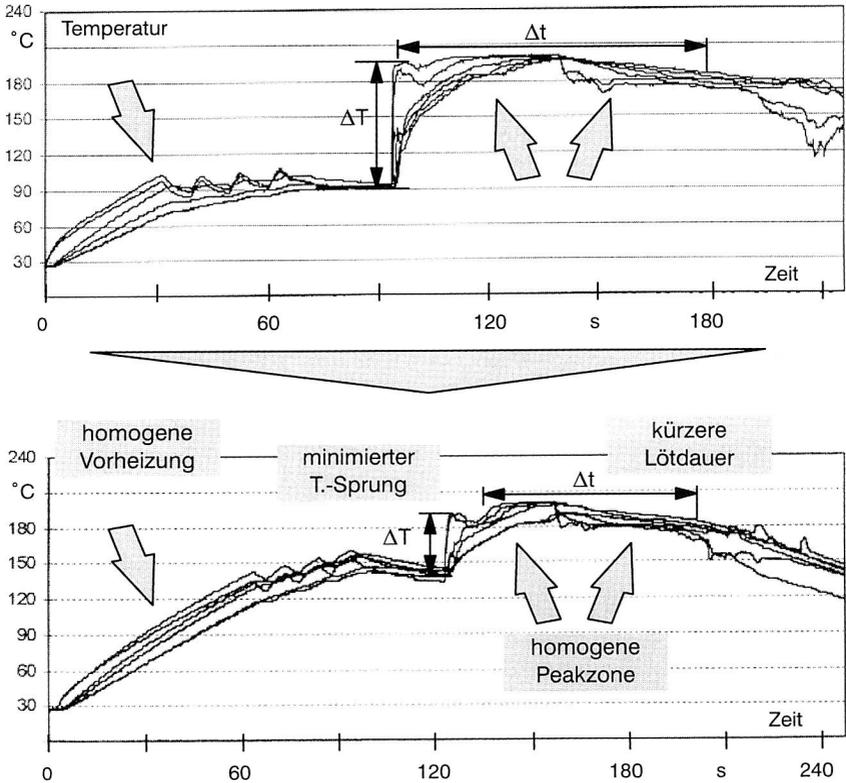


Bild 36: Lötprofilqualifizierung einer Dampfphasenlötanlage - Ausgangsprofil für SMT-Baugruppen und optimiertes Profil für gemischtbestückte Baugruppen in SMT & Area Array Technik

Nach Festlegung einer Testbaugruppe mit definierten Referenzstellen zur Temperaturerfassung (z.B. Substratoberfläche, offene bzw. verdeckte Bauelementanschlüsse) wurde das in Bild 36 oben dargestellte Temperatur-Zeitprofil gemessen. Im Folgenden galt es nun, dieses Standardprofil für die Kontaktierung von Area Array Komponenten zu qualifizieren und den Temperaturverlauf zu optimieren.

Die Qualifizierung des Lötprofils umfasst dabei folgende Kriterien:

– Vorheizzone

Im Vorheizbereich muss die gesamte Baugruppe homogen erwärmt werden, um innere Spannungen aufgrund unterschiedlicher Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten zwischen Substrat, Bauelement und Fügestelle zu minimieren. Die Verweildauer im Vorheizbereich muss daher angepasst werden, um sicherzustellen, dass auch größere Bausteine wie BGAs vollständig auf die notwendige Temperatur erwärmt werden. Da BGAs aus thermodynamischen Gründen auf Strahlungswärme nur sehr träge reagieren und zudem die Kontaktierungsstellen unter dem Bauelementkörper angebracht sind, ist eine erhöhte Vorheizdauer notwendig.

– Eintauchphase

Während der Eintauchphase wird die Baugruppe starken thermischen Belastungen ausgesetzt, da schlagartig ein Temperatursprung von bis zu 60 K beaufschlagt wird. Diese Belastung ist grundsätzlich zu minimieren, um die Lebensdauer der einzelnen Komponenten zu sichern. Für Bauelemente mit Kunststoffgehäusen gilt zudem, dass eine spontane Erhitzung zu Verdampfung der gespeicherten Feuchte führen kann, was zu Delaminationen und Bauteilschädigungen führen kann. Dieses als "Popcorn-Effekt" bekannte Phänomen ist bei PBGAs und QFPs zu beobachten, die aufgrund unzureichender Lagerung Feuchte aufgenommen haben und diese unter hoher Wärmezufuhr schlagartig expandieren [21].

– Temperaturverlauf und Verweildauer in der Peakzone

Der Temperaturverlauf in der Peakzone bestimmt das Aufschmelzverhalten und damit die Benetzung der Verbindungspartner. Das VP-Verfahren garantiert eine sehr gleichmäßige Wärmebeaufschlagung. Gleichwohl muss im Temperaturprofil sichergestellt werden, dass alle Kontaktierungsstellen gleichzeitig und gleichlang oberhalb der Liquidustemperatur der Lotpaste ($T_{\text{Liqu}}(\text{Sn62Pb36Ag2}) = 183 \text{ °C}$) verweilen. Dies gilt insbesondere für Area Arrays, da hier die Lötstellen im Gegensatz zu SMD-Bausteinen nicht mehr optisch zugänglich sind und somit die Benetzung mit herkömmlichen Methoden nicht mehr überprüft werden kann. Die Verweildauer im Schmelzbereich sollte aus prozesstechnischen Gründen so kurz wie möglich sein, um die Belastung gerade kleinerer Bauelemente, die sehr schnell eine Lötverbindung herstelleneingehen, zu minimieren. Zu lange Verweilzeiten beschleunigen zudem das Wachstum intermetallischer Verbindungsschichten (IMV). Hier ist primär das IMV-System SnPb auf Cu relevant, bei dem es zur Ausbildung zweier Phasen,

Cu_6Sn_5 und Cu_3Sn unter Freisetzung von Bleipartikeln, kommen kann. Hiervon sind insbesondere Bausteine mit eutektischen Balls betroffen, da diese in der Peakzone aufschmelzen und eine metallurgische Verbindung mit dem Lotwerkstoff eingehen.

Das unter Berücksichtigung obiger Kriterien verifizierte Temperatur-Zeitprofil ist in Bild 36 unten dargestellt. Es zeigt den gewünschten homogenen Verlauf über die verschiedenen Messstellen während der Aufheiz- und Schmelzphase und die im Vergleich zum Ausgangsprofil minimierten Temperaturgradienten.

Wie bei den anderen Lötverfahren ebenfalls festzustellen ist, erwärmt sich auch hier die Oberfläche am schnellsten, gefolgt vom Bauteilrandbereich und der Bauteilmitte. Der zackige Bereich der Temperaturkurve spiegelt die Heizimpulse am Ende der IR-Vorheizung wieder. Mit diesen Heizimpulsen wird die Temperaturdifferenz zwischen Bauteiloberfläche und dem Bereich unterhalb des Bauelementes angeglichen. Die Abkühlung der Substratoberfläche erfolgt erwartungsgemäß signifikant schneller als die Abkühlung der Komponenten.

Die dergestalt optimierte und qualifizierte Dampfphasenlötanlage wurde im weiteren Verlauf der Arbeiten für die unterschiedlichsten Prozessuntersuchungen an BGA- und CSP-Lötverbindungen eingesetzt. Die Resultate und die daraus abgeleiteten Prozess- und Schädigungsmodelle werden in Kapitel 4 ausführlich diskutiert.

4 Analyse der Verarbeitbarkeit von Area Array-Bauelementen

Im vorherigen Abschnitt wurde die prinzipielle technologische Fähigkeit der an der Flachbaugruppenfertigung beteiligten Prozess- und Prüfstationen analysiert sowie für die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Geräte nachgewiesen. Die konkrete Fokussierung auf ein spezielles Bauelement- oder Technologiespektrum erfolgte bisher nicht. Daher soll im folgenden Kapitel eine umfassende experimentelle Analyse der Verarbeitungsbedingungen für den Bauelementtyp "Area Array" erarbeitet werden.

Wie bereits in Kapitel 2 ausführlich dargestellt, ergibt sich durch den Einsatz von Area Array-Komponenten wie BGAs oder CSPs das größte technologische Potential im Vergleich zur herkömmlichen SMT. Dieses Potential kann nur durch exakte Kenntnis der am Prozess beteiligten Parameter und Wechselwirkungsvorgänge hinreichend genutzt werden. Das folgende Kapitel 4 soll hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten, indem die für diese Gehäuseformen typischen Verarbeitungs- und Schädigungsmechanismen analysiert und die Randbedingungen für eine Integration in Standard-SMT-Prozesse erarbeitet und bewertet werden.

4.1 Lagerung von Bauelementen

Neben robusten Prozessen kommt der Qualität der Eingangsprodukte und Materialien eine große Bedeutung für die Baugruppenqualität zu [90]. Durch die hohe Anzahl und Vielfalt der heutzutage eingesetzten Bauelemente ist es notwendig, über entsprechende Prüfschleifen die Fehlerfreiheit aller Komponenten zu sichern. Bauteildefekte können aufgrund mehrerer Umstände entstehen, wobei der Verarbeiter auf die Lieferqualität des Bauelementherstellers selbst nur geringen Einfluss hat. In der industriellen Praxis wird hier schon seit längerem durch enge Zusammenarbeit im Rahmen von "ship-to-stock"-Lieferantenvereinbarungen versucht, eine hinreichend hohe Eingangsqualität quasi zu erzwingen [83].

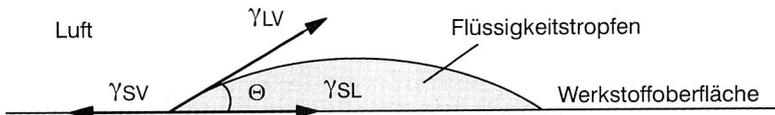
Die Lagerungsbedingungen vor und während der Verarbeitung der Bauelemente bilden einen weiteren wichtigen Aspekt. Durch fehlerhafte Lagerung können während der Verarbeitung Schädigungsmechanismen im Bauelement in Gang gesetzt werden, die durch herkömmliche Tests nur schwer feststellbar sind und meist erst im Feld erkannt werden [31].

Als wesentliches Kriterium zur Bewertung der Verarbeitbarkeit von Bauelementen muss daher der metallurgische Ausgangszustand der zu fügenden Komponenten charakterisiert werden. Dies erfolgt in der Regel durch eine analytische Charakterisierung der Benetzbarkeit der metallisierten Anschlüsse.

4.1.1 Charakterisierung des Benetzungsverhaltens

Benetzbarkeit metallisierter Anschlüsse

Das Benetzungsverhalten metallisierter Anschlüsse bestimmt in wesentlichem Maße die Ausbildung und Qualität der Lötverbindung. Während des Lötprozesses muss das schmelzflüssige Lot die Oberflächen der zu verbindenden Komponenten gut benetzen, damit die Adhäsionskräfte wirksam werden können. Die dabei wirkenden Grenzflächenspannungen unterliegen der in Bild 37 dargestellten Youngschen Gleichgewichtsbedingung, wobei der Kontaktwinkel Θ als qualitätsbestimmendes Kriterium für die Benetzbarkeit eines Festkörpers durch eine Flüssigkeit herangezogen wird [90].



Gleichgewichtsbedingung: $\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} \cos \Theta$

γ_{SL} = Grenzflächenspannung zwischen Tropfen und Oberfläche

γ_{SV} = Oberflächenspannung des festen Werkstoffes

γ_{LV} = Oberflächenspannung des Tropfens

Θ = Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeitstropfen und fester Werkstoffoberfläche

Bild 37: Grenzflächenspannungen bei der Benetzung von festen Oberflächen durch einen Flüssigkeitstropfen [90]

Aus der Benetzungsgleichung folgt, dass der Kontaktwinkel im Benetzungsfall zwischen 0 und 90° liegt, was sich bei einer realen Lötstelle anhand der Ausbildung des Lotmeniskus nachvollziehen lässt. Hieraus ergibt sich, dass die Benetzung durch Erhöhung von γ_{SV} oder durch Verringerung von γ_{LV} und von γ_{SL} verbessert werden kann. Neben der Schichtdicke der die Benetzung behindernden Oxidschichten, hat auch die Ausbildung von intermetallischen Phasen erheblichen Einfluss auf die Benetzbarkeit. Die Bildung dieser Rand- und Zwischenschichten, aufgrund von unzureichender Lagerung, sowie die daraus resultierenden Qualitätsaussagen werden in folgenden anhand experimenteller Untersuchungen erläutert.

Die Ermittlung der Benetzbarkeit erfolgt nach dem Prinzip der Benetzungskraftmessung. Betrag und Verlauf der Benetzungskraft werden in Abhängigkeit von Metallisie-

zung, Flussmittel, Temperatur sowie weiterer Lötparameter ermittelt [69] [70]. Wie in Bild 38 schematisch dargestellt, wird die zu benetzende Probe in das schmelzflüssige Lot eingetaucht. Die am Probekörper beim Eintauchen wirkenden Kräfte werden durch das Gewicht der Probe, den Auftrieb, die Grenzflächenspannung und Benetzung der Probenoberfläche bestimmt.

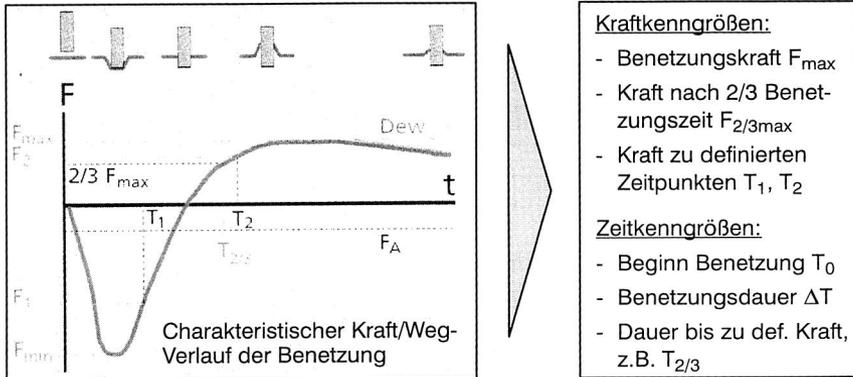


Bild 38: Experimentelle Ermittlung der Benetzbarkeit durch Benetzungskraftmessungen an einer Heitzsch-Benetzungswaage (Bild: IZM)

Die zur Auswertung kommenden Parameter werden in Kraft- und Zeitkenngrößen eingeteilt. Kraftkenngrößen, wie die maximale Benetzungskraft F_{\max} oder die Benetzungskraft nach einer definierten Zeit F_t , führen zu Aussagen über Stärke und Gleichmäßigkeit des Benetzungsverhaltens. Die Auswertung von Zeitkenngrößen, wie der Zeitpunkt bei Erreichen von $2/3$ der max. Benetzungskraft $t_{2/3}$, erlauben Aussagen zur Schnelligkeit der Benetzung und damit zur Oberflächengüte der benetzten Metallisierung. Eine gute Benetzungskurve besitzt eine kurze, schnelle Anstiegszeit und eine hohe, über die Zeit stabile Maximalkraft.

Einfluss von Temperatur und Feuchte

Da die Benetzbarkeit metallisierter Anschlüsse stark von der Oberflächengüte der Metallisierung abhängt, ist es offensichtlich, dass die Bildung von Grenz- und Zwischenschichten mit schlechterem Benetzungsverhalten zu vermeiden ist. Insbesondere die sich aufgrund von Umgebungseinflüssen (Temperatur, Feuchte) bildenden Oxide wirken sich direkt auf Benetzungskraft und -zeit aus.

Experimentelle Untersuchungen, wie sie exemplarisch für den Bauelementtyp Melf mit SnPb-Metallisierung in Bild 39 dargestellt sind, verdeutlichen die grundsätzlich nega-

tive Wirkung von Lagerungseinflüssen [23]. Generell ist ein Abfall der Benetzungskraft sowie ein Anstieg der Benetzungszeit mit zunehmender Feuchte- und Temperaturbelastung zu beobachten. Die stark ansteigende Benetzungszeit bei höheren Lagerungstemperaturen ist auf das Anwachsen von Oxidschichten zurückzuführen.

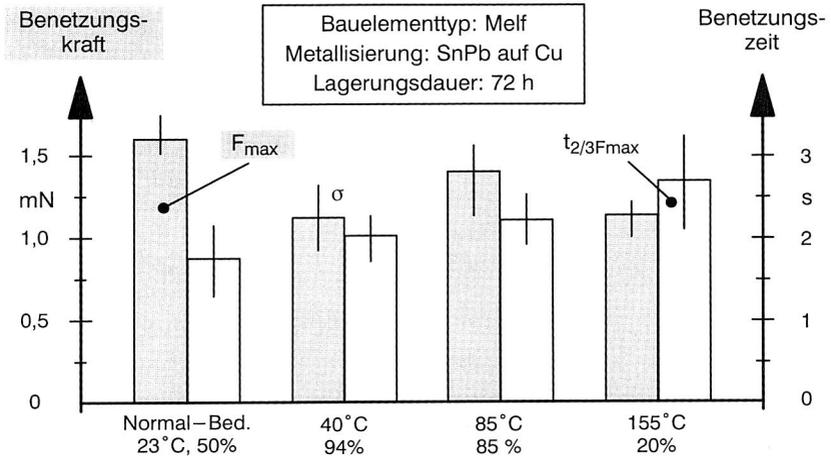


Bild 39: Lagerung von Zweipolern unter definierten Temperatur-Feuchte-Bedingungen und Ermittlung des Benetzungsverhaltens

Die drei hierbei durchgeführten Lagerungszyklen 40°C / 94% rel. Feuchte (Dampfhitze), 85°C / 85% rel. Feuchte (kombiniertes Belastungstyp) und 155°C / 20% rel. Feuchte (trockene Hitze) stellen standardisierte Belastungsprofile dar, wie sie für die beschleunigte Alterung von Komponenten durchgeführt werden (z.B. IEC-68-2-2 ff). Eine Lagerungsdauer von 72 h bei trockener Hitze entspricht dabei für SnPb-metallisierten Anschlüssen auf Cu-Kern einer Lagerung bei normalen Umgebungsbedingungen von ca. 2,5 Jahren. Dieser Zusammenhang ergibt sich aus der Wachstumsformel zur Bildung intermetallischer Verbindungsschichten im System CuSn [46].

Analysiert man die zugrundeliegenden Benetzungskurven, so ergeben sich im wesentlichen drei Kurventypen (Bild 40). Bei nicht oder nur kurzzeitig gelagerten Bauelementen stellt sich eine stabile, schnell verlaufende Benetzung ein (Kurve 1). Mit zunehmender Lagerungsdauer wächst die Oxidschicht an der Metallisierung an, wirkt dort wie eine Sperrschicht und führt zu verzögerter, schwächerer Benetzung (Kurve 2). Dieser Mechanismus ist über eine längere Periode der Oxidschichtbildung nahezu konstant. Erst wenn die sich im Inneren gebildeten Zwischenschichten bis an die Oberfläche gewachsen sind, kommt es zu einem nachhaltigen Abfall der Benetzungskraft bis hin zu

starken Entnetzungeffekten (Kurve 3). Der Verlauf der Benetzungskurve zeigt keinerlei Anstieg mehr, die Benetzungskraft verbleibt im negativen Bereich (technologisch betrachtet liegt die Benetzungskraft bei Null; der negative Wert resultiert aus dem Versuchsaufbau, bei dem das Bauelement zu Versuchsbeginn in flüssiges Lot eingetaucht wird. Dieses Eintauchen wird als negative Kraft gemessen) [23].

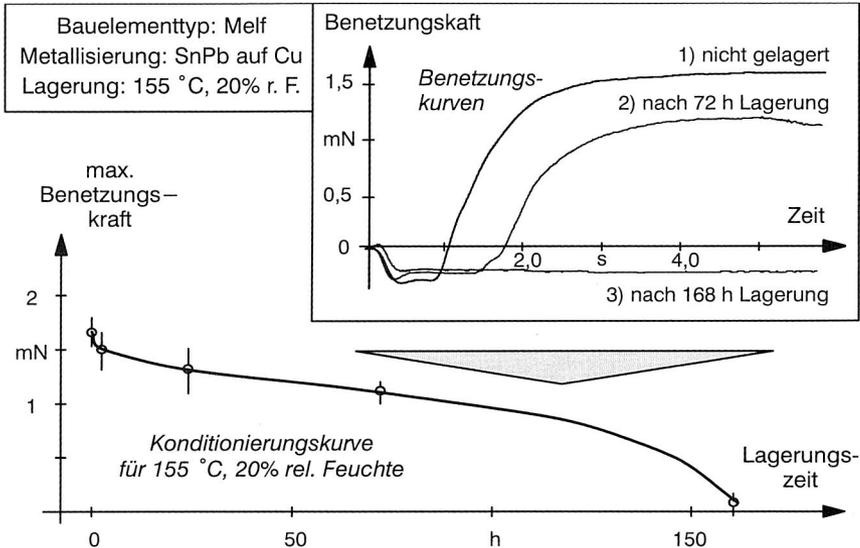


Bild 40: Verlauf der Benetzungskurven von Zweipolern bei verschiedenen Lagerungsdauern und definierten Feuchte-Temperatur-Bedingungen

Aus den einzelnen Kurven lassen sich durch Gegenüberstellung von Lagerungszeit und resultierender maximaler Benetzungskraft sogenannte Konditionierungskurven ableiten (Bild 40 unten). Konditionierungskurven erlauben Aussagen zum Einfluss von Oxid- und Zwischenschichtbildung auf die Benetzbarkeit einer metallischen Oberfläche.

Die beiden angesprochenen Mechanismen der künstlichen Alterung lassen sich mit Hilfe von metallographischen oder spektroskopischen Analyseverfahren nachweisen und quantifizieren. Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) wird zur Elementermittlung sowie zur Schichtdickenmessung von Einfach- und Mehrfach-Schichtsystemen eingesetzt. Hierbei wird die Oberfläche mit einer Röntgenstrahlung beaufschlagt und die Schichtdicke indirekt über eine flächenbezogene Massenbestimmung ermittelt [3]. Hat die auftreffende Röntgenstrahlung einen definierten Energiebetrag erreicht, wird vom bestrahlten Messbereich ein charakteristische Fluoreszenzstrahlung ausgesandt.

Diese Antwortstrahlung wird gemessen und über eine Energieanalyse den jeweiligen Elementen zugeordnet. Somit bestand die Möglichkeit, die verschiedenen Elemente sowie ihren prozentualen Anteil auf der Oberfläche zu ermitteln und in Korrelation zum Lagerungszustand zu setzen.

Die Auswertung der im RFA ermittelten Histogramme zeigt deutlich den kontinuierlichen Abfall des Zinnanteils bei gleichzeitigem starkem Anstieg des Sauerstoffgehaltes der metallisierten Oberfläche. Dieser durch die Alterung der Oberfläche bedingte Effekt ist bei den hier ausgeführten Metallisierungen auf Basis von SnPb auf das Wachstum von Zinnoxiden zurückzuführen und wird wegen des starken Einflusses der Feuchte auch als Dampfalterung bezeichnet. Kennzeichnend ist der starke Abfall des Zinnanteils der Oberfläche, der mit einem Anstieg des Sauerstoffanteils korreliert (Bild 41).

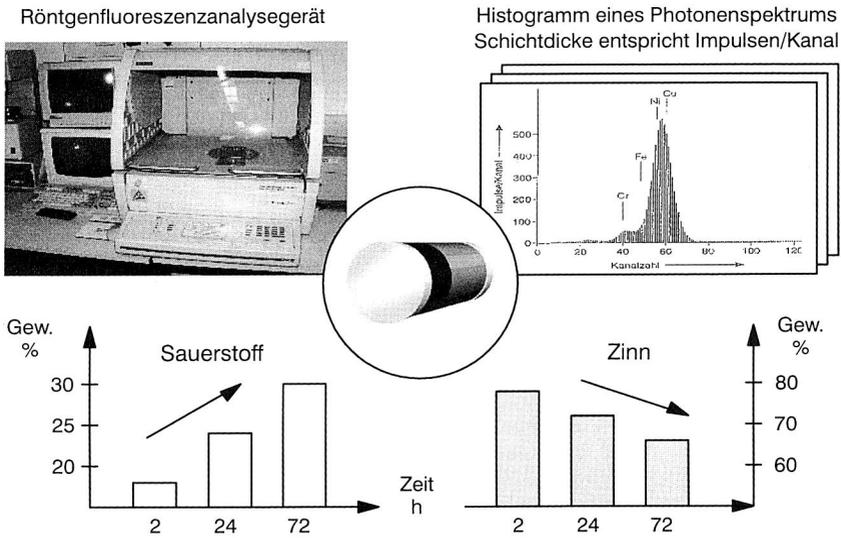


Bild 41: Wachstum von Oxidschichten auf einer Sn63Pb37-Oberfläche, ermittelt durch Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) an Melf-Bauelementen

Die Alterung durch Wachstum der intermetallischen Verbindungsschicht basiert auf dem zunehmenden Auflösen des SnPb-Überzugs durch Reaktion mit dem Grundmetall Kupfer. Kupfer bildet mit Zinn zwei Phasen, Cu_6Sn_5 und Cu_3Sn . Diese Ausbildung eines stabilen Kupfer-Zinn-Komplexes führt letztlich zu einem völligen Auflösen der im vorliegenden Fall $8\ \mu\text{m}$ dünnen SnPb-Metallisierung. Nach einer Lagerungszeit von 72 h bei 155°C hat sich ein ca. $6\ \mu\text{m}$ starker CuSn-Komplex gebildet, die Bleipartikel sind als ungebundene, oberflächennahe Körner sichtbar.

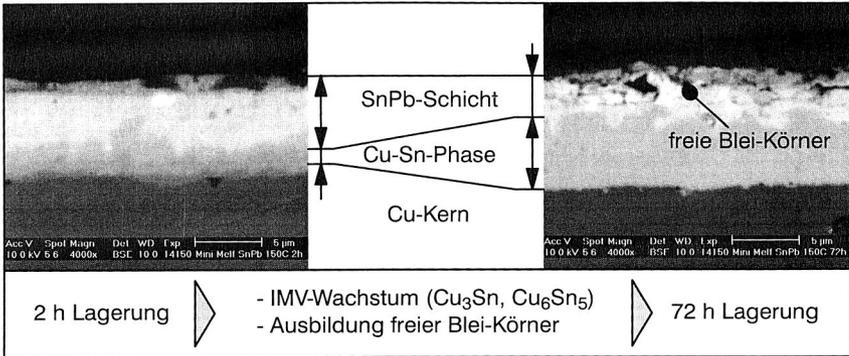


Bild 42: Wachstum der intermetallischen Phasen im System Sn63Pb37/Cu, bestimmt durch Schichtanalysen an Melf-Bauelementen

Zur Visualisierung der im Inneren der Fügestelle ablaufenden, metallurgischen Mechanismen wurden Schlichtbilder von Melf-Bauelementen erstellt und analysiert. Deutlich sind die freien Bleikörner im Schlichtbild nach 72 h Lagerung bei 155 °C zu erkennen. Die intermetallischen Phasen dominieren den Schichtverbund, die nach 2 h noch voll ausgebildete SnPb-Oberflächenschicht ist völlig aufgelöst (Bild 42 rechts).

4.1.2 Untersuchung der Benetzbarkeit von Area Array-Bauelementen

Bei der Analyse der Benetzbarkeit von BGA- oder CSP-Bauelementen muss zuerst geklärt werden, aus welchen Legierungsbestandteilen die Anschlussballs zusammengesetzt sind. Handelt es sich um eutektische Legierungen wie Sn62Pb36 (Softballs), so ist ein Aufschmelzen der Balls während des Benetzungstests zu erwarten. Sind die Anschlüsse aus hochschmelzenden Legierungen wie Pb95Sn5 aufgebaut, handelt es sich um sogenannte Hardballs, die sich im Benetzungstest wie herkömmliche Bauelemente mit metallisierten Anschlüssen verhalten. Dieses Verhalten bestimmt jedoch wesentlich den Kraft-Weg-Verlauf der Benetzungskurve.

Die in Bild 43 gegenübergestellten Benetzungskurven verschiedener Fine Pitch-Bauelemente verdeutlichen diesen Zusammenhang. Die untersuchten QFP-Bauelemente (Kurve 2 und 4) weisen kurze Benetzungszeiten bei niedrigen Benetzungskräften auf. Dies lässt sich mit der geringen benetzbaren Fläche bei überproportional großem Angebot an flüssigem Lot im Benetzungstest erklären. Demgegenüber stehen BGA und CSP, deren eutektische Lotkugeln aufschmelzen (Kurve 1 und 3), was zu einem trägeren Benetzungsverlauf führt. Während die CSP-Anschlüsse jedoch aufgrund ihrer geringen thermischen Masse sofort aufschmelzen können und die Benetzung ohne Verzögerung

abläuft, führt das Aufschmelzen der BGA-Balls zu einer Verzögerung der Benetzung. Während die Temperatur der flüssigen Lotpaste auf die Lotballs übertragen wird, bleibt die Benetzungskraft kurze Zeit konstant, ehe der vollständig aufgeschmolzene Ball komplett benetzt. Dieser Mechanismus ist als "Treppeneffekt" im Kraft-Weg-Verlauf nachweisbar (Kurve 1) und führt zu sehr hohen Benetzungskräften bei BGAs, da das entstehende Überangebot an flüssiger Lotpaste zu hohen Auftriebskräften führt. Dies erklärt auch den aus der Praxis bekannten hohen Selbstzentriereffekt bei BGAs [43].

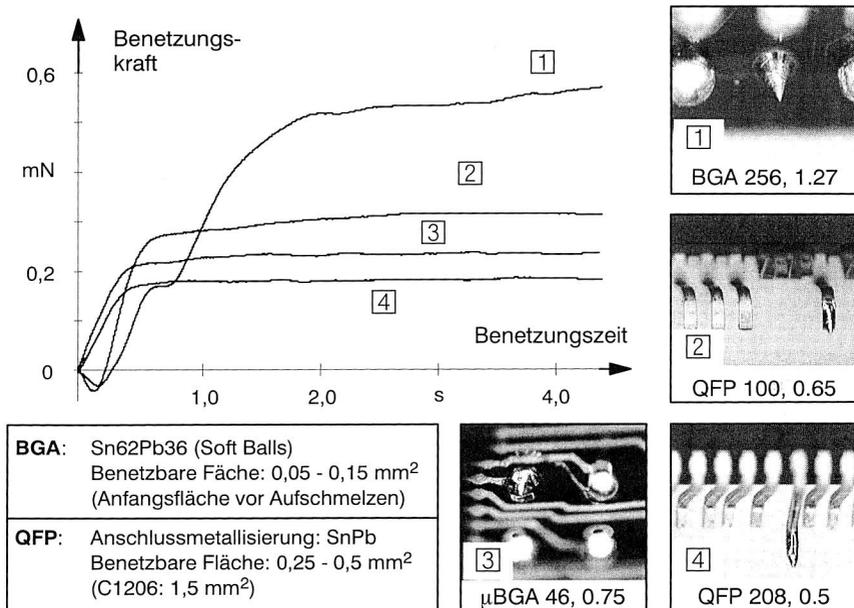


Bild 43: Benetzbarkeit hochpoliger Bauelemente - Ausgangszustand

Stellt man diesen Ergebnissen den Benetzungszustand künstlich gealterter Bauelemente gegenüber, so zeigt sich auch hier eine Zweiteilung, die auf das unterschiedliche An- und Aufschmelzverhalten von Soft- bzw. Hardballs zurückzuführen ist (Bild 44, Bild 45).

Während sich die Benetzung eutektischer Balls nahezu unabhängig von Alterungsmechanismen zeigt, ist an den hochschmelzenden Anschlüssen ein deutlicher Abfall der Benetzbarkeit festzustellen. Diese – auch beim Referenzbaustein 1206 festgestellte – Verminderung der Benetzungseigenschaften um bis zu 50% ist auf das bereits diskutierte Wachstum von Oberflächen- und Grenzschichten zurückzuführen [23].

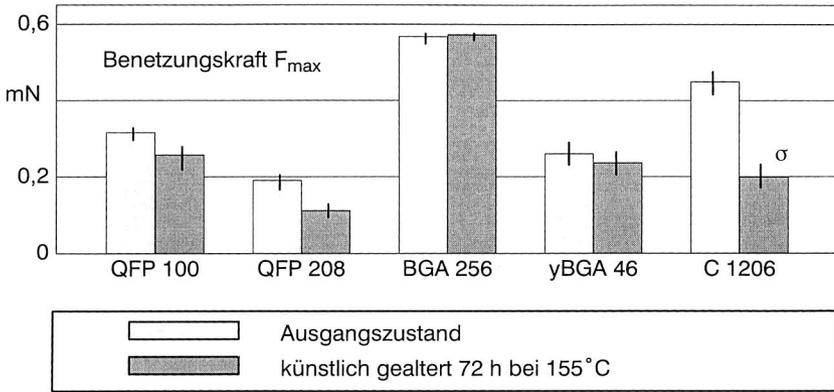


Bild 44: Benetzungskraft hochpoliger Bauelemente nach Alterung

Die hier untersuchten Softballs sind dagegen wesentlich robuster in ihrem Benetzungsverhalten gegenüber Lagerungseinflüssen. Wie aus der Gegenüberstellung in Bild 45 deutlich wird, führt die Überwindung der durch die Temperaturlagerung entstandenen Oxidschichten nur zu einem geringfügigen Anstieg der Benetzungszeiten. Im weiteren Verlauf der Benetzung ist jedoch keine Verschlechterung des Kraft-Weg-Verlaufes erkennbar. Auch die im allgemeinen als kritisch angesehenen CSPs zeigen sehr stabiles Verhalten trotz der wesentlich geringeren benetzbaren Fläche.

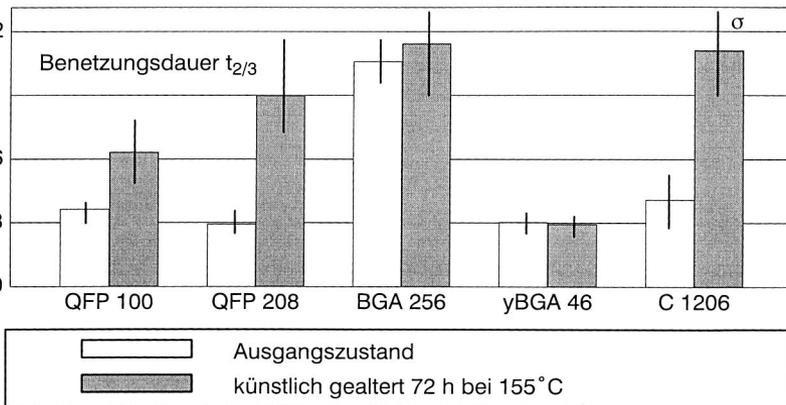


Bild 45: Benetzungsdauer hochpoliger Bauelemente nach Alterung

Gleichzeitig ergeben sich bei den untersuchten Area Array-Bausteinen wesentlich geringere Schwankungen innerhalb einer Versuchsreihe. Insbesondere die Analyse gleichartig gelagerter Bausteine zeigt die höhere Reproduzierbarkeit der Benetzung von BGA/ μ BGA-Bausteinen gegenüber QFPs. Dies ist ein starkes Kennzeichen für ein störungsunempfindliches Prozessverhalten, da Schwankungen einzelner Parameter oder externe Einflüsse gut kompensiert werden.

Zusammenfassend lässt sich das Benetzungsverhalten von Area Array-Bauelementen als sehr positiv und robust gegenüber äußeren Einflüssen bewerten. Insbesondere der Vergleich mit herkömmlichen Fine Pitch-Bauelementen hat gezeigt, dass der Einsatz von Anschlussgeometrien aus eutektischen Lotmaterialien zu einer erheblichen Verbesserung des Aufschmelzverhaltens führt. Das Grenzkriterium "Zielgrößenabfall um 50% gegenüber dem Ausgangszustand" wurde bei keiner der untersuchten Area Array-Bauelementen erreicht, während es bei den meisten QFP-Bauformen sowohl in der gemessenen Benetzungskraft wie auch in der Benetzungsdauer überschritten wurde.

4.1.3 Einfluss der Benetzung auf die Lötstellenqualität

Die Charakterisierung der Lötstellenqualität ist mit Hilfe zerstörungsfreier oder zerstörender Verfahren möglich und umfasst die Überprüfung optischer, mechanischer oder elektrischer Eigenschaften. Die vielfältigen Prüfkriterien und -verfahren, wie sie exemplarisch in [29] ausführlich dargestellt sind, erlauben eine umfassende Beschreibung der Verbindungsqualität der Lötstelle. Zur analytischen Beschreibung der Korrelation zwischen Benetzbarkeit und Lötstellenausbildung wurden die Zielgrößen Benetzungskraft und Scherkraft ausgewählt. Die Scherkraft ist die in der Industrie gebräuchliche Kenngröße zur Bewertung der mechanischen Festigkeit eines gelöteten Bauelementes. Die Versuche wurden mit einem Universalschertester bei einer Schergeschwindigkeit von 0,05 mm/s und einem Absprung von 1 mm durchgeführt.

Aus werkstoffkundlichen Untersuchungen ist bekannt, dass sich die Sprödigkeit der intermetallischen Verbindungsschichten nachteilig auf die Festigkeit der Lötstellen auswirkt. Zudem bedingt das Wachstum der Schichten eine Verarmung des benachbarten Lotes an Zinn. Der bleireiche Bereich ist jedoch duktiler und weist eine geringere Festigkeit auf. Somit ist eine Abnahme der Festigkeit mit wachsenden Zwischenschichten zu erwarten [46].

