

Jürgen Sturm

*Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion*

Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

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:	6. Mai 1996
Tag der Promotion:	2. August 1996
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. H. Stoyan
Berichterstatte:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. habil. W. Sauer

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Sturm, Jürgen:

Prozessintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion /
Jürgen Sturm. Hrsg. von Klaus Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1997
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 60)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996
ISBN 3-87525-082-6

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 1996

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 der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die großzügige Förderung sowie für den Freiraum und die qualifizierende Erfahrung, die ich während der Durchführung dieser Arbeit gewinnen konnte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. W. Sauer, dem Leiter des Instituts für Elektronik-Technologie der TU Dresden gilt mein herzlicher Dank für die wohlwollende Übernahme des Korreferates und die kontinuierliche fachliche Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter vom Institut für Elektronik-Technologie der TU Dresden danke ich für den fachlichen Gedankenaustausch und die konstruktive Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Röntgeninspektion.

Die Erfahrungen im Fachgebiet der Elektronikproduktion, die ich in direkten Kooperationen mit Industrieunternehmen bzw. durch die Mitarbeit in verschiedenen VDI-Fachkreisen gewinnen konnte, stellen eine wesentliche Grundlage der in der Arbeit entwickelten Ergebnisse dar. Allen industriellen Kooperationspartnern sei hiermit auch ohne namentliche Nennung herzlich gedankt.

Weiterhin danke ich allen meinen Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik für die gute und angenehme Zusammenarbeit, insbesondere jedoch Herrn Jörg Franke für den jederzeit fruchtbaren Gedankenaustausch. Die Herren Jürgen Geck, Matthias Wanke und Arnd Warmuth möchte ich aufgrund ihres unermüdlichen Einsatzes im "Röntgen"-Team aus dem Kreise der studentischen Mitarbeiter besonders hervorheben.

Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch meiner Familie, insbesondere meiner Frau Ulrike sowie meinen Eltern, die mir während der Durchführung dieser Arbeit stets ein hohes Maß an Unterstützung und Toleranz gewährt haben.

Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Schlüsselfaktor Qualität in der Produktion elektronischer Baugruppen	3
2.1	Randbedingungen für die Qualitätssicherung in der Elektronik	5
2.1.1	Schnelle Innovation bei Produkten und Prozessen	6
2.1.2	Vielstufige Prozeßkette und hohe Parallelität in den Einzelschritten	6
2.1.3	Auswirkungen der Produkthaftung	8
2.2	Qualität und Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen	9
2.2.1	Qualitätsforderungen und Belastungsarten	10
2.2.2	Grundsätzliche Versagensmechanismen in Weichlötstellen	11
2.2.3	Beurteilungskriterien für die Qualität und Zuverlässigkeit	14
2.3	Aktueller Stand der prozeßintegrierten Qualitätssicherung in der Elektronik	15
2.3.1	Unscharfe Vorgaben für die Qualitätsplanung	16
2.3.2	Qualitätslenkung auf der Basis offener Regelkreise	17
2.3.3	Qualitätsprüfung durch visuelle Inspektion und elektrische Tests	18
2.4	Defizite und zukünftige Anforderungen	22
2.4.1	Systematische Planung robuster Produkt- und Prozeßtechnologien	23
2.4.2	Qualitätslenkung mit integrierten Prozeß- und Prüfmonitoren	24
2.4.3	Integration objektiver Prüfverfahren in die Produktion	25
3	Qualitätssteigerung in der Elektronik durch beherrschte Fertigungs- und Prüfprozesse	26
3.1	Eigenschaften beherrschter Fertigungs- und Prüfprozesse	26
3.1.1	Robustheit aufgrund Unempfindlichkeit des Prozesses	28
3.1.2	Robuste Eigenschaften durch aktive Prozeßregelung	30
3.2	Rahmenkonzept und Bestandteile des Modells	31
3.2.1	Prozeßdatennetz aus Maschinen- und Prozeßdaten	32
3.2.2	Prüfdatennetz zur Charakterisierung der Prozeßergebnisse	33
3.2.3	Zusammenführung der Prozeß- und Prüfdaten im Informationsmodell	34
3.2.4	Werkzeuge zur Analyse von Prozeßabhängigkeiten	35
3.2.5	Regelungsmodell zur Steigerung der Prozeßsicherheit	36

3.3	Vorgehensweise zur prozeßübergreifenden Analyse und Optimierung	37
3.3.1	Strukturierung der Prozeßkette und Sammlung von Einflußgrößen	38
3.3.2	Analyse potentieller Ursache-Wirkungsbeziehungen	42
3.3.3	Verifikation von Wirkmechanismen durch Bestätigungsexperimente	42
3.3.4	Optimierungsmaßnahmen zur Schaffung robuster Prozesse	43
4	Integration automatisierter optischer Inspektionssysteme in die Elektronikbaugruppenmontage	44
4.1	Sichtprüfaufgaben in der Prozeßkette	44
4.1.1	Prüfung von Leiterplatten, Bauelementen, Lotmaterialien	46
4.1.2	Kontrolle des Lotpastendrucks	46
4.1.3	Bestückprüfung	47
4.1.4	Lötstellenprüfung	48
4.2	Optische Inspektionsverfahren für die Baugruppenprüfung	49
4.2.1	2D-Bilderfassung mit CCD-Kamerasystemen	49
4.2.2	Erfassung räumlicher Strukturen mittels Laserinspektion	52
4.2.3	Materialspezifisch volumetrische Analyse mittels Röntgeninspektion	55
4.2.4	Sonstige Verfahrensansätze	62
4.3	Beurteilungskriterien für die automatisierte Inspektion	63
4.3.1	Prinzipielle Eignung für gefordertes Fehlerspektrum	63
4.3.2	Erkennungssicherheit und Fehlerschlupf	67
4.3.3	Irrtümliche Fehlerzuweisung (Pseudofehlerrate)	67
4.3.4	Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse	69
4.3.5	Durchführung von Systemtests zur automatisierten Inspektion	70
5	Entwicklung von 3D-Laserinspektionssystemen für die Elektronikmontage	73
5.1	Entwicklung schneller 3D-Laserscanner	74
5.1.1	3D-Scanner auf Basis der Lasertriangulation	75
5.1.2	Konfokales Meßprinzip	76
5.1.3	Leistungscharakteristika der Systeme	77
5.2	Entwicklung zuverlässiger Klassifikatoren zur 3D-Mustererkennung	78
5.2.1	Histogrammanalysen	79
5.2.2	Merkmalsextraktion	79
5.2.3	Algorithmenparametrierung	80

5.3	Entwicklung einer CAD/CAM-Verfahrenskette für die optische Prüfung von Elektronikbaugruppen	81
5.3.1	CAD-Referenzdaten	82
5.3.2	Optimierung der Abtastbahnen und Prüfsegmente	83
5.3.3	Parallele Verarbeitung der Bildsegmente	87
5.4	Systemtests zur 3D-Laserinspektion	87
6	Entwicklung eines flexiblen Prüfzellenkonzepts auf Basis der Röntgeninspektion	89
6.1	Anforderungen an ein flexibles Prüfzellenkonzept	90
6.1.1	Anforderungsanalyse für verschiedene Einsatzfälle	90
6.1.2	Konkretisierung der Anforderungen am Beispiel der Einführung neuer Gehäuse- und Verbindungstechniken (BGA)	91
6.2	Systemkonzept und Steuerungsarchitektur einer flexiblen Röntgenprüfzelle ...	92
6.2.1	Einbindung in den Materialfluß	93
6.2.2	Kinematischer Aufbau für wahlfreie Prüfaufgaben	94
6.2.3	Modulares Steuerungskonzept	97
6.3	Flexible Benutzerschnittstelle für verschiedene Betriebsarten	99
6.3.1	Manueller Prüfmodus	100
6.3.2	Halbautomatischer Betrieb	101
6.3.3	Automatikmodus	102
7	Anwenderflexible Klassifikation und Regelung der Fertigungsqualität	104
7.1	Geforderte Eigenschaften für die flexible Klassifikation und Regelung	105
7.1.1	Einflußnahme auf Vorgaben zur Qualitätsbeurteilung	106
7.1.2	Wahlfreie Verknüpfung von Einzelkriterien	106
7.1.3	Robustheit gegenüber Schwankungen in der Merkmalerfassung	106
7.2	Anwenderflexible Klassifikation mittels Fuzzy-Logik	108
7.2.1	Merkmalsextraktion und Grenzwertdefinition	109
7.2.2	Verknüpfung von Merkmalen zu Diagnoseregeln	110
7.2.3	Initiierung von Regelungsmaßnahmen	111
7.3	Qualitätsoptimierung durch den Einsatz lernender Verfahren	113
7.3.1	Neuronale Netze für die Klassifikation von Lötstellen	114
7.3.2	Normierung durch Bildvorverarbeitungsschritte	115
7.3.3	Aufbau einer Lernstichprobe und Training des Klassifikators ..	116
7.3.4	Ergebnisse bei der Anwendung in der Fertigungsumgebung ..	117

8 Anwendungen der prozeßintegrierten Qualitätsicherung in der Elektronikproduktion	120
8.1 Optimierung der Prozeßkette Lotpastenauftrag - Bestücken - Löten	120
8.1.1 Aufbau des Prozeßdatennetzes aus Maschinen- und Prozeßdaten	121
8.1.2 Aufbau des Prüfdatennetzes zur Charakterisierung der Prozesse	123
8.1.3 Zusammenführung der Prozeß- und Prüfdaten im Informationsmodell ..	124
8.1.4 Analyse von Prozeßabhängigkeiten	126
8.1.5 Maßnahmen zur Steigerung der Prozeßsicherheit	129
8.2 Anwendung in der Serienproduktion elektronischer Produkte	130
8.2.1 Optimierung in der Produktion von ABS-Beschleunigungssensoren	131
8.2.2 Prozeßoptimierung in einer Rechnerbaugruppenfertigung	133
8.2.3 Konzeption eines integrierten Bestück- und Laserlötautomaten	139
8.3 Bewertung alternativer Prüfstrategien in der Elektronikfertigung	144
8.3.1 Problematik bei der Bewertung	144
8.3.2 Bewertungsmodell zur Analyse alternativer Prüfstrategien	145
8.3.3 Synthese einer Prüfstrategie (Fallbeispiel)	149
8.4 Erkenntnisse aus der Anwendung der prozeßintegrierten Qualitätssicherung .	150
8.4.1 Anwendung der Methodik in einer Laborumgebung	150
8.4.2 Einsatz der Methode in industriellen Anwendungen	151
9 Zusammenfassung und Ausblick	152
10 Literaturverzeichnis	154

1 Einleitung

Elektronische Systeme sind in nahezu allen Produktbereichen zu zentralen, funktionsbeherrschenden Komponenten geworden. Die Innovation wird in Produkten ebenso wie in Produktionsmitteln zum Großteil durch den Einsatz von Elektronik getragen [1]. Gleichzeitig ist die Qualität zum entscheidenden Faktor im Wettbewerb der Unternehmen geworden [2]. Die zentrale Rolle der Schlüsseltechnologie Elektronik stellt daher große Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit elektronischer Komponenten, die unter verschiedensten Einsatzbedingungen sicher funktionieren müssen. Darüber hinaus verursacht der steigende Bedarf an funktioneller Leistungsfähigkeit sowie der hohe Innovations- und Kostendruck im internationalen Wettbewerb rasche Entwicklungen in den Prozessen und damit auch den Produktionssystemen der Elektronik. Der Aufwand zur Prozeßbeherrschung und Sicherung der Produktqualität steigt durch die genannten Faktoren überproportional an. Die besondere Herausforderung in der Elektronikproduktion ist das komplexe Zusammenwirken unterschiedlicher Technologien und die vielen parallelen Fertigungsschritte, die pro Baugruppe in einer mehrstufigen Prozeßkette durchgeführt werden. Statistisch wirkt sich dies selbst bei weitgehend beherrschten Prozessen deutlich auf die resultierende Fertigungsqualität aus. Ein gewisser Prüfaufwand erscheint daher weiterhin unvermeidlich, um die Risiken mangelhafter Lieferqualität auszuschließen [3]. Die Frage nach den optimalen Prozeßsicherungs- und Prüfstrategien ist jedoch weitgehend offen und sehr von den spezifischen Anwendungsfällen abhängig. Der Stand der Forschung ist dementsprechend geprägt durch die intensive Auseinandersetzung mit den Qualitätseigenschaften und Versagensmechanismen elektronischer Baugruppen und dem Bestreben, den Prüfaufwand in der Baugruppenfertigung durch qualitätsgerechte Auslegung der Produkte und beherrschte Prozesse zu reduzieren [4, 5].

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher, mit Methoden und Werkzeugen zur Realisierung der Vision Null-Fehler in der Produktion technologisch anspruchsvoller Elektronikbaugruppen beizutragen. Hierzu wird zu Beginn der Arbeit der Schlüsselfaktor Qualität und Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen sowie der aktuelle Stand der Qualitätssicherung in der Elektronik eingehend analysiert. Die zukünftigen Ziele leiten sich daraus unmittelbar ab. Die Null-Fehler-Fertigung in der Elektronik muß durch konsequente Prozeßbeherrschung in der gesamten Prozeßkette verfolgt werden. Um die komplexen Wechselwirkungen der verschiedenen Fertigungsschritte transparent und beherrschbar zu machen, wird eine Methodik zur prozeßübergreifenden Analyse und Optimierung in der Elektronikbaugruppenfertigung entwickelt und in exemplarischen Anwendungen demonstriert. Die Vorgehensweise sieht die Strukturierung der Prozeßkette und die Analyse potentieller Wechselwirkungen im Rahmen eines integrierten Informationsmodells vor. Auf Basis der so vernetzten Prozeß- und Prüfdaten der Einzelprozesse werden Werkzeuge zur übergreifenden Optimierung bzw. Regelung der Fertigungsqualität vorgeschlagen.

Um die Zielsetzung Null-Fehler auf dem Wege der Realisierung robuster Fertigungsprozesse zu erreichen, ist die Integration geeigneter Prozeßmonitore und treffsicherer Prüfverfahren erforderlich, die zur Prozeßüberwachung und -regelung sowie zur Detektion statistisch auftretender Fertigungsfehler eingesetzt werden können. Ein zweiter Schwerpunkt der Arbeit liegt somit in der Entwicklung und Einführung automatisierter Prüfverfahren, die neben der Prüfung der Baugruppenqualität insbesondere eine zuverlässige Charakterisierung und Führung der Fertigungsprozesse erlauben. Für die prozeßorientierte Überwachung und kurzfristige Regelung der Fertigungsqualität ist die Integration derartiger Prüfsysteme in die Prozeßkette zwingend notwendig. Hierfür sind hinreichende Prüfgeschwindigkeiten sowie mechanische und informationstechnische Schnittstellen erforderlich. Nach der Analyse der prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten werden zwei besonders prädestinierte Prüfverfahren für das Anwendungsfeld der Elektronikbaugruppenproduktion, die 3D-Laser und die Röntgeninspektion, vorgeschlagen. Mit systemtechnischen Entwicklungen wird die Integration derartiger Prüfsysteme in die Elektronikproduktion aufgezeigt.