Wie anhand der Untersuchungen an Zweipolern im vorherigen Kapitel belegt wurde, lassen sich diese Alterungsmechanismen jedoch auch bei Anschlussmetallisierungen von Bauelementen nachvollziehen. Damit ist ein Abfall der Festigkeit aufgrund unzureichend benetzender, weil gelagerter Bauelemente zu vermuten. Um die verschiedenen Einflussbereiche zu separieren, wurden daher künstlich gealterte Bauelemente hin-

sichtlich ihrer Benetzbarkeit und ihrer Lötbarkeit untersucht. Hierzu wurden zwei Lose an 1206-Bauelementen gelagert; mit dem ersten Los wurden die in Bild 46 jeweils links aufgetragenen Benetzungskräfte im Benetzungstest ermittelt. Das zweite Los wurde im Reflowlötverfahren mit einer Referenzlotpaste des Typs Sn62Pb36Ag2 verarbeitet und anschließend im Scherversuch abgesichert. Zur statistischen Absicherung wurden grundsätzlich mindestens 30 Bauelemente pro Versuchsreihe verarbeitet. Die Scherkräfte sind in Bild 46 jeweils rechts aufgetragen.

Analog dem vorherigen Kapitel wurde als Versagenskriterium ein Abfall der ermittelten Kräfte F_{\max} bzw. F_s auf 50 % des Ausgangswertes eines nicht konditionierten Bauelementes festgelegt. Analoge Grenzkriterien auf Basis gemessener Kräfte finden sich u.a. in [56].

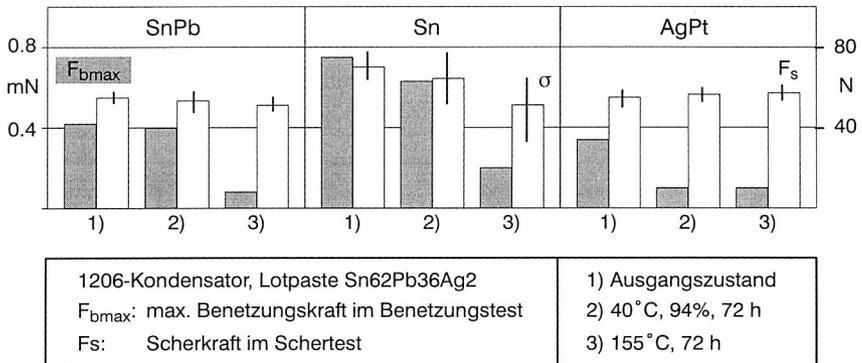


Bild 46: Gegenüberstellung von Benetzungskraft und Scherkraft konditionierter Bauelemente bei verschiedenen Anschlussmetallisierungen

Die Standardlegierung SnPb zeigt im Benetzungstest das erwartete Verhalten. Die Benetzungskraft fällt bei trockener Hitze stark ab, was auf ein starkes Wachstum an Oxid- und Zwischenschichten zurückzuführen ist. Die Lagerung unter Dampfhitze hat hingegen keinen nachhaltigen Einfluss auf Benetzungskraft und -zeit, die geringe Temperatur bewirkt keine wesentliche Verschlechterung der Benetzungseigenschaften. Bei der Analyse der Scherversuche zeigt sich, dass die unterschiedlichen Benetzungszustände keine Auswirkung auf die Scherfestigkeit haben. Mittelwerte und Streuung bleiben innerhalb der Versuchsparameter konstant, die analysierten Bruchstellen lagen im Bereich der Lötstelle, bzw. am Übergang Lötstelle-Pad und wiesen keine Anomalien auf.

Bauelemente mit einer Zinnoberfläche sind in ihrem Benetzungs- und Lötverhalten anfälliger gegenüber Feuchte oder Temperatureinwirkung. Wie die Ergebnisse belegen,

resultiert die künstliche Alterung in einem Abfall von Benetzungskraft und Scherkraft. Ebenso steigen die Benetzungszeiten stark an, was im Lötprozess zu nicht vollständig ausgebildeten bzw. benetzten Lötverbindungen führt. Somit wird die Verbindungsqualität schlechter bei größeren Schwankungen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der stetigen Bemühungen um eine Steigerung von Qualität und Ausbeute in der Baugruppenproduktion von Bedeutung.

Die Bauelementmetallisierung AgPt, als dritte hier untersuchte Oberfläche, zeigt einen starken Abfall der Benetzbarkeit nach Lagerung unter trockener oder feuchter Hitze. Dies lässt sich auf die ausgeprägte Neigung von Silber zur Sulfidbildung zurückführen. Diese Sulfide behindern die Benetzung und das beim Benetzungstest eingesetzte Flussmittel Actiec 5 ist offensichtlich nicht in der Lage, die Sulfidschicht aufzubrechen und eine akzeptable Benetzung vorzubereiten. Der starke Einfluss der unterschiedlichen Flussmittel zeigt sich deutlich im mechanischen Verhalten; die hier ermittelten Scherkräfte sind auf hohem Niveau bei sehr geringen Streuungen, sodass auch Bauelemente mit AgPt-Oberfläche ungeachtet ihrer spezifischen Benetzungseigenschaften für qualitativ hochwertige Lötstellen empfohlen werden können. Erwähnt werden muss in diesem Zusammenhang jedoch der Effekt der Silbermigration, bei dem es zu Kurzschlüssen infolge wandernder Silberpartikel kommen kann [58].

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse beider Versuchsreihen nur bedingt miteinander harmonieren, gemessene Benetzbarkeiten steht oftmals nicht in direkter Relation zu mechanischen Belastbarkeiten. Die hier untersuchten Oberflächen sind geprägt durch die spezifischen rheologischen Eigenschaften der jeweiligen Metallisierung mit den damit verbundenen Wirkmechanismen. Werden diese Effekte bei der Interpretation der Benetzungsuntersuchungen berücksichtigt, so können daraus mit Sicherheit wertvolle Hinweise zur Lagerung und Verarbeitbarkeit von Bauelementen abgeleitet werden. Der dominierende Faktor ist die Kombination aus Anschlussmetallisierungen und Lotpastenlegierung.

Die Verarbeitbarkeit von Area Array-Bauelementen wird im wesentlichen aus der werkstofflichen Zusammensetzung der Anschlussballs (Softballs oder Hardballs) bestimmt. Insbesondere die durchgeführten Untersuchungen zur Benetzbarkeit unter verschiedenen Randbedingungen zeigen die spezifischen Vor- und Nachteile dieser Anslussttechnologie. In den folgenden Kapiteln wird nun unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse eine am Lehrstuhl aufgebaute Area Array-Prozesskette vorgestellt sowie die dort durchgeführten Prozessuntersuchungen mit BGAs bzw. CSPs umfassend diskutiert. Daraus werden Strategien und Maßnahmen für eine qualitativ hochwertige Verarbeitung unter bestgeeigneten Prozessrandbedingungen abgeleitet.

4.2 Systembeschreibung und Parametrisierung der Prozesskette

4.2.1 Präzisionsprozesskette für feinere Strukturen

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Prozessuntersuchungen zur Qualifizierung des Bauelementtypes Area Array (d.i. BGA, CSP, Flip Chip) wurde die in Bild 47 dargestellte Präzisionsprozesskette spezifiziert und parametrisiert. Sie besteht aus dem Schablonendrucker SPM der Firma MPM, dem Bestücksystem Zevatech Micron und einer Dampfphasen-Lötanlage LC 280 der Firma IBL. Bei der Auswahl der jeweils bestgeeigneten Alternative wurden diejenigen Anlagen bevorzugt, die aufgrund des Wirkprinzips (z.B. Kondensationslöten für verdeckte Anschlüsse) oder der Rüstung (z.B. CCD-Kamera für Ballinspektion) bereits für die Verarbeitung von BGAs geeignet sind, bzw. deren Eignung in Voruntersuchungen verifiziert werden konnte.

Qualitätsbestimmende Kenngrößen im Präzisionsprozess

Wiederholgenauigkeit
Positionierung PCB zu
Schablone $12,5 \mu\text{m}^*$

Positioniergenauigkeit
Bauelement auf PCB
 $\leq 15 \mu\text{m}$ bei 3σ

Temperaturverteilung
in der Peakzone
 $\Delta T \leq 5 \text{ K}$

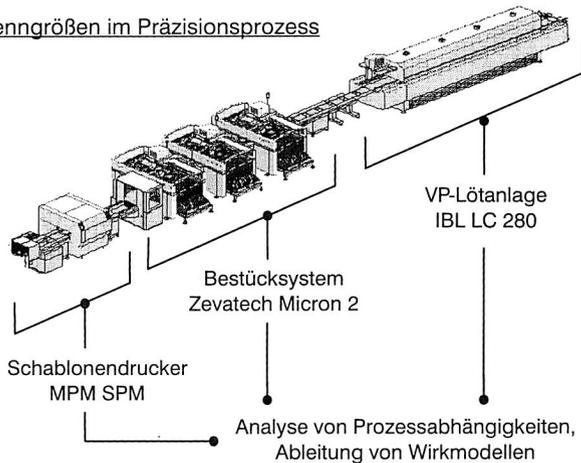


Bild 47: Am Institut verfügbare Präzisionsprozesslinie mit ausgewählten qualitätsbestimmenden Kenngrößen einzelner Teilprozesse (nach eigenen Messungen, Herstellerangaben)*

Die exemplarisch dargestellten Kenngrößen basieren ebenfalls auf den durchgeführten Prozess- und Maschinenfähigkeitsuntersuchungen, wie sie im vorherigen Kapitel 3 ausführlich dargestellt wurden. Sie dienen gleichzeitig als Grundlage für die Parametrisierung der Einzelprozesse. Dabei muss jedoch zwischen beeinflussbaren Kenngrößen (z.B. Temperaturverlauf im Reflowprozess) und nicht direkt beeinflussbaren Kenn-

größen (z.B. Platziergenauigkeit) unterschieden werden. Die Platziergenauigkeit kann durch intelligenten Einsatz von Kamerasystemen und Bildauswerteverfahren prinzipiell gesteuert werden, gleichwohl ist sie für den Bediener maschinenspezifisch auf ein Optimum vorgegeben (vgl. Kapitel 3.3.3).

4.2.2 Parameterfenster für Lotpastenauftrag und Bestückprozess

Für die exakte Durchführung des Versuchsprogramms wurde es im Vorfeld notwendig, die wesentlichen Stellgrößen und deren Umsetzung an der Anlage festzuhalten. Hierzu zählen beim Lotpastenauftrag der Lotpastentyp (Legierung, Korngrößenverteilung), die Schablone (Dicke, Durchbruchgeometrie und -herstellverfahren) sowie wesentliche Druckparameter wie Rakelgeschwindigkeit oder Rakeldruck. Die so festgelegten Kennwerte sowie die damit umgesetzten Zielgrößen sind in Bild 48 dargestellt.

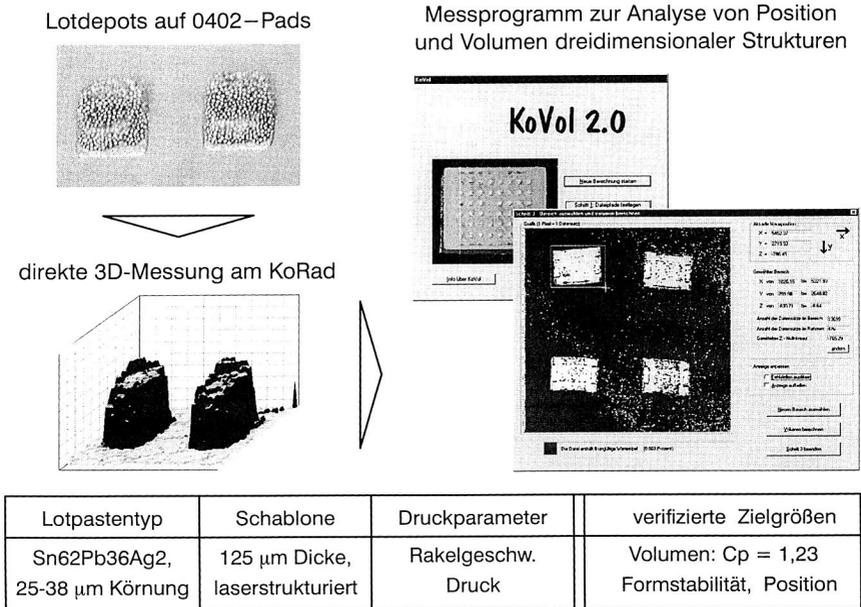


Bild 48: Parametrisierung des Lotpastenauftrags hinsichtlich Geometrie und Volumen der aufgetragenen Lotdepots

Die Messungen wurden mit einem am Lehrstuhl verfügbaren Kohärenzradar (KoRad) durchgeführt. Das Kohärenzradar ist ein tastender optischer Sensor zur 3D-Formbe-

stimmung, der mit einer breitbandigen Lichtquelle flächenhafte Objekte interferometrisch vermßt [16]. Für die quantitative Beschreibung der Lotpastendepots wurde ein rechnergestütztes Mess- und Auswerteprogramm entwickelt, das die direkte Berechnung von Volumen und Position aus den dreidimensionalen Datensätzen ermöglicht. Somit konnte erstmals eine exakte quantitative Analyse des Volumens als Zielgröße beim Pastendruck realisiert werden. Diese Ergebnisse wurden, wie die untersuchten Form- und Positionsabweichungen, den gewählten Stellparametern gegenübergestellt und daraus optimale Stellgrößen für die teilprozessübergreifenden Untersuchungen abgeleitet. Unter anderem konnte nachgewiesen werden, dass sich die Rakelrichtung direkt in der Form der Lotpastendepots reproduziert; das Höhenbild feinerer Strukturen weist ein "Sägezahnprofil" auf (Bild 49). Diese Tatsache ist im Besonderen für die Verarbeitung von Flip Chip oder CSPs interessant, da hier sehr feine Strukturen realisiert werden müssen, die nach dem Bestückprozess jedoch nur mit hohem Aufwand kontrolliert und nachgearbeitet werden können. Daher muss der geometrische Verbund Bauelement-Lotpastendepot-Leiterplatte schon vor dem Lötprozess auf qualitativ hohem Niveau gehalten werden.

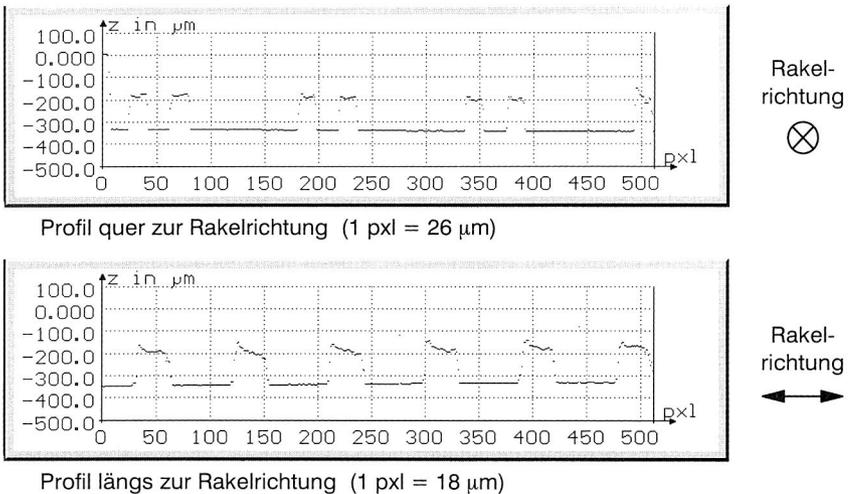
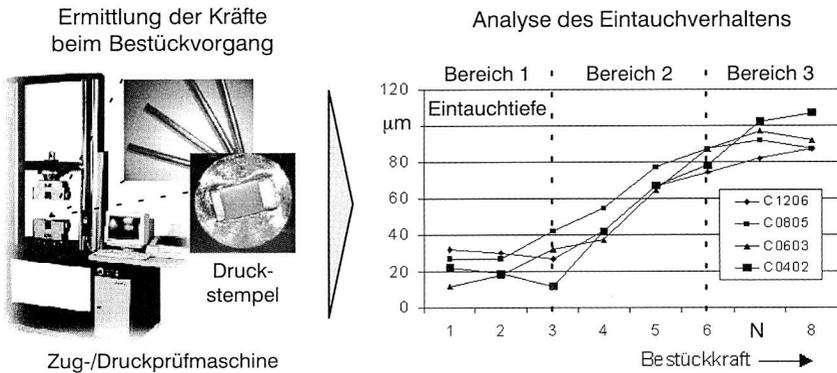


Bild 49: Höhenprofile mehrerer 0402-Lotpastendepots in Quer- und Längsrichtung, Deutlich ist das Sägezahnmuster im Längsprofil erkennbar.

Der nachfolgende Bestückprozess wurde hinsichtlich der Zielgröße Bauelementposition eingestellt. Hierbei ist zwischen der Position der Anschlussstrukturen relativ zur vorgegebenen Bestückposition (d.h. x- und y-Versatz) und der Position des Bau-

elementes in der Lotpaste (d.h. Eintauchtiefe) zu unterscheiden. Diese Unterscheidung ist für die industrielle Umsetzung von großer Bedeutung, da die Position in der Ebene maschinenseitig durch umfangreiche soft- und hardwaretechnische Maßnahmen im Bestückautomaten gesichert wird [40] [93]. Die Eintauchposition der Anschlüsse in die Lotpastendepots wird in der industriellen Praxis jedoch nicht bauelement- oder prozessspezifisch gesteuert, demzufolge wird die Bestückkraft als maßgeblicher Stellparameter meist auf einem konstanten Wert von 3-5 N gehalten. Wie im Verlauf der weiteren Untersuchungen noch gezeigt wird, ist die gezielte Abstimmung der Bestückkraft auf den Bauelementtyp jedoch von großer Bedeutung für die Qualität der Lötverbindung.

Die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Bestückkraft und Eintauchtiefe des Bauelementes in die Lotpaste wurden anhand experimenteller Untersuchungen an einer Zug/Druck-Prüfmaschine ermittelt und in Prozessfenster umgesetzt. In Bild 50 sind Vorgehensweise sowie die Ergebnisse für den Bauelementtyp Chip dargestellt. Das Bauelement wird an einem Druckstempel fixiert und senkrecht von oben in eine mit Lotpaste bedruckte Leiterplatte eingetaucht. Das Kraft-Weg-Diagramm wird mit einer 20N-Kraftmessdose aufgenommen, wobei der maximale Weg durch die aufgetragene Nassschichtdicke der Lotpaste von 125 µm begrenzt ist.



Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	verifizierte Zielgrößen
$F_b = 1 \text{ N}$ Pos. "oben"	$F_b = 5 \text{ N}$ Pos. "mitte"	$F_b = 8 \text{ N}$ Pos. "unten"	Bestückkraft Position (x, y, z)

Bild 50: Experimentelle Analyse des Eintauchverhaltens von Bauelementen in Lotpaste, Ableitung von Bestückkraftfenstern bei Zweipolern

Das Verhalten der Eintauchtiefe in Abhängigkeit der Bestückkraft ist demnach grundsätzlich unabhängig von den Größenverhältnissen, ein 0402-Bauelement (Grundfläche 1 x 0,5 mm) zeigt ähnliches Verhalten wie ein 1206 (Grundfläche 3 x 1,5 mm). Der Kurvenverlauf lässt sich in drei charakteristische Bereiche eingeteilt. Bereich 1 steht für sehr geringe Bestückkräfte, das Bauelement wurde nur auf die Lotpaste aufgelegt (Eintauchtiefe ca. 20 µm). Bereich 2 stellt die im industriellen Umfeld eingesetzten Bestückkräfte dar, das Bauelement ist gut in die Lotpaste eingetaucht (Eintauchtiefe ca. 60 µm, d.h. halbe Nassschichtdicke). Der dritte Bereich ist durch sehr hohe Bestückkräfte bis zu 10 N charakterisiert, hier wird das Bauelement vollständig in die Lotpaste eingetaucht und die Lotpaste zum Rand hin verdrängt. Aus diesen Ergebnissen wurde für die jeweiligen Bereiche eine generalisierte Bestückkraft zugeordnet und in den Versuchsreihen als Parameter umgesetzt.

Der gleiche Ansatz wurde für die Parametrisierung der Bausteine BGA und CSP verfolgt. Auch hier konnten ähnliche Wirkzusammenhänge zwischen Bestückkraft, Bestückposition und Eintauchtiefe verifiziert werden. Bild 51 veranschaulicht die Bestückfenster für den Bestückversatz in x- und y-Richtung (Abbildungen links) und die Bestückkraft (Abbildungen rechts). Der Bestückversatz wurde anteilig zum Paddurchmesser definiert, um proportional vergleichbare Werte zu erzielen und so die Ergebnisse auf vergleichbare Eingangsgrößen beziehen zu können.

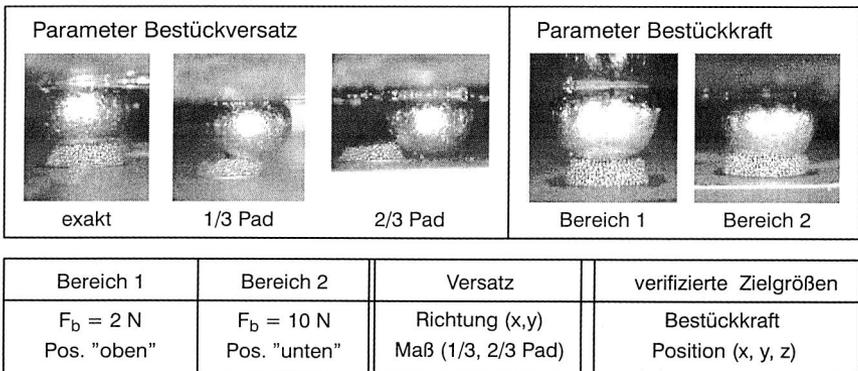


Bild 51: Parametrisierung von Bestückfenstern durch Variation von Bestückkraft und -position bei BGA und CSP

Das Verhalten in Z-Richtung aufgrund unterschiedlicher Bestückkräfte war wiederum identisch für BGA und CSP, sodass hierfür zwei einheitliche Bereiche definiert werden konnten. Eine Stufung in drei Höhenstufen erwies sich aus technologischen Gründen als nicht reproduzierbar. Zum einen treten durch das wesentlich höhere Bauteilgewicht

der Area Array-Bausteine starke Schwankungen in der Eintauchtiefe auf, zum zweiten kommt es bei zusätzlichem Bestückversatz durch die kugelige Geometrie der Anschlussballs direkt zu starken Abweichungen in der Bestückhöhe. Das Bauteil rutscht dann an den Pastendeps entlang nach unten, da im Gegensatz zu den quaderförmigen Chips kein flächiger Kontakt zwischen Anschluss und Lotpaste gegeben ist. Beide Faktoren behindern eine gesicherte Einstellung der Bestückhöhe über die Bestückkraft, sodass in den folgenden Versuchsreihen mit zwei, exakt definierbaren Einstellungen für die Bestückkraft gearbeitet wurde.

Desweiteren ist zu erkennen, dass bei sehr hohen Bestückkräften die Lotpaste seitlich am Ball herausgedrückt wird (Bild 51, Abbildung rechts außen). Diese Verdrängung ist jedoch bei Area Arrays und bei Chip-Bausteinen nicht vollständig, die maximale Eintauchtiefe liegt mit ca. 100 μm deutlich unter der Nassschichtdicke der aufgetragenen Lotpaste von 125 μm . Dies ist durch die pastöse Konsistenz der Lotlegierung zu erklären. Befinden sich unterhalb des Anschlusses nur noch einzelne Legierungskörner, die durch Flussmittel gebunden werden, kommt es über Reibungs- und Scherkräfte sowie durch gegenseitige plastische Verformungen zu Verkantungen und Verpressungen, sodass diese Körner nicht mehr zur Seite hin ausweichen können.

Abschließend wurde der Reflowlötprozess in seinen Stellgrößen festgeschrieben. Da die für den Präzisionsprozess eingesetzte Dampfphasenlötanlage bereits im Vorfeld hinsichtlich eines für Area Array optimalen Profilverlaufs ausgelegt wurde, konnte auf eine weitergehende Parametrisierung verzichtet werden. Die hierzu durchgeführten experimentellen Prozessfensterqualifizierungen sind in 3.4.3 ausführlich dargelegt.

4.3 Systematische Analyse größenabhängiger Wechselwirkungen auf die Lötstellenausbildung

Die Ausbildung einer Lötstelle ist von einer Vielzahl von prozess- und bauelementnahen Parametern abhängig, von denen im Folgenden insbesondere Letztere näher untersucht werden. Hierzu werden zuerst mehrere signifikante Anschlusskenngrößen und deren Auswirkung auf die Lötverbindung experimentell untersucht, ehe in Kapitel 4.3.2 anhand der wirksamen Bestückkraft weitere größenabhängige Wechselwirkungen analysiert werden. In Abschnitt 4.3.3 werden einige für Area Array-Komponenten spezifische Wechselwirkungen vorgestellt und im Prozessverhalten eingeordnet.

4.3.1 Größenabhängige Einflussfaktoren auf die Verbindungsqualität

Ebenso wie die prozesstechnischen Randbedingungen müssen die komponentenseitigen Anforderungen bei der Fertigung einer spezifischen elektronischen Baugruppe

definiert werden. Vor dem Hintergrund zunehmend komplexerer Systeme mit höherer Funktionalität gewinnen dabei im besonderen diejenigen Faktoren zunehmend an Bedeutung, mit denen eine elektronische Schaltung auf kleinstem Raum qualitäts- und kostenoptimal hergestellt werden kann. Somit ergibt sich für die Qualitätssicherung der zusätzliche Anspruch, diejenigen Wechselwirkungsmechanismen zu analysieren und zu beherrschen, die sich durch den steigenden Einsatz geometrisch ähnlicher, jedoch kleinerer Bausteine ergeben.

Als Beispiel sei hier der sukzessive Umstieg auf funktional gleiche, aber kleinere Chip-Bauelemente zu nennen, der derzeit im Konsumerbereich zum massiven Einsatz von Chips der Bauform 0402 führt. Der Einsatz von 0201-Komponenten in der Serienfertigung wird noch Ende 2000 erwartet [4]. Vergleichbare Entwicklungen resultieren in verschiedenen Bereichen in der zunehmenden Ablösung des Ball Grid Arrays durch die Bauform der Chip Size Packages. In beiden Fällen ist der technologische Treiber die kundenseitige Forderung nach Höherintegration bei steigender Funktionalität und gleichzeitig kleinerer Baugröße des Endproduktes. Zur Verdeutlichung sind die wesentlichen Geometrieparameter für diese beiden Gehäusetypen in der folgenden Tabelle kurz zusammengefasst. Daraus ist zu erkennen, dass sich Geometriegrößen wie die Anschlussfläche direkt auf prozessrelevante Parameter wie Pastenvolumen auswirken und dementsprechend beherrscht werden müssen.

BE-Typ	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht mg	Padfläche mm ²	Pastenvol. mm ³
1206	3,2	1,6	0,60	8,5	1,9	0,48
0805	2,0	1,2	0,55	5,0	1,1	0,26
0603	1,5	0,8	0,45	2,5	0,6	0,15
0402	1,0	0,5	0,35	0,5	0,3	0,08
BGA 169	23	23	2,35	1530	0,3	7,01
CSP 46	7,9	4,8	0,85	64	0,1	0,55

Tabelle 6: Größenproportionale Klassifizierung der betrachteten Bausteine

Um die verschiedenen zu untersuchenden Wirkmechanismen bei Area Arrays in einen wissenschaftlich einwandfreien Kontext stellen zu können, wurden alle experimentellen Untersuchungen grundsätzlich für Zweipoler und für Area Arrays durchgeführt. Da beide Anschlussstypen in den wesentlichen geometrischen und prozesstechnischen Parametern analog variiert wurden, konnten Fehlinterpretationen einzelner Ergebnisse ausgeschlossen werden. Die Aufgabe, das Prozessverhalten komplexer Bausteine wie CSP zu analysieren, ist auf Basis der Kenntnis ähnlicher Mechanismen bei einfach zu prozessierenden Bausteinen (hier Zweipoler) leichter zu bewerkstelligen. Gleichwohl

fürte auch die Analyse größenabhängiger Wechselwirkungen bei Chip-Bausteinen zu neuen, interessanten Erkenntnissen.

Die Charakterisierung der Verbindungsqualität wurde grundsätzlich mit zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfverfahren durchgeführt. Die Definition objektiver Bewertungskriterien für Lötverbindungen auf Basis optischer bzw. röntgenoptischer Verfahren ist generell schwierig, meist lassen sich nur wenige Fehlerbilder (z.B. Brückenbildung) eindeutig erkennen und zuordnen. Internationale Richtlinien wie die ANSI / IPC A 610 "Acceptability of Electronic Assemblies" liefern ebenfalls nur grobe Anhaltspunkte zur Lötstellenbewertung, für verdeckte Lötstellen existieren außer firmeninterner Anweisungen keine allgemeingültigen Richtlinien.

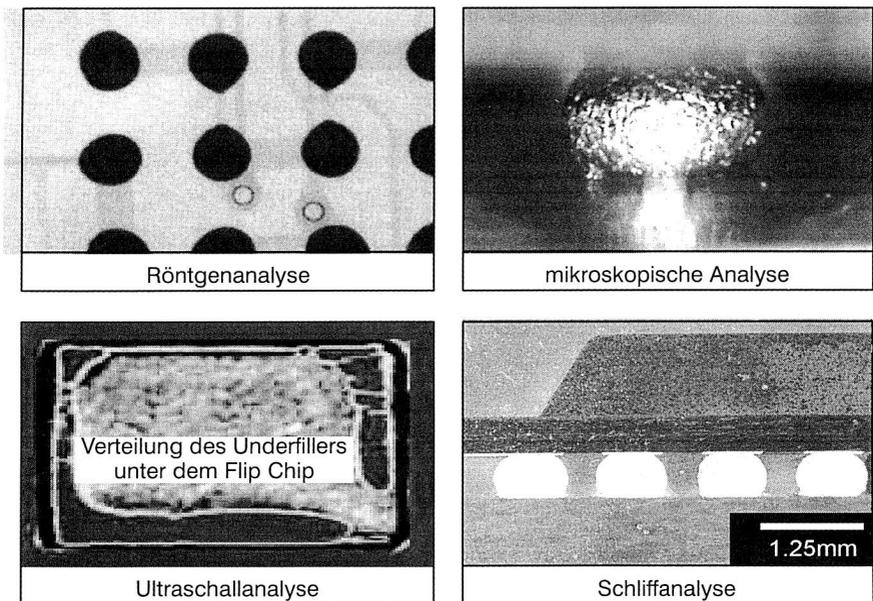


Bild 52: Beispiele zur Charakterisierung der Qualität verdeckter Lötverbindungen durch zerstörungsfreie und zerstörende Prüfverfahren

Im industriellen Umfeld werden daher zusätzlich zerstörende Tests zur Qualifizierung der Füge-technologie durchgeführt. Hier hat sich der Schertest aufgrund seiner einfachen Durchführbarkeit und der direkten, objektiven Ergebnisbewertung etabliert. Daneben sind mikroskopische Analysen und Schliffanalysen der Lötstellenausbildung

weitere gängige Verfahren. Hierbei können Benetzungsverlauf, Lotanfluss oder Meniskusbildung gemessen und beurteilt werden.

Die Bestückposition der zu fügenden Bauelemente auf der Leiterplatte stellt allgemein einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Lötstellenausbildung dar. Infolge des Selbstzentriereffektes während des Reflowprozesses kommt es durch die verschiedenen Oberflächenspannungen zwischen Bauelementanschluss, Lotpaste und Leiterplattenpad zu einem positiven Effekt, der ein Einschwimmen des Bauelementes relativ zum Pad zur Folge hat [29]. Im Rahmen von Versuchsreihen galt es nun aufzuzeigen, inwieweit sich größenrelevante Einflussfaktoren auf die Selbstzentrierung auswirken und wie dadurch das Prozessverhalten beim Einsatz miniaturisierter Komponenten beherrscht werden kann.

Hierzu wurden in einem ersten Schritt die in Tabelle 6 aufgeführten Chip-Bauelemente auf einem mit Standardlotpaste bedruckten Testlayout mit definierten Versätzen bestückt und verlötet. Die Prozessrandbedingungen wurden protokolliert und für jeweils zusammengehörige Versuchsreihen konstant gehalten. Danach wurde der Bauelementversatz nach dem Reflowlötprozess gemessen und anhand einer Qualitätszahl bewertet. Die Qualitätszahl umfasst zusätzlich zum rein geometrischen Versatz die Form und Gestalt der Lötstelle und variiert dabei von 0 (zentriertes Bauelement, einwandfreie Lötstelle) bis 2 (kein Selbstzentriereffekt wirksam, eindeutig fehlerhafte Lötstelle). Zur statistischen Absicherung der Versuchsergebnisse wurden generell ≥ 25 Bauelemente pro Parameterkombination ausgewertet.

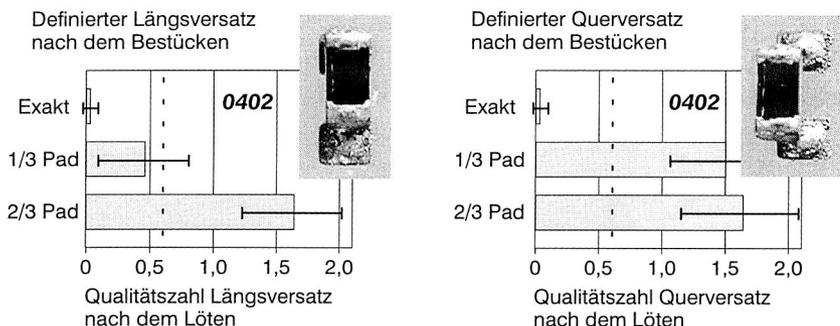


Bild 53: Gegenüberstellung der Bauelementposition nach dem Bestücken und nach dem Löten zur Analyse der Selbstzentrierung bei Chip-Bausteinen

In Bild 53 sind exemplarisch für einen Chip 0402 die resultierende Qualitätszahl für den Lötversatz in Abhängigkeit des Bestückversatzes in Längs- und Querrichtung aufgetra-

gen. Als Vorgaben für den Versatz nach dem Lötén wurde in Anlehnung an die Norm IPC A 610 ein maximaler Versatz von 25% der Padbreite festgelegt, woraus sich für die untersuchten Chip-Bauelemente ein auf die Qualitätszahl bezogener zulässiger Versatz von 0,6 ergibt. Es zeigt sich, dass der Selbstzentriereffekt auch bei sehr kleinen Anschlussgeometrien wirksam ist und das von größeren Bausteinen bekannte Verhalten bei Längs- bzw. Querversatz zeigt.

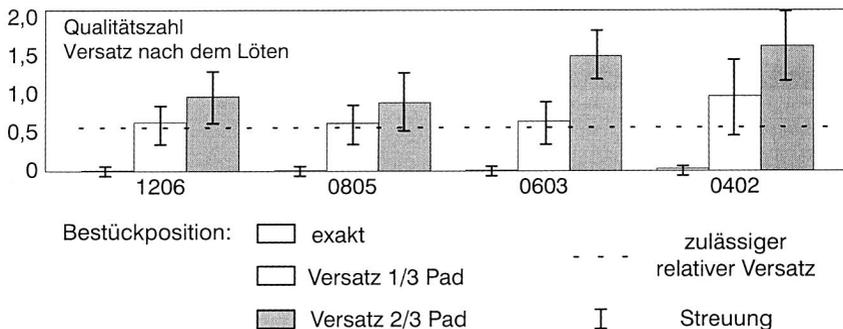


Bild 54: Selbstzentrierung bei geometrisch ähnlichen Chip-Bausteinen in Abhängigkeit der Position vor dem Lötprozess

Stellt man die verschiedenen Bausteine gegenüber (Bild 54), so ist allerdings eine deutliche Verschlechterung im Einschwimmverhalten bei miniaturisierten Gehäuseformen erkennbar. Sowohl der Versatz nach dem Lötén als auch die Streuung innerhalb einer Parameterkombination werden signifikant größer. Ein Grund liegt sicherlich in der geringeren benetzbaren Fläche bei kleineren Chips (0402: 0,3 mm² im Vergleich zu 1,9 mm² beim 1206), die zusammen mit dem wesentlich kleineren Gewicht für das starke Abfallen des Selbstzentriereffektes mit zunehmendem Bestückversatz verantwortlich ist.

Überträgt man diese Erkenntnisse auf die mechanische Festigkeit der resultierenden Lötverbindungen, so ergibt sich das in Bild 55 dargestellte Ergebnis. Hierbei sind den in den Scherversuchen ermittelten maximalen Festigkeiten zusätzlich die Mindestfestigkeiten für Chip-Bauelemente gegenübergestellt. Diese Werte beruhen auf verschiedenen firmeninternen Richtlinien und sind u.a. in [6] publiziert. Die notwendige Kraft zum Ablösen des Bauelementes ist abhängig von Größe und Geometrie der Wirkfläche; bei kleineren Bausteinen fällt die Scherkraft proportional ab. Daher wurde zusätzlich die auf die Wirkfläche bezogene mechanische Festigkeit ermittelt, wodurch die Einzelergebnisse verschiedener Gehäusegrößen miteinander vergleichbar sind. Es zeigt sich, dass die mechanische Festigkeit innerhalb eines gewissen Fensters über alle Anschlussgrößen konstant bleibt. Weitere Untersuchungen bestätigten zudem den starken Ein-

fluss der Bauelementposition nach dem Löten auf die Scherfestigkeit. Unabhängig von der Gehäusegröße war ein Abfall der Festigkeit um ca. 50% bei einem Bestückversatz von 2/3 der Padbreite nachweisbar.