Die Akzeptanz von Werkzeugen zur Steigerung der Fertigungsqualität hängt stark von deren Benutzerfreundlichkeit und Flexibilität ab. Aufgrund der Vielfalt anwenderspezifischer Qualitätsforderungen und sehr unterschiedlich ausgeprägter Prozeßketten ist eine flexible Gestaltung der Mechanismen zur Klassifikation und Regelung der Fertigungsqualität daher grundlegend. Zur Lösung dieser Problemstellung wird in der vorliegenden Arbeit mit dem System FuzzClass ein flexibel parametrierbares Klassifikationssystem vorgeschlagen. Hierbei wird ein wissensbasierter Ansatz verfolgt, mit dem vom Anwender die Informationen des Prozeß- und Prüfdatennetzes zu Diagnoseregeln verknüpft werden können, um damit Regelungsaktionen auszulösen. Alternativ zur regelbasierten Parametrierung der Qualitätsdiagnose können dem vorgeschlagenen System auch Klassifikationsregeln durch eine phänomenologische Verarbeitung von Signalzuständen trainiert werden. Hierzu werden lernende Verfahren auf der Basis neuronaler Netze im laufenden Systembetrieb verwendet.

Abschließend werden ausgewählte praktische Anwendungen der entwickelten Verfahren dargestellt, um eine Einordnung der verschiedenen Ansätze und Systemlösungen für verschiedene Aufgabenstellungen zu ermöglichen. Es zeigt sich, daß die vorgeschlagenen Lösungen unter Kosten/Nutzen-Erwägungen hinreichend flexibel zur nachhaltigen Steigerung der Fertigungsqualität sind.

2 Schlüsselfaktor Qualität in der Produktion elektronischer Baugruppen

Die Qualität elektronischer Komponenten ist sowohl in vielen Produktbereichen, als auch in nahezu allen Produktionsmitteln zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden. Am Beispiel des Automobils wird die zunehmende Durchdringung von Produkten mit Elektronik besonders deutlich. Motiviert durch ständig steigende Anforderungen an Sicherheit, Komfort und Umweltverträglichkeit gibt es in modernen Fahrzeugen kaum eine Funktion, die nicht elektronisch gesteuert oder geregelt wird. Neben der Integration elektronischer Systeme in die Fahrzeugelektrik und Motorsteuerung sind Antiblockier-, Airbag-, Gurtstrafersysteme, Diebstahlsicherung, Sitz- und Spiegelmemory und vieles andere mehr bereits zum Standard geworden. Die nächste Generation elektronischer Komponenten im Automobil, wie z. B. die aktive dynamische Fahrwerksregelung, befindet sich aktuell in der gehobenen Automobilklasse in der Einführung.

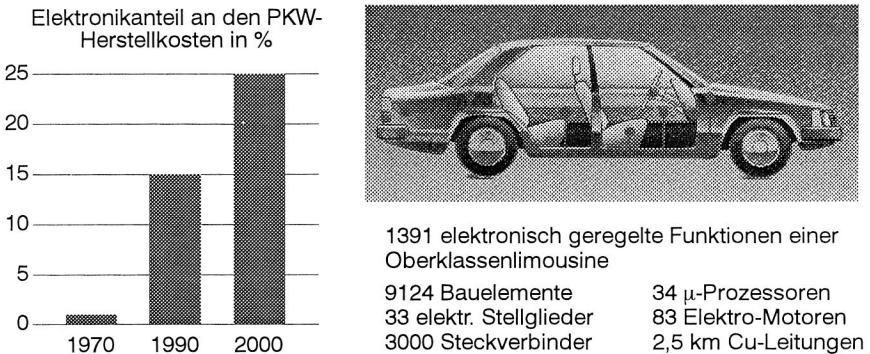


Bild 1: Entwicklung des Elektronikanteils an den Herstellkosten eines PKW (nach [6, 7])

Dies drückt sich auch in den anteiligen Kosten für die Elektronik an den gesamten Herstellkosten eines Automobils aus. Nach einer Studie des VDA konnte bereits 1994 durchschnittlich von einem Anteil von ca. 20 % der Herstellkosten eines Automobils ausgegangen werden, die als Zulieferprodukte in der Form elektronischer Baugruppen in das Fahrzeug eingehen (Bild 1). In der gehobenen Klasse liegt der Kostenanteil heute bereits bei ca. 30 % [6]. Grundsätzlich ist alle zwei Jahre mit einer Verdopplung des Funktionsumfangs elektronisch geregelter Funktionen im Automobil zu rechnen [7].

Am Beispiel der Automobilelektronik zeigt sich das Spannungsfeld zwischen größtmöglicher Absicherung potentieller Risiken und dem Zwang zu wirtschaftlicher Fertigung. Trotz rauher Einsatzbedingungen durch Erschütterungen und starke Temperaturwechsel müssen die Baugruppen über einen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren zuverlässig funktionieren. Dies gilt besonders für die sog. Sicherheitselektronik, deren Funktion unter Umständen lebenswichtige Bedeutung hat, im gleichen Maße jedoch auch für die sog. Komfortelektronik, da insgesamt höchste Qualitätsforderungen erfüllt werden müssen [7]. Zusätzlich führen die unter dem Schlagwort Produkthaftung zusammengefaßten Einflüsse zu verschärften Anforderungen an das Qualitätsmanagement mit umfassend protokollierten Entwicklungs- und Fertigungsprozessen. Gleichzeitig steht die Automobilzulieferindustrie unter starkem internationalen Konkurrenz- und Kostendruck.

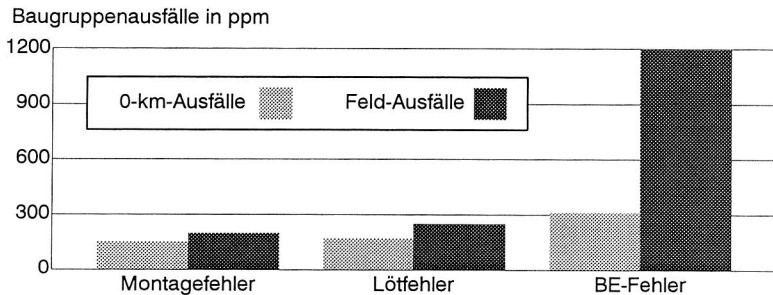


Bild 2: Gegenüberstellung von Einbauqualität und Felddausfällen von Baugruppen der Automobilelektronik. Basis: 1 Mio. Elektronikbaugruppen [7]

Eine über den Zeitraum von einem Jahr bei einem Automobilhersteller an ca. 1 Mio. Steuergeräten durchgeführte Analyse von 0-km- und Felddausfällen zeigt, daß nach den Bauelementefehlern die Verbindungsqualität an zweiter Stelle der Ausfallursachen steht (Bild 3). Während bei Montagefehlern und Lötfehlern die Anteile in etwa gleich auf 0-km- und Felddausfälle verteilt sind, treten im Feldeinsatz die Frühausfälle von Bauelementen als wesentliche Versagensursache hervor. Bei den Versagensfällen besteht ein deutlicher Unterschied zwischen Sicherheitselektronik und Karosserieelektronik. Nur 21,5 % aller Versagensfälle betreffen sicherheitskritische Baugruppen. Dieser Umstand läßt sich mit den erheblich aufwendigeren Testverfahren bei der Produktion sicherheitskritischer Baugruppen erklären. Es werden z. B. sog. Screening- oder Run-In-Testmethoden, d. h. elektrische Endprüfungen mit gleichzeitiger Temperaturbeaufschlagung, serienmäßig durchgeführt (siehe Kapitel 2.3.3). Mit diesen sehr zeit- und kostenintensiven Prüfschritten können mangelhafte Bauelemente oder Fertigungsfehler, die erst beim Kunden im eingebauten Zustand zu Frühausfällen führen würden, durch eine Simulation der Betriebsbelastungen erkannt werden.

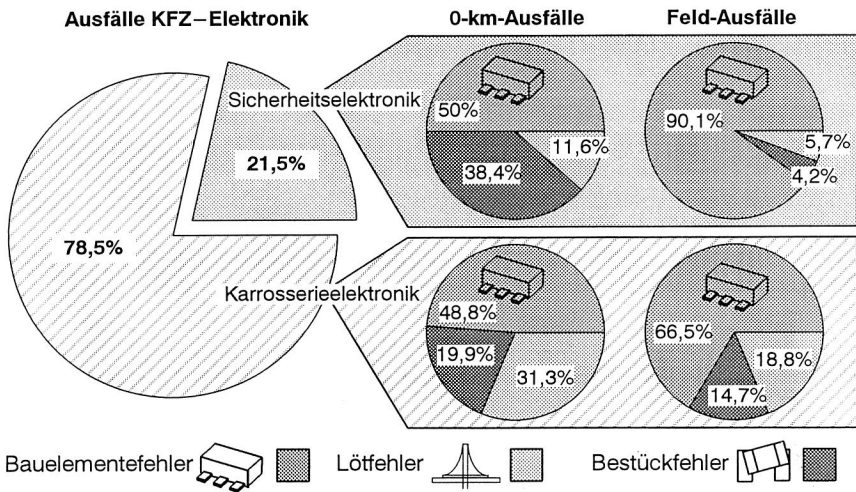


Bild 3: Verteilung der Feld- und 0-km-Ausfälle bei Sicherheits- bzw. Karosserieelektronik und deren Ursachen Bauelemente-, Bestück- u. Lötfehler [7]

2.1 Randbedingungen für die Qualitätssicherung in der Elektronik

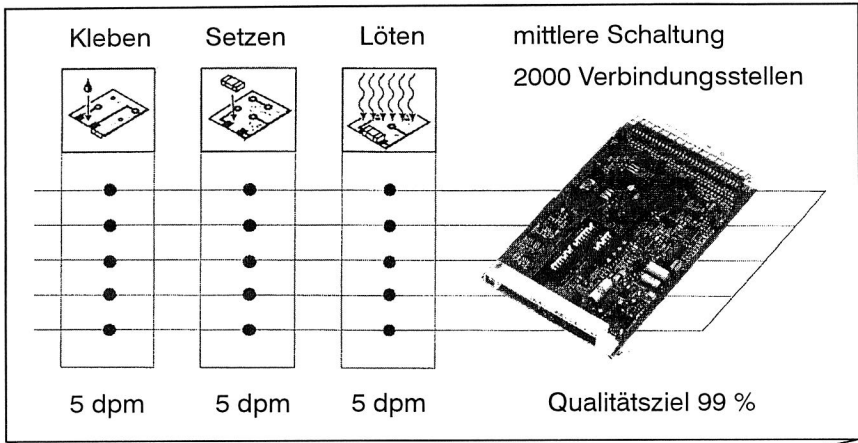
Die Qualitätssicherung in der Elektronik ist durch charakteristische Randbedingungen gekennzeichnet, die eine direkte Umsetzung des Anspruches einer beherrschten, qualitätsfähigen Produktion behindern. Dies sind zunächst die schnellen Innovationszyklen bei Produkten und Prozessen, die ständig neue Herausforderungen für die Prozeßbeherrschung darstellen. Weiterhin beeinträchtigt die mehrstufige Prozeßkette und die hohe Anzahl von Bauelementen bzw. Lötverbindungen pro Baugruppe auch bei weitgehend beherrschten Einzelprozessen die Gesamtausbeute. Eine zusätzliche Einflußgröße stellen die zum Teil sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Qualität dar. Die verbleibenden Risiken müssen daher mit der bestmöglichen Überwachung und Protokollierung der Prozesse abgesichert werden. Dies dient als Grundlage für eine systematische Optimierung der Prozesse sowie einer vielfach kundenseitig geforderten durchgängigen Fehlerrückverfolgbarkeit bzw. zum Nachweis der Fehlerfreiheit im Falle einer evtl. Produkthaftungsfrage.

2.1.1 Schnelle Innovation bei Produkten und Prozessen

Bei den Bauelementen der Elektronik werden durch die Integration von Schaltungsfunktionen und gleichzeitige Miniaturisierung von Jahr zu Jahr immense Leistungssteigerungen erzielt. Die Elektronikbaugruppen werden auf diese Weise technologisch anspruchsvoller, z. B. indem höhere Taktfrequenzen zu realisieren sind und die Anzahl der elektrischen Verbindungen steigt. Dies geht mit immer kleineren Rastermaßen seitens der Bauelementgehäuse- und Leiterplattentechnologien einher. Die schnellen Innovationszyklen stellen herkömmliche Ansätze zur Sicherung der Qualität von Produkten und Materialien anhand von Gütevorschriften in Frage. In der Zeit bis sich ein Bauelement im Feldeinsatz als qualitätsfähig herausstellt und eine Gütevorschrift erstellt werden kann, wird es unter Umständen bereits durch neue Bauelemente ersetzt. D. h., die Qualität muß von vornherein in der Entwicklung und Fertigung sichergestellt werden. Die Innovation in den Produkten erfordert daher eine synchron verlaufende Prozeßentwicklung. Dies betrifft sowohl einzelne Prozeßschritte als auch das Zusammenspiel aller fertigungstechnischen Einflußgrößen in der Prozeßkette, z. B. die zulässigen Maßtoleranzen von Bauelementen und Leiterplatten, die genaue Einhaltung der erforderlichen Lotmengen, Bestückgenauigkeiten, Lötprofile und schließlich der Eignung der eingesetzten Testverfahren. Jeder Teilschritt zur Sicherung der Qualität in der Prozeßkette ist dabei auf die Anforderungen und Wechselwirkungen der gesamten Prozeßkette auszurichten.