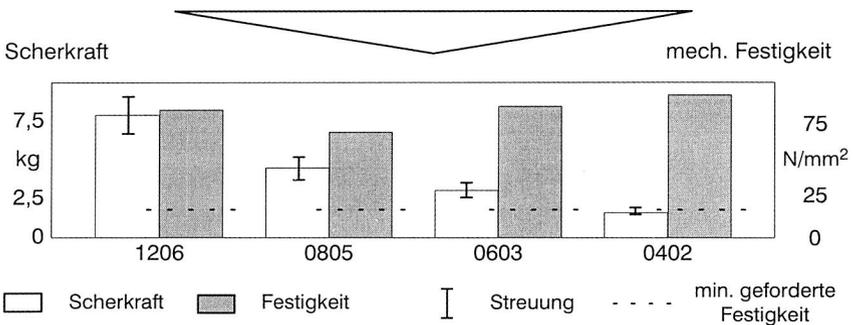
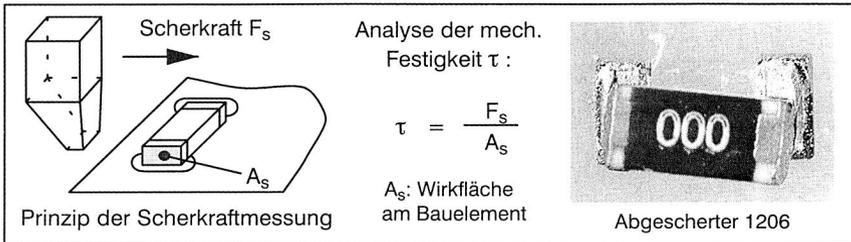
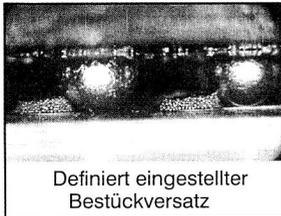


Bild 55: Ermittlung von Scherkraft und mechanischer Festigkeit in Abhängigkeit der Anschlussgröße von Zweipolern (kein Bestückversatz)

Area Array-Bausteine zeigen im Vergleich zu Chips einen ausgeprägten Zentriereffekt, was auf mehrere Ursachen zurückzuführen ist. Zum einen ist die benetzbare Fläche durch die hohe Anzahl großflächiger Anschlüsse größer, zum anderen tritt bei den hier eingesetzten eutektischen Balls ein zusätzlicher starker Effekt durch das Aufschmelzen der Balls im Reflowprozess auf. Zur Quantifizierung der Wechselwirkungen wurde ein analoges Vorgehen gewählt, bei dem Area Arrays mit definiertem Versatz bestückt und anschließend in einer Dampfphasenanlage verlötet wurden. Die resultierenden Lötversätze wurden gemessen und den jeweiligen Prozessparametern zugeordnet. Zur Messung wurde ein eigens entwickelter Algorithmus eingesetzt, mit dem die Bauelementposition direkt im Bestückter mit Hilfe eines CCD-Kamerasystems gemessen und ausgewertet werden kann.

Die in Bild 56 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen diese Wirkmechanismen. Sowohl beim untersuchten BGA 169, als auch beim wesentlich kleiner dimensionierten CSP 46,

kam es zu keinerlei kritischen Versätzen nach dem Lötprozess. Bezogen auf den Ausgangsversatz zeigten beiden Gehäusegrößen ein tendentiell ähnliches Einschwimmverhalten, wobei wiederum der wesentlich leichtere Baustein prozentual geringere Zentrierung bei größeren Streuungen aufwies.



Messbeispiel:
BGA 169, 1.5

Bestückversatz:
2/3 Pad (400µm)

Lötversatz: 63µm
(Messung: CCD-Kamera
und BV-Algorithmus)

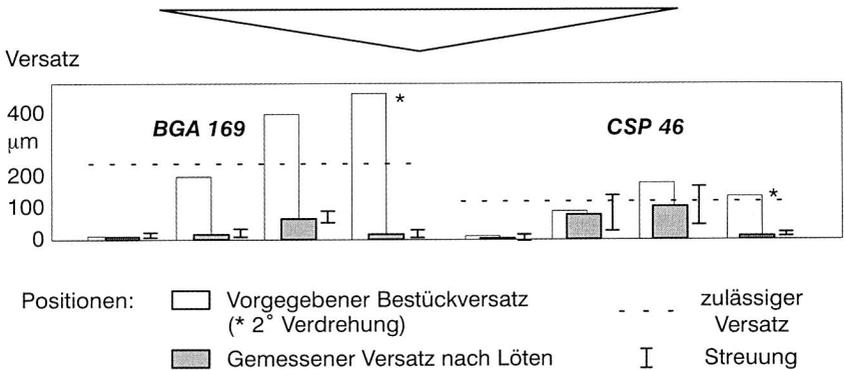


Bild 56: Selbstzentrierung bei geometrisch ähnlichen Area Array-Bausteinen in Abhängigkeit der Position vor dem Lötprozess

Weitere Analysen mit einem Röntgensystem sowie Schliifuntersuchungen bestätigten, dass erst bei starken Bestückversätzen vereinzelt sichtbare Fehlstellen innerhalb der Lötverbindungen wie Lunker oder Lotperlen auftreten (siehe auch Bild 61). Insbesondere bei Verdrehversatz von 2° zeigten sich Unregelmäßigkeiten, die im industriellen Einsatz unter Umständen zu einer reduzierten Zuverlässigkeit der Lötstelle führen können. Verdreht bestückte Bauelemente sind jedoch die Ausnahme, meist kommt es aufgrund von systematischen Fehlern im Bestücksystem zu linearen Abweichungen in einer Achse. Insgesamt lässt sich somit feststellen, dass bei der Verarbeitung von Area Arrays unabhängig von der gewählten Größe ein starker Selbstzentriereffekt wirksam ist, aufgrund dessen das Bauelement einschwimmt. Gleichwohl ist damit die Verbindungsqualität nicht gesichert.

Daher wurden in weiteren Versuchen gezielt der Verdrehversatz analysiert und unterschiedliche Abhilfemaßnahmen bewertet. Als ein Beispiel ist in Bild 57 die Verwendung eines Layouts mit vergrößerten Eckpads aufgezeigt, mit denen der Verdreheffekt unterstützt werden soll. Diese in [51] vorgeschlagene Layoutoptimierung führte zwar zur saubereren Zentrierung des Bauelementes, eine sichtbare Verbesserung der Lötstellenqualität konnte nicht nachgewiesen werden.

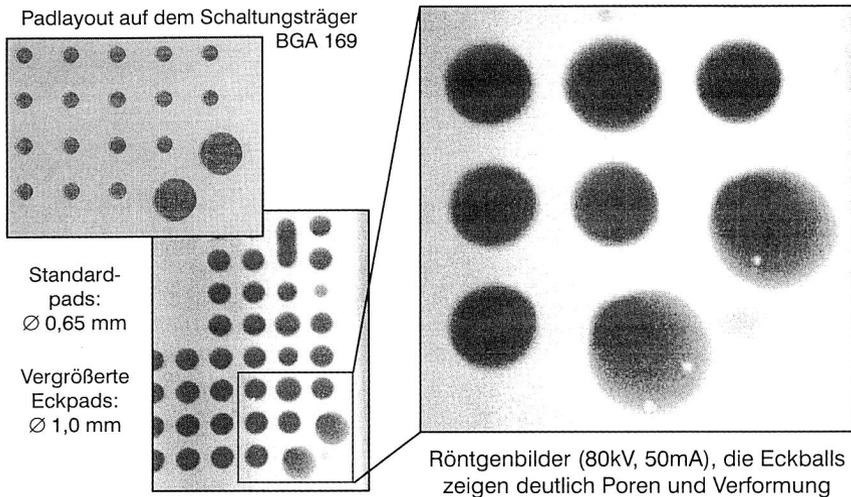


Bild 57: Röntgenoptische Analyse des Selbstzentrieres bei Verwendung eines für Verdrehversatz optimierten BGA-Layouts (Verdrehversatz 2°)

Wie in den Röntgenbildern zu erkennen ist, zeigen sowohl die vergrößerten Eckballs als auch die regulären Verbindungsstellen deutliche Fehler wie Lunker oder Verformungen. Die Lötstellen sind unterschiedlich stark ausgeformt, d.h. die Lotdepotmenge ist nicht konstant bzw. hat sich während der Rückdrehung verändert und ungleichmäßig auf die Anschlussstellen verteilt. Dies führt zu offenen Lötstellen und Brücken.

4.3.2 Einfluss der Bestückkraft auf das Lötverhalten

Während die Optimierung der Bestückposition maschinenseitig durch den Einsatz von Visionsystemen oder durch die Nutzung spezieller hochpräziser Lager und Führungen stark vorangetrieben wird, wird der Bestückhöhe generell eine wesentlich geringere Bedeutung in Wissenschaft und industrieller Umsetzung beigemessen. Meist wird das gesamte Bauelementspektrum mit einer maschinenseitig vorgegebenen Bestückkraft

in die jeweiligen Lotpastenvolumina platziert, woraus sich je nach Anschlussform und -größe eine im Allgemeinen nicht bekannte oder spezifizierte Eintauchtiefe ergibt.

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 ausgeführt, konnte zwischen der an der Pipette wirksamen Bestückkraft und der resultierenden Eintauchtiefe ein systematischer, bauelement-spezifischer Zusammenhang nachgewiesen werden. Diese Versuchsergebnisse dienten als Grundlage für die im Folgenden näher ausgeführten Wechselwirkungseffekte zwischen der Stellgröße Bestückkraft und der Zielgröße Lötstellenausbildung.

Der Einfluss der Bestückkraft wird anhand der bereits vorgestellten Kriterien Bauelementposition nach dem Lötprozess und mechanische Festigkeit der Lötstellen analysiert. Damit sind sowohl Aussagen zu den physikalischen Mechanismen während der Reflowlötung wie auch Erkenntnisse zur Fügequalität je nach Anschlussgeometrie und -größe ableitbar. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die jeweiligen Versuchsergebnisse für Chip-Bauelemente und für Area Arrays getrennt aufgeführt.

Ausgehend von den Voruntersuchungen wurde die Bestückkraft maschinenseitig in zwei bzw. drei Stufen zwischen 1 N und 8 N variiert (in der Großserienfertigung sind Kräfte zwischen 2,5 N und 5 N üblich). Diese Kraft wird im Bestücksystem durch den wirksamen Gegendruck, den die Leiterplatte über das Bauelement auf die Pipette ausübt, technisch umgesetzt. Setzt man diese Kräfte in Relation zur erzielten Bauelementposition nach dem Lötprozess, so ergibt sich das in Bild 58 dargestellte Ergebnis. Wie bereits diskutiert, nimmt der Selbstzentriereffekt mit zunehmend kleineren Anschlüssen ab, unabhängig vom gewählten Ausgangsversatz.

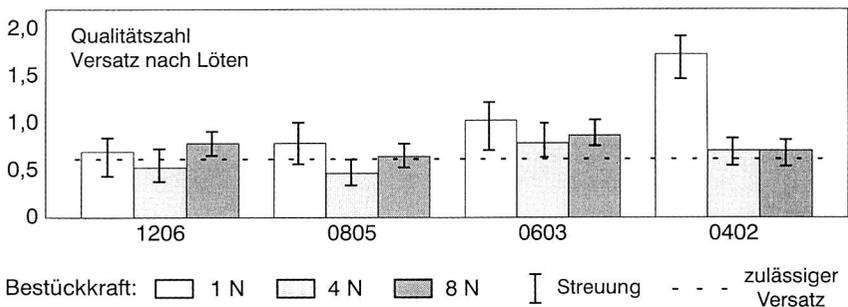


Bild 58: Bauelementposition von Zweipolern nach dem Lötprozess in Abhängigkeit der Parameter Bestückkraft und Anschlussgröße (Bestückversatz 1/3 Pad)

Bemerkenswert ist nun, dass diese generelle Aussage bei kleineren Bauelementen zunehmend an Bedeutung verliert. Je kleiner die für den Selbstzentriereffekt wirksame An-

schlussfläche ist, desto wichtiger ist eine hohe Bestückkraft. Bei 1206 und 0805 ergibt sich kein signifikanter Einfluss der gewählten Bestückkraft auf den Versatz nach dem Löten, die mittlere Kraft liefert die beste Qualitätszahl. Dagegen zeigt sich insbesondere beim Chip 0402 ein sehr starker Zentriereffekt bei hohen Bestückkräften bis zu 8 N. Dieser Effekt lässt sich unter Umständen dadurch erklären, dass die Benetzung bei sehr kleinen Anschlüssen und Pastenvolumina erst durch den bewussten mechanischen Kontakt zwischen den Fügestellen unterstützt wird. Allen Anschlussgrößen gemeinsam ist die Verringerung der Streuung bei höheren Bestückkräften, was als weiteres Zeichen für eine Prozessstabilisierung interpretiert werden kann.

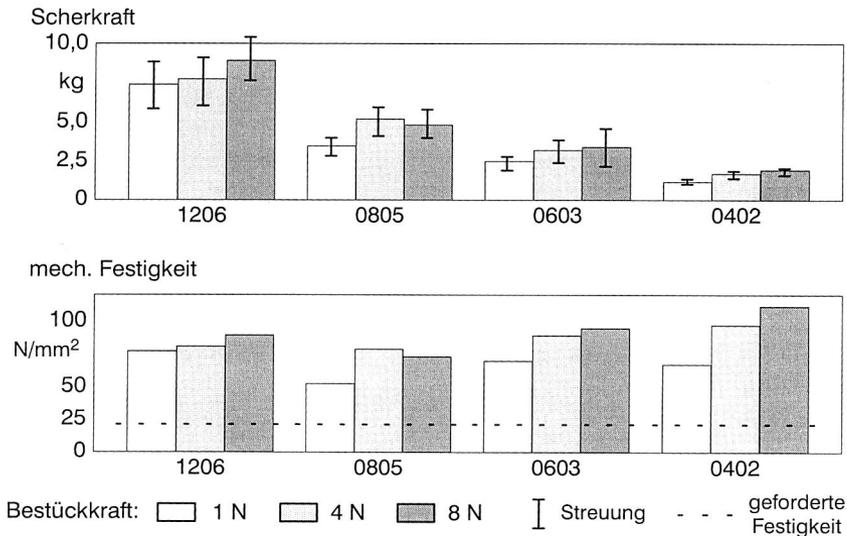


Bild 59: Ermittlung von Scherkraft und mechanischer Festigkeit in Abhängigkeit von Bestückkraft und Anschlussgröße von Zweipolern (kein Bestückversatz)

Zur weiteren Vertiefung dieser Wechselwirkungen wurden Scherversuche mit obigen Parameterkombinationen durchgeführt (Bild 59). Die Ergebnisse bestätigten die Vermutungen, dass das unterschiedlich tiefe Eintauchen der Anschlüsse in die Pastendepots für Geometrie und Festigkeit der Lotstelle verantwortlich ist. Betrachtet man wiederum die verschiedenen Bestückkräfte bei den einzelnen Bausteinen, so zeigt sich ein deutlicher Trend in Richtung höherer Bestückkräfte. Unabhängig von der gewählten Strukturgröße steigt die mechanische Festigkeit der Lötstelle mit zunehmender Bestückkraft an.

Die Strukturgröße der Anschlüsse wirkt sich jedoch auch hier wieder als zweiter signifikanter Einflussfaktor auf die Lötstelle aus. Betrachtet man die Einzelwerte genauer, so stellt man fest, dass der Anstieg der Bestückkraft von 1N auf 8N beim Baustein 1206 eine Erhöhung der Festigkeit von ca 21% bewirkt, beim Baustein 0402 jedoch 56%. Somit ist auch hier die Erhöhung der Bestückkraft mit zunehmend feineren Strukturen von größerer Bedeutung.

BGAs oder CSPs besitzen in der Regel wesentlich mehr Anschlüsse als passive Bausteine. Dies führt zu höheren Benetzungskräften pro Baustein im Lötprozess und damit zu dem bekannten starken Zentriereffekt. Berücksichtigt man diese Überlegungen bei der Betrachtung der Bestückkraft, so sollte sich eine starke Wechselwirkung zwischen Bestückkraft, Anschlussgröße bzw. -anzahl und Versatz nach dem Löten ergeben.

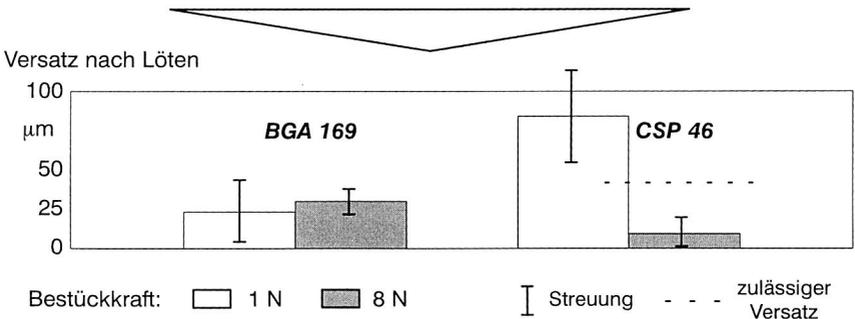
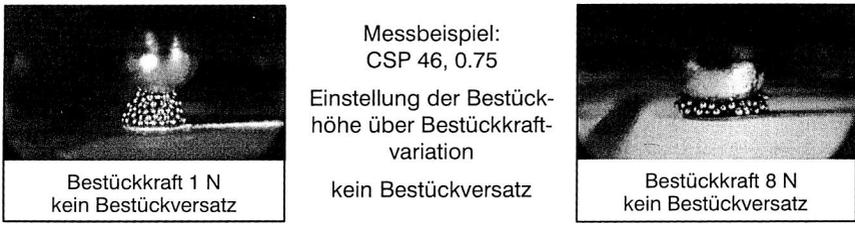


Bild 60: Analyse des Selbstzentriereffektes bei Area Array-Bausteinen und Korrelation mit der Bestückkraft (kein Bestückversatz)

Für die hierzu durchgeführten Versuchsreihen wurden Bestückkraft und Bestückposition variiert und die Lötstellen anhand der beiden geometrisch ähnlichen, jedoch in Anschlusszahl und -größe unterschiedlichen Bausteine BGA 169 und CSP 46 untersucht. Die im Lötprozess gesamte wirksame Fläche ist beim BGA ca. 14x größer als beim CSP

(vergleiche auch Tabelle 6). Das Diagramm in Bild 60 bestätigt die Vermutungen, es ist ein deutlicher Unterschied im Verhalten von BGA und CSP bei unterschiedlichen Bestückkräften zu erkennen. Während der große Baustein sich in seinem Lötverhalten im Wesentlichen unabhängig von der gewählten Bestückkraft zeigt, reagiert das kleiner und leichter dimensionierte CSP auf hohe Bestückkräfte sehr positiv. Hier trifft wieder die bereits bei 0402-Bausteinen aufgestellte These zu, dass die sehr kleinen Anschlussstrukturen vor dem Aufschmelzprozess direkt mit der Lotpaste kontaktiert werden müssen, damit es zu einem zuverlässigen Einschwimmen kommt. Beiden Typen gleich ist jedoch wieder der positive Einfluss einer hohen Bestückkraft auf die Streuung und damit auf die Stabilität innerhalb der Versuchsreihen.

Daraus lässt sich auch für Area Arrays die Feststellung ableiten, dass höhere Bestückkräfte über die Wirkmechanismen im Reflowlötprozess zu positiven Effekten führen. Zur Verdeutlichung wurden mit einer am Institut verfügbaren Röntgenzelle verschiedene Röntgenaufnahmen von ausgewählten Bauelementen erstellt, um zusätzlich die innere Struktur der Lötstellen analysieren zu können.

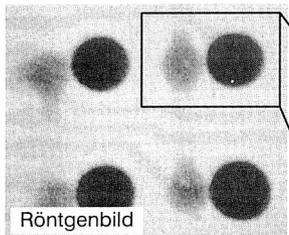
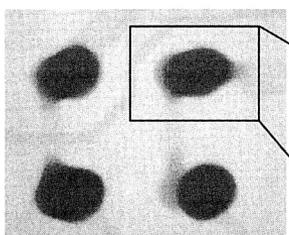
 <p>Röntgenbild</p> <p>Offene Lötstelle im Ersascope-Bild</p>  <p>Versatz 60% Pad, Bestückkraft 1N</p>	<p><u>Qualitätskriterium:</u> BE-Position nach Lötprozess</p> <p><u>Fehlerbild:</u> Versatz (→ Brücken, Opens)</p> <p><u>Signifikante Parameter:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Bestückkraft ↑↑ - Bestückposition ↑↑ - BE-Gewicht ↑
 <p>Verschmierte Lotstelle, Lotperlen</p>  <p>Verdrehung 2°, Sn60Pb40-Balls</p>	<p><u>Qualitätskriterium:</u> Lötstellenausbildung</p> <p><u>Fehlerbild:</u> Form, Oberfläche, Lotperlen</p> <p><u>Signifikante Parameter:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Bestückkraft ↑↑ - Bestückposition ↑ - Anschlussstyp ↑↑

Bild 61: Ausgewählte Fehlstellen in CSP-Lötverbindungen und Charakterisierung der dazugehörigen Geometrie- und Prozesskenngrößen

Wie in Bild 61 exemplarisch anhand der beiden Qualitätsmerkmale Versatz und Lötstellenausbildung dargestellt, lassen sich direkte Korrelationen zwischen den gewählten geometrischen und den Prozessrandbedingungen ableiten. Beide Wirkbereiche führen in Kombination zu einer spezifischen Fugestellenqualität, die sich im äußeren Erscheinungsbild und in der inneren Struktur der Fugestelle nachvollziehen lässt. Als ein Beispiel sei hier die Lötstellenausbildung bei hohen Bestückkräften und Verdrehversatz ausgeführt. Wie bereits in Bild 56 gezeigt, kann es trotz hoher Verdrehungen nach dem Bestücken zu starker Selbstzentrierung und optisch hochwertigen Lötstellen kommen. Erst im Röntgenbild sind innere Verbindungsfehler wie Lotbrücken oder starke Verformungen einzelner Balls erkennbar, da hier im Vergleich zur rein optischen Analyse (Ersascope) alle Anschlüsse beurteilt werden können. Will man auf zerstörende Prüfverfahren wie Schliffbildanalysen verzichten, so ist für eine optische Prüfung die genaue Kenntnis der beteiligten Parameter notwendig. Zu diesen Parametern gehören nicht nur die Prozessstellgrößen wie Lotpastentyp oder Ofenprofil, sondern auch größenwirksame Faktoren wie Bestückkraft, Anschlussgeometrie oder Strukturdimension.

4.3.3 Weitere, für Area Array-Komponenten signifikante Beobachtungen im Prozessverhalten

Wie gezeigt werden konnte, führt die Verwendung eutektischer Balls (sog. Softballs) zu Vorteilen im Lötverhalten; es kommt durch das große Lotangebot im schmelzflüssigen Zustand zu starkem Einschwimmen und großvolumigen Fugestellen. Bei Bausteinen mit hochschmelzenden Anschlüssen (z.B. Pb95Sn5, sog. Hardballs) wird sich eine strukturell anders aufgebaute Fugestelle bilden, bei der typischerweise der Anschlussball von unten vom Lot umflossen und so die Kontaktierung hergestellt wird. Zur Verdeutlichung sind beide Technologien in Bild 62 gegenübergestellt.

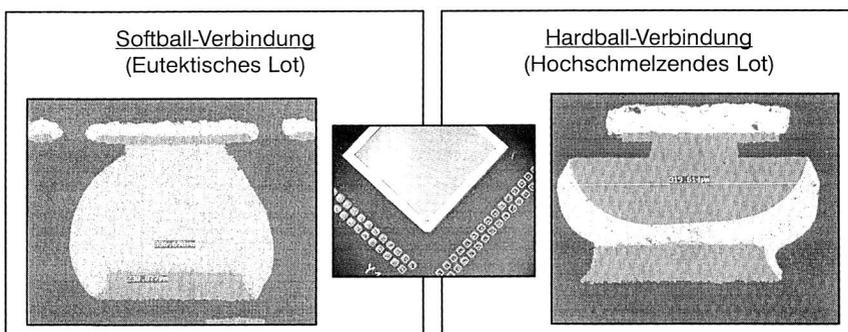


Bild 62: CSP-Lötverbindung in Softball- und in Hardballtechnologie, visualisiert im metallographischen Schliiff (Balldurchmesser ca. 300 bzw. 350 μm)

Ungeachtet der Anschlusstechnologie stehen dem Anwender heutzutage beide Technologien für seine Bausteine gleichwertig zur Verfügung. Er wird sich aus seinem aktuellen Prozessumfeld heraus für eine Variante entscheiden. Diese Entscheidung wird jedoch maßgeblich vom unterschiedlichen Fehlerverhalten der beiden Varianten beeinflusst. Hardball-Verbindungen zeigen sich unter starken thermischen oder Wechselbelastungen robuster und werden daher vorwiegend im Hochtemperaturbereich eingesetzt. Softballs sind dagegen einfacher zu verarbeiten, meist kostengünstiger und prozesstoleranter und werden daher im Regelfall bevorzugt.

Von großer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch das stark unterschiedliche Fehlerverhalten und Fehlerbild der beiden Anschlusstypen. Am Beispiel der Poren- bzw. Hohlraumbildung wird deutlich, dass bei der Fehleranalyse in besonderem Maße die Anschlusstechnologie berücksichtigt werden muss. Bei Poren handelt es sich um Gasblasen, die im Lötprozess im schmelzflüssigen Zustand entstehen und als Hohlraum nach Erstarrung der Lötstelle zurückbleiben.

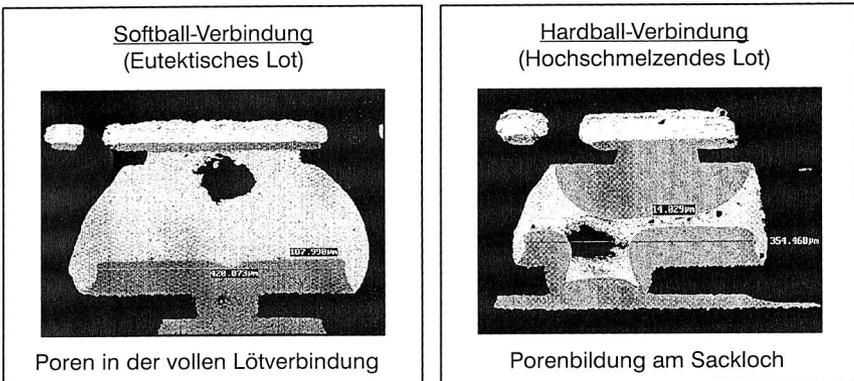


Bild 63: Der für Area Arrays typische Kontaktierungsfehler Porenbildung und seine unterschiedlichen Ausprägungsformen bei Softballs und bei Hardballs

Bei eutektischen Balls kann es zur Porenbildung in der gesamten Lötstelle zwischen Substrat und Baustein kommen (Bild 63 links). Als Ursachen sind hier nicht angepasste Temperaturprofile sowie ungeeignete Pasten und Leiterplattenoberflächen anzuführen [29]. Bei hochschmelzenden Balls ist das Lotpastenangebot wesentlich geringer, es wird meist zu einer Ausbildung der Lötstelle ohne Poren oder Lotperlen kommen. Bilden sich dennoch Poren, so gilt es die Randbedingungen zu analysieren. In dem in Bild 63 rechts dargestellten Fall traten immer dann gehäuft Poren auf, wenn sich die Lötverbindung in unmittelbarer Nähe einer Sacklochbohrung befand. Bei den hier untersuchten

CSPs auf einer 6-Lagenleiterplatte konnte dieses Problem durch ein partielles Redesign der Leiterplatte gelöst werden.

Hierbei zeigte sich auch, dass eine alleinige Fehlererkennung auf Basis von Röntgenverfahren nicht immer zum gewünschten Ergebnis führt. Speziell Benetzungsfehler oder Poren können in einem einfachen zweidimensionalen Röntgenbild nur unzureichend erkannt und ausgewertet werden. Zur gezielten Fehlerdetektion und -analyse sind daher zusätzlich zu metallographischen Schliffen optische Verfahren notwendig, mit denen die Lötstelle aus verschiedenen Ebenen betrachtet werden kann.

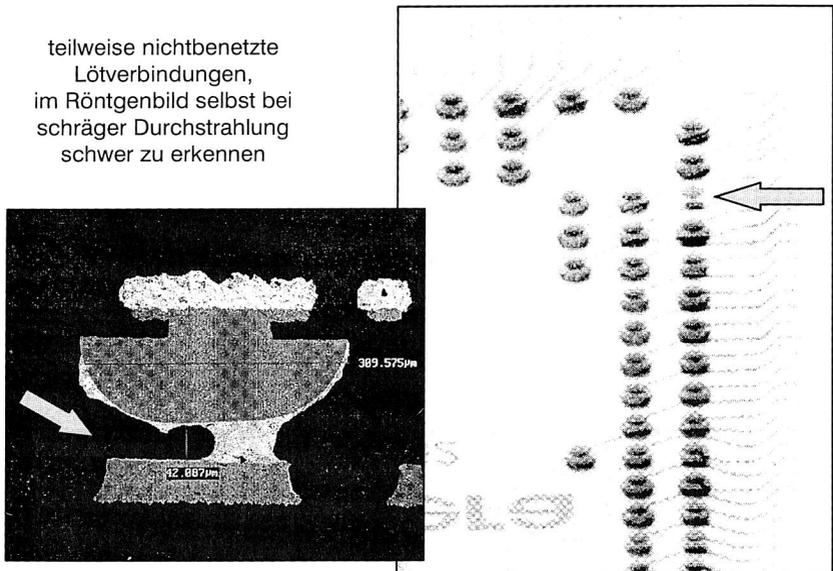


Bild 64: Mangelhafte Benetzung / zu wenig Lot als Beispiel für im Röntgenbild nicht direkt detektierbare Verbindungsfehler bei verdeckten Lötstellen

Eine Möglichkeit bietet hier die 3D-Röntgenanalyse auf Basis von planarer Computertomographie, wie sie seit einigen Jahren mit Erfolg eingesetzt wird [2]. Das hierzu am Fraunhofer Entwicklungszentrum Röntgentechnik in Erlangen entwickelte Verfahren erlaubt sowohl die senkrechte Durchstrahlung für einfach 2D-Prüfungen wie auch Schrägprojektion und 3D-Prüfung. Zur 3D-Durchstrahlung wird das Bild der Fügestelle schichtweise im System erfasst und mathematisch rekonstruiert. Der Benutzer kann mit Hilfe dieser Rekonstruktion beliebige Betrachtungsebenen definieren und das Röntgenbild auswerten.

4.4 Ableitung geometrie- und prozessbezogener Wirkmodelle

4.4.1 Geometriemodell zur Lötstellenausbildung bei Area Array-Anschlüssen

Aus diesen sowie weiteren Versuchen wurde ein Geometriemodell zur Lötstellenausbildung bei Area Array-Anschlüssen abgeleitet, das in Bild 65 dargestellt ist. Es verknüpft Bauelementkenngrößen (Strukturmaß, Anschlusstechnologie) und Bestückparameter (Bestückposition, Bestückkraft) mit der resultierenden Lötstelle. Die Bewertung der Lötstelle orientiert sich dabei an den Faktoren Form und Geometrie der Fugestelle sowie der Bauelementposition nach dem Lötprozess.

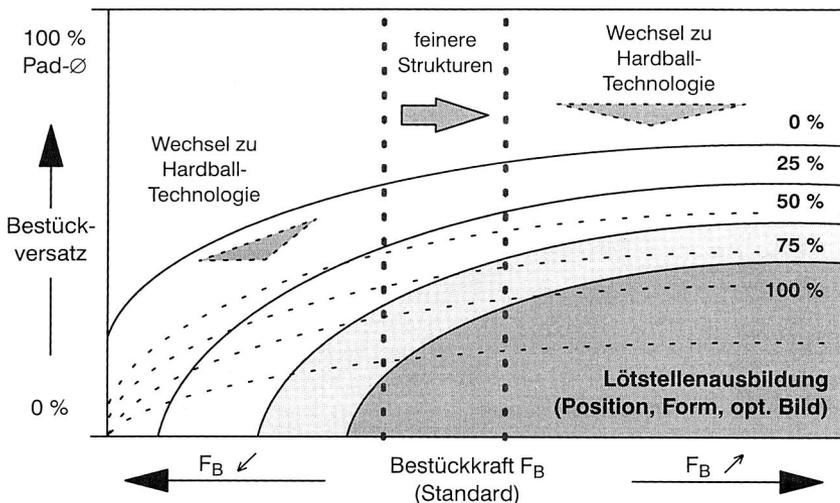


Bild 65: Schematischer Zusammenhang zwischen Geometrie- und Prozesskenngrößen und deren Auswirkung auf die Lötstellenausbildung

Form und Position der Lötverbindung sind von der eingestellten Bestückkraft sowie von der im Bestücker realisierten Bauelementposition auf dem Board abhängig. Mit steigender Bestückkraft kommt es zu einem ausgeprägten Selbstzentriereffekt und damit zu Lötverbindungen auf qualitativ höherem Niveau. Die jeweilige Bestückkraft bewirkt dabei eine definierte Eintauchtiefe der Anschlüsse in die Lotpaste. Diese Eintauchtiefe ist zugleich signifikanter Parameter für die Ausbildung der Lötverbindung.

Kleinere Bestückkräfte wirken sich erst bei zunehmend steigendem Versatz in schlechten Lötstellen aus. Der Bestückversatz ist hierbei jedoch der dominierende Parameter.

Ab einem Grenzversatz von ca. 50-60 % des Paddurchmessers kommt es zu reproduzierbaren Verbindungsfehlern bei Area Arrays. Dieses Grenzkriterium ist grundsätzlich unabhängig von der Strukturgröße und der Bestückkraft.

Der gesamte Kurvenverlauf verschiebt sich bei feineren Strukturen in Richtung höherer Bestückkräfte. Somit ist die Bestückkraft, unabhängig von der Anschlussstechnologie, bei CSP dominierender als bei BGAs. Kleinere Rastermaße sind mit höheren Bestückkräften prozessstabil zu verarbeiten.

Findet ein Technologiewechsel von den gebräuchlichen eutektischen Anschlüssen auf hochschmelzende Balls statt, werden die in Bild 65 aufgetragenen Bereiche optimaler bzw. guter Lötstellenausbildung signifikant kleiner (gestrichelte Bereichsgrenzen). Dies ist im Wesentlichen auf die größere Trägheit im Lötverhalten von Hardballs zurückzuführen, die zu geringerem Einschwimmen führt. Dieses Verhalten muss durch exakte Prozessführung (z.B. Bestückgenauigkeit, Temperaturprofil) kompensiert werden.

4.4.2 Schädigungsmodell zur Analyse verdeckter Lötstellen

Den soeben beschriebenen Wirkmechanismen bei der Lötstellenausbildung können in den Grenzbereichen spezifische Fehlerbilder zugeordnet werden. Diese Prozessfehler sowie die relevanten Einflussgrößen sind in Bild 66 schematisch aufgetragen.

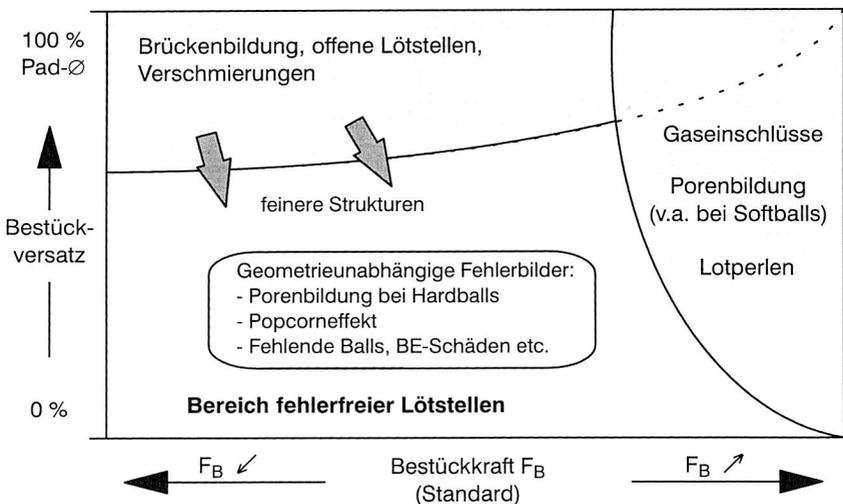


Bild 66: Schematische Einordnung wesentlicher Prozessfehler und Fehlerbilder bei Area Arrays in Abhängigkeit ausgewählter Geometrie- und Bestückkräfte

Generell ist bei der Zuordnung von Fehlern zu Prozessstellgrößen zwischen prozess- und komponentenseitigen Fehlern zu unterscheiden. Zur ersten Gruppe zählen die klassischen Lötfehler wie Brückenbildung, offene Lötstellen oder Lotperlen und die für Area Arrays oftmals typischen Erscheinungen wie Porenbildung oder fehlende Anschlussballs.

Poren oder Lotperlen sind ein Zeichen von unruhigem Aufschmelzverhalten und ungleichmäßiger Lötstellenausbildung. Unterstützt wird dieser Schädigungsmechanismus durch hohe Bestückkraft und hohen Bestückversatz. Beides bewirkt, dass die wirksamen Benetzungskräfte und Oberflächenspannungen behindert bzw. abgeleitet werden. Treibender Faktor ist hierbei eindeutig die Bestückkraft, bei zu hohen Kräften wird die Lotpaste vom Pad weggedrückt, was z.B. zu Lotperlen führen kann.