2.1.2 Vielstufige Prozeßkette und hohe Parallelität in den Einzelschritten

Weitere Herausforderungen für die Fertigungsqualität in der Elektronikbaugruppenproduktion werden durch die Vielzahl von Bauelementen und Fertigungsschritten verursacht [8]. Schon die Betrachtung der Anzahl von Lötverbindungen pro Baugruppe zeigt, daß selbst Qualitätsniveaus von wenigen "defects per million" – d. h. Fehlerraten von wenigen Ausfällen pro Million – pro Prozeßschritt und Bauelement zu beträchtlichen Qualitätseinbußen führen. In Bild 4 ist die Ausbeute, d. h. der Anteil fehlerfreier Baugruppen, abhängig von der Anzahl von Lotverbindungen und der kumulierten Fehlerrate der beteiligten Fertigungsprozesse dargestellt. Dies zeigt die enormen Anforderungen an die Qualität der einzelnen Fertigungsprozesse. Zudem sind die Prozesse sehr stark durch technologische Wechselbeziehungen zu anderen Prozeßschritten geprägt. Optimierungen sind somit nur in einer gesamtheitlichen Sicht über alle Prozeßschritte möglich. Die kundenseitig geforderten Qualitätsniveaus liegen ebenfalls im Bereich von wenigen defects per million. Diese werden jedoch in der Regel auf die gesamten Baugruppen bezogen. Da das Ziel der Null-Fehler-Produktion ohne Prüf- und Kontrollschritte nicht für jeden Prozeßschritt erreichbar ist, bleibt ein beträchtlicher Prüfaufwand weiterhin unvermeidlich. Die Auswahl geeigneter Prüfmethoden und -strategien und deren Integration in die Prozeßkette ist demzufolge ein wesentlicher Schwerpunkt in der vorliegenden Arbeit.



Beispiel: Baugruppe mit 2000 Verbindungsstellen und mittlerer Fehlerquote von 5 dpm

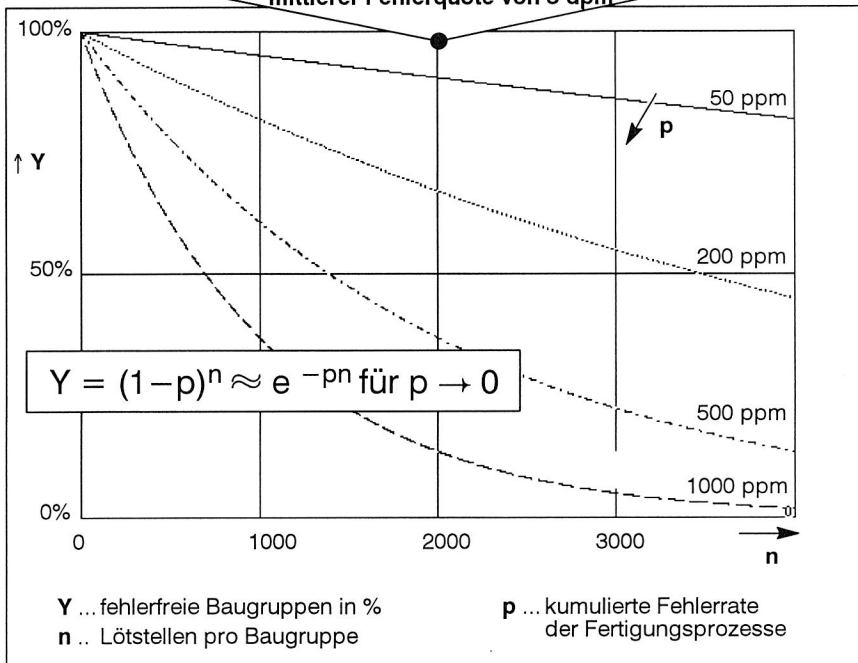


Bild 4: Anteil fehlerfreier Baugruppen Y in Abhängigkeit von der Anzahl n der Verbindungsstellen pro Baugruppe und der Prozesssicherheit p

2.1.3 Auswirkungen der Produkthaftung

Ergänzend zu den allgemeinen Rechtsvorschriften sind die Ansprüche von Verbrauchern gegenüber den Herstellern von Produkten seit 1990 durch das Produkthaftungsgesetz PHG geregelt [9]. Das Gesetz verpflichtet Produzenten zu Schadenersatzleistungen für Schäden, die durch fehlerhafte Produkte beim Benutzer verursacht werden. Diese Schadenersatzpflicht besteht nicht, wenn das Produkt fehlerfrei bzw. ein Fehler nach dem Stand der Wissenschaft und Technik nicht erkennbar war, als es in Verkehr gebracht wurde.

Der Nachweis der Fehlerfreiheit ist hierbei durch den Hersteller zu führen ist, d. h. es gilt die sogenannte Beweislastumkehr gegenüber herkömmlichen Haftungs- oder Verschuldensfragen. Für die Produkthaftung relevant sind daher neben der fehlerfreien Entwicklung, Konstruktion und Herstellung auch alle Maßnahmen, mit denen die Fehlerfreiheit während der Fertigung bzw. bei Auslieferung überprüft und nachweisbar dokumentiert werden kann (Bild 5). Um die mit einer mangelhaften Qualität verbundenen Risiken zu minimieren, ist daher neben dem Schwerpunkt der Fehlerprävention auch weiterhin der Einsatz von Prüfprozessen zur Absicherung der Qualität sowie in zunehmenden Maße eine möglichst lückenlose Dokumentation aller Prozeß- und Prüfdaten in einem integrierten Informationsmodell erforderlich.

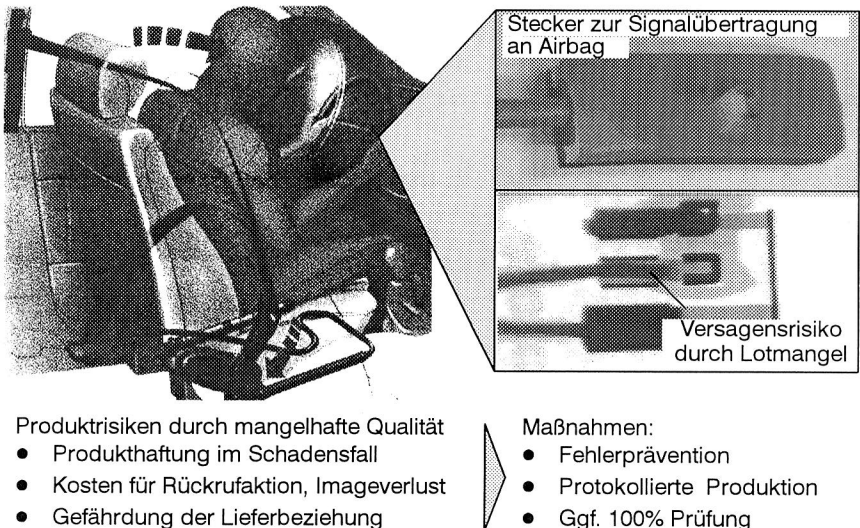


Bild 5: Absicherung der Risiken der Produkthaftung am Beispiel eines sicherheitskritischen Steckverbinders im Automobil

Da elektronische Baugruppen in der Regel kein direktes Endprodukt für den Verbrauchermarkt darstellen, sondern zumeist Zulieferprodukte sind, ist der Hersteller der elektronischen Baugruppen zunächst nicht direkt von den Schadensforderungen eines Endverbraucher-Kunden betroffen. Nach dem Produkthaftungsgesetz haften jedoch sowohl der Hersteller des Endprodukts, als auch die Hersteller von Grundstoffen und Zulieferprodukten gesamtschuldnerisch gegenüber dem Geschädigten, jeweils bis zur vollen Höhe des entstandenen Schadens [10].

Aus der übergeordneten Verpflichtung des Herstellers im Sinne des Produkthaftungsgesetzes nur fehlerfreie Produkte zu liefern, können zwar keine direkten Maßnahmen bezüglich der technischen und organisatorischen Umsetzung dieser Anforderungen abgeleitet werden. Die Sorgfaltspflicht des Herstellers der Endprodukte zwingt den Hersteller jedoch, nur solche Teile zu verwenden, von deren einwandfreier Beschaffenheit er überzeugt ist. In der Regel wird eine alleinige Endprüfung der Produkte hierbei als unzureichend angesehen, da nicht gesichert ist, daß auch sonstige Fehlerquellen hinreichend berücksichtigt sind. Eine Verpflichtung zur Wareneingangsprüfung besteht hingegen nicht. Als zentraler Punkt wird daher das Streben nach Prozeßbeherrschung über alle Phasen der Produktentstehung durch alle an der Wertschöpfung Beteiligten angesehen.

2.2 Qualität und Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen

Für eine qualitätsgerechte Auslegung von Produkten und Prozessen in der Elektronik ist die Spezifikation der Eigenschaften erforderlich, die im Produkteinsatz letztendlich zu guter oder schlechter Zuverlässigkeit führen. Diese durch den Anwender vorgegebene Zielgröße ist durch die Belastungssituationen beim Produkteinsatz ebenso wie durch die Erwartungshaltung des Anwenders stark beeinflusst (Bild 6). Herstellerseitig muß angefangen von der Produktidee bis zum Service beim Produkteinsatz oder der Rücknahme der Geräte die Qualität der Produkte und Dienstleistungen auf die Kundenerwartungen eingestellt werden. Im folgenden wird daher die Qualität und Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen bzgl. der Qualitätsanforderungen, Belastungsarten und Versagensmechanismen analysiert, um daraus unter den vorgegebenen Randbedingungen eine Zielgröße für die Entwicklung qualitätsfähiger Fertigungsprozesse abzuleiten. Die Qualitätsvorgaben sind daher nicht allgemeingültig formulierbar. Sie werden in der Regel durch gemeinsame Zielvereinbarungen zwischen Zulieferern und Abnehmern vereinbart. Dies betrifft die Spezifikation von Qualitätseigenschaften und entsprechender Prüfvorschriften sowie quantifizierte Zielsetzungen für maximal zulässige Abweichungen von der Lieferqualität.

Die Zielgröße Lieferqualität wird in der Elektronik üblicherweise in dpm-Werten (defects per million), d. h. die Anzahl auftretender Fehler pro Million Baugruppen, dargestellt. Es wird dabei unterschieden zwischen der sog. Einbauqualität - bei Automobilanwendungen auch 0-km-Qualität genannt - und der Quote der Feldausfälle. Im Falle eines Autoradioherstellers ist die angestrebte Einbauqualität 200 dpm [11]. Das heißt, 2 von 10000 Radios dürfen während des Einbaus Fehler aufweisen, wobei sämtliche Fehlerarten einschließlich falscher Produktbeschriftung, Verpackungsfehler oder ähnliche Fehlerarten, die die Funktion des Radios nicht beeinträchtigen, mit berücksichtigt werden.

2.2.1 Qualitätsforderungen und Belastungsarten

Wie im einführenden Beispiel aus der Automobilelektronik bereits erwähnt wurde, ist die Verbindungstechnik nach dem Bauelementeversagen die zweithäufigste Versagensursache bei elektronischen Baugruppen. Besondere Aufmerksamkeit muß hierbei auf die miniaturisierten Lötstellen bei oberflächenmontierten Bauelementen gerichtet werden. Da in der Oberflächenmontage bei reinen Reflow-Lötvorgängen in der Regel auf eine Bauelementefixierung mittels Klebetröpfen verzichtet wird, haben die Lötstellen neben ihrer elektrischen Funktion die Aufgabe, das Bauelement mechanisch zu fixieren. Dies ist aufgrund der Werkstoffeigenschaften von Loten prinzipiell kritisch, umso kritischer jedoch, je kleiner die realisierten Lötverbindungen sind.

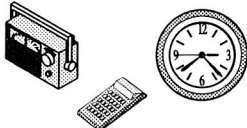
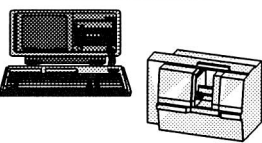
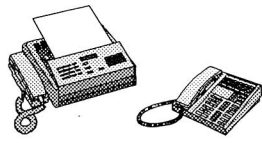

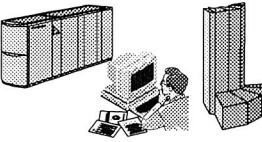

Konsumelektronik  Temperaturbereich: $+0^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$ Zyklendauer: 12 h Nutzungsdauer: 1 ... 3 Jahre	Industrieelektronik  Temperaturbereich: $-55^{\circ}\text{C} \dots +95^{\circ}$ Zyklendauer: 12 h Nutzungsdauer: ~ 10 Jahre	Telekommunikation  Temperaturbereich: $-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$ Zyklendauer: 12 h Nutzungsdauer: 7 ... 20 Jahre
Automobilelektronik  Temperaturbereich: $-55^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$ Zyklendauer: 1 h Nutzungsdauer: ~ 10 Jahre	Computer  Temperaturbereich: $+15^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$ Zyklendauer: 2 h Nutzungsdauer: ~ 5 Jahre	Luft- & Raumfahrt  Temperaturbereich: $-55^{\circ}\text{C} \dots +95^{\circ}\text{C}$ Zyklendauer: 2 h Nutzungsdauer: 5 ... 30 Jahre

Bild 6: Einsatzbereiche von Elektronikbaugruppen (Zahlenangaben nach [12-15])

Die geringe Kriechfestigkeit von Zinn-Blei-Loten unter mechanischen Belastungen sowie unter Temperaturbeanspruchung wirkt sich hierbei sowohl positiv als auch negativ auf die Qualität und Zuverlässigkeit der Baugruppen aus. Positiv, indem sich Spannungszustände in der Lötstelle durch plastische Verformung abbauen können. Negativ, indem die Belastbarkeit der Lötstellen prinzipiell gering ist [16]. Den unterschiedlichen Belastungsarten, die durch die Alterung der Baugruppen schließlich zum Versagen der Baugruppen führen, stehen sehr unterschiedliche Qualitätsanforderungen und Lebensdauererwartungen gegenüber. Eine generell gültige Spezifikation der Qualität elektronischer Baugruppen ist demzufolge nicht möglich, sondern muß abhängig vom Anwendungsspektrum der Baugruppen erfolgen [17].

2.2.2 Grundsätzliche Versagensmechanismen in Weichlötstellen

Wie oben erwähnt sind die Zuverlässigkeitseigenschaften von Lötstellen in der Oberflächenmontage kritischer zu beurteilen als bei Lötstellen in Durchsteckmontage, die neben ihrer größeren Lotmenge auch mechanisch robuster aufgebaut sind. Abgesehen von dem Umstand, daß die rein visuelle Betrachtung der Verbindung nur unter dem Mikroskop erfolgen kann, wird deutlich, daß die Qualität der Verbindung durch metallurgische Kriterien, wie Körnigkeit des Gefüges und Ausbildung intermetallischer Phasen, beeinflußt wird. Eine visuelle Beschaffenheit der Lötstellen kann daher nur ein Aspekt neben mehreren sein, der ein Indiz für die Qualität darstellt. Weitere zu berücksichtigende Kriterien sind u. a. die konstruktive Auslegung der Lötstelle, die Eigenschaften der verwendeten Lote und Fügepartner sowie die Prozeßparameter während des Lötens.

Wachstum intermetallischer Schichten

Den schematischen Aufbau einer weichgelöteten Verbindung zeigt Bild 7 am Beispiel eines verlöteten Bauelementeanschlusses. Zwischen der Metallisierung des Bauelementes und dem Lot sowie zwischen Lot und der Metallisierung der Leiterplatte bildet sich jeweils eine intermetallische Phase aus. In verschiedener Hinsicht können diese, durch einen thermisch aktivierten Wachstumsprozeß entstehenden Schichten, die mechanischen Eigenschaften des Verbundsystems beeinflussen [18]. Entsprechend der Dicke dieser Schichten, die nicht nur weich, sondern auch hart und brüchig sein können, verändert sich die Wahrscheinlichkeit, daß es zur Rißbildung kommt. Die Verbindung Gold/Zinn ist beispielsweise sehr brüchig und sollte vermieden werden. Ist die Metallisierung auf einer der zu verbindenden Komponenten sehr dünn oder ist die Wachstumsrate der intermetallischen Schicht hoch, so kann im Extremfall die Metallisierung aufgebraucht und vollständig zur intermetallischen Phase umgewandelt werden. Eine Lösung der Verbindung ist im allgemeinen die Folge. Besonders bei Dauerbelastung unter erhöhten Temperaturen muß dieser Me-

chanismus bedacht werden [19]. Eine 2 μm dicke gelötete Nickelschicht ist z. B. nach 250 Stunden bei 125°C zur Hälfte umgewandelt. Weiterhin kann es zur Verformung und zum Bruch kommen, falls sich Einschlüsse des Basismaterials (Oxide im Kupfer u. ä.) an der Grenzschicht zwischen Metallisierung und intermetallischer Schicht anreichern und diese schwächen [20].

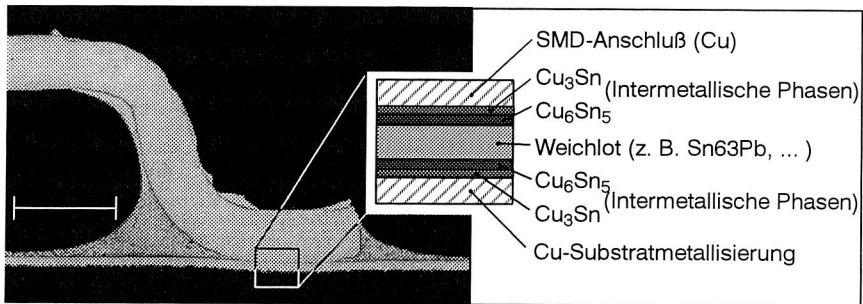


Bild 7: Ausbildung intermetallischer Zonen in SMD-Weichlotverbindung

Scherspannungen durch Temperaturwechsel

Die Zuverlässigkeit von Elektronikbaugruppen wird maßgeblich durch deren Einsatzbedingungen beeinflusst. Ein Beispiel ist die Entstehung von Rissen in Lötstellen durch thermische Ermüdung, verursacht durch Thermozyklen, die durch die Baugruppe selbst, z. B. bei häufigen Ein-/Ausschaltvorgängen oder durch äußere Einwirkungen hervorgerufen werden. In einigen Produktparten, wie z. B. der Automobilelektronik, treten die thermischen Wechselbeanspruchungen zudem gepaart mit mechanischen Wechselbeanspruchungen auf [7]. Erst mit der Kenntnis der Qualitätsforderungen und Einsatzbedingungen der Geräte, den prinzipiellen Versagensmechanismen an elektronischen Baugruppen und den Wechselbeziehungen mit der qualitätsoptimierten Gestaltung und Ausführung der Baugruppen lassen sich qualitätsgerechte Produkte erzielen [21].

Die Einwirkung von Temperaturwechselbeanspruchungen an Lötstellen führt – bedingt durch verschiedene Ausdehnungskoeffizienten von Bauelement, Lot, und Substrat – zu unterschiedlichen Wärmeausdehnungen und damit zur Induzierung von Eigenspannungen in der Lötverbindung. Der Effekt tritt sowohl global zwischen Bauelement und Substrat, als auch lokal an den Grenzflächen zwischen Lotmaterial und Bauelement bzw. Leiterplattenmetallisierung auf. Analytische Untersuchungen mit Finite-Elemente-Berechnungen zeigen die thermisch induzierten Spannungsmaxima

an Lötstellen auf, z. B. die Lotferse und die Zehenspitze bei sog. Gullwing-Verbindungen [22]. Experimentelle Untersuchungen des Alterungsverhaltens bestätigen anhand von Schlifffbildern die Rißeinleitung an Stellen mit maximaler Belastung [23].

Während des Feldeinsatzes ist eine Lötverbindung Schwankungen der Umgebungstemperatur, der lokal verschiedenen Abwärme anderer elektronischer Komponenten und Temperaturschwankungen durch Ein- und Ausschalten ausgesetzt. [24, 25]. Durch die verschiedenen Längenausdehnungskoeffizienten von Leiterplattenmaterial, Lot und SMD-Bauelement treten Scherkräfte auf [26]. Plastikgehäuse, Chipträger und Anschlußbeine können diesen Kräften zwar etwas nachgeben, die relativ starre Lötverbindung muß die resultierenden Spannungen jedoch aufnehmen. Durch plastische Verformung, die bei typischen Einsatztemperaturen möglich ist, werden die Spannungskonzentrationen abgebaut. Versetzungsbewegungen, Abgleitvorgänge und die Entstehung von Ermüdungsgleitbändern sind die Folge. Mikrorisse bilden sich durch Zusammenlagerung von Leerstellen in den Gleitbändern oder durch Versetzungsaufstau an [27]. Mechanische Belastungen bzw. eine zyklische Wiederholung der plastischen Verformung können zum Ermüdungsbruch führen.

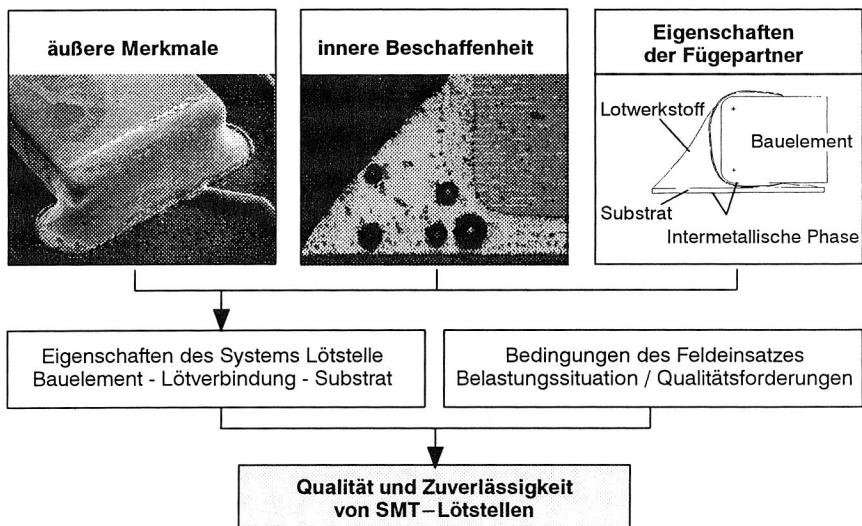


Bild 8: Einflußfaktoren auf die Beurteilungskriterien zur Lötstellenqualität

Mikrostrukturelle Veränderungen des Weichlotes

Die Mikrostruktur der Lötstelle wird primär durch Prozeßparameter wie Lötzeit und Abkühlrate bestimmt, kann sich jedoch unter bestimmten Bedingungen im Feldeinsatz verändern. Bei mehrphasigen, eutektischen Lotverbindungen beeinflussen thermisch aktivierte Diffusionsprozesse die Mikrostruktur des Lotmaterials. Entsprechend dem zugehörigen Phasendiagramm der Verbindung ändert sich bei bestimmten Temperaturen die Phasenstruktur des Lotes. Wechselwirkungen zwischen Phasengrenzen verändern so die mechanischen Eigenschaften des Lotmaterials in unter Umständen negativer Weise. Unter thermomechanischer Belastung verändert sich außerdem das Gefüge des Lotes schneller als bei konstanter Temperatur. Durch schwer berechenbare Mechanismen wie Kornwachstum, Poren- und Rißbildung oder Bildung intermetallischer Schichten wird die Vorhersage über die Langzeitstabilität erschwert [28].

2.2.3 Beurteilungskriterien für die Qualität und Zuverlässigkeit

Die Bereitstellung objektiver Bewertungsmaßstäbe für die Qualitätsbeurteilung elektronischer Baugruppen und insbesondere für die Lebensdauerprognose von Weichlötstellen ist weltweit Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten. Als aktuelle Beispiele seien hierfür das Avionic Integrity Program (AVIP) der United States Airforces [28] sowie das Verbundprojekt "Zuverlässigkeitsuntersuchungen von SMT-Weichlötstellen im visuellen Grenzfallbereich" [29] genannt. Um die Grundlagen für die Beurteilung von Qualitäts- und Zuverlässigkeitseigenschaften elektronischer Baugruppen zu schaffen, werden dort umfangreiche experimentelle Versuchsprogramme zur Festlegung geeigneter Bewertungs- und Grenzfallkriterien durchgeführt. Die Ergebnisse werden dem Anwender als Nachschlagewerk zur Verfügung gestellt, um diesen bei der Spezifikation der für ihn geeigneten Qualitätsstandards zu unterstützen.

Analysen der betreffenden internationalen Normen und Firmenstandards zur Lötstellenbeurteilung weisen Widersprüche in der Angabe von Beurteilungskriterien und Entscheidungsgrenzen auf [30]. In der Praxis der Baugruppenfertigung führt dieser Umstand zu erhöhten Kosten für Inspektion und ggf. zu ungerechtfertigten Nachbearbeitungs- bzw. Reparaturmaßnahmen [31, 32]. Zusätzlich führen unnötige Reparaturvorgänge zu einer Herabsetzung der Qualität der Lötstellen, da die beim Nachlöten eingebrachte Wärmeenergie mit dem Wachstum der relativ spröden intermetallischen Phasen in der Lotverbindung sich schädigend auswirkt [33, 34]. In der Praxis der Baugruppenfertigung kommen in der Regel für die Beurteilung der Fertigungsqualität nur einfache zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie z. B. die Mikroskopanalyse zum Einsatz. In ausgewählten Fällen werden aufwendigere zerstörungsfreie Verfahren wie Laser-, Röntgen- oder Ultraschalluntersuchungen sowie stichprobenweise auch Schliffuntersuchungen oder Abreißtests angewandt (Bild 9).

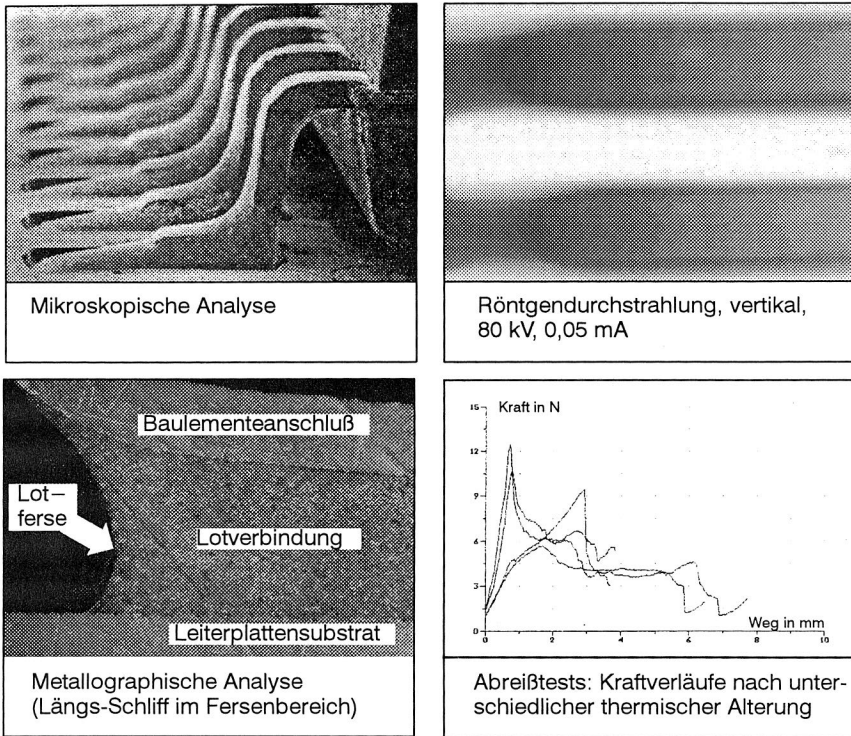


Bild 9: Beispiele zur Charakterisierung der Qualität von Lötverbindungen durch zerstörungsfreie und zerstörende Prüfverfahren

2.3 Aktueller Stand der prozeßintegrierten Qualitätssicherung in der Elektronik

Nach der Definition der Deutschen Gesellschaft für Qualität wird mit dem Begriff Qualität die "Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bezüglich ihrer Eignung festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen" beschrieben. Der Begriff Qualitätsmanagement umfaßt "die Gesamtheit aller qualitätsbezogenen Tätigkeiten und Zielsetzungen". Ein Qualitätsmanagement-System enthält daher alle Mittel, um das Qualitätsmanagement sachgerecht und wirtschaftlich durchzuführen, d. h. "die zur Verwirklichung des Qualitätsmanagements festgelegte Organisationsstruktur, Zuständigkeiten, Verfahren und erforderlichen Mittel" [35]. Aus den zugrundegelegten Definitionen ist ersichtlich, daß es keine allgemeingültige genormte Fassung eines

Qualitätsmanagement-Systeme geben kann, denn die Elemente müssen spezifisch auf die Belange der einzelnen Unternehmen zugeschnitten sein. Dennoch hat sich seit dem Ende der achtziger Jahre die Norm DIN ISO 9000 als das zentrale Rahmenschema für Qualitätsmanagement-Systeme herauskristallisiert und findet auch in der Elektronikindustrie breite Anwendung. Eine spezifische Handlungsanleitung für die Ergreifung gezielter Maßnahmen zur Prozeßbeherrschung ist damit jedoch nicht verbunden [36].

Eingrenzung der Begriffe und des Analyseumfangs

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden mit dem Begriff des prozeßintegrierten Qualitätsmanagements diejenigen Aktivitäten bezeichnet, die sich auf der Planungs- und Fertigungsebene direkt mit den zu fertigenden elektronischen Baugruppen auseinandersetzen. Im besonderen sind dies die unter den Begriffen Qualitätsplanung, Qualitätslenkung und Qualitätsprüfung zusammengefaßten Aktivitäten, die im später noch vorzustellenden Modell zum prozeßintegrierten Qualitätsmanagement berücksichtigt und auf die spezifischen Besonderheiten der Elektronikbaugruppenproduktion angepaßt werden. Die in jedem Qualitätsmanagementsystem vorhandenen übergeordneten Qualitätselemente, wie die Ausarbeitung einer Qualitätsphilosophie und Qualitätspolitik, die Schaffung personeller Voraussetzungen, z. B. Mitarbeitermotivation, Qualifikation, Anreizsysteme etc. werden in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt.