Fehlerbilder wie offene Lötstellen oder eine Lotbrücke zwischen zwei Anschlüssen sind im Regelfall auf starken Bestückversatz zurückzuführen. Geometrische Parameter der Fügepartner und die Bestückkraftvariation haben hier nur untergeordnete Bedeutung. Tendentiell nimmt der Hang zur Brückenbildung mit feineren Strukturen jedoch zu, da diese aufgrund geringerer Masse und benetzbarer Fläche schlechtere Selbstzentrierung aufweisen.

Zu den klassischen komponentenseitigen Fehlern zählen Bauelementschäden wie fehlende Balls oder innere Risse aufgrund alterungsbedingter Schäden. Diese sind jedoch in der Regel von einzelnen Prozess- oder Geometrieparametern unabhängig und müssen durch geeignete prozessintegrierte Inspektionssysteme erfasst werden. Andere Fehler wie Porenbildung bei hochschmelzenden Balls oder magere Lötstellen können ebenso layoutbedingte Ursachen haben.

4.5 Zusammenfassende Bewertung des Prozessverhaltens

Im Laufe der Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit von Area Array-Bauelementen konnte nachgewiesen werden, dass sich Bausteine mit verdeckten Anschlüssen auf hohem Niveau in eine SMD-Prozesskette integrieren lassen. Die wesentlichen Kenngrößen sind beherrschbar und können innerhalb ihrer Prozessfenster reproduzierbar eingestellt werden. Damit ist auch der Einsatz von Area Arrays mit Rastermaßen unter 0,65 mm für eine Klein- und Mittelserienfertigung möglich. Der Anwender muss sich nicht mehr mit der sehr problematischen Verarbeitung von QFP-Bausteinen im Rastermaß 0,4 mm und kleiner beschäftigen, der Innovationsschub in Richtung BGA bzw. µBGA löst das Dilemma der Verarbeitung hochpoliger Bausteine auf engster Fläche.

Das hohe erzielbare Qualitätsniveau ist geprägt vom robusten Prozessverhalten von BGAs oder CSPs. Wie in verschiedenen Versuchsreihen aufgezeigt werden konnte,

tragen spezifische Wirkmechanismen wie beispielsweise die Selbstzentrierung oder komponentenspezifische Bestückkräfte erheblich zur stabilen Ausbildung der Lötstelle bei. Durch die Analyse der Wechselwirkungen zwischen Bauelementposition, Eintauchtiefe und Anschlussgeometrie konnte aufgezeigt werden, dass vor allem bauelementbezogene Faktoren einen starken Einfluss auf die entstehende Lötverbindung haben. Dazu zählen Größe und Gewicht des Bausteins ebenso wie das Benetzungsverhalten unterschiedlicher Anschlusstypen und -metallisierungen.

Weitere signifikante Vorteile ergeben sich aus der gleichbleibend hohen Verarbeitungsstabilität beim Übergang zu feineren Strukturen. So konnte am Beispiel des Wandels von BGA zu μ BGA deutlich gemacht werden, dass beide Bausteine im Prozess ähnliches Verhalten aufzeigen. Damit ermöglicht eine geeignete Parametrisierung der Prozesskette die Verarbeitung des gesamten Spektrums an Area Array-Bausteinen. Dies führt zu höherer Fertigungsflexibilität in agilen Fertigungsumgebungen und damit zu niedrigeren Kosten.

Die optische Prüfung verdeckter Lötstellen kann durch den Einsatz von Röntgensystemen oder anderen speziell ausgelegten Inspektionssystemen realisiert werden. Wichtig ist hierbei der parallele Einsatz verschiedener Systeme, um den detektierten Fehler bewerten und einer oder mehrere Stellgrößen zuordnen zu können. Gerade bei komplexen Fehlerbildern sind zusätzlich zerstörende Prüfverfahren wie z.B. Schliffbildanalysen notwendig. Gleichwohl sind die auftretenden Fehler und ihre Entstehungsmechanismen bekannt und können durch geeignete Prozessparametrisierung auf ein Minimum reduziert werden.

5 Prozessoptimierung durch den Einsatz rechnergestützter Informations- und Analysesysteme

Wie in den beiden vorherigen Kapiteln ausführlich diskutiert wurde, stellen eine grundsätzliche Prozessbeherrschung sowie die technologiespezifische Kenntnis der Verarbeitbarkeit neuer Komponenten zwei wesentliche Eckpfeiler für eine qualitativ anspruchsvolle Fertigung hochwertiger Baugruppen dar. Hinzu tritt als dritter und bedeutender Aspekt die ständige Transparenz der Fertigungsdaten, die für Prozesssteuerung und -regelung benötigt werden. Die Sammlung und anforderungsspezifische Aufbereitung qualitätsrelevanter Daten wird im allgemeinen von Qualitätsmanagementsystemen übernommen.

Eigene Studien belegen jedoch, dass derartige Informationssysteme oftmals Defizite bei der Datenerfassung und bei der späteren Analyse der Prozesswechselwirkungen aufweisen, die den prozessintegrierten Einsatz innerhalb einer hochflexiblen Fertigung stark behindern. Daher wurde am Institut im Rahmen von Forschungsarbeiten ein eigenes Konzept für ein prozessbegleitendes Informationssystem entwickelt und im Softwarepaket "Q-Vision" realisiert [31]. Die Datenführung erfolgt hierbei über sogenannte begleitende Fertigungsprotokolle.

5.1 Technologieorientierter Ausbau des Informationssystems

Das Kernsystem von Q-Vision, wie es in [31] ausführlich beschrieben ist, umfasst die technologischen Prozessschritte Dispensen, Bestücken und IR-Reflowlöten. Im begleitenden Fertigungsprotokoll werden die Daten zu einer spezifischen Baugruppe parallel zu deren Bewegung im Fertigungssystem durch den Rechnerverbund geführt und an den einzelnen Stationen entsprechend ausgewertet, bzw. erweitert (Bild 67).

Durch den modularen Aufbau von Q-Vision ist es möglich, technologische Ergänzungen in der betrachteten Prozessfolge oder Erweiterungen im Fertigungsprotokoll problemlos durchzuführen. Gleichwohl war das Grundsystem auf eine Standard-SMD-Prozesskette ausgelegt und musste vor dem Hintergrund der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten neuen Aufbau- und Verbindungstechnologien um zwei wesentliche Module erweitert werden. Das erste Modul umfasst die Definition und Implementierung neuer Prozess- und Prüfstationen, die für die Verarbeitung von COB-Komponenten notwendig sind. Da dies in der Regel zu einer eigenständigen, von der SMT-Prozesskette weitgehend unabhängigen Montagefolge mit spezifischen Umgebungsanforderungen führt, wurden an dieser Stelle umfangreiche Erweiterungen durchgeführt. Damit verbunden war eine weitgehende Restrukturierung verschiedener Bibliotheken, um insbesondere die neuen am Institut verfügbaren Stationen (z.B. Siplace F4, S23) und Bildverarbeitungssysteme optimal anbinden zu können.

Im weiteren wurde die Prozessfolge "Inspektion und Nacharbeit" realisiert und in Q-Vision integriert. Hierbei galt es, die durchlauforientierte Struktur des Systems so zu modifizieren, dass Nacharbeitsschleifen und damit das (wiederholte) Rückführen bereits bearbeiteter Fertigungsprotokolle zulässig sind. Beide Applikationen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

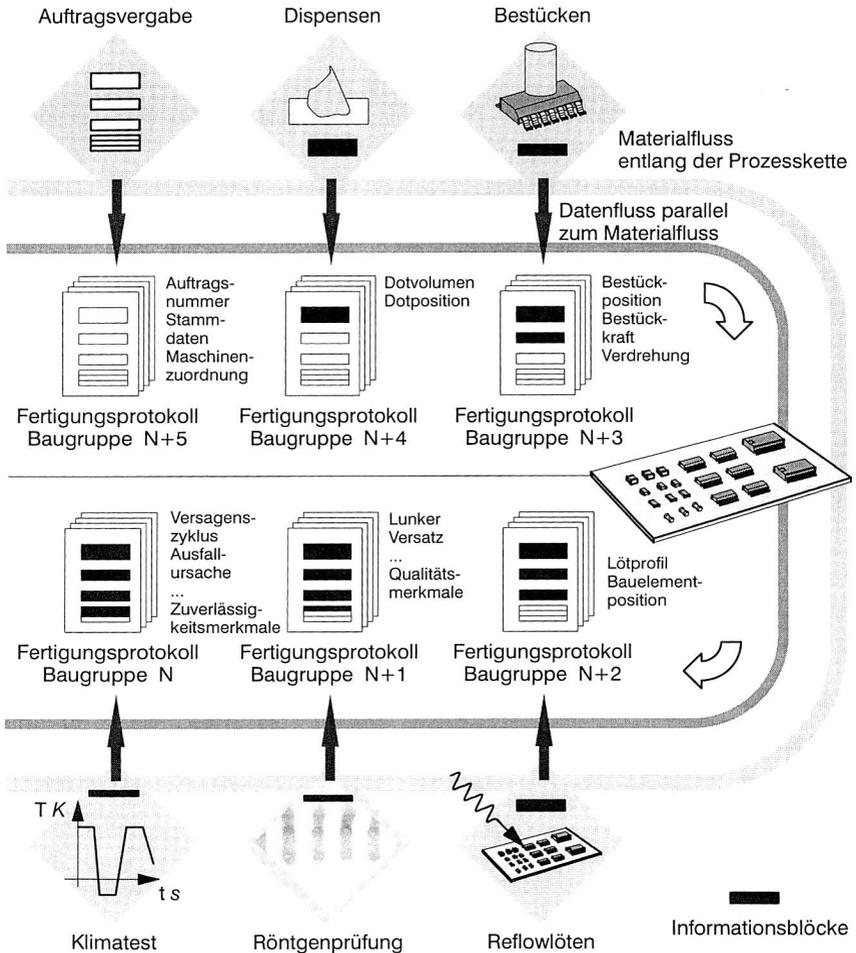


Bild 67: Konzept des begleitenden Fertigungsprotokolls [31]

Erweiterung der Prozess- und Prüfdatenstruktur

Die Einführung neuer Bauelement- bzw. Anschlussstechnologien führt im Regelfall zu einer Erweiterung der Prozesskette. Wie bereits in Kapitel 2 ausführlich diskutiert, betrifft dies insbesondere die Verarbeitung ungehäuster Halbleiter im Chip & Wire-Verfahren, während die Einführung von Area Array-Komponenten mit wesentlich geringerem prozesstechnischen Aufwand verbunden ist. Im Informationssystem wurde daher das Chip & Wire-Verfahren als eigenständige Prozessfolge abgebildet, ohne die bisherige Struktur von Fertigungsauftrag und -protokoll zu verändern. Damit ist die Datenkonsistenz und Durchgängigkeit der Bedienung gewährleistet. Wie bisher werden relevante Komponenten- und Prozessparameter interaktiv über verschiedenste Eingabemasken vom Benutzer hinterlegt und abgefragt. Hierzu wurden die Bauteilbibliotheken erweitert sowie neue logische Verknüpfungen zwischen den Einzelstationen aufgebaut (Bild 68).

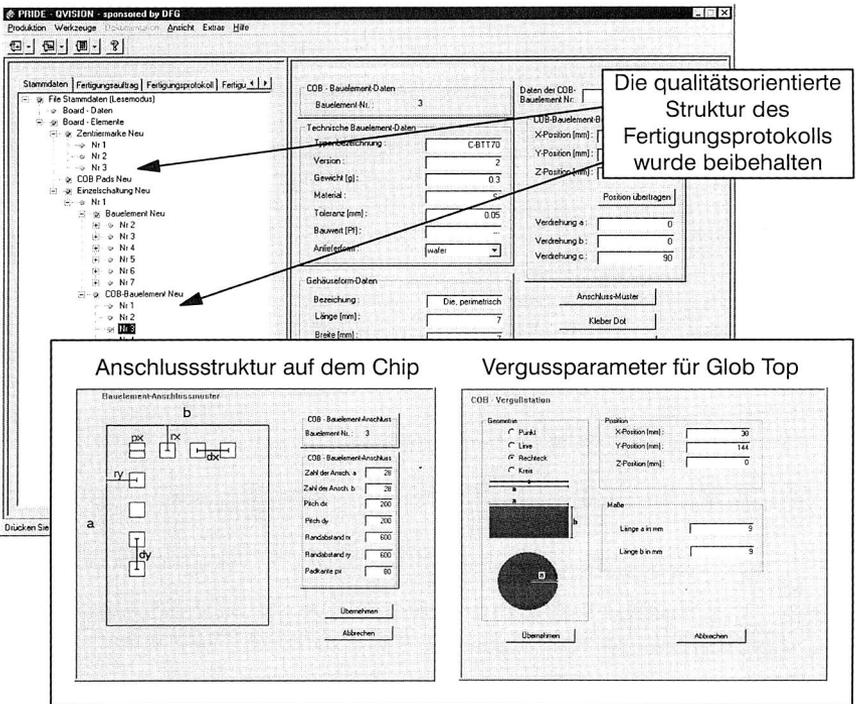


Bild 68: Festlegung COB-spezifischer Stellgrößen, Eingabemasken von Anschlussstrukturen und Prozessparameter bei der Verarbeitung von Chip & Wire

Zusätzlich wurde die Bauelementbibliothek stark erweitert und mit einem am Lehrstuhl eingesetzten Leiterplattenentwicklungsprogramm abgeglichen, sodass jetzt einheitliche Bezeichner innerhalb der beiden Systeme verwendet werden. Eine neu entwickelte Schnittstelle bietet darüber hinaus eine direkte Verbindung vom Layoutprogramm zu Q-Vision. Beide Systeme enthalten somit auch bei Area Arrays einheitliche Bausteine. Ebenso werden Geometriemerkmale wie die Positionen der Bauelementanschlüsse oder die Vergussparameter dynamisch aus den vorgegebenen Solldaten des Leiterplattenlayouts (z.B. Bauelementposition) generiert, wodurch der Bediener einfacher und damit fehlerfreier durch die Eingabe der Stammdaten geführt werden kann. Die optionale grafische Einblendung der im Stammdatensatz hinterlegten Leiterplatte mit den platzierten Bauelementen erleichtert die Eingabe, offensichtliche Übertragungsfehler oder Fehleingaben sind leicht überprüfbar.

Integration von Nacharbeitsstationen

Die Integration von Nacharbeitsstationen in die Baugruppenmontage ist technologisch unumgänglich, da trotz der stetigen Bemühungen nach einer Reduzierung der Fehlerquote immer ein bestimmter Restanteil defekter Baugruppen anfällt. Diese Baugruppen werden in der Praxis aus dem Fertigungsprozess ausgeschleust, inspiziert und in speziellen Nacharbeitsstationen repariert. Je nach Fertigungsstand wird die Baugruppe einer Endkontrolle zugeführt oder wieder in den Prozess eingeschleust.

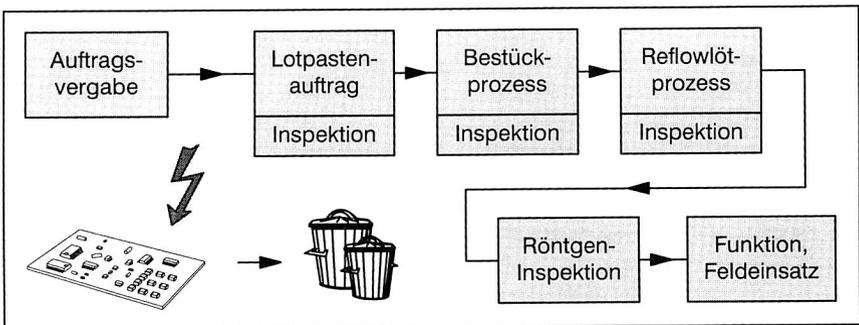


Bild 69: Die durchlauforientierte Grundstruktur, wie sie im prozessbegleitenden Informationssystem parallel zum Prozessfluss umgesetzt wurde

Diese Nacharbeitsschleife muss jedoch parallel zum Prozess auch in die bestehenden Datenstrukturen des Informationssystems eingebunden werden. Die bisher durchlauforientierte Prozessfolge, wie sie in Bild 69 skizziert ist, wurde daher durch die in Bild 70 dargestellte erweiterte Struktur ersetzt.

Der wesentliche Unterschied gegenüber der bisherigen Systematik besteht in der Rückführung eines bereits parametrisierten Fertigungsprotokolls in die Fertigung. Wurde während der prozessintegrierten Inspektion ein Fehler erkannt, der nicht durch Regelungsmechanismen eliminiert werden kann (z.B. können fehlende Bauelemente durch einen erneuten Bestückvorgang gesetzt werden), so wird die Leiterplatte ausgeschleust und das zugeordnete Fertigungsprotokoll eindeutig fehlerindiziert. Anhand der Indizierung können die für die Nacharbeit relevanten Informationen wie Fehlertyp, Fehlerort, Verbindungstechnologie, etc. ausgelesen und an der Nacharbeitsstation visualisiert werden.

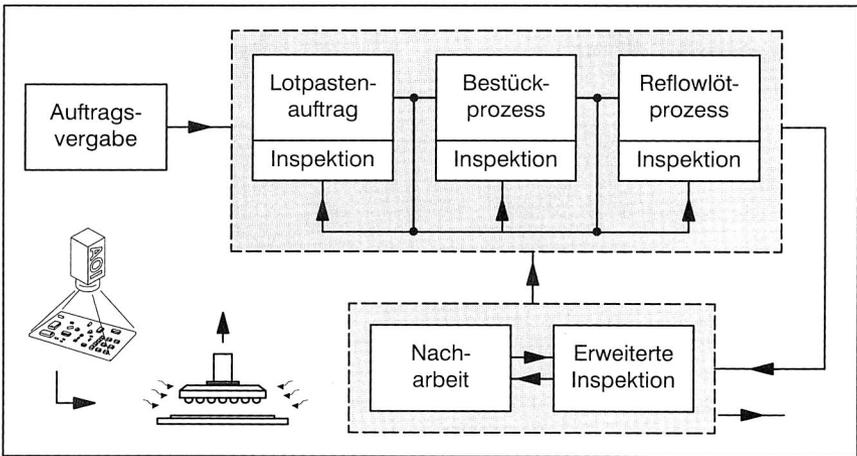
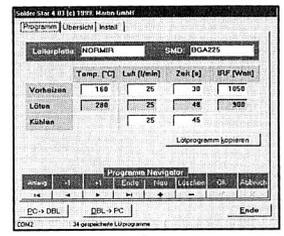
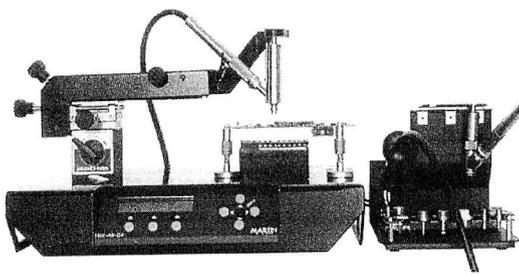
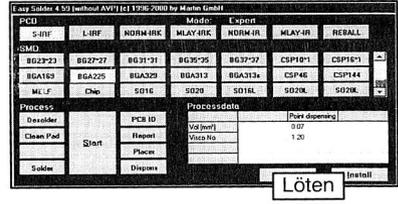
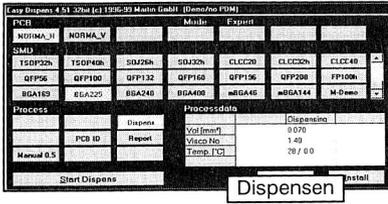


Bild 70: Modifizierte Prozessstruktur mit Nacharbeitsschleifen, die eine wiederholte Bearbeitung einer Baugruppe in einer beliebigen Station ermöglicht

Nach Abschluss der Nacharbeit wird die Baugruppe zurück in den Fertigungsfluss, z.B. für weitere Montagearbeiten, eingeführt, gleichzeitig wird das betreffende Fertigungsprotokoll freigegeben. Die eindeutige Indizierung und Freigabe von Protokollen ist insbesondere vor dem Hintergrund wichtig, dass verschiedene Baugruppen verschiedene Inspektions- und Nacharbeitsstationen wiederholt durchlaufen können. Die durchgehend modulare, baugruppenorientierte Erweiterung von Q-Vision stellt hierbei sicher, dass alle anfallenden Daten unter Berücksichtigung der aktuell bearbeiteten Station mitgeführt und der richtigen Baugruppe zugeordnet werden. Somit ist ein konsistenter Informationsfluss auch bei Integration von Nacharbeitsschleifen gewährleistet.

Eingabemasken zur Parameterauswahl (BE-Typ, Pastentyp, Zeit, Temp., etc.)



PC-geregelte Prozessführung während der Nacharbeit

Bild 71: Nacharbeitsstation mit PC-Unterstützung (Quelle: Martin)

In Bild 71 sind mehrere Bildschirmmasken abgebildet, wie sie zur Verwaltung relevanter Daten an einer Nacharbeitsstation eingesetzt werden. Dieses marktverfügbare System stellt rechnergestützte Werkzeuge zum Austausch von Bausteinen, zum Dispensieren von Lotpaste sowie zum profilgesteuerten Verlöten der neuen Bausteine zur Verfügung.

5.2 Entwicklung einer Methodik zur prozessintegrierten Analyse komplexer Qualitätsdaten

Wie bereits in grundlegenden Untersuchungen am Institut nachgewiesen wurde [31], führt die Komplexität der in der Elektronikproduktion vorherrschenden Wirkzusammenhänge notwendigerweise zum Einsatz geeigneter Analysemethoden, mit denen eine umfassende Betrachtung des Gesamtprozesses möglich ist. Derartige Methoden basieren auf rechnergestützten Prozesskettenmodellen, die die erfassten Qualitätsdaten verarbeiten und daraus Parameter zur Optimierung entlang der Prozesskette liefern.

Somit stellt die Verknüpfung von Analysewerkzeugen mit prozessnahen Informationssystemen eine wesentliche Herausforderung für die flexible und dynamische Prozessoptimierung dar. Wie in Kapitel 5.1 diskutiert, werden die Prozessdaten innerhalb von Qualitätsmanagementsystemen gesammelt und weitergegeben. Im zweiten Schritt

müssen diese "Rohdaten" aufbereitet und verdichtet werden. Die dabei eingesetzten mathematischen Strategien sind im Wesentlichen von der nachfolgenden Analysemethodik sowie von der Qualität der Eingangsdaten abhängig. Das in Bild 72 dargestellte Flussdiagramm soll diese Zusammenhänge verdeutlichen und gleichzeitig die Schwerpunkte des hierzu entwickelten Analysewerkzeuges aufzeigen, wie sie im Folgenden kurz angerissen werden.

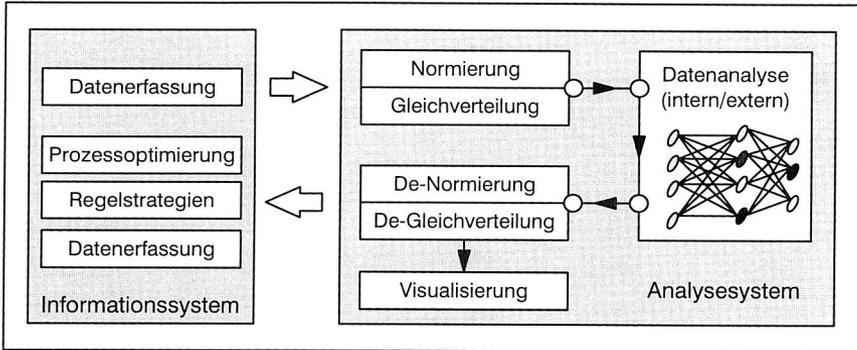


Bild 72: Strukturdiagramm zur Abbildung der Wirkzusammenhänge zwischen Informations- und Analysesystem

Die Prozessdaten werden über eine definierte Schnittstelle aus dem Informationssystem (hier Q-Vision) zur Weiterverarbeitung bereitgestellt. Die Weiterverarbeitung umfasst im Wesentlichen die Teilschritte Datenaufbereitung, Datenanalyse mit neuronalen Prozessmodellen und Visualisierung der ermittelten Zusammenhänge.

Aufbereitung der Eingabedaten

Die aus einer laufenden Produktion erfassten Daten weisen typischerweise Häufungen um die Sollwerte auf, während andere Intervalle vernachlässigt sind. Für eine qualitativ hochwertige Auswertung der Eingabedaten mit Hilfe neuronaler Algorithmen ist jedoch eine stetige Gleichverteilung vorteilhaft [85]. Daher werden die selektierten Daten innerhalb des realisierten Analysewerkzeuges zuerst gleichverteilt, um Über- oder Unterbewertungen von Daten in Teilbereichen zu verhindern. Zusätzlich ist aus mathematischen Gründen eine Normierung auf vorgegebene Intervalle (z.B. $[-1;1]$ oder $[0; 1]$) notwendig. Beide Algorithmen wurden automatisiert und stehen dem Benutzer innerhalb der realisierten Eingabemasken wahlfrei zur Verfügung (Bild 73).

Da die eingangs dargestellte Architektur sowohl für die Lern- wie für die Analysephase eingesetzt werden soll, wurde die zusätzliche Nutzung von Prüfdaten implementiert.

Prüfdaten dienen zur Bewertung der Analyseausgabe des neuronalen Algorithmus, indem die verifizierten Zusammenhänge zwischen Eingabe- und Ergebnisdaten den real ermittelten Prüfdaten gegenübergestellt werden.

Auswahl von Eingabe- und Prüfdaten

Normierung der Datensätze

Initialisierung u. Gleichverteilung

Randbedingungen:

- Mathematische Invertierbarkeit
- Reproduzierbarkeit
- keine Funktionsverfälschung

Bild 73: Eingabemasken zur Auswahl und Aufbereitung der Eingabe- und Prüfdaten

Datenanalyse

Die Datenanalyse erfolgt in der derzeitigen Realisierungsstufe in einem externen Simulationsprogramm, das direkt an die Datenaufbereitung angebunden wurde (Bild 73). Es liest die bereitgestellten Eingabe- und Prüfdaten ein, verarbeitet sie innerhalb eines neuronalen Simulationsmodells und übergibt den Ausgabevektor zurück. Die bewusste Trennung der Datenaufbereitung vom eigentlichen Analysealgorithmus sowie der Einsatz eines Standard-Simulationswerkzeuges unterstützten die Datenauswertung. Insbesondere erlaubt die hier prototypisch realisierte Lösung eine strukturierte Selektion der Daten, die ungeachtet des später eingesetzten Simulationsmodells durchgeführt werden kann. Im Umkehrschluss können die einmal bereitgestellten Daten mit beliebi-

gen Modellen analysiert werden, woraus sich weitere Optimierungsansätze der realen Prozessumgebung wie der Prozessmodelle ableiten lassen.

Der Aufbau der Simulationsmodelle ist grundsätzlich losgelöst von der Analyseaufgabe. Damit erhält der Benutzer die Option, innerhalb der integrierten Entwicklungs- und Simulationsumgebung, die vom System bereitgestellt wird, die Modelle aufzubauen, zu testen und vergleichend zu bewerten [113]. Zur Evaluierung können wiederum die bereits aus dem Prozess aufbereiteten Daten sowie zusätzlich weitere Lern- und Trainingsdaten eingesetzt werden.

In zukünftigen Arbeiten werden verstärkt der effiziente Einsatz neuronaler Simulationsmodelle in der Elektronikproduktion untersucht und weitere, baugruppenspezifische Modelle entwickelt und an die bestehenden Werkzeuge angebunden. Diese Prozesskettenmodelle sollen direkt an das Prozess- und Prüfdatennetz angebunden werden, damit die ermittelten optimalen Parametereinstellungen im Sinne einer Prozesskoordination verifiziert werden können.

Ergebnisvisualisierung

Die grafische Aufbereitung der Wirkzusammenhänge aus dem Simulationsmodell stellt das zweite eigenständige Modul innerhalb des realisierten Analysesystems dar (siehe Bild 72). Die Anbindung erfolgt direkt an die Schnittstelle zwischen Datenaufbereitung und Datenanalyse, sodass eine schnelle, datenkonsistente Datenauswertung und -visualisierung gewährleistet ist. Die Darstellung der Ergebnisse wurde mit Hilfe von Oberflächendiagrammen in Microsoft Excel 97 realisiert, wodurch eine einfache Anbindung an Standardsoftware gewährleistet ist (Bild 74).

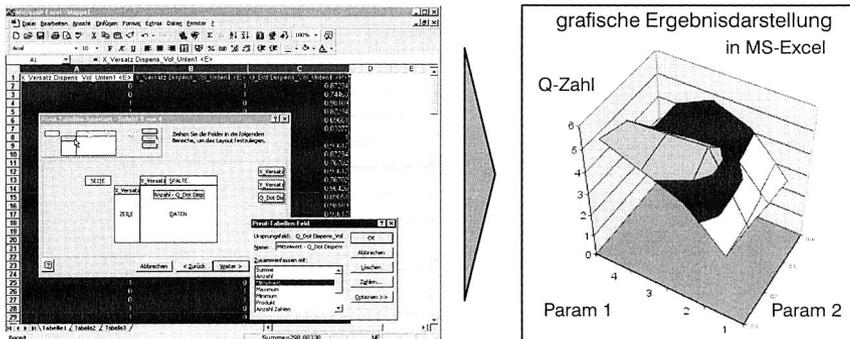


Bild 74: Ergebnisdarstellung im Oberflächendiagramm nach Pivotisierung des Ausgabevektors

Ein Oberflächendiagramm visualisiert die Fehlerfunktion und zeigt grafisch vorhandene lokale und globale Minima bzw. Maxima bei der Betrachtung zweier Prozessgrößen und deren Auswirkung auf einen Zielwert. Für das Oberflächendiagramm ist eine Pivotisierung der Daten notwendig. Da dieser Schritt jedoch keine mathematischen Veränderungen an den betreffenden Daten verursacht, sondern nur der grafischen Aufbereitung dient, ist er unmittelbar der Darstellung vorgeschaltet.

Mit der Integration dieses Analysewerkzeuges konnte das bereits bestehende Werkzeug zur Prozess- und Prüfdatenerfassung zu einem umfassenden Informations- und Analysesystem für die Baugruppenmontage erweitert werden. Diese zusätzlichen Funktionalitäten sowie die Berücksichtigung innovativer Aufbau- und Verbindungstechnologien in der gesamten Datenstruktur tragen zu einer erheblichen Erhöhung des Nutzungsgrades bei. Aufgabe weiterer Arbeiten ist jetzt die optimale Einbindung der verschiedenen Simulationsmodelle und Algorithmen sowie die flexible Umsetzung der bisher nur prototypisch realisierten Schnittstellen.

6 Ausgewählte Verfahren zur Bewertung neuer Technologien in der Elektronikproduktion

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt wurde, führt die Realisierung eines Systems zur prozessbegleitenden Qualitätssicherung mittels geeigneter Datenerfassungs- und Analysewerkzeuge zu einem substantiell höheren Qualitätsniveau. Im Vergleich zu einer reinen Test- und Auslesestrategie verlagert sich der finanzielle Aufwand vom Prüffeld in die Produktion. In verschiedenen Untersuchungen wurde bereits aufgezeigt, dass mit der Steigerung der Qualität ein erhebliches Kostensenkungspotential im Prüffeld verbunden ist [31] [87].

Dieser Senkung von Prüf- und Fehlerkosten steht jedoch ein erhöhter Aufwand für präventive Maßnahmen entgegen. In letzte Konsequenz führt das Streben nach einer Null-Fehler-Produktion zu exponentiell ansteigenden Fehlervermeidungskosten. Das wirtschaftliche Optimum liegt an dem Punkt, an dem die Summe aus Fehlerbeseitigungs- und Fehlervermeidungskosten ein Minimum aufweist. Für die Elektronikproduktion ist die Bestimmung dieses Optimums von besonderer Bedeutung, da einerseits aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen eine Beherrschung des Prozesses nur mit großem Aufwand realisierbar ist, andererseits kostenintensive Prüfstrategien und Nacharbeiten durchgeführt werden.

Ausgehend von diesen Überlegungen wird in den folgenden beiden Kapiteln eine kombinierte technisch-wirtschaftliche Methodik entwickelt und realisiert, mit der die Bewertung der Effizienz qualitätssichernder bzw. -steigernder Maßnahmen möglich ist. Dazu werden zuerst die in der industriellen Praxis eingesetzten Verfahren zur Technologiebewertung und zur Wirtschaftlichkeitsberechnung analysiert, um aus den Defiziten ein Anforderungsprofil für ein neues, umfassendes Bewertungskonzept abzuleiten. Im anschließenden Kapitel 7 wird das im folgenden "Q-Value" genannte System in einer geeigneten Softwareumgebung implementiert und anhand von verschiedenen Anwendungsbeispielen näher vorgestellt.

6.1 Problematik einer qualitäts- und kostengerechten Bewertungsstrategie

Prozessverbesserungen in der Elektronikproduktion basieren auf der Optimierung bestehender oder auf dem Einsatz neuer Technologien. Die Entscheidung zum Technologiewandel wird dabei betriebsintern sowohl von technologischen wie wirtschaftlichen Kriterien geprägt, wobei in der Regel ergebnisorientierte Aspekte (Erlöse, Kosteneinsparungen) im Vordergrund stehen. Dies hat zur Folge, dass als wesentliches Kriterium lediglich ökonomische Gesichtspunkte beurteilt werden, d.h. es wird verglichen, ob

bezüglich eines definierten Prozesses oder Produktes ein Kostenvorteil innerhalb der Fertigung darstellbar ist [1].

Technologisch ist die Entscheidungssituation für den Einsatz einer Technologie immer dann trivial, wenn Produktinnovationen erst durch diese Technologie möglich werden oder Kostenvorteile gegenüber alternativen Lösungen bei gleichbleibenden oder verbesserten Produkt- bzw. Prozesseigenschaften verbunden sind. Vielfach ist jedoch mit dem Einsatz einer innovativen Technologie zunächst kein direkter Kostenvorteil realisierbar, die Fertigungskosten sind kurzfristig höher. Die Technologie kommt folglich nicht zum Einsatz, auch wenn mittelfristig ein erhebliches Kostensenkungspotential durch stabilere Prozesse verbunden mit geringerer Nacharbeit erzielbar ist. Als Beispiel aus der Elektronikproduktion sei hier der Umstieg von QFP auf BGA angeführt. Obwohl der Einsatz von BGAs offensichtlich zu einer um den Faktor 5-10 geringeren Lötfehler-rate gegenüber QFPs führt [46], scheuen viele klein- und mittelständische Unternehmen den Einsatz von BGAs. Ein Hauptgrund liegt sicherlich in der Befürchtung, hohe Investitionen für qualifizierte Bestück- und Röntgenprüfsysteme tätigen zu müssen.

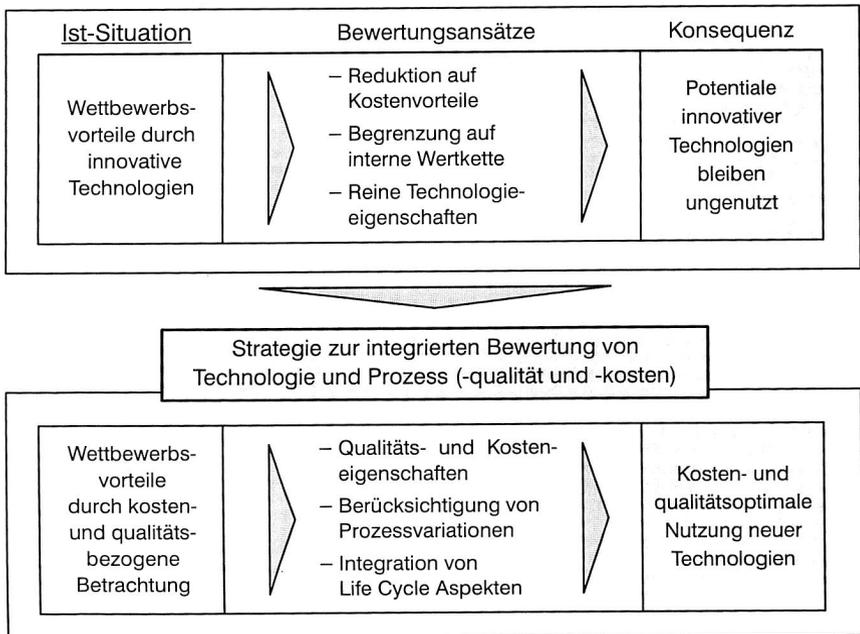


Bild 75: Zielsetzung für eine integrierte Technologiebewertung (vgl. [1])

Eine kosten- und qualitätsoptimale Nutzung neuer Technologien muss daher auf einer integrierten Betrachtung prozessualer und ergebnisorientierter Aspekte basieren. Wie in Bild 75 dargestellt, führt eine integrierte Bewertung von Technologie, Prozess und Produkt zu einem technisch-wirtschaftlichen Gesamtbild, das die kosten- und qualitätsoptimale Nutzung neuer Technologien ermöglicht.

Die Ermittlung von "Prozess-Input" und "Prozess-Output" stellt dabei eine wesentliche Voraussetzung zur integrierten Technologiebewertung dar. Als Prozess-Input kann in diesem Zusammenhang der Aufwand für qualitätssteigernde Maßnahmen oder für neue, innovative Technologien gesehen werden. Unter Prozess-Output ist die real erzielte bzw. erzielbare Qualität unter den definierten technologischen Randbedingungen zu verstehen.

Der Faktor Qualität muss also ebenso wie der Faktor Kosten als unternehmerische Führungsgröße operationalisiert werden. Gelingt dies, ist die Bestimmung von Prozess-Effizienzen auf Basis von Aufwand-Nutzen-Relationen möglich. Die Analyse der Effizienz einer qualitätssichernden Maßnahme lässt sich somit auf die Analyse der relevanten Qualitäts- und Kostenkenngrößen zurückführen. Die Erfassung dieser Kennzahlen gestaltet sich jedoch im Allgemeinen schwierig, da Ingenieure und Betriebswirte eine unterschiedliche "Sprache" sprechen und sich dies auch im Einsatz heterogener, nicht miteinander kommunizierender Informationssysteme äußert [39]. Dieser Widerspruch spiegelt sich auch in den beiden klassischen Richtungen der Unternehmensstrategie wieder; verfolgt wird entweder die (ökonomische) Kostenführerschaft oder die (technologische) Qualitätsführerschaft [100].

Für die Bestimmung technisch-wirtschaftlicher Effizienzen bedeutet dies, dass geeignete Kenngrößensysteme definiert werden müssen, die die beiden Unternehmensbereiche Produktion und Controlling gleichwertig umfassen.

6.2 Kennzahlen und Kennzahlensysteme

Jedes Management- oder Controllinginstrument basiert auf dem Einsatz von Kennzahlen. Je nach Komplexität der zu untersuchenden Fragestellung werden problemspezifische Einzelkennzahlen oder Kennzahlensysteme zur Merkmalsbewertung herangezogen. Kennzahlen liefern somit einen Erkenntnisgewinn im Sinne eines unternehmensweiten Informationsversorgungssystems [115].

Unabhängig von deren konkreten Einsatzgebiet werden Kennzahlen allgemein als jene Zahlen betrachtet, mit denen ein objektiver, konzentrierter Soll-Ist-Vergleich eines Sachverhalts möglich ist. Die wichtigsten Eigenschaften einer Kennzahl sind [81]:

- der Informationscharakter, d.h. es soll ein Urteil über einen bestimmten Sachverhalt ermöglicht werden,

- die Quantifizierbarkeit, d.h. die Messung dieses Sachverhalts mit Hilfe einer Werteskala sowie die
- spezifische Form der Information, deren Ziel es ist, komplizierte Strukturen und Prozesse auf einfachere Weise zu beschreiben.

Kennzahlen sind das Ergebnis eines Messvorgangs. Sie besitzen eine numerische Dimension, aus der sich die Einteilung in absolute Zahlen und Verhältniszahlen ableitet. Das in Bild 76 dargestellte einfache Kennzahlensystem basiert auf Verhältniszahlen, die in diesem Falle eine Aussage zum Verhältnis von Leistung und Kosten liefern.

Von Lösungs- alternative unabhängig		Von Lösungsalternative abhängig			
Kriterien	Wichtung	Erfüllungsgrad	Wert I	Risiko- faktor	Wert II
Leistungs- kriterium i	1 - 3	100% - 200%	Wichtung x Er- füllungsgrad	0 - 1	Wert I x Risikofaktor
Kosten- kriterium i	1 - 3	100% - 200%	Wichtung x Er- füllungsgrad	0 - 1	Wert I x Risikofaktor
Kennzahl I =		$\frac{\text{Durchschnitt der Leistungswerte I}}{\text{Durchschnitt der Kostenwerte I}}$		(ohne Berücksichtigung des Risikos)	
Kennzahl II =		$\frac{\text{Durchschnitt der Leistungswerte II}}{\text{Durchschnitt der Kostenwerte II}}$		(mit Berücksichtigung des Risikos)	

Bild 76: Einfaches Kennzahlensystem zur Ermittlung von Verhältniszahlen [98]

Eine in der Praxis weit verbreitete Systematisierung unterscheidet betriebliche Funktionsbereiche. Danach können Qualitätskennzahlen, Logistik-, Produktions- sowie Absatzkennzahlen unterschieden werden [115]. Von besonderem Interesse für die Prozessbewertung sind dabei die Qualitätskennzahlen, mit denen eine quantitative Beurteilung einzelner Teilprozesse möglich ist. Derartige Bewertungen stoßen jedoch in der Elektronikproduktion schnell an ihre Grenzen, da die meisten qualitätsrelevanten Parameter nur unzureichend erfasst oder quantifiziert werden können. Daher werden bei der Beurteilung der Verbindungsqualität qualitative, nicht direkt messbare Kriterien (Oberflächenglanz, Flussmittelverteilung, Lötstellenausbildung) neben quantitativ bestimmbar Merkmalen (Meniskuswinkel, Scherfestigkeit) herangezogen.

An diesem Beispiel zeigt sich jedoch, dass der enge Kennzahlenbegriff, wie er in Anlehnung an [81] vorgestellt wurde, zur Prozessbewertung in der Elektronikproduktion nicht ausreicht. Vor dem Hintergrund der Komplexität der zu bewertenden Zusammenhänge und der unzureichenden Messbarkeit einzelner Parameter ist die Definition eines umfassenden Kennzahlensystems notwendig.

Kennzahlensysteme dienen generell zur Erhöhung der Aussagefähigkeit einzelner Kennzahlen. Entscheidend ist die Umsetzung der Verknüpfung separater Kennzahlen, wobei im allgemeinen zwei Strukturierungsprinzipien unterschieden werden [100]:

- Rechentechnisch verknüpfte Kennzahlensysteme
Ein derartiges System liegt vor, wenn eine komplexe Strukturhierarchie von Einzelkennzahlen aufgebaut wird, an deren Spitze die wichtigste Kennzahl steht (sog. Kennzahlenpyramide). Diese Systematisierung bietet vor allem Vorteile beim Aufbau von Ursache-Wirkzusammenhängen.
- Ordnungssysteme
Ordnungssysteme sind Kennzahlensysteme, bei denen verschiedene Einzelkennzahlen problemspezifisch zusammengestellt, jedoch nicht mathematisch verknüpft werden. Die Beziehungen zwischen den Kennzahlen sind lediglich qualitativ bekannt, jedoch gewährleistet ein Ordnungssystem hohe Flexibilität.

Ein weiterer, zu berücksichtigender Aspekt bei Aufbau und Strukturierung von Kennzahlensystemen stellt die Zielorientierung dar. Die primäre Aufgabe von Kennzahlen, der Abgleich zwischen Soll- und Ist-Wert eines Parameters, entspricht der Überprüfung, inwieweit ein vorgegebenes Zielkriterium erreicht wurde. Übertragen auf die oben angesprochene Problemstellung aus der Baugruppenfertigung muss das Zielkriterium "Lötstellenqualität" klar definiert werden. Dies beinhaltet die direkte Erfassbarkeit und die möglichst präzise Beschreibbarkeit des Zielkriteriums durch geeignete Kennzahlen.

Am Beispiel der "Bewertung von Lötstellen" wird deutlich, dass eine Prozess- oder Produktbewertung – basierend auf der Verknüpfung von Zielkriterien und Kenngrößen – gerade im Umfeld der Elektronikproduktion verschiedenste Aspekte berücksichtigen muss. Die Vereinbarung des technischen Ziels "Qualitätssteigerung" mit dem wirtschaftlichen Ziel "Kostensenkung" bedarf komplexer Bewertungssysteme. Bei den im Folgenden vorzustellenden Bewertungsstrategien wird daher insbesondere deren Anwendbarkeit in der Baugruppenfertigung analysiert.

Eine Nichtkonformität, d.h. die Abweichung einer Zielgröße von deren vorgegebenen Toleranzgrenzen, wirkt sich direkt auf das Prozessergebnis aus. Somit ist das Prozessergebnis als finale Bewertungskennzahl zu betrachten, in die die einzelnen, spezifisch zu definierenden Qualitäts- und Kostenkennzahlen einfließen. Die Umsetzung ist Aufgabe geeigneter Bewertungsstrategien.

6.3 Methoden zur Technologiebewertung

6.3.1 Entscheidungs- und Bewertungsstrategien nach VDI 3780

Wie bereits anhand von Bild 76 erläutert, lassen sich auf Basis einfacher Kennzahlen und Bewertungsverfahren eine Vielzahl an Methoden zur Technikbewertung ableiten, die jeweils auf spezielle Teilprobleme zugeschnitten sind. Die in Tabelle 7 dargestellte Auswahl ist an die Methodenauflistung der VDI-Richtlinie 3780 angelehnt und zeigt verschiedene der in der Praxis am häufigsten eingesetzten Methoden zur qualitativen und quantitativen Beurteilung von Technologien auf.

Methode	Typ		Phase der Produktbewertung		
	qualitativ	quantitativ	Definition, Strukturierung	Folgenabschätzung	Bewertung
Delphi-Befragung	X	X	X	X	X
Relevanzbaum-Analyse	X	X	X	X	X
Risiko-Analyse, FMEA		X		X	X
Verflechtungsmatrix	X	X		X	X
Modell-Simulation		X	X	X	X
Szenario-Gestaltung	X		X	X	X
Kosten-Nutzen-Analyse		X			X
Nutzwert-Analyse	X	X			X

Tabelle 7: Methoden zur Technikbewertung nach VDI-Richtlinie 3780 [108]

Bei der *Delphi-Befragung* handelt es sich um eine Ideenfindungs- und Prognosemethode, die die Urteile und Zukunftseinschätzungen ausgewählter Fachleute mit Hilfe von Umfragen ermittelt und systematisiert. Die Umfrageergebnisse werden den beteiligten Experten ein- oder mehrmals vorgelegt, damit sie ihre Angaben unter dem Eindruck der anderen Meinungen nochmals überdenken. Das Ergebnis der Methode hängt somit stark von der Auswahl der beteiligten Fachleute ab, die im Allgemeinen dazu neigen, Entwicklungen, an denen sie selbst beteiligt sind, zu optimistisch zu bewerten. Außerdem herrscht ein gewisser Konformitätsdruck, sodass Mehrheitsentscheidungen favorisiert werden [8].

Die *Relevanzbaum-Analyse* wird eingesetzt, um komplexe Wechselwirkungen und Folgen einer angestrebten Lösung transparent zu machen, indem man dem Problem eine Baumstruktur gibt. Diese Analyse unterstützt den Anwender damit nicht nur bei der

Strukturierung und Darstellung bekannter Zusammenhänge, sondern erleichtert auch das Auffinden zusätzlicher, bisher unbekannter Abhängigkeiten. Die Stärke der Relevanzbaum-Analyse liegt jedoch fast ausschließlich in der Bewertung qualitativer Zusammenhänge und erlaubt Quantifizierungen nur bei wohlstrukturierten Problemen, die ein Zurückgreifen auf Erfahrungswerte erlauben. Eine Erweiterung dieser Methode stellt die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse *FMEA* dar, die versucht, mögliche Fehlerquellen und deren Bedeutung für den Gesamtprozess sowie darüber hinausgehende Folgen aufzudecken und zu bewerten [77].

Einen ganz ähnlichen Hintergrund hat die *Verflechtungsmatrix*, die auch Cross-Impact-Methode genannt wird. Mit ihr wird versucht, wechselseitige Abhängigkeiten aufzudecken, indem man die interessanten Größen den Zeilen und Spalten einer Matrix zuordnet und Wechselwirkungen im einfachsten Fall qualitativ durch Markierungen hervorhebt. Will man die quantitative Ausprägung der gegenseitigen Einflüsse sichtbar machen, kann dies mit Hilfe von Rangziffersystemen erfolgen. Die Aussagekraft solcher Quantifizierungsversuche ist jedoch oftmals sehr begrenzt.

Im Rahmen einer *Modell-Simulation* wird das zu bewertende System als mathematisches Modell im Rechner abgebildet, was dem Anwender ermöglicht, verschiedene Technologiealternativen in der Simulation zu testen und deren Auswirkungen kennenzulernen. Dadurch muss er keine abstrakten Überlegungen mehr anstellen, sondern kann die Konsequenz einer Handlung direkt am Bildschirm erkennen. Problematisch ist jedoch, dass die Qualität der Simulationsaussage nur so gut ist wie die zur Verfügung stehenden Daten. Die dazu notwendige Datenselektion und -verdichtung ist jedoch im Bereich der Elektronik mit erheblichem Aufwand verbunden, da das Verständnis um die komplexen Prozessbeziehungen notwendig ist. Daher behilft man sich in der Baugruppenfertigung meist mit einfachen Rüst- oder Kinematiksimulationen, die nur einen Teilaspekt der Prozesskette beleuchten.

Eine *Nutzwert-Analyse* unterstützt die Entscheidung zwischen mehreren Handlungsalternativen durch die Berechnung von Nutzwerten, die sich für jeden Anwender individuell aus der Gewichtung von Bewertungskriterien ergeben. Dabei lassen sich sowohl quantitative als auch qualitative Einflussgrößen erfassen, indem sie mit Hilfe von Nutzenfunktionen in Zahlenwerte einer Nutzwertskala umgewandelt werden. Am Ende stehen die aus mehreren Teilnutzwerten ermittelten Gesamtnutzwerte, die einen Vergleich der betrachteten Alternativen erlauben. Mit dieser Methode werden komplexe Bewertungsprobleme in eine überschaubare Form gebracht und die Anwender gezwungen, eigene Präferenzen durch Diskussion klar festzulegen. Nachteilig wirkt sich aus, dass die quantitativen Ergebnisse zwar eindeutige Entscheidungen suggerieren, wegen der angewandten Rechenverfahren jedoch lediglich als meinungsbildende Unterstützung verstanden werden dürfen. Grund dafür sind messtheoretische, entscheidungs-

logische und mathematische Annahmen, die in der komplexen Realität nur unzureichend erfüllt sind.

Die *Kosten-Nutzen-Analyse* stellt eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Wirtschaftlichkeitsrechnung dar, indem sie neben den gesamten Aufwendungen und Erträgen eines Projekts auch sogenannte externe Effekte und qualitative Auswirkungen berücksichtigt. Dabei wird versucht, alle Einflussgrößen durch Umrechnung in Geldwerte quantifizierbar zu machen, sodass sie in der Gesamtbilanz auftauchen können. Dies hat zwar den Vorteil, dass auch Kriterien mit einbezogen werden können, die über die technisch-wirtschaftlichen hinausgehen, doch zugleich wird die Frage aufgeworfen, wie solche Einflüsse (z. B. ein verbessertes Image) sinnvoll zu quantifizieren sind.

Obwohl verschiedene Studien belegen, dass die vorhandenen Bewertungsinstrumente im unternehmerischen Alltag häufig zum Einsatz kommen und Experten die Auswahl der zur Verfügung stehenden Methoden als durchaus ausreichend einschätzen [8] [27], werden doch zunehmend Defizite bezüglich der Aussagekraft und universellen Einsetzbarkeit einzelner Verfahren bemängelt. Im Brennpunkt der Kritik steht vor allem die geringe Reichweite bei der Erfassung externer Kosten und Aspekte bzw. die ungenügende Bewertung nichtmonetärer Einflüsse. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass einzelne Methoden nur bei sehr eng eingegrenzten Problemstellungen sinnvolle Ergebnisse liefern, sodass eine umfassende Technikbewertung in der Realität auf mehrere Einzelverfahren angewiesen ist [92]. Vor dem Hintergrund des hier betrachteten Systemkomplexes "Qualitäts-Kosten-Bewertung in der Elektronikproduktion" ist dies insbesondere dahingehend kritisch zu betrachten, dass eine Kombination aus Einzelmethoden mit verschiedenen Zeit- und Wirkhorizonten wohl nicht in der Lage ist, die Komplexität des Bewertungsobjektes zu erfassen.

6.3.2 Nutzwert-Kosten-Analyse

Die Nutzwert-Kosten-Analyse (NKA) ist ein strategisches Planungsinstrument zur Quantifizierung der Stärken einer Systemlösung. Sie erlaubt eine objektive Aussage über den technisch-wirtschaftlichen Wert eines Produkts im Vergleich zu konkurrierenden Lösungen und damit die Identifizierung der besten Alternative [27]. Die NKA ist somit die systematisierte Weiterführung der beiden im vorherigen Kapitel vorgestellten Methoden "Nutzwert-Analyse" und "Kosten-Nutzen-Analyse".

Die Nutzwert-Kosten-Analyse besteht aus mehreren Verfahrensschritten, an deren Ende der Gesamtnutzwert jeder Alternative als Kennzahl ermittelt wird. Nach einer klar umrissenen Zieldefinition wird zuerst eine Sammlung aller Anforderungskriterien erstellt, die für das neue System wesentlich sind; dafür bieten sich chaotische Methoden wie Brainstorming an oder methodische Werkzeuge wie eine Morphologische Klassifi-

kation [108]. Danach gilt es, diese Anforderungen gruppenweise zu ordnen und gegliedert zu einem Anforderungskatalog zusammenzufassen. Dieser Katalog sollte maximal aus drei Stufen bestehen, wobei jeder Stufe nur eine begrenzte Anzahl an Begriffen (ca. 6-9, je nach Strukturtiefe) zugeordnet werden sollten.

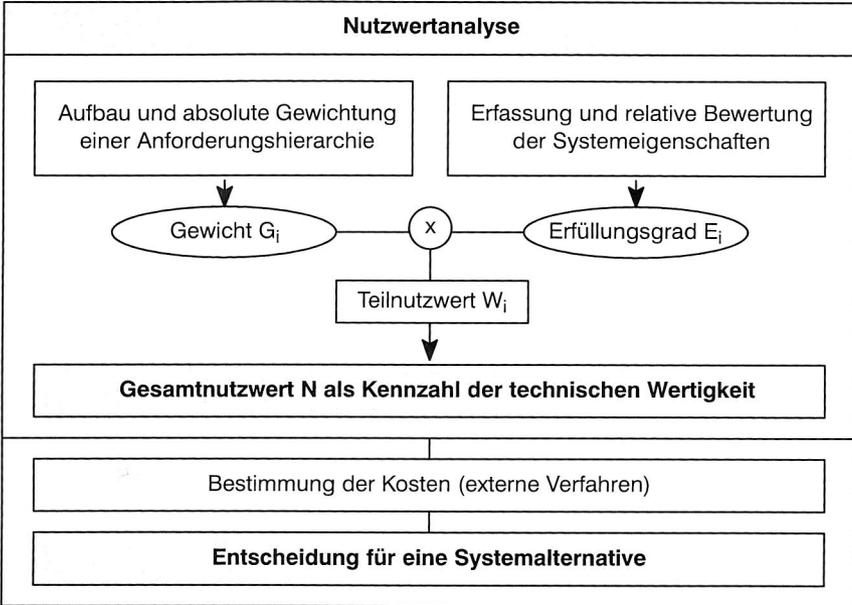


Bild 77: Ablauf der Nutzwert-Kosten-Analyse

Ist der Anforderungskatalog definiert, kennzeichnet der Anwender diejenigen Kriterien, die von dem neuen System unbedingt erfüllt werden müssen. Lösungsalternativen, die diese K.o.-Kriterien nicht erfüllen, bleiben beim späteren Auswahlprozess unberücksichtigt. Anschließend werden alle Kriterien innerhalb der drei Stufen relativ zueinander gewichtet, sodass sich jeweils eine Summe von 100% ergibt. Bei der Gewichtung der Anforderungen werden somit den Kriterien der Stufe 1 die Teilgewichte g_1 , den Kriterien der Stufe 2 die Teilgewichte g_2 und den Kriterien der Stufe 3 die Teilgewichte g_3 zugeteilt und anschließend die Gesamt-Teilgewichte G der untersten Stufe durch Multiplikation der Teilgewichte errechnet.

Auch deren Summe über die ganze Anforderungsliste muss wiederum 100% ergeben. Wie gut die gestellten Anforderungen von den zur Diskussion stehenden Systemalternativen erfüllt werden, drückt der Erfüllungsgrad E aus. Für normale Analysen genügt

ein fünfstufiger Erfüllungsgradkatalog. Bei Detail-Analysen sind auch 11 Stufen (0; 0,1; ... ; 1,0) möglich. Speziell für die Elektronikproduktion ist jedoch eine zu starke Feingliederung unzumutbar, da das Bewertungsobjekt selbst strukturell sehr komplex ist.

Mit den nun vorhandenen Größen lassen sich zuerst die Teilnutzwerte W und schließlich der (Gesamt-)Nutzwert bestimmen. Zur Verdeutlichung sind alle Größen der Nutzwertanalyse noch einmal in Tabelle 8 zusammengefasst:

Bestimmung von Teil- und Gesamtnutzwerten						Alternativen			
Beispieltabelle						System A		System B	
Pos.	Anforderungskatalog	g_1	g_2	g_3	G	E	W	E	W
1	Kriterium	40			$G = \frac{g_1 \times g_2 \times g_3}{100 \times 100}$	0,5	$W = G \times E$.	.
1.1	Kriterium 1.1		10						
1.1.1	Kriterium 1.1.1			30					
.	.			.					
.
Summen:					100		NA		NB

Tabelle 8: Bestimmung von Teil- und Gesamtnutzwerten innerhalb der NKA [27]

Eine sinnvolle Ergänzung zur Bestimmung der technischen Wertigkeit bietet die Integration von wirtschaftlichen Kennzahlen (z.B. Prozess- oder Investitionskosten). Für einfache Anwendungsfälle genügt ein aus dem Controlling bekannter Kalkulationsstundensatz, der als "Aufwand" dem erzielten "Nutzen" gegenübergestellt werden kann. Verständlicherweise stößt dieses Verfahren jedoch dort an seine Grenzen, wo die notwendigen Angaben zur Kalkulation neuer Technologien noch nicht verfügbar sind.

Aus den vorliegenden Werten kann ein Nutzwert-Kosten-Diagramm generiert werden, indem die Kosten normiert dem zugehörigen technischen Nutzwert in einem einfachen Diagramm gegenübergestellt werden (vgl. Bild 78). Die Lösungsalternative mit dem besten Nutzwert-Kostenverhältnis wird von der Geraden mit der größten Steigung repräsentiert. Legt der Anwender zusätzlich eine Kosten- und eine Nutzwertgrenze fest, so kann er die für ihn optimale Systemlösung visuell eingrenzen. Im vorliegenden Beispieldiagramm scheiden die Systemlösungen B und C aus, da der technische Nut-

zwert, bzw. die relativen Kosten die jeweiligen Grenzwerte überschritten haben. Aus den verbleibenden Alternativen A und D weist A das bessere Nutzwert-Kosten-Verhältnis aus und ist als beste Lösung im NKA-Diagramm identifiziert.

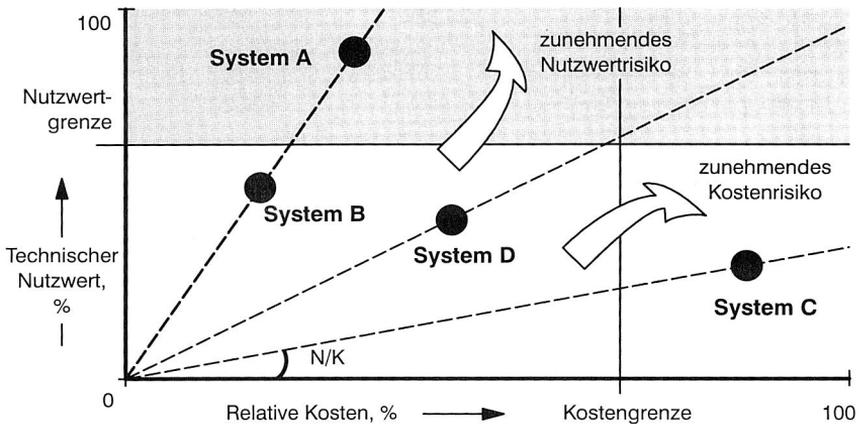


Bild 78: NKA-Diagramm

Der Vorteil der Nutzwert-Kosten-Analyse liegt vor allem darin, dass sie vom Anwender eine klare Zieldefinition sowie eine konkrete Anforderungsbeschreibung und Gewichtung verlangt. Auf diese Weise können Lösungen gefunden werden, die sich jeweils nach den individuellen Bedürfnissen des einzelnen Unternehmens richten. Dies schließt auch die Möglichkeit ein, unbedingt erforderliche Kriterien berücksichtigen zu können. Im Gegensatz zu eindimensionalen Kennzahlensystemen erlaubt das mehrdimensional ausgelegte NKA-Diagramm, sowohl monetär quantifizierbare als auch nicht quantifizierbare Einflussgrößen in gegenseitiger Abhängigkeit darzustellen. Damit kann ein solches Diagramm einen Beitrag zu einer effizienten Entscheidungshilfe leisten.

Der große Nachteil der NKA besteht darin, dass die Prozesskosten in der praktischen Umsetzung nur sehr unzureichend in Form einer Investitionskalkulation berücksichtigt werden [27]. Die Vorteile von Systemen, die zwar teuer in der Anschaffung sind, jedoch ein hohes Kosteneinsparungspotential im Betrieb haben, können vom Anwender nur schlecht identifiziert werden. Zudem werden das Zukunftspotential und die Innovationsrisiken der einzelnen Systemlösungen stark vernachlässigt, was ebenfalls zu einer verfälschten, weil zu kurzzeitigen Entscheidung führen kann. Trotzdem liefert auch die NKA wertvolle Ansatzpunkte für die Entwicklung einer Bewertungsstrategie für die Elektronikproduktion.

6.3.3 Methoden zur übergreifenden Qualitätsbewertung

Das Konzept einer übergreifenden Bewertung von Qualität durch die Zusammenführung von Kunden- und Unternehmenssicht wird in [111] verfolgt. Ziel dieser Strategie ist die Erarbeitung eines produktlebensphasen-übergreifenden Maßstabs für die Qualität eines Produktes. Hierzu wird ein zweiteiliges Bewertungs- und Kennzahlensystem vorgeschlagen, das eine wirtschaftliche Produktbewertung mit der Bewertung aus Mitarbeiter-, Unternehmer-, und Kundensicht kombiniert.

Die wirtschaftliche Produktbewertung bedient sich der qualitätsbezogenen Kosten, die auf Basis einer Betriebskostenrechnung um weitere Faktoren (z.B. interne und externe Kundenzufriedenheit) ergänzt werden. Anschließend wird ein einheitliches Kennzahlensystem auf gebaut, um die verschiedenen Sichtweisen von Kunde, Lieferant und Abnehmer zu bewerten und in einem Qualitätsvektor abbilden zu können.

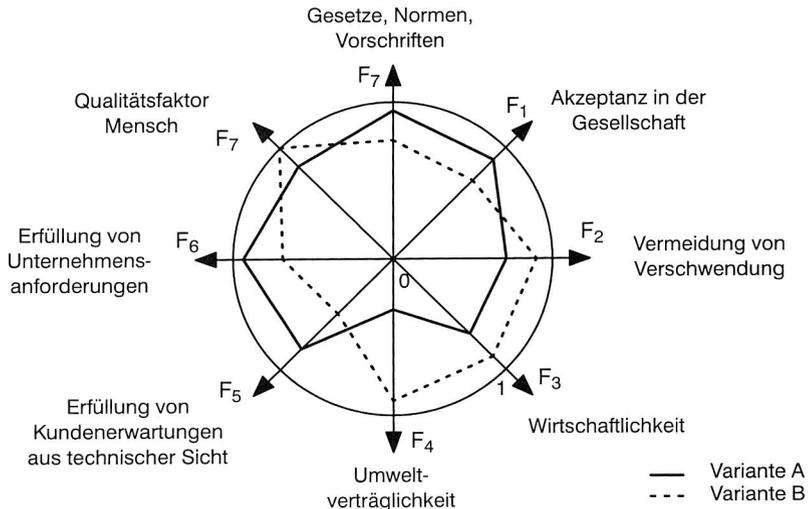


Bild 79: Grafische Darstellung des Qualitätsvektors anhand von acht Bewertungskriterien $F_1 - F_8$ aus Kunden- wie Unternehmenssicht [97]

Der Qualitätsvektor kann grafisch dargestellt oder sein Betrag als Vergleichswert für verschiedene Alternativen ausgewertet werden (Bild 79). Zur Ermittlung der einzelnen Kennzahlen bietet es sich an, auf bereits vorliegende Indizes anderer QM-Methoden zurückzugreifen und diese zu integrieren. Als Beispiele seien hier die folgenden aufgeführt (vergleiche [111]):

- Bewertung aus Unternehmensicht:
Risikoprioritätszahl einer FMEA, Fähigkeitsindizes von Prozessen und Maschinen
- Bewertung aus Kundensicht:
Kennwerte von Kundenanforderungen und Kundenwünschen einer QFD

Die besondere Schwierigkeit liegt in der Bewertung "weicher" oder "unscharfer" Einflussgrößen. Diesem für die Baugruppenfertigung typische Problem wird durch den Einsatz von Fuzzy-Regelbasen und logischen Verknüpfungen mit Fuzzy-Operatoren begegnet. Die relevanten Wechselwirkungen werden – ähnlich wie in den in Kapitel 5.2 vorgestellten eigenen Arbeiten – mithilfe von Fuzzy-Logic-Unterstützung modelliert und bewertet [97]. Die in Bild 79 dargestellten acht Kriterien sind dabei als Bewertungszwecke erster Ebene für einen Qualitätsvektor vorstellbar.

Die ganzheitliche Betrachtungsweise einer integrierten Produktoptimierung, wie sie hier vorgestellt wurde und auch in ähnlichen Modellen zum Ausdruck kommt [15], erstreckt sich über den gesamten Produktlebenslauf. Die Frage, wie diese Modelle in der Praxis auf den vielschichtigen, komplex aufgebauten Prozess der Elektronikproduktion übertragen werden können, gilt es allerdings noch zu klären. Die Integration externer Kenngrößen aus anderen QM-Werkzeugen oder aus übergeordneten Informationssystemen in ein spezifisches Kennzahlensystem ist eine vorstellbare Möglichkeit. Damit kann der Schritt von der Produktoptimierung zur Effizienzbewertung unter bestimmten Randbedingungen erfolgen.

6.3.4 Qualitätscontrolling und "Return of Quality"

Der Begriff "Controlling" stammt aus der Wirtschaftswesen und beschreibt generell Methoden zur monetären Bewertung von Prozessen und Systemen. Die Bewertung erfolgt somit in den Dimensionen Kosten, Wert und Nutzen und ist meist in die betrieblichen Prozesse der Entscheidungsvorbereitung und -findung integriert. Dementsprechend spricht man bei den im folgenden vorzustellenden Instrumenten von Qualitätscontrolling, da hier die qualitätsorientierte Komponente des Controllings im Rahmen der Produkt- und Qualitätsplanung im Vordergrund steht [63].

Der Aufgabenbereich des Qualitätscontrollings (QC) umfasst die Analyse, Planung, Bewertung und Kontrolle des Produkterfolges durch Information über Produktkosten und Produktwert, wobei eine möglichst frühzeitige, parallele Betrachtung von Kosten und Ertrag realisiert werden soll. Ziel des QC-Ansatzes ist die analytische Betrachtung und Bewertung des Nutzens von Qualitätsmaßnahmen. Die Spanne reicht dabei von der Bewertung einzelner qualitätsprüfender Systeme bis hin zur Rentabilität von Total Quality Management [41].

Die Rentabilität umfassender Qualitätsmanagement-Systeme wie TQM kann nur über ein fundiertes Kennzahlenkonzept gemessen und langfristig gesteuert werden [115]. In der Betriebswirtschaft bedient man sich der Kennzahl des "Return on Investment", um die Aufwand-Nutzen-Korrelation einer Investition zu analysieren. Analog wurde für die Ermittlung der Rentabilität von TQM die Kennzahl des "Return on Quality" (RoQ) definiert und als Zielgröße eines umfassenden Kennzahlensystems eingeführt. Die grundsätzliche Kennzahlenstruktur, die sich aus einer Werteebene (repräsentiert durch finanzielle Kennzahlen) und einer Treiberebene (Qualitätskennzahlen) zusammensetzt, ist in Bild 80 dargestellt.

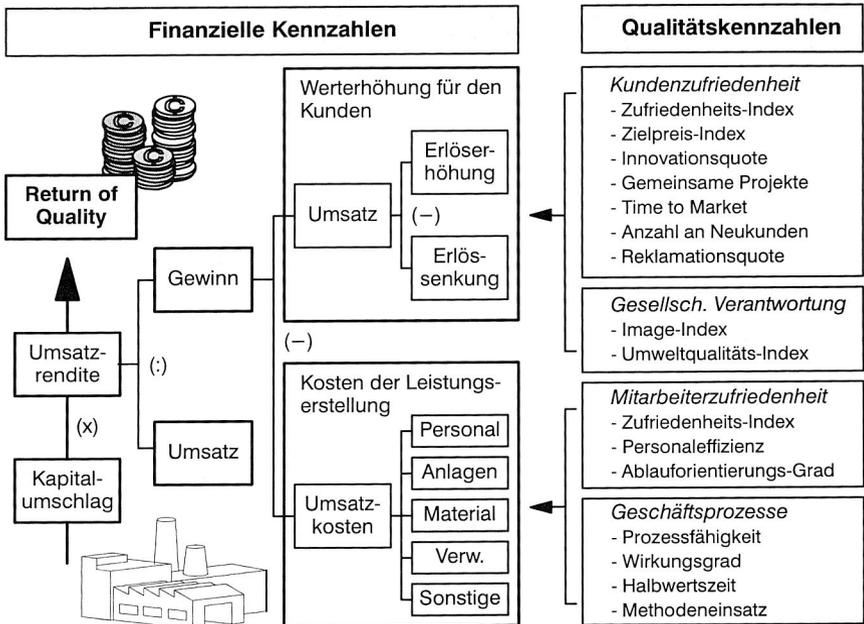


Bild 80: Führungskennzahlensystem zur Aufwand-/Nutzen-Gegenüberstellung, hier repräsentiert durch eine Werte- und eine Treiberebene (vgl. [115])

Danach lässt sich der Gewinn durch die Werterhöhung der Unternehmensleistung für den Kunden sowie durch die Reduzierung der Kosten für z.B. Blind- oder Fehlleistungen erhöhen. Der RoQ drückt somit eine monetäre Funktion der Qualität im Sinne von TQM aus. Auf diese Weise wird die finanzwirtschaftliche Sicht mit der umfassenden qualitätsorientierten Sicht kombiniert, ähnlich einer FMEA werden Ursache-Wirkbeziehungen aufgebaut und bewertet.

In der praktischen Umsetzung der RoQ-Strategie müssen zuerst die konkreten Ziele definiert werden, auf denen das Führungskennzahlensystem aufgebaut wird. Daraufhin werden die systemspezifischen Parameter zur Bewertung der Qualität, also die Qualitätstreiber, ebenso wie die Ergebnisgrößen erarbeitet und strukturiert. Als Ergebnisgrößen im Sinne von TQM können externe Indizes (wie Kundenzufriedenheit, Auftrags-eingänge) oder interne Kenngrößen (wie Mitarbeiterzufriedenheit oder Prozessfehlerquote) eingesetzt werden.

Die besondere Schwierigkeit dieser Methodik liegt in der objektiven Ermittlung und Bewertung der verschiedenen Kennzahlen. Insbesondere die nicht-monetären Größen müssen vordefinierten Zielmaßstäben angeglichen werden. Dies kann mitunter zu erheblichem personellen und monetären Aufwand führen, indem ein internes Bewertungswesen zur Erfassung der Mitarbeiterzufriedenheit aufgebaut werden muss. Andererseits ist die quantitative Ermittlung des langfristigen Unternehmenserfolges natürlich nur schwer mit einfachen, auf kurzfristigen Zielen basierenden Kennzahlen möglich. Hier einen für die Praxis umsetzbaren Mittelweg zu finden, ist in Anbetracht der Komplexität der untersuchten Objekte schwierig. Die in [115] vorgestellten Umsetzungsbeispiele verdeutlichen daher auch, dass die Evaluierung der Rentabilität von TQM anhand des "Return of Quality" ein durchaus geeignetes, weil mächtiges Werkzeug ist. Gleichwohl muss dieses Kennzahlensystem in der konkreten Anwendung auf das betriebliche Geschehen angepasst werden, welches mitunter von einfacheren Strukturen zur Datenerfassung und -auswertung geprägt ist.

6.4 Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsberechnung

6.4.1 Methoden der Investitions- und Kostenrechnung

Die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Technologien oder Prozessen basiert in der Praxis häufig auf traditionellen Kostenrechnungsmethoden. Je nach Zeithorizont und betrachtetem Objekt unterscheidet man *A-Priori-Verfahren* und *A-Posteriori-Verfahren* [109]. A-Priori-Verfahren, wie die Investitionsrechnung, dienen zur frühzeitigen Erfassung von Wirtschaftlichkeitsinformationen. Die Aussagekraft der Ergebnisse einer Investitionsrechnung ist jedoch erheblich eingeschränkt, die Investitionsrechnung ist hier als Planungsmethode zu sehen, die in starkem Maße von der Qualität der zu Verfügung stehenden Kostengrößen abhängt. Ebenso bleiben diejenigen Größen unberücksichtigt, die nicht direkt mit Kostenkennzahlen bewertbar sind. Hierzu wurde von [57] die Gewichtung dieser Kriterien mithilfe einer externen Analyse vorgeschlagen. Der Gedanke einer Kombination der Investitionsrechnung mit einer Nutzwert-Analyse zur Bewertung nicht-monetär quantifizierbarer Kriterien wird in Kapitel 7.2.2 noch einmal aufgegriffen.