2.3.1 Unscharfe Vorgaben für die Qualitätsplanung

Unter der Qualitätsplanung wird das Auswählen, Klassifizieren und Gewichten der Qualitätsmerkmale sowie das schrittweise Konkretisieren aller Einzelforderungen an ein Produkt verstanden [35]. Diese Spezifikation wird im Hinblick auf die durch den Anwendungszweck der zu fertigenden Baugruppe vorgegebenen Ansprüche erstellt. Da in der Vermeidung von Fehlern durch qualitätsgerechte Planung von Produkten und Prozessen das größte Verbesserungspotential liegt, wird mit methodischen Ansätzen versucht, optimierte Produkte und Produktionsprozesse zu gestalten. Schon die Analyse der vielfältigen Einflußgrößen erleichtert das Erkennen qualitativer Zusammenhänge, um diese in Folge zu berücksichtigen [37]. Eine Methode ist die systematische Erfassung der Einflußgrößen im sog. Ursache-Wirkungsdiagramm, z. B. geordnet nach den Kriterien Mensch, Maschine, Material, Methode und Mitwelt [38]. Weitere Beispiele für die methodische Analyse von Einflußgrößen auf die Qualität sind Fehlermöglichkeits- und -einflußanalysen (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA), die als Konstruktions-FMEA auf die qualitätsgerechte Gestaltung des Produkts und als Prozeß-FMEA auf die qualitätsgerechte Gestaltung der Herstellungsprozesse angewandt werden [39, 40].

Um Hypothesen über die Einflußgrößen auf die Qualität von Produkten und Prozessen weiter zu untersuchen, werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Um hierbei eine systematische Vorgehensweise zu unterstützen und den Versuchsaufwand möglichst zu begrenzen, werden unterschiedliche Methoden zur systematischen Versuchsplanung und -auswertung eingesetzt [41, 42]. Sobald kritische Prozeßparameter erkannt sind, kann durch gezielte Prozeßoptimierung die Voraussetzung für qualitätsfähige Prozesse und Mechanismen zur Qualitätslenkung geschaffen werden.

Für die Planung und Optimierung von Qualitätsüberwachungs- und Regelmethoden wird in [43] ein Simulationsbaustein vorgeschlagen. Verschiedene Fertigungsabschnitte werden als Eingangs-, Bearbeitungs-, Prüf- und Reparaturbausteine in einem Simulationsmodell verknüpft. Produktseitig werden die geforderten attributiven und variablen Qualitätsmerkmale sowie eingehende und ausgehende Qualitätsmerkmale pro Bearbeitungsbaustein definiert. In den Prüfbausteinen ist für jedes Qualitätsmerkmal eine statistische Vorgabe einer Prüfmethode vorgesehen. Mittels mathematisch statistischer Analyse lassen sich so Aussagen über das Qualitätsverhalten der Prozesse und die resultierenden Kosten ableiten.

Zusammenfassend werden wie oben dargestellt bereits eine Reihe von methodischen Werkzeugen für die Qualitätsplanung in der Elektronik eingesetzt. Dennoch basiert die resultierende qualitätsgerechte Auslegung der Produkte und Prozesse weitgehend auf heuristisch ermittelten Zusammenhängen, da eine vollständige Durchdringung aller Wechselwirkungen, die von der gesamten Prozeßkette sowie dem Produkteinsatz beeinflußt sind, nicht gegeben ist. Aus der Gesamtheit der anwenderseitig stark differierenden Anforderungen und der Schwierigkeit objektive Meßgrößen zu vereinbaren resultieren daher relativ unscharfe Vorgaben, die im Rahmen der Qualitätsplanung erfüllt werden müssen.

2.3.2 Qualitätslenkung auf der Basis offener Regelkreise

Im Rahmen der Qualitätslenkung werden alle vorbeugenden, überwachenden und korrigierenden Tätigkeiten bei der Herstellung eines Produkts durchgeführt. Um in der Fertigung produzierte Qualität zu erzielen, werden die als kritisch betrachteten Prozeßführungsgrößen z. B. mittels statistischer Prozeßkontrolle (SPC) überwacht [44]. Dies bezieht sich auch bei fortschrittlichen Elektronikproduzenten erst auf ausgewählte Einzelprozesse [45]. Die Ursache hierfür ist, daß als Voraussetzung eine hinreichende Maschinen- und Prozeßfähigkeit oftmals erst noch geschaffen werden muß [46]. Der Einsatz der statistischen Prozeßkontrolle erlaubt es, Schwankungen in einzelnen Prozeßkenngrößen zu überwachen und Maßnahmen zu ergreifen, um diese zu minimieren. Die abgeleiteten Maßnahmen basieren zumeist auf dem heuristischen Wissen der Anlagenbediener und werden teilweise in Form von firmeninter-

nen und allgemeinen Richtlinien dokumentiert [47]. Eine mögliche Unterstützung in der Durchführung von Maßnahmen zur Qualitätslenkung bietet die Verknüpfung zwischen Fehleranalyse und statistischer Prozeßkontrolle mittels wissensbasierten Systemen. Die kausalen Zusammenhänge zwischen aufgetretenen Fehlern und deren Ursachen werden systematisch von den Anlagenbedienern abgefragt und im wissensbasierten System abgespeichert, um so eine Grundlage für den Aufbau von hinreichend schnellen Regelkreisen in der Fertigung zu schaffen [48]. Der Aufbau von Regelkreisen wird dabei vorwiegend auf die Optimierung von Einzelprozessen bezogen. Es wird vorausgesetzt, daß vorgelagerte Prozeßschritte eine definierte Eingangsqualität bereitstellen. Abweichungen von den geforderten Eingangsgrößen müssen als Prozeßstörungen ausgeregelt werden. Der regelnde Eingriff kann erst in der Rückführung erfolgen, da der Fertigungsfehler in der Regel erst in späteren Prüfschritten erkannt werden kann. Um die damit verbundene Herabsetzung der Produktqualität und die langen Reaktionszeiten zu vermeiden, werden die Aufgaben der Prozeßüberwachung und Prozeßführung zunehmend integriert. Ein Beispiel ist die Regelung eines planaren Bestückvorgangs durch optische Lagekorrektur [49]. Trotz des hohen Aufwands für den maschineninternen Regelkreis für das hochgenaue Bestücken müssen vorweg eine Reihe von Kriterien, wie z.B. die Koplanarität der Bauelementanschlüsse, sichergestellt werden, damit der Regelkreis einwandfrei funktioniert.

2.3.3 Qualitätsprüfung durch visuelle Inspektion und elektrische Tests

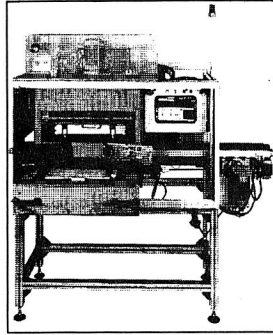
Die in der Praxis vorherrschende Konzentration auf Regelkreise auf der Ebene von Einzelprozessen führte zur vorübergehenden Trennung der Bereiche Fertigung und Prüfung von Elektronikbaugruppen. Die derzeit eingesetzten fertigungsbegleitenden Prüfschritte haben in erster Linie die Aufgabe, fehlerbehaftete Komponenten frühzeitig zu erkennen und die Weitergabe an nachgelagerte Fertigungsschritte zu verhindern. Die Rückwirkung auf die Fertigungsprozesse wird in der Regel Off-Line auf der Basis von Fehlerstatistiken durchgeführt. Dies zeigt die Notwendigkeit, die bisher getrennte Betrachtung der Qualitätsdaten, die aus Prüfvorgängen gewonnen werden, und die Optimierung der Fertigungsprozesse in ein gesamtheitliches Modell von Qualitätsregelkreisen zu integrieren [50].

In der Praxis wird die prozeßbegleitende Qualitätsprüfung in einem dreistufigen Ansatz durchgeführt (Bild 10). Vorweg wird in Eingangstests, wie Benetzbarkeitsprüfung von Bauelementen, Kontrolle der Leiterplatten und der verwendeten Lotpasten, die Anlieferqualität der eingesetzten Materialien und Komponenten sichergestellt. Während der Baugruppenfertigung werden Sichtprüfungen, d.h. visuelle Kontrolle von Baugruppen vor und insbesondere nach dem Lötprozeß, anschließend elektrisch arbeitende Testverfahren wie In-Circuit-, Funktions- und abschließend Temperaturtests durchgeführt [51].

Sichtprüfung



Elektrischer Test



Temperatur-Test

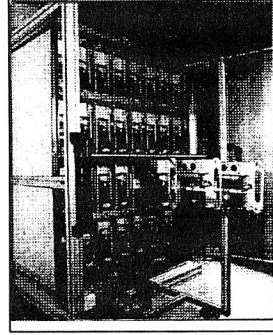


Bild 10: Qualitätsprüfung durch visuelle Sichtprüfung und elektrische Tests am Ende der Prozeßkette

Visuelle Beschaffenheitsprüfung

Insbesondere die personalintensive visuelle Qualitätskontrolle stößt zunehmend an die Grenzen der Durchführbarkeit. Ausschlaggebend hierfür sind die hohen Personalkosten, die hohe Arbeitsbelastung des Prüfpersonals und die schlechte Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse sowie der steigende Aufwand für visuelle Prüftechnik, um der fortschreitenden Miniaturisierung zu entgegnen. Ein weiterer Nachteil ist, daß Prüfergebnisse nur qualitativ erfaßt werden können und lediglich als statistische Fehlerdatenerfassung in ein Qualitätssystem eingehen können. Die Sichtprüfung mit dem Mikroskop wird üblicherweise an separaten Sichtprüfarbeitsplätzen vorgenommen, wobei die Mitarbeiter die Prüflinge auf Vollständigkeit der Bestückung, korrekte Positionierung der Bauelemente, richtige Polarität, korrekte Kontaktierung und äußere Unversehrtheit prüfen. Um die Flexibilität des Prüfpersonals zu nutzen und andererseits die physischen und mentalen Belastungen in Grenzen zu halten werden mehrere Arbeitsinhalte für die manuelle Bestückung, die visuelle Prüfung sowie für Reparaturiötarbeiten an Gruppenarbeitsplätzen integriert [52,53,54].

In einem in den USA durchgeführten Test wurde ausgebildeten Sichtprüfern eine fehlerbehaftete SMD-Baugruppe mit 850 Bauelementen zur Prüfung vorgelegt. Sie hatten die Aufgabe, alle Fehler innerhalb einer Stunde Prüfzeit zu finden und zu benennen. Keinem der Prüfer gelang es, alle Fehler zu detektieren, obwohl alle visuell erkennbar gewesen wären [16]. Offensichtlich ist neben den Einflüssen durch schwankende Konzentrationsfähigkeit ein stark subjektiver Einfluß in den Prüfentscheidungen eine weitere Ursache für große Diskrepanzen in den Aussagen unterschiedlicher Prüfpersonen. Einige Prüfer haben eine Spezialisierung auf ausgewählte

Fehlertypen, einige sind generell kritischer als andere, bzw. die Interpretation der zugrundeliegenden Prüfspezifikationen differiert bei verschiedenen Prüfern. Hinzu kommt die Abhängigkeit der Prüfpersonen von Tagesform, Ermüdung, psychosozialen Randbedingungen usw. Ebenso wird bei immer geringer werdenden Fehlerraten die Konzentrationsfähigkeit durch das sehr seltene Auftreten eines Fehlerereignisses überfordert. Demzufolge zeigen Befragungen von Prüfpersonen, daß die Arbeit sowohl körperlich als auch mental als belastend angesehen wird [53] (Bild 11).

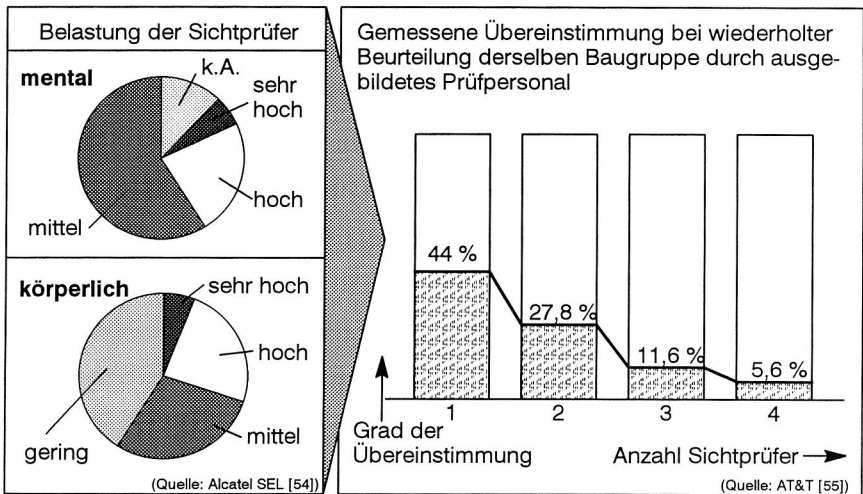


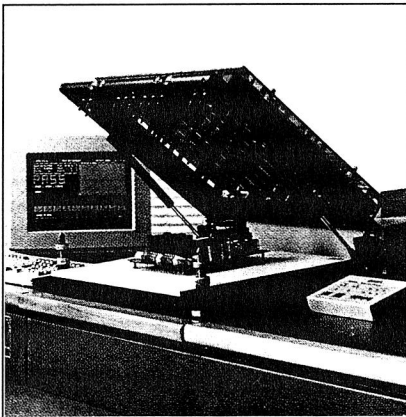
Bild 11: Körperliche und mentale Belastung an Sichtprüf- und Reparaturarbeitsplätzen in der SMD-Baugruppenfertigung

Sowohl der Einsatz der Sichtprüfung in der industriellen Praxis als auch die Anstrengungen zur Entwicklung einer geeigneten automatisierten Qualitätskontrolle konzentrieren sich auf die Kontrolle der Baugruppen nach dem Lötprozeß, da erst nach dem Löten die Qualität der Fertigungsschritte der gesamten Prozeßkette offenkundig wird. Nach [56] sind jedoch 75 % aller Lötfehler bereits vor dem Löten vorhanden, hätten also früher erkannt und zu geringeren Kosten behoben werden können. Nachteilig ist, daß nach dem Löten erkannte Fehler am Produkt nur noch in aufwendiger Nacharbeit behoben werden können bzw. als Ausschuß behandelt werden müssen. Die für das Qualitätsziel wesentliche Einwirkung auf vorgelagerte Fertigungsschritte kann somit erst relativ spät vorgenommen werden. Letzteres setzt zudem voraus, daß die Ursache-Wirkungsmechanismen zwischen Fehlerart, Fehlerentstehungsort und Fehlerursache bekannt sind. Aufgrund der Vielfalt und der

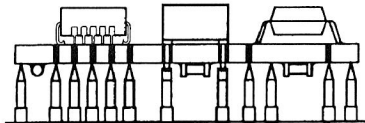
Komplexität der Einflußgrößen, die aus der gesamten Prozeßkette einschließlich der Herstellung der eingesetzten Komponenten resultieren, ist die genaue Kenntnis der Zusammenhänge in der Regel jedoch nicht sichergestellt.