Im Gegensatz dazu erlauben A-Posteriori-Verfahren wie die Bilanz- oder Prozesskostenrechnung eine sehr detaillierte Bestimmung wertmäßiger Zusammenhänge. Da zum Zeitpunkt der Kostenrechnung alle relevanten Daten aus dem Produktionssystem vorliegen, ist zwar die zeitnahe Erfassung und Bewertung der Kostensituation möglich, ein schnelles Reagieren im Sinne einer präventiven Maßnahme zur Senkung der Kosten ist jedoch erschwert, da das bewertete System bereits realisiert ist.

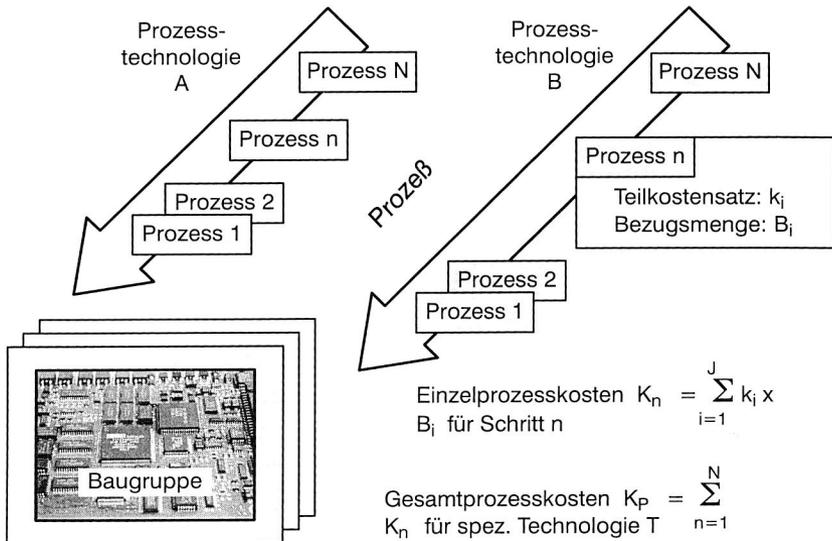


Bild 81: Grundlegende Struktur der Prozesskostenermittlung (vgl. [13])

In der industriellen Praxis haben sich in den letzten Jahren diejenigen Verfahren durchgesetzt, die eine monetäre Bewertung eines einzelnen Prozessschrittes auf der Basis der vorliegenden Prozess- und Materialkosten durchführen. Bei der klassischen Vollkostenrechnung findet eine Aufteilung in Kostenarten- und Kostenstellenrechnung statt. Die Zuordnung der anfallenden Kosten auf die Kostenträger erfolgt bei den Einzelkosten direkt, bei den Gemeinkosten über Zuschlagssätze, die im Rahmen der Kostenstellenrechnung und des Betriebsabrechnungsbogens ermittelt werden [57]. Da diese Art der Zuschlagsrechnung gerade bei komplexen, flussorientierten Fertigungsstrukturen problematisch ist, werden alternativ Methoden der Teilkostenrechnung eingesetzt, bei denen eine weitere Aufteilung der Gemeinkosten in leistungs- bzw. losgrößenabhängige und -unabhängige Kostensätze erfolgt [110].

Beim *Activity Based Costing* (ABC) werden die Materialkosten den Kosten der Fertigung zugeschlagen. Dieser Typ der Prozesskostenrechnung erlaubt eine verursachungs-

gerechte Verrechnung aller Kosten. Betrachtet man z.B. die Bestückung mit der Zielgröße "Gesamtkosten für die Bestückung einer Leiterplatte", so ergeben sich diese aus den gesamten Materialkosten plus den Bestückkosten pro Bauelement, multipliziert mit der Zahl der Komponenten. Die Bestückkosten als die reinen Betriebskosten ergeben sich aus den Gesamtkosten (Abschreibungen, Personalkosten, Nebenkosten) dividiert durch die Anzahl verarbeiteter Komponenten. Man kann die Strukturierung noch verfeinern, indem die Bestückkosten in Bauelementgruppen aufgeteilt werden.

Die Kostenabschätzung mit *Real Time Costing* (RTC) geht einen Schritt weiter und analysiert die Kostenstrukturen mit Bezug zu einer realen Fertigungslinie. Damit ist eine Ermittlung aktueller Werte möglich, was insbesondere für den Vergleich verschiedener Systeme oder die Kostenwirksamkeit einer Prozessveränderung interessant ist. Das RTC ist eine einfache, jedoch zeitaufwendige Methode, da die relevanten Daten direkt erfasst und dokumentiert werden müssen. Da jedoch nicht die (zeitunabhängigen) Betriebskosten, sondern eine direkte, aktuelle Gewinn-Differenzierung ermittelt werden kann, ergeben sich zusätzliche Vorteile für eine Bewertungsstrategie [66]. Die Gewinn-Differenzierung bezieht sich auf den Gewinn, den eine Maschine oder ein Prozess erwirtschaften kann. Damit steht jedoch eine wesentlich mächtigere Kenngröße zur Verfügung, die objektiv bewertbare, monetäre Aussagen trifft. Gerade bei der Evaluation innovativer Technologien entsteht aus höheren Betriebskosten meist auch ein höherer Ertrag, der mit herkömmlichen, statischen Methoden der Betriebskostenrechnung nicht berücksichtigt wird.

6.4.2 Simulationsgestützte Kostenanalyse

Die traditionelle simulationsunterstützte Produktionsplanung und -steuerung (PPS) verwendet als Bewertungsbasis ausschließlich technologische Größen. Um eine betriebswirtschaftlich fundierte Entscheidung treffen können, muss das der Fertigungssimulation zugrundeliegende Kennzahlensystem um Kostenfaktoren erweitert werden. Die Entwicklung eines simulationsorientierten Kostenrechnungsansatzes, wie sie unter anderem in [95] vorgestellt wird, schließt diese Lücke. Ziel ist die Integration von Kostenkennzahlen (Stundensätze, Stückkosten) in die Planung technischer Systeme mittels geeigneter, simulationstauglicher Ansätze [57].

Da eine Simulationsanalyse sehr aktuelle, realistische Planungsdaten bereitstellt, bietet sich die Anwendung von Prozesskostenmodellen wie RTC (vgl. Kap.6.4.1) an, da diese wiederum auf zeitnahe Daten für die Analyse angewiesen sind. Das Verrechnungsschema ergänzt die während der Fertigungssimulation ermittelten Kenngrößen (Durchlaufzeiten, Pufferbestände, etc.) um die dazugehörigen Kostenfaktoren (bereichsbezogene Bearbeitungskosten, Stückkosten, etc.). Diese zustandsspezifische Kostenverursachung berücksichtigt ebenso Gemeinkosten und ermöglicht eine Verrechnung

indirekter Bereiche, indem die unterschiedlichen Prozess- oder Prüfzeiten Beachtung finden [95].

Eine weitere Möglichkeit zur Integration von Kostenrechnungsmodulen in bestehende Simulationssysteme wird am Lehrstuhl FAPS verfolgt. Dazu wird der Ansatz nachgeschalteter Kostensimulatoren verfolgt, bei denen die Verrechnung von Kosten nicht in der Systemsimulation selbst, sondern in einem nachgeschalteten System erfolgt, das auf den Leistungsdaten der Simulation aufsetzt [17].

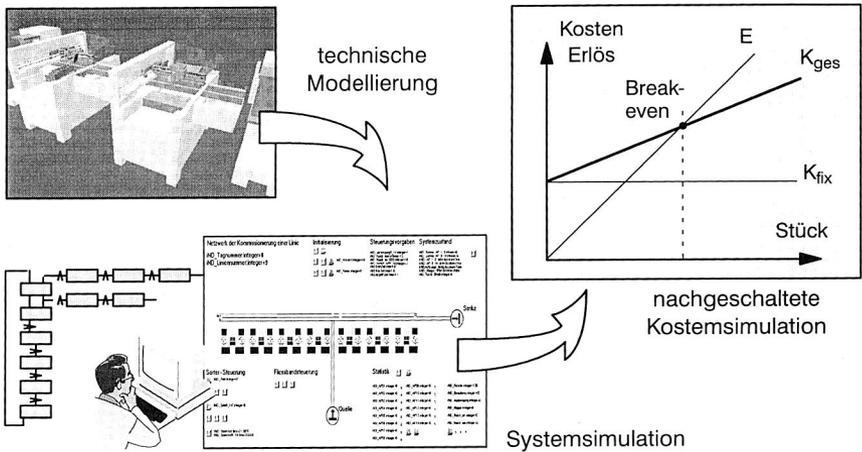


Bild 82: Ablauf der simulationsgestützten Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die so gewonnene Kostentransparenz erweitert die Beurteilung von Maßnahmen zur Planung bzw. Umgestaltung von Produktionsstrukturen (Bild 82). Ebenso können strategische Entscheidungen wie Make-or-Buy durch kostenorientierte Kennzahlen unterstützt werden.

Das entscheidende Defizit beim Einsatz von Simulationsmodellen zur Qualitäts-Kosten-Bewertung liegt jedoch in der mangelnden Qualitätstransparenz. Die technologischen Steuergrößen aus dem Simulationsmodell werden zur Optimierung von Leistungskenngrößen wie Durchlaufzeit oder Pufferverhalten eingesetzt. Qualitätsgrößen, wie der Anteil an Nacharbeit oder die Pseudofehlerrate im Prüffeld, können mit heutigen Simulationsmodellen nur unzureichend abgebildet werden. Somit ist eine durchgehende Bewertung von Qualitäts-Kosten-Strukturen auf Basis von Simulationsverfahren mit den derzeit eingesetzten Methoden nicht realisierbar.

6.4.3 Qualitätskostenmodelle

Die Anwendung von Qualitätskostenmodellen zur Ermittlung optimaler Prüfstrategien basiert auf der in der heutigen Baugruppenfertigung vorherrschenden Systematik, dass zu jedem Fertigungsschritt ein integrierter bzw. nachfolgender Prüfschritt gehört. Wesentliche Elemente dieser Prozessfolge sind die Kontrolle der Fertigungsqualität und die Ermittlung von Prozessfähigkeiten oder Fehlerquoten. Das zu lösende Optimierungsproblem besteht nun darin, aus den punktuell auftretenden Fehlerbildern sowie aus den anfallenden Qualitätskosten eine optimale Strategie für den Einsatz von Prüfsystemen abzuleiten [87].

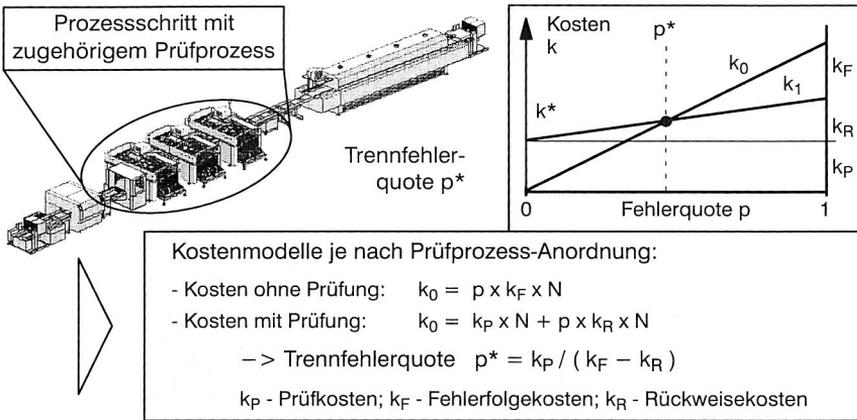


Bild 83: SMD-Linienschema und zugehörige Kostenmodelle [75]

Ausgehend von dem in Bild 83 dargestellten SMD-Linienschema, werden jedem technologischen Prozess die Prozesskosten, potentielle Prüfkosten und Rückweiskosten (Kosten für Reparatur und erneute Prüfung) zugewiesen. Mit Einführung der spezifischen Fehlerquote p lassen sich folgende grundsätzliche Modelle ableiten [75]:

- Modell 1: Prüfung nach jedem Fertigungsschritt
Unmittelbar nach jedem Prozessschritt wird eine Prüfung durchgeführt. Die gefundenen Fehler durchlaufen eine Rückweiseschleife und gelangen nicht direkt in den nächsten Prozessschritt.
- Modell 2: Prüfung am Ende der Linie
Die in den einzelnen Prozessschritten entstandenen Fehler werden nicht detektiert und somit erst im Prüffeld nachgearbeitet.

Zwischen diesen beiden Modellen sind natürlich weitere Kombinationen denkbar, die je nach Fehlerquote, Prüfschärfe oder auch Kostenverteilung eine optimierte Gesamtkostensituation ergeben. Letztlich ergibt sich je nach gewählter Variante eine bestimmte Kostensituation, die durch die Bestimmung der Trennfehlerquote p^* analysiert werden kann (vgl. Bild 83). Die Trennfehlerquote ist dabei als Maßstab anzusehen, ab welcher Fehlerquote eine direkte prozessspezifische Prüfung kostengünstiger ist als die Weiterverarbeitung der fehlerhaften Baugruppe bis zum Endtest.

Die Erweiterung dieses einfachen Modelles um eine exakte Kalkulation der Folgekosten basiert auf der expliziten Betrachtung des Fehlerfolgeprozesses mit dessen nachgeschaltetem Prüfprozess. Dadurch ist eine bessere Bestimmung der Fehlerfolgekosten möglich, gleichzeitig kann die Variation zweier voneinander unabhängiger Prüfsysteme evaluiert werden. Weitere Ergänzungen um veränderliche Fehlerquoten (z.B. durch Schlupf, Pseudofehler) oder von der Losgröße abhängige Prozesskosten ermöglichen eine beliebig komplexe Berechnung der einzelnen Kostenfaktoren und Trennfehlerquoten entlang der Prozesskette [75].

Der Fokus bei dieser Betrachtung der verschiedenen Kostengruppen liegt auf einer typbezogenen Kalkulation, d.h. es wird eine stark produkt- bzw. losbezogene Optimierung durchgeführt. Dies steht aber in gewissem Widerspruch zur kostenstellenbezogenen Prozesskostenrechnung, die auf kaufmännischer Seite in der Regel zur Kalkulation eingesetzt wird. Auch die Anbindung an bestehende Qualitätsdaten-Informationssysteme, wie sie in Kapitel 5 oder in [31] vorgestellt werden, ist aufgrund der stark losbezogenen Orientierung schwierig. Gleichwohl stellt die Qualitätskostenmodellierung mit den hier vorgestellten Modellen eine interessante Alternative zur schnellen und einfachen Bewertung des Einsatzes von Prüfsystemen dar.

6.4.4 Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Produktionsstrategien

Ausgangspunkt der in [98] entwickelten Wirtschaftlichkeitsbeurteilung ist der Gedanke, dass die Einführung neuer Technologien den Produktionsablauf grundlegend verändert und sehr hohe Investitionskosten nach sich zieht. Damit ist eine sorgfältige Planung und Beurteilung der Erfolgsaussichten unbedingt notwendig. Die Methoden der herkömmlichen Investitionsrechnung sind in diesem Zusammenhang jedoch sehr unbefriedigend, weil sie strategische Gesichtspunkte nicht berücksichtigen und neue Technologien doch gerade in dieser Hinsicht langfristige Vorteile bringen können. Ferner lassen sich schwer quantifizierbare Faktoren wie höhere Flexibilität oder verbesserte Wettbewerbsfähigkeit nicht erfassen. Schließlich wirft gerade eine höhere Systemflexibilität das Problem auf, dass keine gesicherten Erkenntnisse bezüglich der zukünftigen Ein- und Auszahlungsströme zur Verfügung stehen.

Der aus diesen Problemstellungen entstandene Ansatz soll sowohl strategische als auch rechnerische Gesichtspunkte berücksichtigen, da nur die Kombination beider

Faktoren zu einer sinnvollen Investitionsentscheidung führen kann. Bild 84 zeigt das Grundkonzept im Überblick.

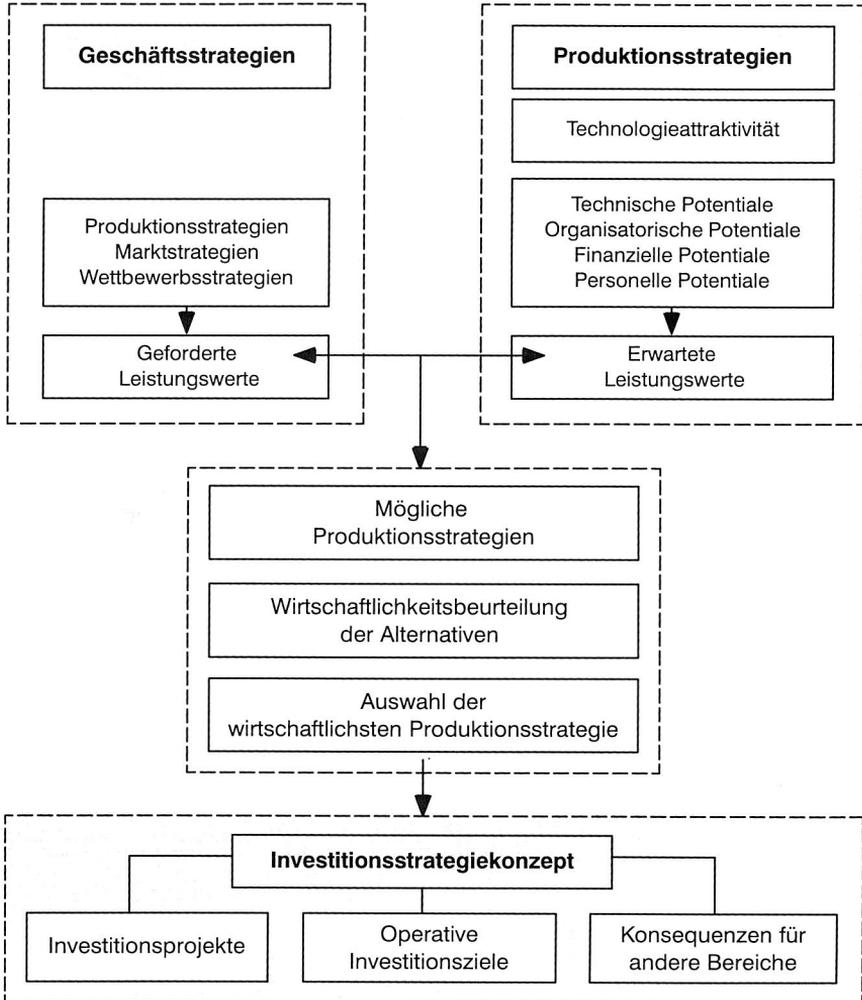


Bild 84: Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Produktionsstrategien [98]

Ausgehend von den festgelegten Produkt-, Markt- und Wettbewerbsstrategien ist es Aufgabe des Unternehmens, die Leistungsanforderungen an das zukünftige System zu definieren und parallel dazu mögliche Strategien zu erarbeiten, die sich mit dem vorhandenen technischen, organisatorischen, finanziellen und personellen Potential in Einklang bringen lassen und zudem über eine ausreichende Technologieattraktivität verfügen. Definitionsgemäß ist eine Technologie dann attraktiv, wenn die Risiken gering und die Zukunftschancen groß sind. Das Ergebnis beider Schritte ist ein Katalog von Leistungs- und Kostenkriterien, der als Grundlage für eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsbeurteilung der unterschiedlichen Lösungsalternativen herangezogen wird. Dazu wird ein Kennzahlensystem eingeführt, das es dem Anwender erlaubt, die wirtschaftlichste der angebotenen Lösungen zu identifizieren (vgl. Bild 76). Anschließend wird für die ausgewählte Alternative ein Investitionsstrategiekonzept entworfen und mit Hilfe der klassischen Investitionsrechnung über die Anschaffung der individuell passenden Systemkomponenten (z. B. Maschinen) entschieden.

Im Rahmen der hier vorgestellten Entscheidungsmethode werden gleichzeitig Risiken und Chancen, aber auch Aspekte der klassischen Investitionsrechnung berücksichtigt, da Investitionsentscheidungen im allgemeinen nur unter Berücksichtigung möglichst vieler quantifizierbarer und nicht quantifizierbarer Einflussgrößen getroffen werden können. Durch die methodische Vorgehensweise und das Kennzahlensystem wird der Anwender veranlasst, sich über seine Bedürfnisse und Erwartungen Gedanken zu machen; gleichzeitig wird dessen Entscheidungsfindung erleichtert. Doch wie bei ähnlich konzipierten Verfahren, spiegeln solche Kennzahlen scheinbar klare Lösungen vor, die sich jedoch bei eingehender Betrachtung unter Umständen nicht bestätigen lassen [45]. Ferner wird die Methodik der Wirtschaftlichkeitsbeurteilung bei einer großen Anzahl von Kriterien leicht unübersichtlich und kann zu Schwierigkeiten bei der Gewichtung führen, weil alle Kriterien absolut und nicht im Vergleich zu anderen bewertet werden. Speziell der letzte Kritikpunkt zeigt deutlich, dass die oben vorgestellte Methode – exemplarisch für andere, ähnlich konzipierte Bewertungsstrategien – im theoretischen Ansatz durchaus erfolgversprechend aufgebaut ist, in der Umsetzung für die Baugruppenfertigung jedoch erhebliche Defizite und Probleme aufweist. Diese Defizite begründen sich unter anderem auf der unzureichenden Fähigkeit der Methodik zur Erfassung komplexer Kennzahlensysteme und zur notwendigen Berücksichtigung subjektiver, qualitativer Kriterien.

6.5 Vergleich der Verfahren und Darstellung der Defizite

Betrachtet man die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bewertungsmethoden, so ergeben sich verfahrensspezifische Merkmale, die sich insbesondere aus den beiden Haupteinsatzbereichen ableiten. Technologische Bewertungsverfahren zeichnen sich durch eine ausgeprägte Fokussierung auf die Prozesse, deren Wechselwirkungen so-

wie Folgen auf das Qualitätsgeschehen im Prozess aus. Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsbeurteilung dagegen betrachten die wesentlichen Kostenwirksamkeiten im Prozess und leiten daraus Optimierungspotentiale ab. In Bild 85 werden die relevanten Bewertungsmethoden klassifiziert sowie hinsichtlich der vier Hauptbereiche Bewertungsstrategie, Qualitäts-Kosten-Relevanz, Rechnerunterstützung und baugruppenspezifische Anwendbarkeit gegenübergestellt.

Methoden	Bewertungsstrategie			Qualität / Kosten		Rechner-einsatz		Prozesse der EP	
Nutzen-Analyse nach VDI 3780	●	●	○	○	◐	○	○	●	◐
Risiko-Analyse, FMEA	●	○	●	●	○	○	◐	●	○
Nutzwert-Kosten-Analyse	●	○	◐	○	●	○	●	●	◐
Übergreifende Qualitätsbewertung	◐	◐	○	●	●	○	◐	●	◐
Qualitätscontrolling, RoQ	◐	◐	●	◐	●	●	●	◐	◐
Investitions- und Kostenrechnung	○	●	◐	○	○	◐	●	◐	○
Simulationsgestützte Kostenanalyse	◐	●	◐	●	◐	●	●	○	○
Qualitätskostenmodelle	○	●	◐	●	●	◐	●	●	◐
Wirtschaftlichkeitsbeurteilungen	◐	●	○	◐	○	◐	◐	◐	○

● Möglich
 ◐ Bedingt möglich
 ○ Nicht möglich

Kriterien

- Berücksichtigung technischer Kriterien
- Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien
- Bewertung komplexer Systeme
- Ableitung von Optimierungspotentialen
- Fragestellungen zu Aufwand/Nutzen
- Anbindung an externe Systeme
- Rechnergestützte Durchführung
- Anwendung in der Baugruppenfertigung
- EP-spezifische Bewertungsmerkmale

Bild 85: Vergleichende Klassifizierung relevanter Bewertungsmethoden zur technisch-wirtschaftlichen Analyse

Die einseitige Fokussierung auf wirtschaftlichen Aufwand oder auf technologischen Nutzen ist gleichzeitig ein wesentliches Defizit vieler der hier vorgestellten Methoden. Eine ganzheitliche Bewertung ist nur auf Basis eines komplexen Kennzahlensystems möglich, das beide Aspekte gleichwertig berücksichtigt. Bestehende Methoden weisen diese Komplexität in der Regel nicht auf und beschränken sich auf Einzelaspekte. Das große Problem herkömmlicher betriebswirtschaftlicher Bewertungsmethoden liegt darin, dass oftmals mit Kennzahlen gearbeitet wird, die weder das Zukunftspotential einer Technologie berücksichtigen noch die anfänglichen Defizite einer Innovation transparent machen. Technologische Bewertungsmethoden weisen dagegen Mängel bei der betriebsinternen und bei der externen, d.h. kundenbezogenen Technologiefolgenabschätzung auf.

Daher ist auch die direkte Betrachtung von Qualität-Kostenwirksamkeiten mit vielen Methoden nicht oder nur stark eingeschränkt durchführbar. Da der Anwendungsschwerpunkt der meisten Methoden in der Planung von Prozessen oder der Vorkalkulation von Kosten liegt, ist die Ableitung konkreter Optimierungspotentiale schwierig. Der Nutzen liegt eindeutig nicht in der Optimierung, sondern in der monetären Bewertung von Prozessen bzw. Produkten. Bei der Durchführung der Bewertung kommt dies auch dadurch zum Ausdruck, dass oftmals standardisierte Kennzahlengrößen zum Einsatz kommen, mit denen umfassendere Fragestellungen nicht hinreichend beantwortet werden können.

Eine rechnerunterstützte Durchführung von Evaluations- oder Analysemethoden wird heutzutage in vielen technologisch geprägten Bereichen erwartet und muss daher auch von den hier betrachteten Methoden gefordert werden. Insbesondere die rechnerunterstützte Zuweisung von Gewichtungsfaktoren und der Aufbau von Klassifizierungshierarchien können den Benutzer bei der Bewertung komplexer Systeme stark unterstützen. Einige Systeme bieten hierzu Werkzeuge auf Basis verfügbarer Standardsoftware (Datenbanksysteme, Kalkulationsprogramme) an, mit denen einfache Algorithmen rechnerunterstützt entwickelt und ausgewertet werden können. Die im Sinne der ganzheitlichen Analyse geforderte Beurteilung von Aufwand-Nutzen-Wirksamkeiten innovativer Technologien bedingt jedoch auch Datenkonsistenz zwischen wirtschaftlicher und technischer Ebene sowie Schnittstellen zu externen Systemen. Beide Forderungen werden nur von wenigen Strategien (z.B. Qualitätscontrolling oder übergreifende Qualitätsbewertung) erfüllt. Diese Verfahren weisen allerdings teilweise erhebliche Schwächen in der industriellen Umsetzung auf.

Generell kann festgestellt werden, dass die vorhandenen Ansätze und Methoden nur mit großen Einschränkungen auf die Baugruppenfertigung übertragbar sind. Viele der Systeme scheitern am hohen Komplexitätsgrad der Elektronikproduktion. Die Bewertung neuer Technologien unter gleichsam wirtschaftlichen wie technologischen Gesichtspunkten bedingt Verfahren, die beide Bereiche gleichberechtigt umfassen und in einer Gesamtmethodik überführen. Die hierzu notwendige – weil sinnvolle – rechnerintegrierte Anbindung an Dateninformationssysteme ist ebenso ein herrschender Mangel, wie die stringente Umsetzung einer Methodik für die Effizienzanalyse von Prozessen und innovativen Technologien.

7 Entwicklung eines Bewertungssystems zur Effizienzanalyse alternativer Prozessketten

Aufbauend auf den im vorherigen Kapitel diskutierten Defiziten beim Einsatz gebräuchlicher Bewertungsmethoden wird im Folgenden eine für die spezifischen Belange der Elektronikproduktion ausgelegte ganzheitliche Methodik vorgestellt. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges Grundkonzept für eine Qualitäts-Kosten-Bewertungssystematik entwickelt, für die spezifischen Anforderungen aus dem technischen und wissenschaftlichen Umfeld optimiert und in einem Softwarepaket "Q-Value" realisiert.

Das System "Q-Value" vereint dabei technologische und ökonomische Bewertungsstrategien und erlaubt somit erstmals die integrierte Betrachtung von Kosten- und Qualitätsaspekten im komplexen Bewertungsumfeld der Baugruppenfertigung. Die hierfür neu definierten Effizienz-Kennzahlen unterstützen wesentlich die hohen Anforderungen hinsichtlich Konsistenz, Datentransparenz und Umsetzbarkeit der verschiedenen Bewertungsszenarien. Die grundlegende Vorgehensweise sowie die hierfür entwickelten Lösungsalternativen werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt und diskutiert. Im abschließenden Abschnitt werden einige der Systemmöglichkeiten anhand von Praxisbeispielen dargestellt und weitere Nutzungspotentiale durch die Anbindung an externe Systeme erläutert.

7.1 Grundlegende Anforderungen aus dem technologischen Umfeld

Die in Kapitel 6.5 erarbeiteten wesentlichen Defizite heutiger Bewertungssysteme bedingen die Konzeption einer ganzheitlichen Methodik zur Technologiebewertung. Ganzheitlich bedeutet unter diesem Blickwinkel, dass technologie- oder prozessspezifische Merkmale gleichwertig mit ökonomischen, kostenorientierten Merkmalen betrachtet werden. Diese für die Baugruppenfertigung maßgebliche Forderung wurde bisher in der hier diskutierten Form nur sehr unzureichend berücksichtigt und muss daher als grundsätzliche Zielsetzung in das zu projektierende System aufgenommen werden.

Betrachtet man die Randbedingungen, unter denen der potentielle Technologiewechsel bewertet und gegebenenfalls durchgeführt werden kann, so ergibt sich eine Technologie- und eine Kostenebene. Beide Ebenen bestimmen die Wertigkeit einer neuen, innovativen Technologie im Vergleich zum bestehenden Prozess (Bild 86). Je nach Entscheidungsverlauf ist eine schnelle qualitative Vorauswahl möglich, wenn z.B. die neue Technologie höhere Kosten bei potentiell minderer Qualität verursacht.

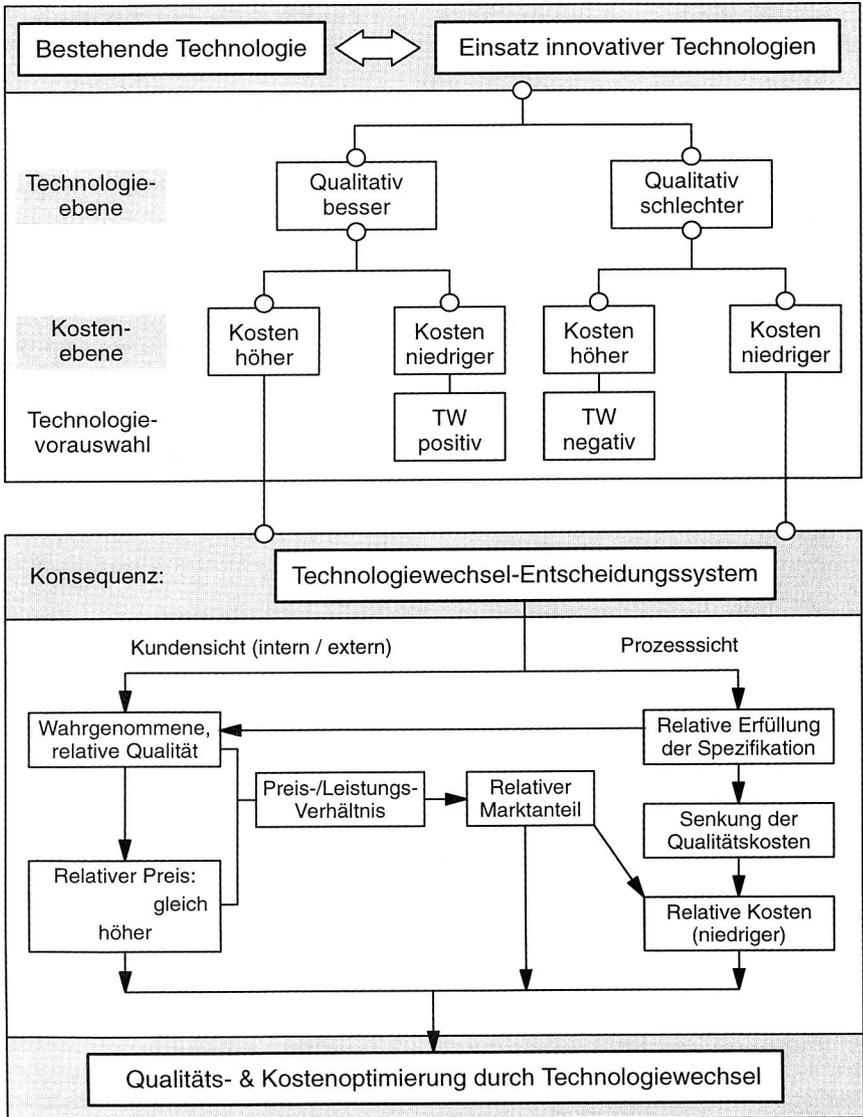


Bild 86: Ablauf- und Entscheidungsdiagramm zur strategischen Unterstützung der Technologie-Auswahl (TW: Technologiewechsel)

Für die weitaus meisten Fälle ist jedoch ein Technologiewechsel-Entscheidungssystem notwendig, das auf Basis quantitativer Aussagen das optimale Vorgehen für einen konkreten Anwendungsfall auswählt. Dabei müssen sowohl die technischen Forderungen aus dem Prozess selbst (z.B. Spezifikationen, beherrschtes Prozessverhalten) wie auch die Kundenforderungen (z.B. wahrgenommene Qualität, Preis-/Leistungsverhältnis) berücksichtigt werden.

Weitere Anforderungen ergeben sich aus dem industriellen Umfeld, das nach klar strukturierten, einfach aufgebauten Lösungsmethoden verlangt. Hierbei ist insbesondere die Nutzung bereits aus anderen Systemen vorliegender Daten anzusprechen, ebenso die Realisierung des Gesamtsystems in einer geeigneten benutzergeführten Bedieneroberfläche.

7.2 Struktur der Bewertungsstrategie

Das in Bild 86 dargestellte durchgängige Ablaufdiagramm für ein Technologiewechsel-Entscheidungssystem wurde in die in Bild 87 abgebildete zweistufige Struktur überführt. Die bewusste Trennung in zwei separate Module erlaubt dem Anwender eine schnelle und übersichtliche Durchführung, der Bewertungshorizont kann im Vorfeld durch Auswahl des bestgeeigneten Moduls gezielt gewählt werden. Beide Module werden ebenfalls datentechnisch entkoppelt und kommunizieren über standardisierte Schnittstellen. Dadurch und durch die konsistente Anbindung an externe Informationssysteme, ist trotz der Modularität eine durchgängige Bearbeitung der beiden Module "Technologiewechselbewertung" und "Dynamische Effizienzanalyse" gewährleistet.

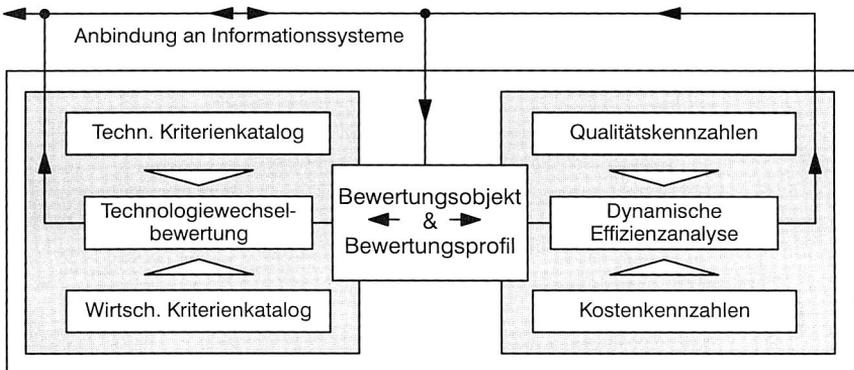


Bild 87: Struktur der Bewertungsstrategie mit den zwei wesentlichen Zielsetzungen "Technologiewechselbewertung" und "Dynamische Effizienzanalyse"

7.2.1 Definition geeigneter Kennzahlen und Bewertungsprofile

Als übergreifende Kennzahl für die beiden oben vorgestellten Bewertungsmodule wurde die "Technische Effizienz" definiert. Effizienzkennzahlen beschreiben generell das Verhältnis von erzielt oder erzielbarem Nutzen zu notwendigem Aufwand, der finanzieller, zeitlicher oder materieller Natur sein kann. Übertragen auf die hier vorliegende Situation lässt sich die technische Effizienz E_t zur Bewertung qualitätssichernder bzw. -steigernder Maßnahmen einsetzen. E_t definiert sich hierbei als das Verhältnis der wirksamen Prozessverbesserungen zu dem dafür notwendigen Aufwand.

Bild 88 verdeutlicht die Integration und Anwendung auf die beiden bereits vorgestellten Evaluationsstufen. Die jeweilige Evaluationsstufe kommt dabei auch in der Umsetzung der technischen Effizienz zum Ausdruck. Will der Benutzer gezielt eine neue, noch nicht realisierte Situation bewerten, so wird er die Prognosesicht wählen, um eine Offline-Analyse durchzuführen. Die Bewertung wird sich dabei auf die Betrachtung des technischen Potentials im Verhältnis zum abschätzbaren Umsetzungsaufwand konzentrieren (Bild 88 links).

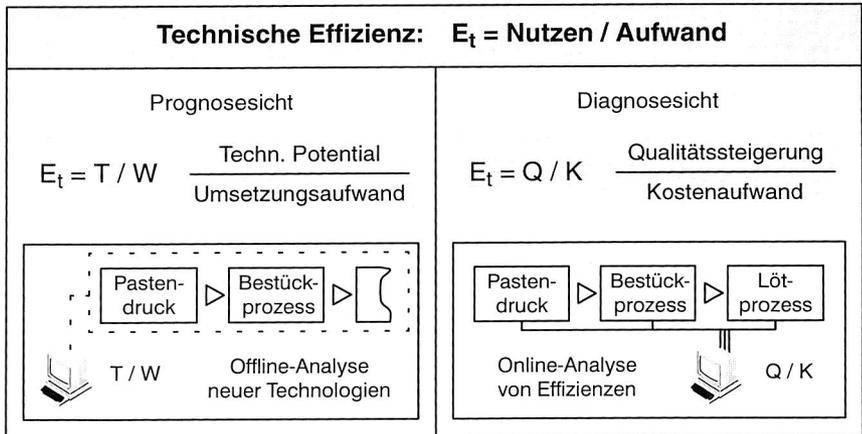


Bild 88: Definition der "Technischen Effizienz" und deren Einsatz in der jeweiligen Evaluationsstufe

Die Diagnosesicht wurde hingegen für die Analyse einer aktuell produzierten Baugruppe oder der dazugehörige Fertigungsumgebung konzipiert. Zielsetzung ist hierbei eindeutig die online-Analyse von Prozessverbesserungen durch Effizienzen (Bild 88 rechts). Die Kenngrößen ergeben sich dabei aus den real erzielten Prozessverbesserungen in Relation zum dazu notwendigen, monetär bewerteten Aufwand. Diese Sicht-

weise ist im besonderen auch für die Nutzung prozessbegleitender Daten ausgelegt und ermöglicht somit erhebliche Synergieeffekte durch die Anbindung an Qualitätsdaten-Informationssysteme, wie sie im vorherigen Kapitel ausführlich vorgestellt wurden.

Ausgehend von dem so definierten primären Bewertungskriterium wird eine Bewertungshierarchie erstellt, wobei sowohl vertikal wie horizontal strukturierte Kenngrößen definiert und gewichtet werden. Ähnlich dem in Kapitel 6.3.4 vorgestellten Führungszahlensystem zur Aufwand-/Nutzen-Gegenüberstellung ermöglicht diese Vorgehensweise eine umfassende Analyse, die finanzwirtschaftliche wie qualitätsorientierte Sichten berücksichtigt (vg. auch Bild 80).

Das so erzeugte Bewertungsprofil auf Basis der technischen Effizienz dient als Grundlage für die spätere Evaluation. Es umfasst sowohl die Struktur wie auch die technischen und wirtschaftlichen Inhalte der Einzelkenngrößen, die je nach aktuell zu bewertender Situation konfiguriert und parametrisiert werden.

7.2.2 Konzept der Technologiewechselbewertung (Prognosesicht)

Die Technologiewechselbewertung spaltet sich, wie bereits im Ablaufdiagramm in Bild 86 dargestellt, in eine Technologie- und eine Kostenebene auf. Die Technologieebene dient zur direkten Berechnung der technische Wertigkeit, wie in Tabelle 9 für eine dreistufige Kriterienhierarchie dargestellt.

Analyse der technischen Wertigkeit						Alternativen			
Prototypisch mit Tabellenkalkulation realisiert						CSP		BGA	
Kriterienhierarchie	k.o.	g ₁	g ₂	g ₃	G	E	W	E	W
1. Prozess		60							
1.1 Prozessstabilität			10						
1.1.1 Realisierung der Prozessfolge				40	2	1	2,4	0,8	2
1.1.2 Realisierung der Prüffolge				40	2	1	2,4	0,5	1
1.1.3 Veränderte Rahmenbedingungen				10	1	1	0,6	0,8	0
1.1.4 Anforderungen an neue Komponenten				10	1	1	0,6	0,8	0
1.2 Qualität									
1.2.1 Anzahl Lötfehler				50	100				
				70	21	0,2	4,2	1	21

Eingabefeld Stufe 1
Eingabefelder Stufe 3
Eingabefeld Stufe 2
Kontrollfeld für Stufe 3 (100%)

Tabelle 9: Strukturierte Analyse der technischen Wertigkeit, dreistufige Matrix zur gewichteten Bewertung von Einzelkriterien

Die oberste Ebene der Kriterienhierarchie repräsentiert dabei als Zielgröße die technische Wertigkeit, während die unteren Ebenen Einzelkriterien abbilden, die gegeneinander gewichtet werden. Die Gewichtung erfolgt dabei nach dem in Tabelle 10 dargestellten Vergleichsverfahren, mit dem auch eine größere Anzahl an Faktoren innerhalb einer Ebene schnell und übersichtlich gewichtet werden kann. Die so definierte Struktur kann dann auf den konkreten Bewertungsfall angewandt werden.

Anford.- Kennz.	Anforderung	Vorzugsanforderung						Häufig- keit	Gewicht %
A	Datenwortbreite	↘						1	10
B	Taktfrequenz	B	↘					3	30
C	Speichergroße	A	B	↘				1	10
D	Festplattengroße	D	D	D	↘			4	40
E	Geschwindigkeit	E	B	C	D	↘		1	10
F	↘	...	
...								...	
...								10	100

*Tabelle 10: Gewichtung mehrere Merkmale untereinander:
Vergleichsverfahren statt Gleichzeitigkeitsbetrachtung [27]*

Die wirtschaftliche Ebene wird durch Kalkulationsverfahren auf Basis von Activity Based Costing (ABC) und Real Time Costing (RTC) dargestellt (die Grundlagen der beiden Kalkulationsverfahren wurden in Kapitel 6.4.1 vorgestellt). Beide Methoden erlauben eine stark an betriebswirtschaftlichen Belangen orientierte Bewertung und eignen sich daher gut für die Bestimmung des Umsetzungsaufwandes. Konzeptionell werden hierbei drei Ansätze unterschieden, die je nach betrachtetem Bewertungsobjekt zum Einsatz kommen können. Zum einen die einfache Investitionsrechnung, die als Planungsinstrument direkten Bezug zur Technologiewechselbewertung besitzt. Zum zweiten eine an ABC angelehnte Kalkulationsmethode, mit der alle anfallenden Aufwendungen für Investitionen, Prozesse und Verbrauchsmaterialien erfasst werden. Schließlich die Abschätzung des Aufwandes auf Basis von Life Cycle Costs-(LCC) Betrachtungen. LCC umfassen alle Kosten, von der Produktionsphase über den Feldeinsatz bis hin zur Entsorgung. Damit geht dieser Ansatz über die reine Prognosesicht hinaus, erlaubt jedoch die Berücksichtigung von Einsatzdaten. Obwohl dies für die Technologiewechselbewertung nicht zwingend notwendig ist, beinhaltet diese Strategie eine direkte Überführung der Daten zwischen den beiden Evaluationsstufen "Prognose mit Hilfe von Offline-Analysen" und "Diagnose durch Online-Analysen". Im Folgenden wird dieser Ansatz wieder aufgegriffen und für die dynamische Effizienzanalyse verfeinert.

gemein definierbaren Bewertungsprofile mit den analysespezifischen Bewertungsobjekten unter Anbindung online erfasster Daten führt zur Effizienzanalyse. Darüber hinaus können die bereits aus der Technologiewechselbewertung vorliegenden Kostendaten integriert werden.

Somit basieren beide Evaluationsstufen "Technologiewechselbewertung" und "dynamischen Effizienzanalyse" auf grundsätzlich ähnlichen Datenstrukturen und Abläufen. Die Verknüpfung erfolgt über einheitliche Bewertungsabläufe und über den direkten Datenaustausch. Das Gesamtkonzept ist somit für eine gezielte Einzelanalyse ebenso wie für die durchgängige Bearbeitung beider aufeinanderfolgender Bewertungsstufen ausgelegt. Im Vordergrund steht dabei stets die gleichrangige Betrachtung von wirtschaftlichen und technologischen Kriterien bzw. Kenngrößen.

7.3 Realisierung des Bewertungssystems "Q-Value"

7.3.1 Implementierung des Kernsystems

Das Kernsystem umfasst die Abbildung der Prozesskette bzw. deren Teilsysteme sowie die hierarchisch strukturierten Bewertungsabläufe der Technologiewechselbewertung. In dieser Ebene von Q-Value legt der Benutzer die prinzipiellen Bewertungsobjekte sowie Kenngrößen technologischer und ökonomischer Art fest, mit denen er im Folgenden arbeitet. Gleichwohl wurde Q-Value konsequent benutzerorientiert realisiert, so dass jede vom Bediener gewünschte Änderung der Bewertungsstruktur schnell und datenkonsistent durchgeführt werden kann. Somit führt die bewusst flexibel ausgelegte Definition von Daten und Zusammenhängen zu keinem Verlust an Übersicht oder Bedienungskomfort.

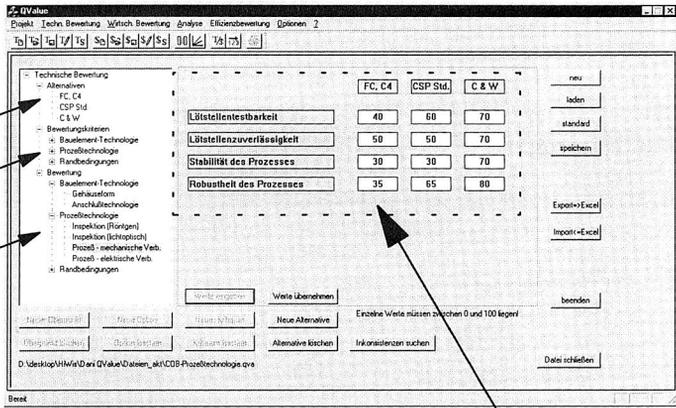
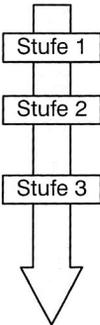
Aufbau der technologischen Kriterienhierarchie

Innerhalb der technischen Bewertung werden zuerst frei definierbare Elemente sowie eine dreistufige Kriterienhierarchie erstellt (Bild 90). Die beiderseitige Unabhängigkeit und die Realisierung von Schnittstellen zu externen Systemen ermöglichen einen sehr hohen Freiheitsgrad bei der Definition der Elemente. Der Benutzer hat die Möglichkeit, eine neue Kriterienhierarchie anzulegen oder eine bereits bestehende zu bearbeiten. Die vertikale Gewichtung der Bewertungskenngrößen untereinander (Stufe 2) erfolgt dabei unabhängig von der horizontalen Gewichtung in Bezug auf die aktuell gewählten Bewertungsobjekte (Stufe 3). Dadurch ist eine hohe Funktionalität gewährleistet, die herkömmliche Systeme dieser Bewertungs Komplexität in der Regel nicht bieten.

Ein Beispiel für die Eingabe einer technologischen Bewertung ist in Bild 90 dargestellt. Die Eingabemaske ist dabei dynamisch von der Bewertungsstruktur abhängig und

stellt die in den vorherigen Stufen festgelegten Parameter und Abläufe dar. Damit hat der Benutzer jederzeit die Möglichkeit, interaktiv Kriterien zu bewerten sowie bereits vorhandene Werte abzurufen und zu editieren. Die Datenkonsistenz wird dabei durch automatische, in die Berechnungsalgorithmen integrierte Testroutinen gewährleistet.

Bewertungsstruktur:



- Stufe 1: Definition der Alternativen
- Stufe 2: Definition & Gewichtung der Kriterien
- Stufe 3: Wechselseitige Bewertung der Kriterien

Eingabemaske für Alternativen, Kriterien und deren Bewertung

Bild 90: Aufbau und Untersetzung der technologischen Kriterienhierarchie

Die Zwischenergebnisse der technologischen Bewertung können direkt für die verschiedenen Alternativen visualisiert sowie über eine Schnittstelle an Microsoft Excel übergeben werden. Gleichzeitig sind alle relevanten Angaben im System gespeichert und stehen für weitergehende Analysen im Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Bewertung zur Verfügung.

Aufbau der wirtschaftlichen Kriterienhierarchie

Die Definition und Quantifizierung der relevanten Kostenverursacher ist Grundlage der wirtschaftlichen Bewertung. Hierbei hat der Benutzer die Möglichkeit, sowohl die zu bewertenden Alternativen, als auch den Typ der Bewertung festzulegen. Die so gewonnene Mächtigkeit und Vielfalt hebt Q-Value deutlich von marktüblichen Systemen ab, bei denen der Benutzer im Vorfeld auf eine sehr geringe Anzahl an Kalkulationsoptionen beschränkt ist.

Die in Bild 91 exemplarisch dargestellte Eingabemaske verdeutlicht den Bewertungsablauf. Die zentrale Eingabemaske enthält die zur jeweiligen Alternative gehörigen Teil-

elemente, deren kalkulierte Kosten sowie weitere Verknüpfungen, mit denen der Benutzer direkt via Internet zusätzliche Informationen abrufen kann. Weitere Optionen, wie die aktuell gewählte Kalkulationsmethode oder grundlegende Kennzahldefinitionen, sind über zusätzliche externe Eingabemasken steuerbar (Bild 91 unten links).

Durch die Auswahl der bestgeeigneten Kalkulationsoption verfügt der Bediener über die Möglichkeit, die gewünschten Kennwerte gezielt mit der Bewertungsaufgabe abzustimmen. Es stehen dabei drei grundsätzliche Methoden zur Verfügung auf Basis von Investitionskosten, Prozesskosten und Life Cycle Costs (d.h. die Gesamtkosten, die durch Herstellung, Einsatz und Entsorgung eines Produktes entstehen [112]). Je nach gewählter Option sind ausgewählte Angaben zur Kostenberechnung erforderlich, die dynamisch im System vom Benutzer abgefragt werden. Exemplarisch ist in Bild 92 die Ermittlung auf Basis von Life Cycle Costs dargestellt, die zu verschiedenen spezifischen Vorgaben führt. Zum einen wird als Primärkennwert "Gesamtverursachte Kosten pro Baugruppe" eingestellt, zum zweiten wird der Bediener explizit zur Eingabe der Anzahl produzierter, im Feld ausgefallener oder reparierter Baugruppen und der dadurch entstehenden Kosten aufgefordert. Analog werden bei der Berechnung der Investitions- oder Prozesskosten u.a. die Primärkennwerte "Investitionsgesamtkosten" bzw. "Prozesskosten/Stunde" dargestellt. Diese Kennwerte dienen insbesondere als Planungsgrundlage für die Einführung neuer Technologien

Bewertungsstruktur:

Alternativen

Nr.	Maschinentyp	Beschreibung	Investitionskosten
1	Cybertron	Kleberauftragstation	156.000
2	Siplace S23	Multi Purpose Bestücksystem	1.000.000
3	Heraeus	Konvektionsofen für Kleberh.	20.000
4	Hybond S72	Wirebänder, manuell	51.500
5	unknown	Glab Top Auftragsstation	25.000
6	Heraeus	Konvektionsofen für Gerüstung	5.000
7	HR Klasse 1000	kostenrelevantes Equipment	1.925.000

Summe Investitionskosten 3.102.500

Optionen

Kostenrechnungsart:

- Investitionskosten
- Prozesskosten
- Life Cycle Costs

Schichten pro Tag: 1500, 3000, 4500

Stunden / Jahr: 1500, 3000, 4500

Normale Abschreibung in Prozent: 7,0

Normale Abschreibung in Prozent: 20,0

Kalkulationsoptionen

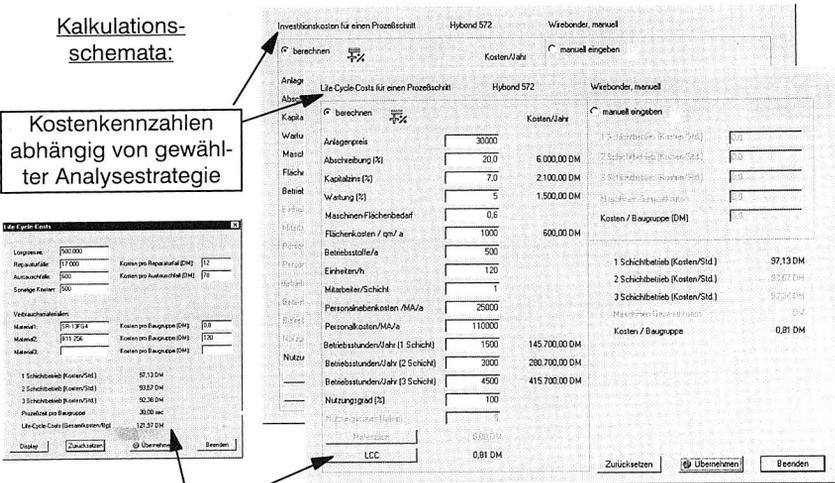
Eingabemaske für gewählte Alternative, deren Teilelemente und Kostenwerte

Bild 91: Durchführung der wirtschaftlichen Bewertung mittels Definition und Quantifizierung von Kostenverursachern

Diese kalkulatorischen Werte stehen einerseits direkt in der wirtschaftlichen Bewertung zur Verfügung, können aber genauso in andere Elemente des Bewertungssystems übernommen werden. Insbesondere die LCC dienen als Schnittstelle zwischen der hier durchgeführten Technologiewechselbewertung und der Effizienzanalyse, deren Realisierung innerhalb von Q-Value im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

Kalkulations-schemata:

Kostenkennzahlen abhängig von gewählter Analysestrategie



**Analysevariante LCC (Life Cycle Costs):
Zusätzliche Berücksichtigung von Kosten durch Feldeinsatz und Entsorgung**

Bild 92: Eingabemasken zur flexiblen Konfiguration und Durchführung der Kostenkalkulations-Schemata

Neben einer Kalkulation auf Basis betriebswirtschaftlicher Kennzahlen steht dem Benutzer – unabhängig von der gewählten Kalkulationsvariante – zusätzlich die Möglichkeit der manuellen Eingabe von Kennwerten zur Verfügung. Somit lassen sich Analysen auch ohne genaue Kenntnis einzelner Kenngrößen schnell und konsistent durchführen. Dieser Punkt ist insbesondere für spontane Analysen im Vorfeld von Investitions- oder Technologieentscheidungen interessant, in dem einzelne Parameter als Planungsgrundlage zugrunde gelegt werden müssen. Damit bestimmt der Benutzer durch gezielte Selektion der Bewertungskenngrößen und -alternativen die Schärfe seiner Analyse, bzw. kann begleitend zur fortschreitenden Projektplanung die Einzelbausteine erweitern und somit das Ergebnis konkretisieren.

Technologisch-wirtschaftliche Analyse

Die Zusammenführung beider Ergebnisse führt zur technologisch-wirtschaftlichen Analyse. Hierzu verknüpft der Benutzer interaktiv die aktuell gewählten Alternativen aus technischer und wirtschaftlicher Bewertung nach vorgegebenen Plausibilitätskriterien. Das System bietet daraufhin verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten und Standardschnittstellen an, die den Benutzer bei der Auswertung und weiteren Nutzung der Ergebnisse vielfältig unterstützen.

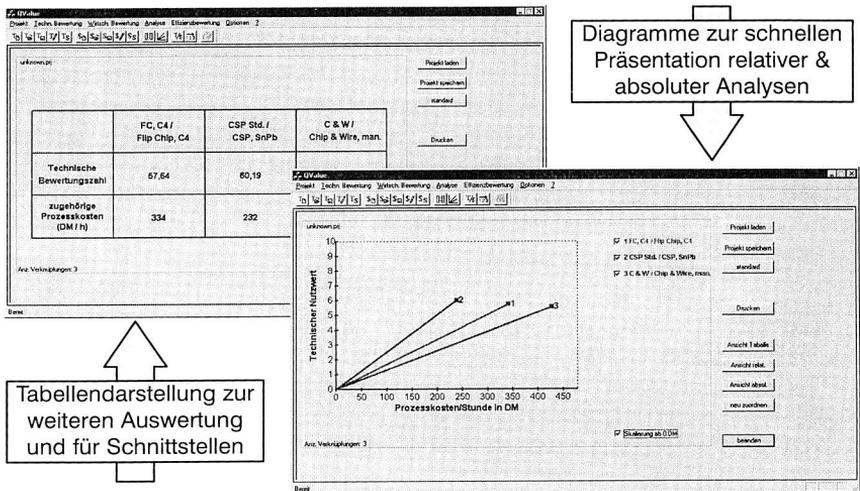


Bild 93: Visualisierung der kombinierten technologisch-wirtschaftlichen Bewertung

Exemplarisch sind in Bild 93 zwei Darstellungsvarianten gegenübergestellt, aus denen der Benutzer schnelle Aussagen ableiten und somit zielgerichtet weitere Aktionen anstoßen kann. Neben einer einfachen, an Standard-Software angelehnten Tabellendarstellung können die Alternativen und deren Wertigkeiten in sogenannten Nutzwert-Kosten-Diagrammen in Anlehnung an [27] dargestellt werden. Das Verhältnis von technischem Nutzwert zu prognostiziertem Aufwand wird im Diagramm durch den Steigungswinkel der Geraden abgebildet, zusätzliche Grenzkriterien erleichtern die Selektion der bestgeeignetsten Alternative.

Das Kernsystem von Q-Value stellt somit in der hier vorliegenden Form die Grundfunktionalitäten für eine effiziente Technologiewechselbewertung zur Verfügung. Die beiden Module der technologischen und wirtschaftlichen Bewertung verschiedener Alternativen können dabei sowohl separat als auch in Kombination durchgeführt werden. Beide

Teilsysteme verfügen über umfangreiche Schnittstellen zu praxisüblichen Evaluationswerkzeugen, bieten gleichzeitig aber durch die integrative Auslegung der erstellten Bewertungsstrukturen ein zusätzliches, innovatives Potential, das weit über den Charakter heutiger Methoden hinausgeht.

7.3.2 Funktionen der Effizienzbewertung

Die Umsetzung der dynamischen Effizienzanalyse erfolgt in drei Teilschritten, wie sie in Bild 94 skizziert sind. Dabei wird das bereits in Bild 89 vorgestellte Datenstrukturkonzept durch die Definition von generalisierten Bewertungsprofilen sowie die Konfiguration problemspezifischer Bewertungsobjekte untersetzt. Beide Schritte sind für den Ablauf zwingend notwendig, jedoch in ihrer Funktionalität entkoppelt, so dass auf bereits vorhandene Profile oder Objekte beliebig zurückgegriffen werden kann. Innerhalb der Effizienzanalyse werden schlussendlich beide Datentypen zusammengeführt, die für die Bewertungsaufgabe gewählten Qualitäts- und Kostenkennzahlen zu Effizienztypen kombiniert, diese berechnet und visualisiert.

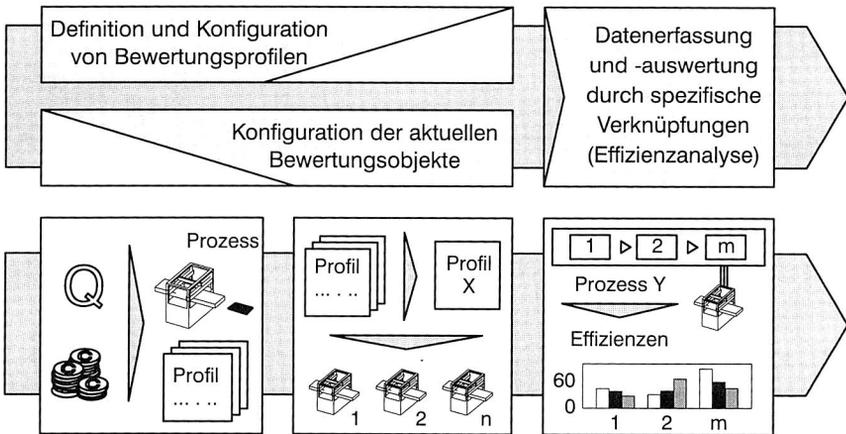
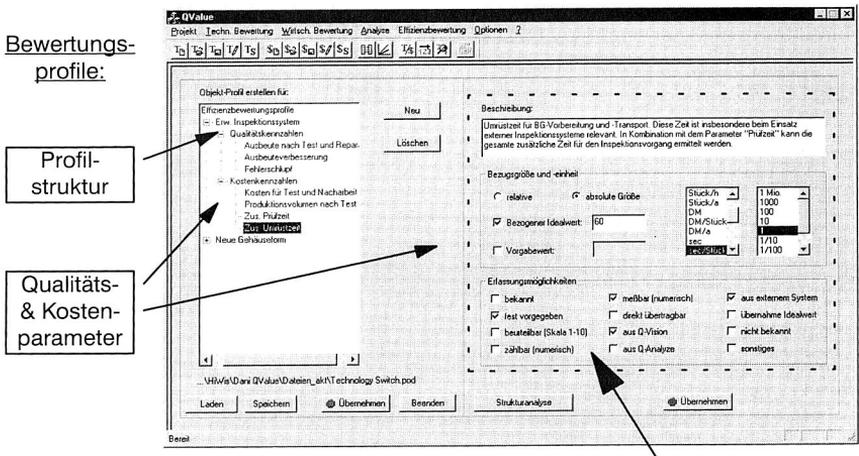


Bild 94: Dreistufige Effizienzanalyse zur Konfiguration und Parametrisierung der Typen "Bewertungsobjekt" und "Bewertungsprofil"

Erstellung von Bewertungsprofilen und Konfiguration von Bewertungsobjekten

Die Erstellung allgemeingültiger Bewertungsprofile erfolgt innerhalb der in Bild 95 dargestellten Eingabemaske. Im linken Teil bearbeitet der Benutzer ein neues bzw. vor-

handenes Profil (z.B. Inspektionssystem), indem er Qualitäts- und Kostenparameter (z.B. Fehlerschlupf, Prüfkosten oder Prüfzeit) festlegt und diese einem Profil zuordnet. Im rechten Teil der Maske wird ein einzelner Parameter innerhalb des gewählten Profils näher spezifiziert. Hierzu gehören im Wesentlichen die beschreibenden Angaben, die unabhängig von einer konkreten Bewertungsaufgabe festgelegt werden können. Diese umfassen Einheit und Größenordnung der Kennzahl, eine kurze textuelle Beschreibung und die Erfassungsmöglichkeiten, die aus dem technischen Umfeld der Kennzahl vorstellbar sind. Die Erfassungsmöglichkeiten bei der späteren Effizienzanalyse reichen dabei von einer einfachen manuellen Eingabe der Einzelwerte bis zur direkten Übernahme bereits vorliegender Daten aus Q-Value. Ebenso wurden Schnittstellen zur Übertragung von Kennwerten aus externen Systemen realisiert, mit denen eine online-Anbindung einzelner Prozess- oder Prüfstationen gewährleistet werden kann.



Eingabemaske zur Spezifikation eines einzelnen Parameters mit Einheit, Beschreibung, Vorgabewerten und Datenerfassungsspezifikation

Bild 95: Definition und Konfiguration von generalisierten Bewertungsprofilen

Die Festlegung von Bewertungsobjekten für eine konkrete Aufgabe erfolgt in einer weiteren Eingabemaske. Grundlage hierfür ist die Anlage eines Objektes (z.B. Röntgensystem X von Hersteller Y) und die Verknüpfung mit einem dazugehörigen Profil (z.B. Inspektionssystem). Desweiteren müssen aus den im Profil verfügbaren Kennzahlen die für die aktuelle Bewertung Notwendigen aktiviert und gegebenenfalls gewichtet werden. Diese Auswahl ist grundsätzlich für jedes Objekt frei durchführbar und kann über Schnittstellen gespeichert bzw. abgerufen werden. Es ist jedoch wichtig, schon im Vorfeld bei der Auswahl der Kennzahlen eine gewisse Einheitlichkeit zu beachten, um

die spätere Vergleichbarkeit mehrerer Objekte (z.B. Inspektionssysteme von Hersteller A, B und C) zu gewährleisten. Ebenso wählt der Benutzer aus den n beliebigen, im Profil gespeicherten Datenerfassungsmöglichkeiten die für das aktuelle Objekt relevante Option aus, anhand derer die aktuelle Kennzahl erfasst wird.

Aufbau der Effizienzanalyse mit integrierter Datenerfassung und -bewertung

Analog der in Bild 94 dargestellten Struktur dient die dritte Eingabemaske zur Datenaufbereitung, Berechnung und Darstellung der Effizienzanalyse. Bild 96 zeigt hierzu exemplarisch das Hauptfenster sowie zwei weitere Masken, die zur Vorbereitung der Effizienzberechnung dienen. Ausgehend von der bereits eingeführten Definition der technischen Effizienz E_t , als dem Verhältnis der wirksamen Prozessverbesserungen zu dem dafür notwendigen Aufwand, legt der Bediener diejenigen Qualitäts- und Kostenkennzahlen fest, die er zur Berechnung von E_t einsetzen möchte (Bild 96 vorne). Ebenso ist es problemlos möglich, zu diesem Zweck mehrere Kennzahlen zu kombinieren (z.B. Bildung einer Summenkennzahl aus der zusätzlich anfallenden Prozesszeit für Prüfung sowie für Rüstung und Handhabung).

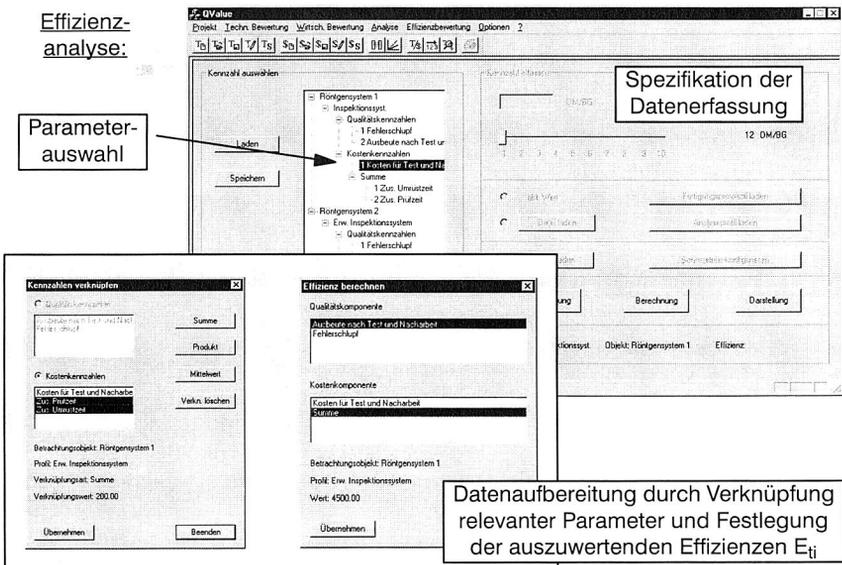


Bild 96: Eingabemasken zur Parameterauswahl, Vorbereitung der Effizienzanalyse

Die Effizienzberechnung erfolgt nach Auswahl der Kennzahlen automatisch und wird unter Angabe des zugehörigen Objektes und Objektprofils in der Eingabemaske dargestellt. Für weiterführende, vergleichende Analysen stehen die Ergebnisse aller eingetragenen Objekte für jeweils einen Effizientyp E_{t1} in übersichtlicher grafischer Form zur Verfügung (Bild 97).

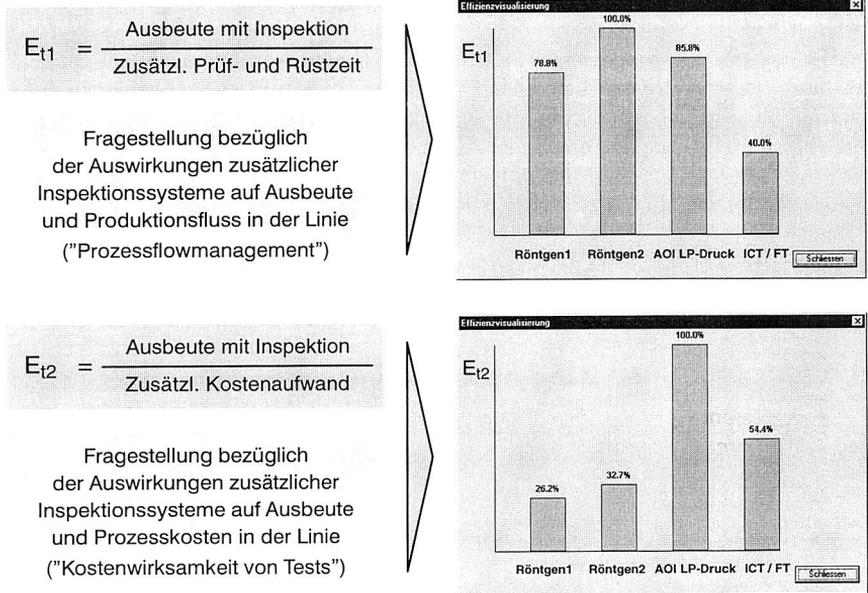


Bild 97: Paarweise Visualisierung der errechneten Effizienzen für verschiedene Testsystem-Alternativen, Gegenüberstellung zweier Effizientypen

Anhand des Beispiels der "Effizienzbewertung von Inspektionssystemen" zeigt Bild 97 eine Darstellung der in Q-Value kalkulierten Effizienzen. Die ermittelten Werte werden auf 100% normiert und in einem Balkendiagramm gegenübergestellt. Im oberen Diagramm für E_{t1} ist kein signifikanter Unterschied bei der Bewertung der drei optischen Inspektionssysteme feststellbar, sie sind im Vergleich zum kombinierten elektrischen Test gut in die Linie integrierbar. Die zweite Analyse in Bild 97 unten zeigt jedoch, dass bei der Berücksichtigung der durch die Tests entstehenden Kosten ein deutlicher Vorteil beim Lotpastendruck-Inspektionssystem liegt. Zusätzlich zur hohen Qualitätswirksamkeit eines derart frühzeitig in die Prozessfolge integrierten Systems sind offensichtlich auch die Betriebskosten im Vergleich zu Röntgensystemen deutlich reduziert.

Aufgabe des Anwenders ist es nun, die für ihn optimale Lösung anhand der Auswahl der Effizienzparameter zu selektieren. Je nach Ausrichtung und Prägung des Fertigungsumfeldes ergeben sich Analysestrategien, die durch eine gezielte Variation der relevanten Qualitäts- und Kostenkennzahlen verfolgt werden können. Bewertungsziele wie "Prozessflowmanagement" oder "Kostenwirksamkeit von Tests" können durch entsprechende Bewertungsparameter abgebildet und analysiert werden.

Weiterführende Variationsmöglichkeiten innerhalb einer dynamischen Effizienzanalyse ergeben sich durch die Definition von Wertebereichen oder -intervallen anstelle fester Werte für einzelne Kenngrößen. Ebenso ist die Erweiterung einer Kennzahl um statistische Größen oder Toleranzfenster realisierbar, mit denen objektspezifische Schwankungen einzelner Kenngrößen erfasst und in der Analyse berücksichtigt werden können. Die so aufgebauten Kennzahlenfenster können gleichsam als mathematische Grundlage für eine intelligente Effizienzanalyse gesehen werden, mit der, zusätzlich zu den in diesem Kapitel vorgestellten Möglichkeiten, die automatisierte Optimierung verschiedenster Parameter bis zu einem Effizienz-Optimum innerhalb der Prozessspezifikationen umsetzbar ist.

7.3.3 Anbindung an Informations- und Analysesysteme

Für eine effiziente und prozessnahe Nutzung eines Bewertungssystems ist die Anbindung an externe Systeme notwendig, die die relevanten Qualitäts- oder Kostendaten zur Verfügung stellen können. In früheren Arbeiten wurden bereits umfangreiche Grundlagenuntersuchungen zur prozessbegleitenden Qualitätsdatenerfassung und -verarbeitung in der Baugruppenfertigung durchgeführt und in verschiedenen Anwendungen am Lehrstuhl realisiert [31] [103]. Im Vordergrund stand dabei die Umsetzung einer Null-Fehler-Produktion durch systematische Sammlung und Auswertung von Informationen über die Prozesse der Elektronikproduktion sowie die lösungsorientierte Modellbildung aus diesen Informationen. Dabei konnte u.a. aufgezeigt werden, dass die in der Industrie vorherrschenden Strategie des "Prüfens und Aussortierens" vor dem Hintergrund einer angestrebten Null-Fehler-Fertigung nicht zufriedenstellend umgesetzt werden kann. Insbesondere der monetäre Aufwand steigt mit Reduzierung der Fehleranzahl exponentiell an. Daher ist eine weitergehende Kopplung von Qualitäts- und Kostendaten unbedingt notwendig und sinnvoll.

Die Anbindung des Bewertungssystems "Q-Value" erweitert dieses bisher rein auf die Evaluation von Qualitätsdaten ausgelegte Informationssystem "Q-Vision" um den Aspekt der Kostendatenerfassung und -bewertung. Wie im vorherigen Kapitel ausgeführt, können durch die integrative Betrachtung von Qualitäts- und Kostenaspekten innerhalb eines Systems erhebliche Synergieeffekte erzielt werden. Die beiden in Bild 98 dargestellten Zielfelder "Null-Fehler-Fertigung" und "kostenoptimale Fehlerrate" können

strukturell auf eine eindeutige prozess- oder produktspezifische Datenbasis zurückgeführt werden, in der Prozessdaten, Prüfdaten sowie kostenrelevante Informationen hinterlegt sind.