Elektrische Tests am Ende der Prozeßkette

Die Prüfinhalte innerhalb der Flachbaugruppenproduktion haben sich über Jahre hinweg aus visuellen Prüfungen und abschließenden elektrischen Funktionstests zusammengesetzt. In den 80er Jahren kamen In-Circuit-Tests hinzu, die genaue und schnelle bauelementebezogene Diagnosen zuließen. Zudem trug die höhere Fehlerabdeckung des In-Circuit-Tests zur raschen Verbreitung dieses Testverfahrens bei, da auch redundante Bauelemente oder Schutzbeschaltungen geprüft werden konnten, die mit Funktionstests nicht erfaßbar sind. Der Vorteil des In-Circuit-Tests ist der im Vergleich zum Funktionstest geringe Programmieraufwand und die relativ hohe Fehlerabdeckungsrate. Nachteilig ist, daß auf diesem Wege nur die korrekte Funktion einzelner Bauelemente nachgeprüft werden kann. Die Funktion der gesamten Baugruppe muß zusätzlich im Funktionstest geprüft werden. Ein genereller Engpaß in der Anwendung der elektrischen Testverfahren ist die mechanische Adaptierung der Testpunkte auf der Baugruppe mittels Prüfadaptern. Durch die steigende Miniarisierung und Integration auf Baugruppenebene nimmt die Anzahl der zu kontaktierenden Punkte pro Flächeneinheit stark zu. Insbesondere oberflächenmontierte Bauelemente können nicht direkt mit Prüfspitzen kontaktiert werden, was die Einführung gesonderter Testpunkte auf der Leiterplatte erforderlich macht. Der elektrische Test



Problemfeld Prüfadapter



- oberflächenmontierte Bauelemente nicht direkt adaptierbar
- gesonderte Prüfpads erforderlich
- Kosten für baugruppenspezifische Prüfadapter
- Abhilfe durch integrierte Selbsttest- und Scan-Pfad-Methoden

Bild 12: Schwierigkeiten der Kontaktierung von SMD-Baugruppen mittels Nadelbett-Prüfadaptern

wird zudem durch die steigende Komplexität in der Schaltungsfunktion und die ständig steigenden Taktfrequenzen zunehmend aufwendiger in der technischen Durchführung, was einen hohen Kapitalaufwand für die eingesetzten Prüfsysteme erfordert [57]. Die Analyse und Behebung der Fehler, die durch In-Circuit- und Funktionstest entdeckt werden, kann nur durch hochqualifiziertes Prüfpersonal an aufwendig ausgestatteten Diagnose- und Reparaturplätzen durchgeführt werden. Um das Prüfpersonal hierbei zu unterstützen, werden rechnergestützte Hilfsmittel zur Verknüpfung von Fehlerbildern und Fehlerursachen entwickelt [58]. Der hohe Aufwand für die eingesetzten Prüfanlagen und die teuren Fehlerbeseitigungsmaßnahmen zeigen das Rationalisierungspotential auf, das durch eine Reduktion des Prüfaufwands mittels direkt produzierter Qualität erreicht werden kann.

Temperatur- und Temperaturwechseltests

Anschließend an den In-Circuit- und Funktionstest werden die Baugruppen einem Temperaturtest bzw. definierten Temperaturwechseltest unterzogen. Hiermit soll insbesondere die Auslieferung frühausfallgefährdeter Baugruppen an den Kunden verhindert werden, indem extreme Arbeitsbedingungen der Prüflinge vorweggenommen werden. Neben dem sehr hohen Aufwand für die Prüfanlagen sind bei diesem Prüfverfahren die langen Prüfzeiten von mehreren Stunden kritisch. Die damit einhergehende Erhöhung der Durchlaufzeiten und Bestände wirkt sich insbesondere bei hochwertigen Baugruppen negativ auf die Kapitalbindung im Umlaufbestand aus. Die Durchführung der Temperaturtestverfahren erfolgt weitgehend heuristisch, da das Grundlagenwissen über die Fehlermechanismen an Baugruppen, die durch Temperatur- und Temperaturwechselbelastung hervorgerufen werden, nicht gesichert ist [59].

2.4 Defizite und zukünftige Anforderungen

Um die hohen Qualitätsforderungen an elektronische Baugruppen und die Komplexität der Produkte und Fertigungsprozesse zu beherrschen, werden – wie oben dargestellt – eine Reihe von bewährten Methoden zur Qualitätsplanung, -lenkung und -prüfung eingesetzt. Die übergeordneten Ziele für eine prozeßintegrierte Qualitätssicherung sind mit dem Streben nach Null-Fehlerfertigung zu geringsten Fertigungskosten unverändert. Der Aufwand hierfür ist jedoch unverhältnismäßig hoch, da die verfügbaren Werkzeuge und Methoden weitgehend isoliert voneinander eingesetzt werden. Die verwendeten Prüfverfahren sind sehr zeit- und kostenintensiv in der Durchführung, die Treffsicherheit der Ergebnisse und die Rückführung auf die Fertigungsprozesse ist jedoch unzureichend und mit zu langen Totzeiten realisiert. Insbesondere durch eine verbesserte Vernetzung aller Informationen aus den Fertigungs- und Prüfprozessen und durch die vermehrte Berücksichtigung von Interprozeßab-

hängigkeiten lassen sich erhebliche Potentiale zur Rationalisierung und Qualitätssteigerung erschließen. Die zukünftigen Anforderungen an ein prozeßintegriertes Qualitätsmanagement leiten sich daher aus den bereits dargestellten Randbedingungen, Aufgaben und Defiziten ab. Im besonderen sind Methoden und Maßnahmen der Qualitätsplanung, -lenkung und -prüfung auf die folgenden Ziele auszurichten.

2.4.1 Systematische Planung robuster Produkt- und Prozeßtechnologien

Alle Maßnahmen müssen auf die Schaffung robuster, d.h. qualitätsfähiger und in gewissen Grenzen störungsunempfindlicher Prozesse hinzielen. Ein weiterer Schwerpunkt ist der Einsatz präventiver Methoden zur Sicherstellung robuster Prozeßketten und gleichzeitigen Minimierung der Fertigungskosten. Durch die konsequente Vermeidung von Fehlern in Entwicklung, Planung und Fertigung mit präventiven Methoden und robusten Fertigungsprozessen lassen sich weitreichende Effekte für eine wirtschaftliche Darstellung hoher Erzeugnisqualität erreichen.

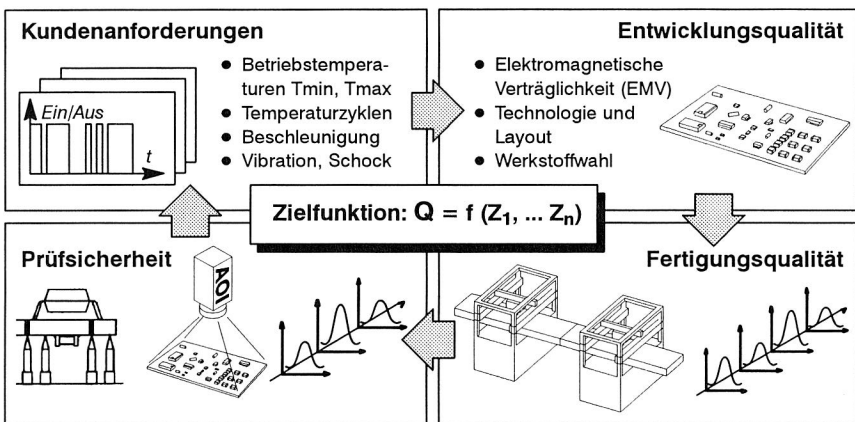


Bild 13: Zusammengesetzte Zielfunktion der Baugruppenqualität

Die Spezifikation der Eigenschaften von Produkten und Fertigungsprozessen, die ursächlich mit geforderten Qualitätseigenschaften elektronischer Baugruppen in Zusammenhang stehen, wird auch zukünftig Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten sein. Dies beginnt bei der Definition der Baugruppeneigenschaften und entsprechender objektiver Beurteilungskriterien, die mit einer geforderten Qualität und Zuverlässigkeit im Feldeinsatz der Produkte korrelieren. Im gleichen Maße ist erst auf

dieser Grundlage die Spezifikation von Führungsgrößen und zulässiger Prozeßfenster für einzelne Prozeßparameter möglich. Prüfverfahren zur Beurteilung der Baugruppenqualität müssen ebenso bzgl. ihrer Aussagefähigkeit im Hinblick auf ursächliche Qualitätseigenschaften beurteilt werden.

2.4.2 Qualitätslenkung mit integrierten Prozeß- und Prüfmonitoren

Angesichts der komplexen Wechselwirkungen, die über die gesamte Prozeßkette der Baugruppenproduktion das Zusammenspiel der Prozesse und Materialien beeinflussen, müssen für eine beherrschte Produktion die kritischen Einflußgrößen kontinuierlich überwacht werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß im ersten Ansatz nicht unbedingt alle maßgeblichen Faktoren bekannt sind, die letztendlich die resultierende Qualität bestimmen (Bild 14). Im Rahmen der Qualitätslenkung sind daher flexible Prozeß- und Prüfmonitore unabdingbar für die zu erfüllenden Aufgaben zur Steuerung der Prozesse. Die Erfassung von Prozeß- bzw. Prüfdaten muß zuverlässig erfolgen und mit kurzen Reaktionszeiten in steuernde Maßnahmen umgesetzt werden können. Mittel- und langfristig können mit den Möglichkeiten einer transparenten protokollierten Produktion Ursache-Wirkungsanalysen und Optimierungen herbeigeführt werden. In Kapitel 3 werden hierfür ein integriertes Konzept vorgeschlagen und entsprechende Werkzeuge vorgestellt.

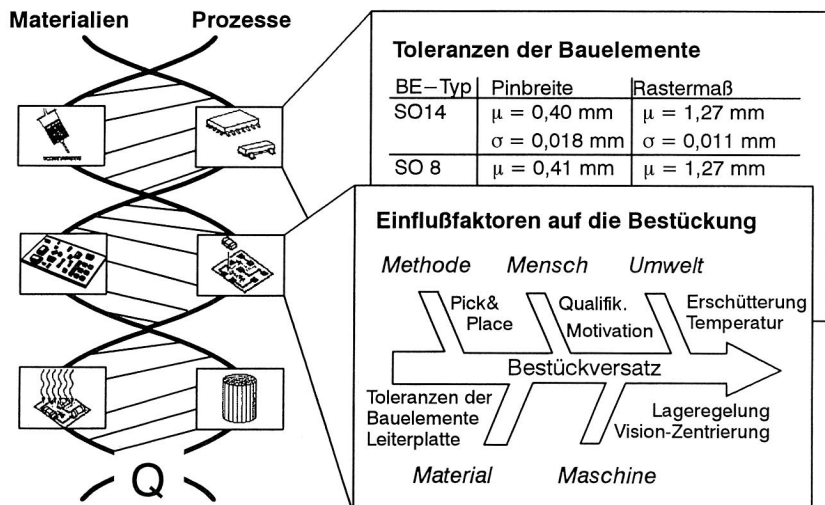


Bild 14: Prozeßkettenbezogene Vorgehensweise zu Qualitätseigenschaften von Materialien und Prozessen

2.4.3 Integration objektiver Prüfverfahren in die Produktion

Aufgrund der in Kapitel 2.1 dargestellten Randbedingungen ist ein gewisser Prüfaufwand in der Baugruppenproduktion weiterhin erforderlich. Dies gilt der Absicherung der Produktqualität sowie vorrangig der Überwachung und Führung der Fertigungsprozesse. Hierzu müssen die Prüfverfahren weitgehend in die Prozeßkette integriert werden, um die Anzahl der Fertigungsfehler, die bei einem Serienfehler auftreten gering zu halten und schnelle Regelungsaktionen zu initiieren [60]. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Anforderungen, die an Elektronikbaugruppen gestellt werden, sind die Vorgehensweisen zur Qualitätssicherung sehr heterogen. Im Falle der Qualitätsprüfung sind zum Beispiel die Prüfmerkmale und Entscheidungsgrenzen zur Klassifikation von gut- bzw. schlecht-Prüfentscheidungen stark anwendungsbezogen. Die Verfahren müssen daher weitreichende Flexibilität für die Erfordernisse verschiedener Anwender aufweisen. Darüberhinaus müssen die Verfahren für den flexiblen Einsatz in verschiedenen Phasen der Produktentstehung geeignet sein, z. B. zur Qualifikation von Technologien im Vorserienstadium, zur Stichproben- oder 100%-Prüfung von Baugruppen in der Serie, sowie zur flexiblen Überwachung ganzer Produktgruppen in einem Prüfpool (s.a. Kap. 6).

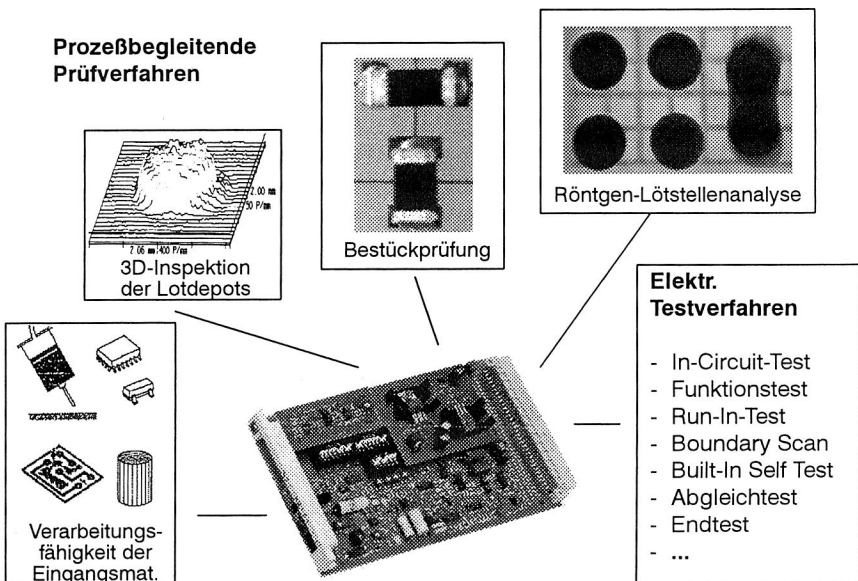


Bild 15: Eine Reihe prozeßbegleitender Prüfverfahren ergänzen den elektrischen Test

3 Modell zur Qualitätssteigerung in der Elektronik durch beherrschte Fertigungs- und Prüfprozesse

Im Rahmen dieses Kapitels wird ein methodischer Ansatz zur systematischen Qualitätssteigerung in der Elektronik vorgeschlagen. Ziel ist, die wesentlichen Einflußgrößen auf die Fertigungsqualität elektronischer Baugruppen in einer strukturierten Vorgehensweise zu ermitteln, um daraufhin gezielte Maßnahmen zur Schaffung robuster Fertigungsprozesse zu ergreifen. Ein wesentlicher Aspekt ist die Strukturierung der Prozeßkette durch das Freischneiden von Einzelprozessen mit ihren jeweiligen Prozeßparametern und die Zusammenführung der Prozeß- und Prüfparameter zu einer vernetzten Betrachtung prozeßübergreifender Wirkzusammenhänge [61]. Die wesentlichen Schritte dabei sind:

- Strukturierung der Prozeßkette und Aufbau zugeordneter Partialmodelle
- Erfassung qualitätsrelevanter Prozeß- und Prüfparameter
- Analyse der Ursache-Wirkungsbeziehungen in der Prozeßkette
- Optimierungsmaßnahmen zur Stabilisierung und Regelung der Prozesse

Die Vorgehensweise wird im folgenden vorgestellt und in Anwendungsbeispielen erläutert. Die Erfahrungen bei der Anwendung der Methodik werden am Ende der Arbeit in Kapitel 8 dargestellt und erlauben eine Einordnung und Diskussion der prozeßintegrierten Qualitätssicherung in der Elektronik. Vorweg werden in Abschnitt 3.1 die angestrebten Eigenschaften robuster Prozesse erläutert.

3.1 Eigenschaften beherrschter Fertigungs- und Prüfprozesse

Die wichtigste Voraussetzung für eine gesicherte Produktion sind stabile bzw. beherrschte Prozesse. Ein stabiler Prozeß unterliegt nur seiner natürlichen, systemimmanenten Streuung. Durch das Auftreten spezieller Einflüsse, kann eine Verlagerung des Mittelwerts bzw. ein Aufweiten der Streubreite an einzelnen Prozeßwerten auftreten. Der Prozeß wird instabil. In etwa gleichlautend ist die Definition des beherrschten Prozesses. Ein Prozeß wird als beherrscht bezeichnet, wenn die Prozeßergebnisse zufallsverteilt innerhalb der zulässigen Eingriffsgrenzen liegen und keine Hinweise auf spezielle oder systematische Störgrößen vorliegen [62]. Ist ein Prozeß stabil bzw. beherrscht, so kann die statistisch beschriebene Prozeßcharakteristik in Kombination mit den vorgegebenen zulässigen Toleranzen des Prozesses zur Bestimmung der Fähigkeitskennwerte herangezogen werden (Bild 16).

Bei der Ermittlung der Fähigkeitskennwerte von Prozessen wird zwischen den Kenngrößen Maschinenfähigkeit, Prozeßfähigkeit und Prüfmittelfähigkeit unterschieden. Bei der Ermittlung der Maschinenfähigkeit werden die Untersuchungen unter Idealbedingungen durchgeführt. Die Maschinenfähigkeitsprüfung wird in der Regel bei Abnahmeprüfungen bzw. bei zyklischen Fähigkeitsnachweisen im laufenden Produktionsbetrieb eingesetzt. Ein Beispiel ist die Messung der Bestückgenauigkeit von SMD-Bestückungsautomaten, wobei spezifische Meßnormalien zur Ermittlung der Maschinenfähigkeit eingesetzt werden. Dies sind in der Regel hochgenaue Aluminium bzw. Glasleiterplatten und spezielle Bauelemente bzw. Meßkörper, die eine leichte Bestimmung der Plazierungsgenauigkeit unter dem Meßmikroskop ermöglichen [63, 64]. Weitergehende Ansätze schließen die Ermittlung der Prozeßfähigkeit unter realen Prozeßbedingungen ein [65].

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

$$C_{pk} = \frac{\text{minimale Prozeßgrenznähe}}{\text{halbe Prozeßstreuung}} = \frac{\min|E - GW|}{3\sigma}$$

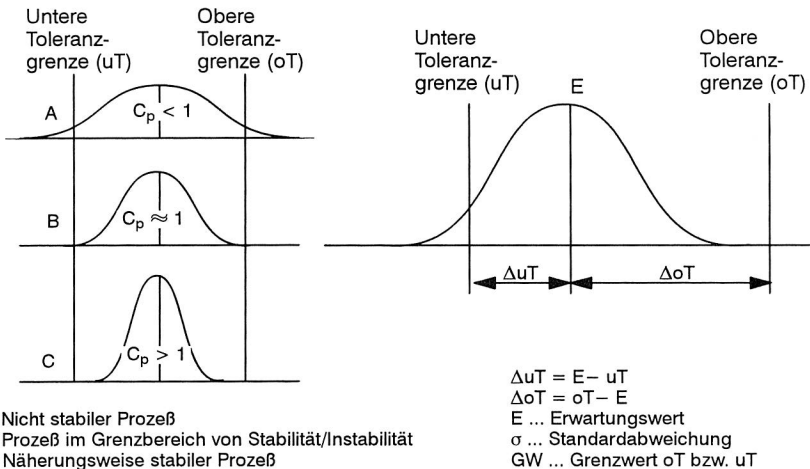


Bild 16: Kennwerte der Prozeßfähigkeit C_p und C_{pk}

In Bild 16 sind die relevanten Definitionen für die Bestimmung der Prozeßfähigkeit dargestellt. Der Prozeß wird als fähig bezeichnet, wenn sich alle Prozeßergebnisse innerhalb der geforderten zulässigen Toleranzzone befinden, d. h. $C_p, C_{pk} \geq 1$. Da dies jedoch den Grenzfall darstellt, mit dem die Prozeßstreuung das zulässige Toleranzband voll ausnutzt, wird in der Regel erst ab einem Fähigkeitskennwert C_p ,

$Cpk \geq 1,33$ von einem fähigen Prozeß gesprochen [62]. Ein Prozess wird als robust charakterisiert, falls er mit seinen gewünschten Eigenschaften auf einen angestrebten Zielwert eingestellt ist und darüberhinaus noch unempfindlich gegenüber Störgrößen oder Schwankungen in den Einstellgrößen ist [9]. Bei den Stellgrößen wird generell zwischen sog. Streufaktoren und Abgleichfaktoren unterschieden. Streufaktoren haben primär eine Auswirkung auf die Streuung der Zielwerte des Prozesses, während Abgleichfaktoren eine Verlagerung des Mittelwertes der Prozeßergebnisse bewirken. Zu unterscheiden sind folgende Arten robusten Verhaltens.

3.1.1 Robustheit aufgrund Unempfindlichkeit des Prozesses

Idealerweise verhält sich ein Prozeß unempfindlich gegenüber möglichen Störgrößen oder auch gegenüber Veränderungen in seinen Stellgrößen. In der Prozeßkette der Elektronikbaugruppenproduktion ist die Spezifikation robuster Arbeitspunkte und geeigneter Prozeßfenster für die Einzelprozesse nur in der Gesamtheit über alle Prozesse möglich. Am Beispiel des Lötprozesses wird deutlich, daß das Prozeßergebnis Lötverbindung von einer Vielzahl von Parametern aus der gesamten Prozeßkette für Lotpastenauftrag, Bestückung und Löten abhängt. Dazu kommt noch der Einfluß der Verarbeitungsfähigkeit der verwendeten Materialien Leiterplatte, Bauelemente, Lotmaterialien und Flußmittel. Ein Beispiel für robustes Prozeßverhalten ist die Fähigkeit des Reflowlötprozesses die Toleranzen der Bestückgenauigkeit von oberflächenmontierten Bauelementen in gewissen Grenzen durch einen Selbstzentriereffekt auszugleichen (Bild 17).

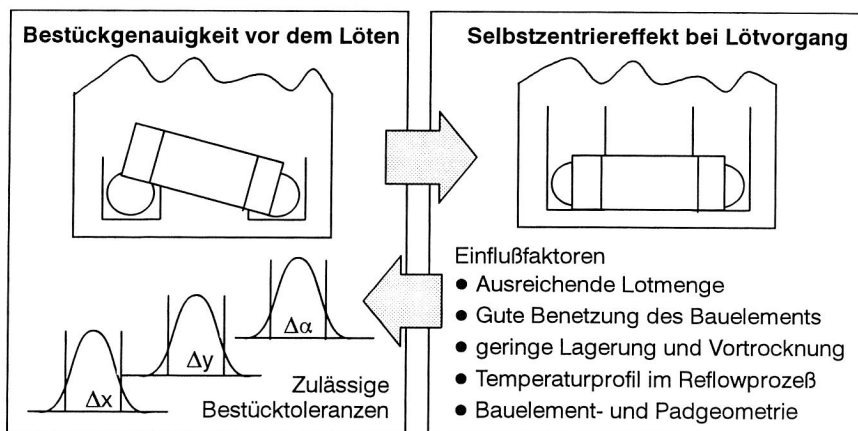


Bild 17: Robustes Prozeßverhalten, verursacht durch Selbstzentrierung beim Reflowlöten [vgl. 66]

Das Bauelement schwimmt während des Lötvorgangs nach dem Aufschmelzen der Lotpaste auf und wird durch die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes auf den Anschlußflächen der Leiterplatte zentriert, wodurch vorhandene Positionierabweichungen teilweise wieder ausgeglichen werden können. Dieser Effekt ist gekoppelt an eine Reihe von Voraussetzungen, wie ausreichendes Lotpastendepot, geringe Liegezeit und Vortrocknung der Lotpaste, gute Benetzungsfähigkeit der Bauelemente, kurze Aufheizphase beim Lötvorgang etc. Der Effekt ist in [66] eingehend qualitativ und quantitativ untersucht und für ein Spektrum von Bauelementtypen beschrieben. Wichtig ist die Erkenntnis, daß sich der Lötprozeß unter bestimmten Voraussetzungen weitgehend robust gegenüber unpräzisen Bestückvorgängen verhält. D. h. das zulässige Toleranzband für die Bestimmung der Prozeßfähigkeit des Bestückprozesses kann nur im Zusammenhang mit vor- und nachgelagerten Prozeßschritten und weiteren Randbedingungen sinnvoll festgelegt werden. Dies wirft die Frage nach der generellen prozeßübergreifenden Spezifikation zulässiger Toleranzfelder bzw. Prozeßfenster auf, die in ursächlichem Zusammenhang mit den resultierenden Qualitätseigenschaften stehen (Bild 18). Die prozeßkettenübergreifende Analyse und Spezifikation geeigneter Meßgrößen und Toleranzbänder für robuste Prozesse wird mit dem im folgenden Abschnitt 3.2 vorgestellten Rahmenkonzept zur prozeßübergreifenden Qualitätssicherung unterstützt.

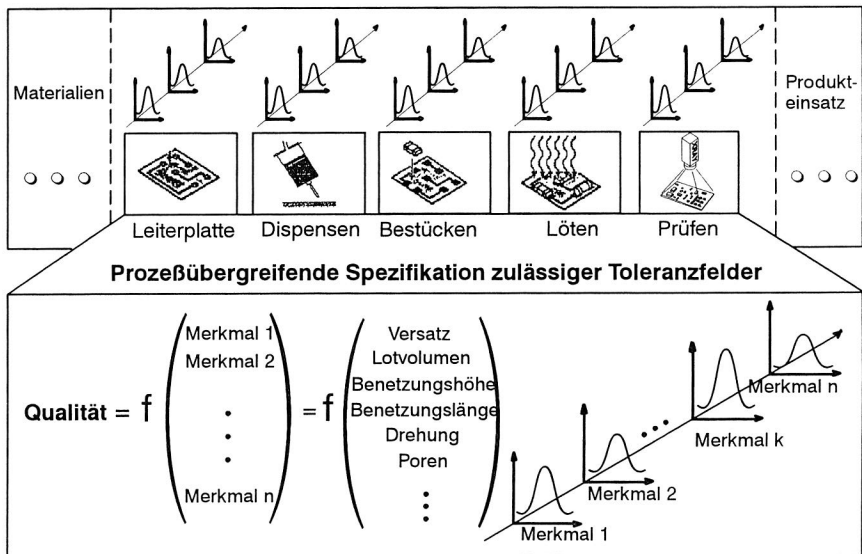


Bild 18: Die Gesamtheit der Prozeßfenster in den Einzelprozessen bestimmt die Fertigungsqualität der gesamten Prozeßkette

3.1.2 Robuste Eigenschaften durch aktive Prozeßregelung

Um die durch Miniaturisierung und Fertigungstoleranzen vorgegebenen Grenzen der technologischen Machbarkeit hinauszuschieben, ist in Ergänzung zur robusten fertigungsgerechten Auslegung der Baugruppen auch die Erzielung robuster Prozesse durch aktive Regelung der Prozesse erforderlich. Hierunter ist beispielsweise die optische Zentrierung von Bauelement und Leiterplatte beim Bestückvorgang zu verstehen (Bild 19). Durch die Vermessung der Bauelementeanschlüsse vor dem Bestücken und der Leiterbildstrukturen auf der Leiterplatte vor oder während des Bestückvorgangs können geometrische Abweichungen innerhalb gewisser Grenzen aktiv während der Bestückung ausgeglichen werden [49]. Analoge Vorgehensweisen sind auch beim Lotpastenauftrag mit der Lagekorrelation der Druckschablonen und der Leiterplattenstrukturen üblich. Ein ausführliches Beispiel für eine aktiv vorwärtsverkettete Prozeßregelung bei einem kombinierten Bestück- und Lötvorgang wird in Kapitel 8.2.3 näher beschrieben.

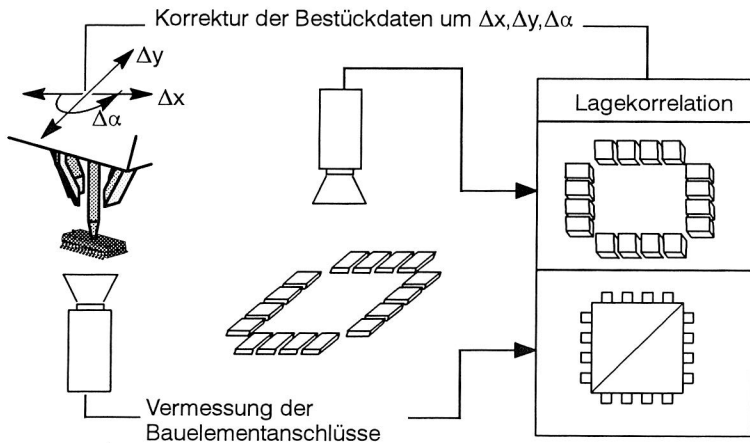


Bild 19: Aktive Prozeßregelung beim Bestücken durch optische Zentrierung von Bauelement- und Leiterplattenanschlüssen

Die geeignete Kombination von Maßnahmen zur aktiven Prozeßregelung und der gezielten Nutzung von robusten Prozeßeigenschaften, die eine Unempfindlichkeit gegenüber Störgrößen bewirken, setzt ein sehr weitgehendes Prozeßverständnis voraus. Im folgenden wird hierfür ein Rahmenkonzept zur Realisierung robuster Prozesse durch beherrschte Fertigungs- und Prüfprozesse und die Bestandteile des Modells zur prozeßintegrierten Qualitätssicherung dargestellt.