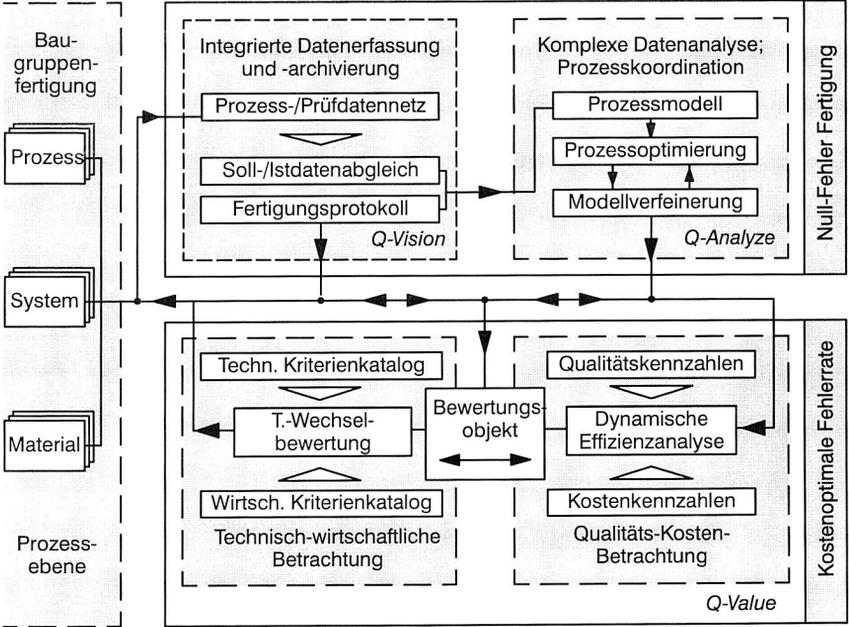


Bild 98: Schematische Darstellung von Datenströmen und Schnittstellen zwischen den Informations- und Analysemodulen

Die Kopplung der drei Einzelmodule und damit die Umsetzung des Datenflussschemas aus Bild 98 erfolgte über einen sogenannten Qualitätsleitstand. Dieser Leitstand baut auf den bisherigen Modulen auf, die Eingabemaschinen wurden konsequent produktionsnah und bedienorientiert ausgelegt (Bild 99). Der Benutzer meldet sich beim System an und bekommt über eine dynamische Profilverwaltung die für ihn zugänglichen Einzelmodule zugewiesen. Diese Zuweisung kann sich beispielsweise am Zugriffslevel des Benutzers oder am Einsatzort (Fertigung, Qualitätsmanagement, etc.) orientieren.

Die Anzeige verschiedener Statusinformationen (Systemzeit, Benutzer, verfügbare und aktiv bearbeitete Vorgänge) ist ebenso vorgesehen, wie der Parameter- und Dateiaustausch zwischen den verschiedenen Modulen. Inkonsistenzen zwischen einzelnen Vorgängen oder Protokollen werden systemintern überprüft und gegebenenfalls dem

Bediener mitgeteilt. Die Realisierung unter Windows NT in Visual C++ erlaubt auch bei zukünftigen Erweiterungen eine schnelle Anbindung bzw. Kommunikation mit marktüblichen Software-Systemen.

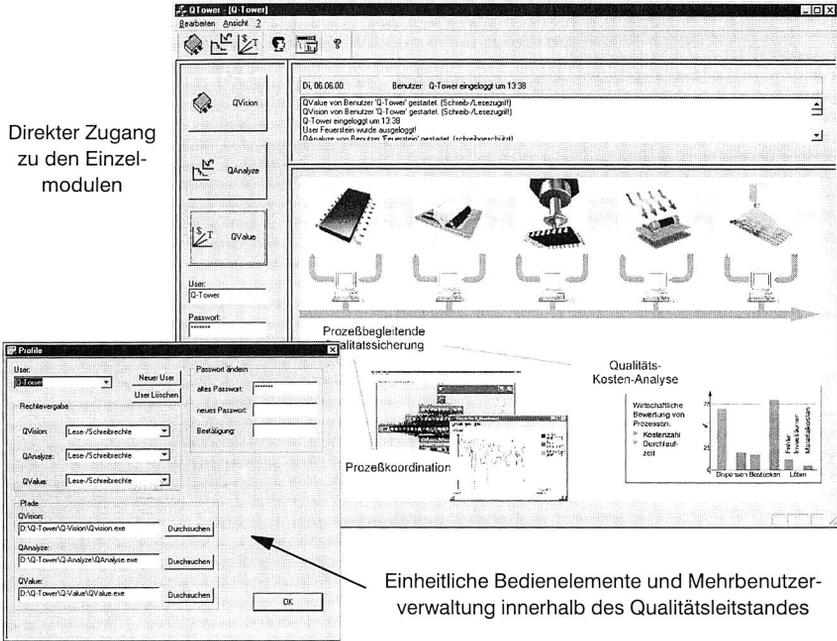


Bild 99: Die rechnergestützte Zusammenführung im Qualitätsleitstand führt zu Vorteilen für den Bediener und für die interne Datenstrukturverwaltung

Weitere interessante Potentiale zur Nutzung der verfügbaren Daten ergeben sich durch die Einbindung von Informationen aus den Bereichen Logistik, Controlling oder Versorgungsmanagement eines Unternehmens. Damit ist eine umfassende Betrachtung des Fertigungslebenslaufes eines Produktes realisierbar, aus der Strategien für die verschiedensten Bereiche (z.B. Qualitätsmanagement, Produktcontrolling, Investitionsmanagement) abgeleitet werden können. Ebenso können personalisierte Befragungen oder -manipulationen durchgeführt werden, was die Ebene der bisher rein horizontalen Qualitätssicherung um eine vertikale Dimension erweitert. Ziel kann es hierbei sein, dem jeweiligen aktuellen Benutzer die Datenverdichtung bereitzustellen, die er aus seiner Position im Unternehmen heraus benötigt.

Eine vergleichbare Zielrichtung wird auch von anderen Systemen auf Basis kalkulatorischer Daten verfolgt. Ein Beispiel ist die Anwendung mySAP.com der Fa. SAP, die eine rollenspezifische, personalisierte Anwenderschnittstelle (sog. Workplace) bietet. Die Mitarbeiter aller Bereiche des Unternehmens haben Zugriff auf Applikationen und Informationen im Intranet. Jeder Mitarbeiter bekommt dabei seinen personalisierten Workplace, den er benötigt, um seine Aufgabe im Unternehmen wahrnehmen zu können. Zugriffsbeschränkungen und moderne Intranetbasierte Kommunikationstechniken sichern Datenkonsistenz und Zugriffslevel.

Eine Erweiterung dieses konsequent benutzerorientierten Konzeptes der innerbetrieblichen Datenverwaltung kann durch die Nutzung des Internets realisiert werden. Zum einen lassen sich damit Kunden- oder Zulieferinformationen frühzeitig in alle Bereiche des Kosten- oder Qualitätsmanagements einbinden. Zum anderen wird die Qualität der Daten durch weitergehende Werkzeuge der Maschinendiagnose vor Ort erheblich gesteigert.

Die Kopplung der internen Fertigungs- und Qualitätsdaten mit externen Diagnosesystemen kann bis zu neuen Ansätze der Telediagnose reichen [22]. Hierzu wurde am Institut ein Telediagnosystem auf Basis des Internets unter Nutzung seiner standardisierten Dienste entwickelt. Das Diagnosemodell und die Werkzeuge werden dabei für einen globalen Zugriff zentral auf einem Server zur Verfügung gestellt. Zur Problemlösung und Führung der Anlagen sind hierarchisch gestufte Einsatzstrategien vorgesehen. Die direkte Anbindung an Qualitätsdateninformationssysteme erhöht die Ausagesicherheit der Diagnose und führt letztlich im Umkehrschluss zu fundierten Hinweisen auf Fehlerschwerpunkte in der Baugruppenfertigung.

8 Zusammenfassung

Die Baugruppenfertigung ist geprägt von einem weltweit stark dynamischen Wachstum in allen Bereichen. Elektronikproduktion als Schlüsseltechnologie und Kernkompetenz ist von herausragender Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Die Qualitätssicherung hat dabei einen besonderen Stellenwert. Dies zeigt sich am vergleichsweise hohen Aufwand für Personal und Investitionen mit entsprechenden Kosten. Ursachen liegen in der Komplexität der Prozessschritte, verstärkt durch zunehmende Miniaturisierung sowie der stetigen Erhöhung der Anzahl an Verbindungsstellen pro Bauelement.

Die zunehmende Variantenvielfalt heutiger Elektronikkomponenten führt jedoch zwangsläufig zu komplexeren und flexibleren Prozessketten. Die Integration neuer Komponenten bei gleichzeitigem Zwang zu qualitäts- und kostenoptimalen Fertigungslösungen führt zu erweiterten Herausforderungen an die Qualitätssicherung. Ziel der Arbeit war daher die gezielte Analyse qualitäts- und kostenrelevanter Mechanismen innerhalb eines erweiterten Produktionsumfeldes für miniaturisierte Strukturen.

Dabei wurden zu Beginn der Untersuchungen die verschiedenen Alternativen zur Standard-SMD-Technologie gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer technologischen Umsetzung vergleichend bewertet. Es zeigt sich, dass die kostengünstigste Lösung zur Funktionsintegration auf Baugruppenebene mit BGAs und CSPs realisiert werden kann. Beide Bauelementtypen sind der Gruppe der Area Arrays zuzuordnen und besitzen insbesondere bei der Integration in bestehende Prozessketten wirtschaftliche und technologische Vorteile.

Ausgehend von dieser Vorauswahl wurde eine umfangreiche technische Qualifizierung der am Lehrstuhl verfügbaren Systeme zur Verarbeitung von Area Arrays durchgeführt. Für die einzelnen Teilprozesse Lotpastenauftrag, Bestücken, Löten wurden die ausgewählten Maschinen experimentell untersucht und wesentliche Stellparameter analysiert. Daraufhin wurden Optimierungsmaßnahmen entwickelt und deren Wirksamkeit durch Fähigkeitsanalysen nachgewiesen. Diese Ergebnisse konnten zudem auf die Qualifizierung bestehender Systeme bei Industriepartnern im Rahmen von Kooperationen übertragen werden.

Aufbauend auf diesen Arbeiten konnte erstmals eine Prozesskette zur Verarbeitung höchstintegrierter Bauelemente mit verdeckten Anschlussstrukturen am Institut aufgebaut werden. Diese Präzisionsprozesskette diente zur umfassenden Analyse von Wechselwirkungen und Schädigungsmechanismen bei der Verarbeitung von Area Arrays. Der starke Einfluss anschlusspezifischer Kenngrößen auf die Prozessqualität konnte ebenso nachgewiesen werden, wie die deutliche Abhängigkeit der Verarbeitbarkeit dieser Bausteine von bisher nur unzureichend berücksichtigten Parameter wie der

Bestückkraft. Ergänzend wurden im Vorfeld verschiedene Versuchsreihen zur Charakterisierung des Benetzungsverhaltens unter Lagerungseinfluss durchgeführt. Hier zeigte sich das signifikant bessere Benetzungsverhalten von Area Arrays gegenüber technologisch vergleichbaren Bausteinen mit peripheren Anschlüssen.

Zur übergreifenden Analyse der Wechselwirkungsbeziehungen wurde ein am Institut entwickeltes Informationssystem um die technologisch relevanten Komponenten, Prozesse und Analysemechanismen ausgebaut. Gleichzeitig wurde der Aspekt der Nacharbeit durch die Integration zusätzlicher Funktionalitäten berücksichtigt. Insbesondere vor dem Hintergrund neuer und miniaturisierter Anschlussformen muss eine prozessintegrierte Nacharbeit bereitgestellt werden. Hierzu wurden erste Arbeiten geleistet, die in Zusammenarbeit mit Industriepartnern ausgebaut werden.

Mit fortschreitender Erhöhung der Qualitätsniveaus erhält die Frage nach dem Aufwand für eine beherrschte Fertigung zunehmend an Bedeutung. Die rein technische Betrachtung und Optimierung eines Prozesses muss um Parameter zur Abschätzung des wirtschaftlichen notwendigen Aufwandes ergänzt werden. In umfangreichen Grundlagenuntersuchungen wurden daher marktverfügbare Systeme zur integrierten Qualitäts- und Kostenbewertung evaluiert und aus deren Defizite ein Anforderungsprofil für die spezifischen Belange der Elektronikproduktion abgeleitet. Dieses Profil wurde in einem zweistufigen Bewertungssystem umgesetzt, mit dem sowohl eine Technologiewechselbewertung als Planungswerkzeug wie auch eine produktionsintegrierte Effizienzbewertung möglich ist. Exemplarische Anwendungsbeispiele sowie die Anbindungsmöglichkeiten an externe Systeme verdeutlichen die vielfältigen Einsatzfälle, die das realisierte Bewertungssystem zur Effizienzanalyse zur Verfügung stellt.

In zukünftigen Arbeiten werden die Verarbeitungsmechanismen für innovative Bauelementformen weiter verfeinert und zusätzlich alternative Verbindungsmedien oder Substrate berücksichtigt. Darüber hinaus bietet die konsequente Zusammenführung von Qualitäts- und Kostenaspekten bei Planung, Realisierung und Betrieb komplexer Fertigungslinien zur Baugruppenproduktion noch erhebliches Potential, das in weiterführenden Arbeiten umzusetzen ist.

Literaturverzeichnis

- [1] Adams, M.: *Produktorientierte Bewertung der Einsatzmöglichkeiten innovativer Technologien*. Dissertation Aachen 1995
- [2] Bauscher, I.: *2D- und 3D-Röntgeninspektion zur effizienten Qualitätssicherung*. FOWEP-Seminar "Effiziente Elektronikproduktion durch integrierte Qualitätssicherung", Erlangen 1999
- [3] Beitinger, G.: *Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger*. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1999
- [4] Beelen-Hendrixx, C.; Verguld, M.: *Trends in Assembly Processes for Miniaturized Consumer Products*. Session P-AP1: Proceedings of the Technical Program, APEX 2000, Long Beach, California 2000
- [5] Brand, A.: *Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen*. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1997
- [6] Brielmann, V.; Zäske, M.: *Einfluß von Bauelement- und Substratmetallisierung auf die Qualität von SMD-Leitklebeverbindungen*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 337-360
- [7] Bronstein, I.N.; Semendjajev, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*. Springer Verlag, Berlin 1997
- [8] Bullinger, H.-J.: *Einführung in das Technologiemanagement*. Teubner Verlag, Stuttgart 1994
- [9] Burger, K.; Heine, A.: *Charakterisierung verschiedener Chip-Scale-Packages*. FOWEP-Seminar "Produktivitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch gesicherte Verbindungstechnik", Erlangen 1998
- [10] Burr, D. C.: *Solder Paste Printing Guidelines for BGA and CSP Assemblies*. SMT 1/1999, S. 70-74, Illinois 1999
- [11] Deley, M.; Ramsey, C. C.; et al.: *Accurate Placement of Ball Grid Array Packages*. EPP 37/1996, S. 36-42

- [12] Eisenbarth, M.: *Medienggebundene Reflowlötverfahren für die Verarbeitung bleifreier Lotwerkstoffe*. FOWEP-Seminar "Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik", Erlangen 1999
- [13] Eitrich, O.: *Prozeßorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation*. Dissertation TH Karlsruhe, Karlsruhe 1996
- [14] Engelhardt, D.; Nicolaidis, K.; Pfeffer, J.: *Auf dem Weg zur Null-Fehler Fertigung*. SMT 8/1998, S. 40-43
- [15] Eversheim, W.; Kerwat, H.; et al.: *Integrierte Produktoptimierung*. QZ 43/6, Carl Hanser Verlag, München 1998, S. 723–726
- [16] Felbinger, C.; Feldmann, K.; Feuerstein, R.: *Deployment of the coherence radar for threedimensional quality assurance in electronics production*. Proceedings of the 2nd International Congress: 3D Image Analysis and Synthesis '97, University Erlangen, Sankt Augustin 1997
- [17] Feldmann, K.; Collisi, T.: *Simulationsgestütztes Instandhaltungsmanagement – Nutzeffekte in der Praxis*. Industrie Management 15 (1999) 2, GITO Verlag, Berlin 1999
- [18] Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: *Medienggebundene Lötverfahren vor dem Hintergrund höherschmelzender Lotlegierungen*. GMM-Fachbericht 28, Leiterplatten- und Baugruppenteknik '99, Bad Nauheim 1999, S. 265-272
- [19] 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
- [20] Feldmann, K.; Feuerstein, R.: *Sicherung der Prozeßqualität bei feineren Strukturen durch integrierte Prüfsysteme*. GMM-Fachbericht 28, Leiterplatten- und Baugruppenteknik '99, Bad Nauheim 1999, S. 273-280
- [21] Feldmann, K.; Feuerstein, R.; Götz, K.: *Influences of Storage Conditions on Component Cracking*. Proceedings of the Technical Program, NEPCON East '97, Reed Exhibition Companies, Boston USA 1997, S. 99–107

- [22] Feldmann, K.; Göhringer, J.; Feuerstein, R.: *Systeme zur prozeßbegleitenden Qualitätssicherung und Diagnose*. Symposium Elektronik-Technologie '98, Tagungsband "Qualitätsmanagement in der Oberflächenmontage der Elektronik", Dresden 1998
- [23] Feuerstein, R.: *Influence of Storage Conditions on Component Wettability and Processing*. Tagungsband zum Seminar "Stable Processes for Reliable Interconnections", Productronica 1997, München 1997
- [24] Folgner, G.: *Integration von Widerständen in Leiterplatten*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 201-214
- [25] Franke, M.: *Benchmarking für die Reflowlöttechnologie*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 453-464
- [26] Franke, M.: *Wichtig ist der Blick auf den Prozeß*. EPP 11/97, S. 44-46
- [27] Führmann, J.: *Die Nutzwert-Kosten-Analyse*. Westbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V., Nördlingen 1993
- [28] Gamalski, J.: *Aspekte zur Qualitätssicherung beim Technologiewandel in der Flachbaugruppenteknik*. Tagungsband Symposium Elektronik-Technologie '98 "Qualitätsmanagement in der Oberflächenmontage der Elektronik", Dresden 1998, S. 3-23
- [29] Gerhard, M.: *Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen*. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998
- [30] Ghaffarian, R.: *CBGA/PBGA/CSP for Highly Reliable Applications*. Technical Session 6: Area Array Technologies, Nepcon East '97, Boston 1997, S. 217-228
- [31] Götz, K.: *Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion*. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998
- [32] Gruber, J.: *Trends elektronischer Bauelemente*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 59-84

- [33] Hacke, H.-J.: *TAB-Technologie*. Tagungsband zur Messe SMT, ES & S, Hybrid, Nürnberg 1989, S. 209-222
- [34] Hartmann, T.; Niebling, R.: *Prozeß innerhalb der Spezifikation*. EPP 2/1998, S. 32–34
- [35] Herber, R.: *Rapid Implementation of Advances in Solder Paste*. Inline Volume 1/3, Distinctive Communications, Franklin, MA 1998
- [36] Hitchcock, D.; Glasbey, C.A.: *Binary Image Restoration at Subpixel Resolution*. Biometrics, Vol. 53, 1997, S. 1040-1053
- [37] Hwang, J.S.: *Ball Grid Array & Fine Pitch Peripheral Interconnections*. Electrochemical Publications Ltd., New York, 1995
- [38] Jung, E.; et al.: *Integration of Flip Chip Assembly in the SMT Process: Manufacturing & Productivity Issues*. International Electronics Manufacturing Technology Symposium, Proceedings 1998, Austin, TX 1998, S. 8-15
- [39] Kaiser, J.: *Qualitätsbewertung von Prozessen und Prozeßergebnissen durch integrierten Einsatz von Fuzzy Logic und Fuzzy Arithmetic*. Dissertation, Frankfurt am Main 1997
- [40] Kamen, E.; et al.: *Analysis of Factors Affecting Component Placement Accuracy in SMT Electronics Assembly*. International Electronics Manufacturing Technology Symposium, Proceedings 1998, Austin, TX 1998, S 50–58
- [41] Kamiske, G. F.: *"Return of Quality" Bausteine zur Rentabilitätsverbesserung durch TQM*. In Kamiske, G.F. (Hrsg.): *Die hohe Schule des Total Quality Management*. Springer Verlag, Berlin 1994
- [42] Keil, M.: *Nachweis der Maschinentauglichkeit von SMT-Bestückautomaten – Theorie und praktische Erfahrungen*. FOWEP-Seminar "Produktivitätssteigerung beim Bestücken komplexer Baugruppen", Erlangen 1998
- [43] Kempe, W.: *Montagetechnik für BGA-Bauelemente*. GMM-Fachbericht 18, Leiterplatte '97, Berlin 1997, S. 285-294
- [44] Kempe, W.: *Produktionstechnik für neue Elektronikanwendungen im Verkehr und für die Kommunikation*. Tagungsband der Karlsruher Arbeitsgespräche 1998: *Produktion 2000 – Ergebnisse und Zukunftschancen*, Karlsruhe 1998

- [45] Kepner, C. H.; Tregoe, B.: *Entscheidungen vorbereiten und richtig treffen. Rationales Management. Die neue Herausforderung.* Verlag moderne industrie, Landberg am Lech 1995
- [46] Klein Wassink, R.J.: *Weichlöten in der Elektronik.* Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau/Württ. 1991
- [47] Koch, V.-E.: *Prozeßmeß- und Prüftechnik für BGA-Baugruppen.* GMM-Fachbericht 18, Leiterplatte '97, Berlin 1997, S. 307-316
- [48] Kudernatsch, D: *Qualitätsverbesserungen monetär bewerten.* QZ 43/8, Carl Hanser Verlag, München 1998, S. 912–916
- [49] Lang, K.-D.: *Wire bonding for future requirements.* DVS 173, EuPac '96, Essen 1996, S. 119-124
- [50] Larmouth, R.; Keating J.: *Reliability of micro-BGA-on-Flex Assemblies.* Proceedings of The Technical Program, Surface Mount International, San Jose, CA 1997
- [51] Lau, J. H.: *Ball Grid Array Technology.* McGraw-Hill, New York 1995
- [52] Lau, J. H.: *Chip on Board Technologies for Multichip Modules.* Van Nostrand Reinhold, New York 1994
- [53] Lau, J. H.: *Cost Analysis: Solder Bumped Flip Chip on Board versus Wire Bonding.* International Electronics Manufacturing Technology Symposium, Proceedings 1998, Austin, TX 1998, S. 464-471
- [54] Lau, J. H.: *Electronics Packaging Technology Update: BGA, CSP, DCA and Flip Chip.* Proceedings of the Technical Program, NEPCON East '97, Reed Exhibition Companies, Boston USA 1997, S. 89-98
- [55] Lentzen, W.: *Fehlerreduktion durch gesicherten Lotplastenauftrag.* FOWEP-Seminar Effiziente Elektronikproduktion durch integrierte Qualitätssicherung, Erlangen 1999
- [56] Li, G.Y.; Chan, Y.C.: *Aging Effects on Shear Fatigue Life and Shear Strength of Solder Thick Film Joints.* IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 21, Nr. 4, New York 1998, S. 398-406

- [57] Lorenzen, J.: *Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen*. Forschungsberichte der TU München Band 107, Springer Verlag, München 1997
- [58] Luchs, R.: *Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT*. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998
- [59] Luhn, G.: *Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion*. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1998
- [60] Maciariello, R.: *Lotpastendrucker – Stand und Trends*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 443-452
- [61] Männel, W.: *Prozeßkostenrechnung*. Gabler Verlag, Wiesbaden 1995
- [62] Mescher, P; Hand, L.: *The Expanding BGA Menu – Comparison and Direction of the Exploding Technology*. Proceedings of The Technical Program, Surface Mount International, San Jose, CA 1997
- [63] Müller, M.: *Qualitätscontrolling komplexer Serienprodukte*. Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen 1998
- [64] Neubauer, C.; Hanke, R.: *Planare Computertomographie an BGA*. Symposium Elektronik-Technologie '97, Tagungsband "Zerstörungsfreie Prüfverfahren in der Oberflächenmontage der Elektronik", Dresden 1997
- [65] N. N.: *CSP Processing Requirements*. Back-End Supplement, 11/1998, S. 41-43
- [66] N.N.: *Differenzierung des Ertrags*. EPP 5/1999, S. 52-55
- [67] N.N.: *electronica '98: Elektronische Bauelemente trotz stürmischer See*. Presse und Öffentlichkeitsarbeit Pr - 126/98 der ZVEI Bauelement, unter: http://www.fen.baynet.de/~yy107/d/presse/pr126_98.htm
- [68] N.N.: *Elektronische Baugruppen – Eine neue wachsende Industriegruppe formiert sich*. Presse und Öffentlichkeitsarbeit Pr - 130/98 der ZVEI Bauelement, unter: http://www.fen.baynet.de/~yy107/d/presse/pr130_98.htm

- [69] N.N.: *IEC 68-2-69, Wetting Balance Test-Globule Method*. International Electrotechnical Commission, Dezember 1995
- [70] N.N.: *IPC-EIA/J-STD-002A, Solderability Tests for Component Leads, Terminations, Lugs, Terminals and Wires*. Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Illinois, Oktober 1998
- [71] N.N.: *ANSI/IPC A 610, Acceptability of Electronic Assemblies*. Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Illinois, Mai 1995
- [72] N. N.: *Mikro-BGA: Durchbruch für die Chip-Scale-Packages*. Productronic 11/97, S. 124-125
- [73] N.N.: *PROnova – Innovative Prozesse und Bauweisen für Elektronik- und verwandte mikrotechnische Produkte*. Abschlußbericht. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI), Frankfurt 1999
- [74] N.N.: *VDE Mikroelektronik-Studie 1997-2002*. VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Miro- und Feinwerktechnik (GMM), Frankfurt 1998
- [75] Oppermann, M.; Wohlrabe, H.: *Praktische Anwendung von Qualitätskostenmodellen*. Workshop Mikrotechnische Produktion der TU Dresden, Dresden 1998
- [76] Peck, D.: *The BGA Rework Process*. Proceedings of the Technical Program, NEPCON East '97, Reed Exhibition Companies, Boston USA 1997, S. 173-194
- [77] Pfeifer, T.: *Qualitätsmanagement – Strategien, Methoden, Techniken*. Carl Hanser Verlag, München 1996
- [78] Placke, P.; Kober, H.: *Innovative Chipmontagemethoden auf kostengünstigen flexiblen Antennenfolien für kontaktlose Chipkarten*. VTE 10/98, S. 20-25
- [79] Reichl, H., Töpfer, M.: *Der Weg zum Chip-Size-Package*. F&M 11-12/97, Carl Hanser Verlag, München 1997, S. 790-794
- [80] Reichenberger, M.: *Verarbeitung und Einsatz niedrigschmelzender Lotwerkstoffe*. FOWEP-Seminar "Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik", Erlangen 1999

- [81] Reichmann, Th.: *Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten*. Vahlen Verlag, München 1997
- [82] Reiter, M.; Slyman, David A.: *Lotpasten unter Druck*. productronic 6/1998, S. 56-64
- [83] Ries, G.: *Von Stichprobenprüfung der Bauelemente zu "Ship-to-stock"-Verträgen*. FOWEP-Seminar "Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion - Strategien und Inspektionssysteme", Erlangen 1996
- [84] Robeck, A.: *Dynamische Zielfindung für das Total Quality Management*. Dissertation Springer Verlag, Berlin 1997
- [85] Rojas, R.: *Theorie der Neuronalen Netze, eine systematische Einführung*. Springer Verlag, Berlin 1996
- [86] Rothhaupt, A.: *Modulare Planungssystem zur Optimierung der Elektronikproduktion*. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation, Carl Hanser Verlag, Bamberg 1995
- [87] Sauer, W.: *Herausforderungen an das Qualitätsmanagement durch die Optimierung von Design, Fertigung, Prüfung und Dienstleistung*. Tagungsband Symposium Elektronik-Technologie '98 "Qualitätsmanagement in der Oberflächenmontage der Elektronik", Dresden 1998, S. 24-45
- [88] Sauer, W.; Wohlrabe, H.: *Möglichkeiten zur Bestimmung der Prozeßfähigkeitskoeffizienten von Lötverfahren für Flachbaugruppen*. Tagungsband zur Messe SMT, ES & S, Hybrid, Nürnberg 1997, S. 213-222
- [89] Sauer, W.; Wohlrabe, H.; Zerna, T.: *Bestimmung der Maschinenfähigkeit und Prozeßfähigkeit während der Fertigung von Flachbaugruppen*. GMM-Fachtagung Leiterplatte 97, Karlsruhe 1997, S. 221-232
- [90] Scheel, W.: *Baugruppenttechnologie der Elektronik - Montage*. Verlag Technik, Berlin 1997
- [91] Schick, A.: *Optische 3D-Inspektion in der Elektronik Montage*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 657-676

- [92] Schiebel, G.: *Criteria for High-Speed Mounting of Area Array Packages*. Proceedings of The Technical Program, Surface Mount International, San Jose, CA 1997
- [93] Schiebel, G.: *CSP- und Flip-Chip-Verarbeitung im SMD-Bestückautomaten*. SMT 3/1998, S. 14–22
- [94] Schilpp, A.: *Organische High-Density-Substrate*. FOWEP-Seminar "Neue Schaltungsträger und Packungsformen", Erlangen 9.07.1997
- [95] Schmidt, B.: *Kostenrechnung und Simulation*. Tagungsband "Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch systemtechnische Mittel" Bayerischer Forschungsverbund Systemtechnik ForSYS, München 1994, S. 111–130
- [96] Schwaderer, J.: *Industrialisierung der BGA/MikroBGA-Technik auf komplexen Baugruppen*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 391-414
- [97] Schwan, A.; Weckenmann, A.: *Qualität übergreifend bewerten*. QZ 42/7, Carl Hanser Verlag, München 1997, S. 808–812
- [98] Singer, U.: *Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in neue Produktionstechnologien*. Dissertation Hochschule St. Gallen, Difo-Druck GmbH, Bamberg 1990
- [99] Solberg, V.: *CSP Packaging Trends and Standards*. Chip-Scale Symposium Nuremberg, Nürnberg 1997
- [100] Staiger, T. J.: *Controlling eines projektorientierten Prozeßmanagements am Beispiel des Anlagenbaus*. Dissertation Springer Verlag, Berlin 1998
- [101] Stephan, J.: *3D-Röntgeninspektion für MikroBGA, CSP und Flip-Chip*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 677-706
- [102] Stephan, J.: *Röntgeninspektion für Bauelemente mit Array-Anschlüssen*. GMM-Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik, Berlin 1998, S. 635-656
- [103] Sturm, J.: *Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion*. Feldmann, K., Geiger, M., (Hrsg.), Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1996

- [104] Theden, P.: *Analyse der Rentabilität von Qualitätstechniken*. Dissertation Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK Berlin, Berlin 1997
- [105] Thompson, P.: *Chip-scale packaging*. IEEE Spectrum 08/1997, S. 36-43
- [106] Thun, E. J.: *Die from a supplier's perspective*. Proceedings of the technical program. NEPCON WEST '95, Anaheim, California 1995, S. 47-51
- [107] Vardaman, E. J.: *International Activities in Flip Chip on Board Technologies*. Proceedings of the Technical Program, NEPCON WEST '95, Anaheim, California 1995, S. 946-950
- [108] VDI (Hrsg.): *Technikbewertung - Begriffe, Grundlagen, Erläuterungen und Hinweise zur VDI-Richtlinie 3780*. VDI Report 15. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1991
- [109] Vollmer, E.: *Ein simulationsgestütztes Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsbestimmung von Fertigungsprozessen mit Stückgutcharakter*. Dissertation Springer Verlag, Berlin 1996
- [110] Warnecke, H.-J.; et al.: *Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag, München/Wien 1996
- [111] Weckenmann, A.: *Methoden zur vergleichenden, übergreifenden Qualitätsbewertung von Produkten aus Kunden- und Unternehmensicht unter Einbeziehung des Produktentstehungsvorganges, der Nutzungsphase und der Entsorgung*. Berichtskolloquium zum DFG Schwerpunktprogramm, Aachen 1994, S. 199–204
- [112] Westkämper, E.; v.d. Osten-Sack, D.: *Methods and Tools of the Life Cycle Management - Optimizing the Performance of Manufacturing Systems*. Proceedings of the CIRP 6th International Seminar on Life Cycle Engineering, Kingston, Ontario, Canada 1999
- [113] Wilke, P.; Billing, G.: *Programmierhandbuch für NeuroGraph Version 3.8*. Institut für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung der Universität Erlangen-Nürnberg, 1998
- [114] Wohlrabe, H.: *Bestimmung von Maschinen- und Prozeßfähigkeitskoeffizienten in der Baugruppenproduktion; ein Überblick*. Tagungsband Symposium

Elektronik-Technologie '98 "Qualitätsmanagement in der Oberflächenmontage der Elektronik", Dresden 1998, S. 102-114

- [115] Wolter, O.: *Entwicklung und praktische Erprobung eines Kennzahlensystems für das Total Quality Management*. Dissertation Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK Berlin, Berlin 1997
- [116] Wolter, O.: *Rechnet sich TQM?*. QZ 43/8, Carl Hanser Verlag, München 1998, S. 912–916
- [117] Young, J. L.: *Chip scale packaging provides known good die*. Proceedings of the Technical Program, NEPCON WEST '95, Anaheim, California 1995 S. 52-59

Lebenslauf

Robert Feuerstein

geboren am 07.08.1969 in Nürnberg

ledig

- | | |
|-------------|---|
| 1976 - 1980 | Grundschule in Schwabach |
| 1980 - 1989 | Adam-Kraft-Gymnasium in Schwabach,
math.-naturwiss. Zweig |
| 1989 - 1990 | Grundwehrdienst |
| 1990 - 1996 | Studium der Fertigungstechnik
an der Universität Erlangen-Nürnberg.
Abschluss 02/1996: Dipl.-Ing. |
| 1996–2000 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
an der Universität Erlangen-Nürnberg.
Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann |
| seit 2001 | Technologiereferent bei der TEMIC
Telefunken Microelectronic GmbH, Nürnberg
Bereich Zentrale Technik, ZT/MP |

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

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

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

Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13
Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 14
Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 15
Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 16
Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 17
Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 18
Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 19
Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 20
Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 21
Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22
Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23
Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24
Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und –schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25
Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26
Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27
Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28
Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM–Prozeßkette für die Herstellung
von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29
Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung von
Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30
Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31
Hubert Reinisch
**Planungs– und Steuerungswerkzeuge zur impliziten
Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32
Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33
Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34
Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**
XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35
Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36
Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37
Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38
Robert Schmidt-Hebbel
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender
Durchgangslöcher**
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39
Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40
Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41
Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42

Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser

160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 43

Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren

149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 44

Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung

180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45

Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion

195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 46

Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile

126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 47

Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 48

Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen

156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 49

Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen

144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 50

Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)

196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 51

Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter

190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 52

Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen

200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 53

Robert Hopperditzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie

180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54

Thomas Rebhan

**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**

148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55

Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56

Uwe Schönherr

**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**

188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57

Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung

162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 58

Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen

165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 59

Thomas Krebs

**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-
Produktmodell**

198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60

Jürgen Sturm

**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**

167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 61

Andreas Brand

**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher
elektronischer Baugruppen (3-D MID)**

182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartoniert

Band 62

Michael Kauf

**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage**

140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63

Peter Steinwasser

**Modulares Informationsmanagement in der integrierten
Produkt- und Prozeßplanung**

190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 64
Georg Liedl
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß
in der Elektronikproduktion**
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 65
Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997. Kartoniert

Band 66
Wolfgang Blöchl
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC–Steuerungen
zur Prozeß– und Programoptimierung**
168 Seiten, 96 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 67
Klaus–Uwe Wolf
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs– und
Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln.**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 68
Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D–Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 69
Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 70
Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂–Lasieranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 71
Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 72
Pfeistorf, Markus
Funktionale 3D–Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 73
Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen
für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 74
Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 75

Arthur Meißner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung –**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 76

Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 77

Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von
Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 78

Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Lötén komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 79

Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs-
und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 80

Niederborn Sorin

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei
umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 81

Stefan Schubert

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 82

Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production System Using High-Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 83

Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible
Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 84

Knuth Götz

**Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 85

Ralf Luchs

**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung
elektronischer Bauelemente in der SMT**
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 86
Frank Pöhlau
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)**
144 Seiten, 99 Bilder. 1999. Kartoniert.

Band 87
Roland Kals
Fundamentals of the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 88
Gerhard Luhn
**Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der
Elektronikproduktion.**
253 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999. Kartoniert.

Band 89
Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 90
Hans-Jörg Pucher
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und
Laserstrahllöten von Mikrokontakten**
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 91
Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 92
Doris Schubart
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim
Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 93
Adrianus L. P. Coremans
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 94
Hans-Martin Biehler
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**
199 Seiten, 105 Bilder. 1999. Kartoniert.

Band 95
Wolfgang Becker
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
Excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 96
Philipp Hein
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung,
Prozeßauslegung und Prozeßführung**
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 97

Gunter Beitinger

**Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger**

176 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 98

Jürgen Knobloch

**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation
von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**

156 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 99

Frank Breitenbach

**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**

168 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Band 100

Bernd Falk

**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung**

134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Band 101

Wolfgang Schlögl

**Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung
und Anlagenplanung**

157 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Band 102

Christian Hinsel

**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**

130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Band 103

Stefan Bobbert

**Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren**

123 Seiten, 77 Bilder. 2000. Kartoniert.

Band 104

Harald Rottbauer

**Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement
in der Elektronikproduktion**

176 Seiten, 106 Bilder. 2000. Kartoniert.

Band 105

Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformung

120 Seiten, 50 Bilder. 2001. Kartoniert.

Band 106

Thomas Menzel

**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und
Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**

152 Seiten, 71 Bilder. 2001. Kartoniert.

Band 107

Thomas Stöckel

**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks**

162 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 108

Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen

158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 109

Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund

125 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 110

Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion

In Druck

Band 111

Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen

190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 112

Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementtechnologien in die Flachbaugruppenfertigung

164 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001. Kartoniert.