3.2 Rahmenkonzept und Bestandteile des Modells

Eine gesamtheitliche Analyse der Ursache-Wirkungsketten in der Elektronikproduktion setzt die intensive Nutzung aller Informationen aus den Einzelprozessen voraus. Dies schafft die notwendige Grundlage für die Analyse von Interprozeßabhängigkeiten und die Planung qualitätssteigernder Maßnahmen auf der Basis eines prozeßübergreifenden Regelungsmodells.

In Bild 20 ist das Rahmenkonzept und der Zusammenhang der verwendeten Partialmodelle dargestellt. Das Prozeß- und Prüfdatennetz (① und ②) bildet die Nahtstelle zum Fertigungsprozeß sowohl zur Erfassung der Informationen, als auch zur Rückwirkung auf den Fertigungsprozeß. Die Prozeß- und Prüfdaten werden in ein datenbankgestütztes Informationsmodell (③) übertragen und stehen dort zur Auswertung zur Verfügung. Für die systematische Untersuchung von Prozeßabhängigkeiten werden Werkzeuge der methodischen Versuchsplanung (④) eingesetzt. Sind eindeutige Prozeßabhängigkeiten ermittelt und mit Bestätigungsexperimenten verifiziert, kann die Optimierung der Prozesse bzw. die Regelung der Fertigungsqualität erfolgen (⑤). Die einzelnen Partialmodelle sowie deren Zusammenhang innerhalb des Rahmenkonzepts werden im folgenden beschrieben.

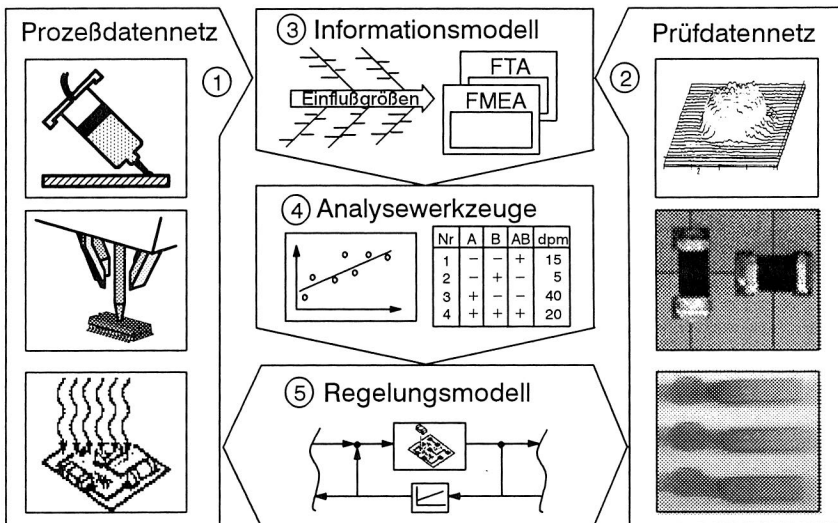


Bild 20: Rahmenschema der vernetzten Prozeß- und Prüfdaten zur Analyse und Regelung von Qualitätszusammenhängen in der Elektronikproduktion

3.2.1 Prozeßdatennetz aus Maschinen- und Prozeßdaten

Anhand einer strukturierten Einflußgrößensammlung werden für jeden Teilprozeß relevante Maschinen, Prozeß- und Materialparameter erfaßt und in Einflußgrößendiagrammen dokumentiert. Auf Basis der dabei erarbeiteten Prozeßmodelle und qualitätsrelevanten Material-, Maschinen- oder Prozeßparameter wurde ein prozeßkettenübergreifendes Netz von Prozeßdaten konzipiert. Bei der Umsetzung des Konzepts in ein reales Prozeßdatennetz wurde berücksichtigt, daß aus technischen Gründen oder aufgrund zu hohen Aufwands in der Regel nicht alle als relevant erachteten Parameter automatisiert erfaßt werden können. Ebenso können sich in späteren Phasen der Optimierung – nachdem ein besseres Prozeßverständnis entwickelt wurde – einzelne Parameter als irrelevant herausstellen. Ggf. müssen neue Parameter, die zu Anfang nicht weiter betrachtet wurden, in das Prozeßdatennetz aufgenommen werden. Um die geforderte Flexibilität des Prozeßdatennetzes sicherzustellen, wurde für das darauf basierende Informationsmodell eine relationale Datenbankumgebung gewählt (vgl. Kap. 3.2.3). Bild 21 zeigt als Beispiel aus einem in einer Bestückungslinie realisierten Prozeßdatennetz die Erfassung von Prozeßdaten beim Lotpastenauftrag mittels Dispensen (s.a. Kap. 8.1).

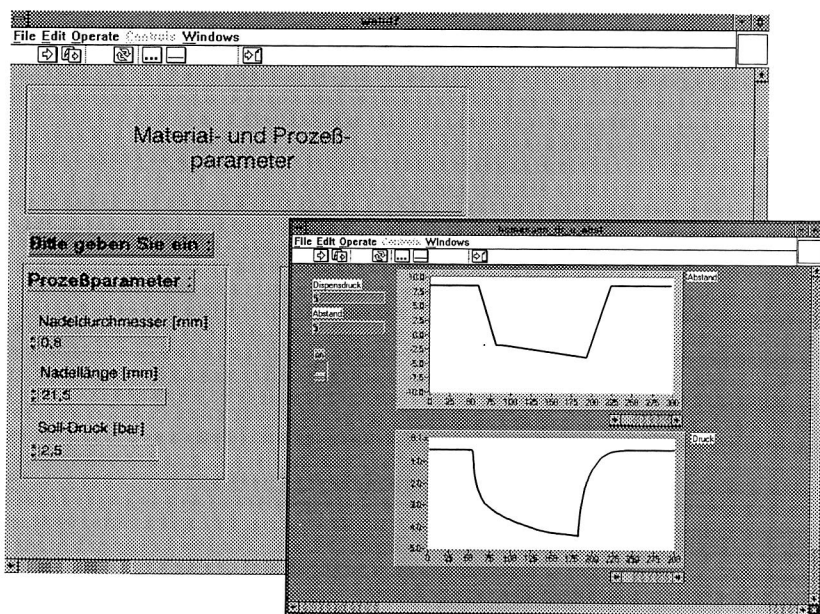


Bild 21: Erfassung von Prozeß- und Prüfdaten im datenbankgestützten Informationsmodell (Bildschirmmasken)

3.2.2 Prüfdatennetz zur Charakterisierung der Prozeßergebnisse

Analog zur Erfassung von Prozeßdaten wurden die resultierenden Prozeßergebnisse charakterisiert. In das Prüfdatennetz werden alle Informationen übertragen, die mittels zerstörungsfreier oder zerstörender Prüfung an eingehenden Materialien, Halbfertigwaren oder an fertigen Baugruppen ermittelt werden. Zunächst wurde ein Konzept erstellt, welche Prüfungen zur Charakterisierung der Fertigungsqualität eingesetzt werden sollen. In einem ersten, möglichst vollständigen Ansatz wird angestrebt, nach jedem Fertigungsschritt das Ergebnis des vorangegangenen Fertigungsschrittes zu dokumentieren. Nach dem Bestücken der Bauelemente ist dies z. B. die Ermittlung der Bestückgenauigkeit durch die Messung der Verdrehung bzw. des Versatzes des Bauelements gegenüber seiner Sollposition. Bild 22 zeigt eine Auswahl aus den in die Prozeßkette integrierten Prüfverfahren, die als Monitor zur Charakterisierung der Prozeßergebnisse die verschiedenen Fertigungsstadien der Baugruppen zerstörungsfrei erfassen.

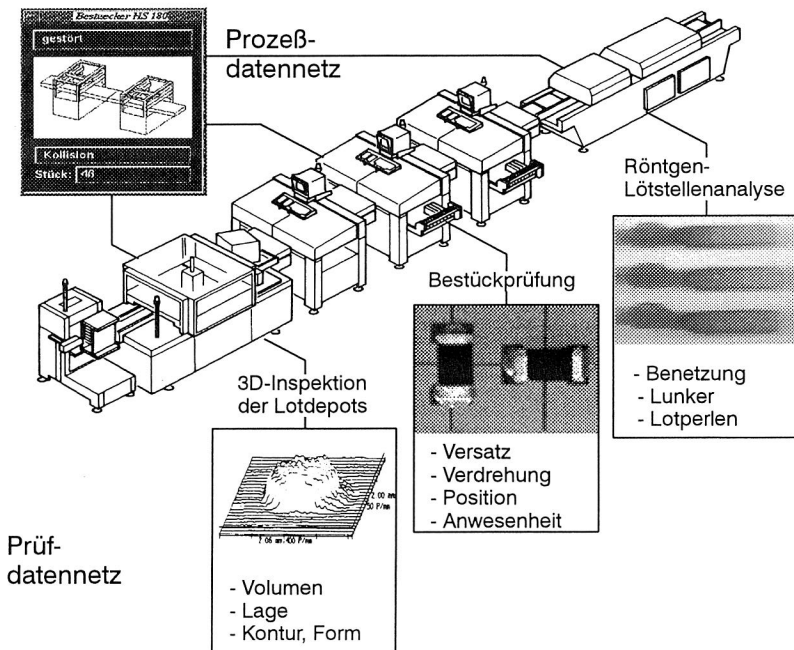


Bild 22: Prozeß- und Prüfdatennetz durch Prozeß adaptierung mit rechnergestützter Diagnose und Prüfdatenerfassung mit prozeßbegleitender Inspektion

3.2.3 Zusammenführung der Prozeß- und Prüfdaten im Informationsmodell

Das mit den Schritten ① und ② aufgespannte Prozeß- und Prüfdatennetz wird in ein einheitliches Informationsmodell übertragen und bildet dort die Grundlage für die Prozeßbeobachtung und weitere gezielte Prozeßanalysen. Die auf Basis der FMEA- und Fehlerbaumanalysen ermittelten Zusammenhänge werden systematisch im Informationsmodell hinterlegt und können dort vom Anlagenbediener problemlos wieder abgerufen werden [67] (Bild 23). Der physische Aufbau des Informationsmodells erfolgt in einer relationalen Datenbank. Die zentrale Stellung der Datenbasis ermöglicht zum einen die Aufnahme der Daten aus den einzelnen Prozeßschritten und zum anderen die einfache Bereitstellung der Daten für die Prozeßanalyse. Beispielsweise werden für die Analysewerkzeuge der Interprozeßabhängigkeiten auf diese Weise wichtige Basisinformationen bereitgestellt, mit denen die statistische Versuchplanung sehr viel effektiver gestaltet werden kann. Als weitere Anwendung sind Daten für das Regelungsmodell verfügbar, um aus den Korrelationen der Einzelparameter die entsprechenden Maßnahmen für optimale Prozeßeinstellungen unterstützen zu können. Aufgrund der zentralen Stellung der Datenbasis ist eine durchgängige Verfolgung der eingesetzten Materialien sowie des Fertigungsablaufes und der beteiligten Prozesse möglich.

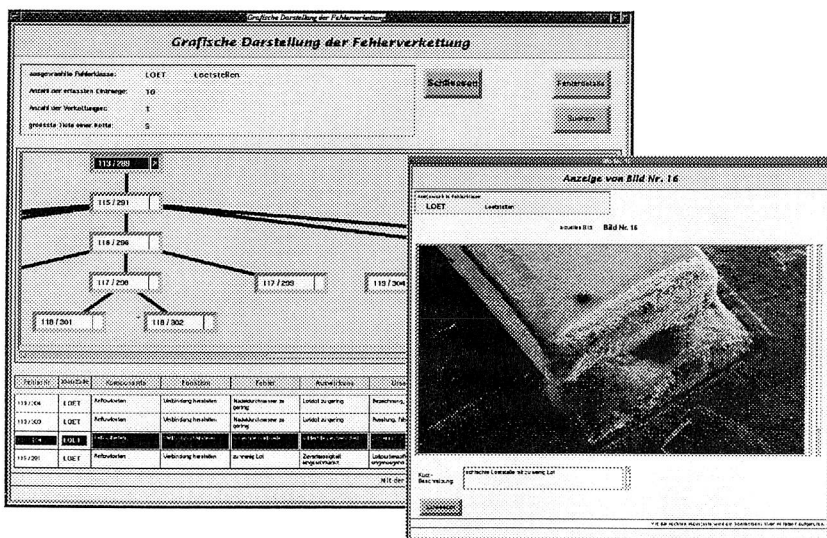


Bild 23: Exemplarische Bildschirmdarstellung für die Darstellung verketteter Einzelfehlergraphen

3.2.4 Werkzeuge zur Analyse von Prozeßabhängigkeiten

Anhand der Informationen, die in der Fertigung aus Einzelprozessen bereitgestellt und im integrierten Informationsmodell gesammelt werden, werden über Korrelationsanalysen qualitätsbezogene Zusammenhänge ermittelt. Kritische Parameter werden im laufenden Betrieb der Fertigungsprozesse in ihrem Trend erfaßt und dokumentiert. Parallel stehen resultierende Qualitätsparameter über die integrierten Prüfprozesse aus dem Prüfdatennetz zur Verfügung und können den Prozeßdaten zugeordnet werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, zielgerichtet die Prozeßzustände zu analysieren, die zu einem schlechten Qualitätsergebnis führten. Im umgekehrten Fall ist es ebenso möglich, die Prozeßzustände nachzuvollziehen, die in der Produktion zu guten Qualitätsausbeuten führten. Erst die Kombination beider Vorgehensweisen gibt über die tatsächliche Relevanz der Einflußgrößen auf die Prozesse und die optimalen Arbeitspunkte der Prozeßführungsgrößen Aufschluß. Sind Hypothesen bezüglich verschiedener Prozeßabhängigkeiten getroffen, werden diese mit gezielt durchgeführten Bestätigungsexperimenten bzgl. der genauen Einflußfaktoren und Wechselwirkungen experimentell untersucht.

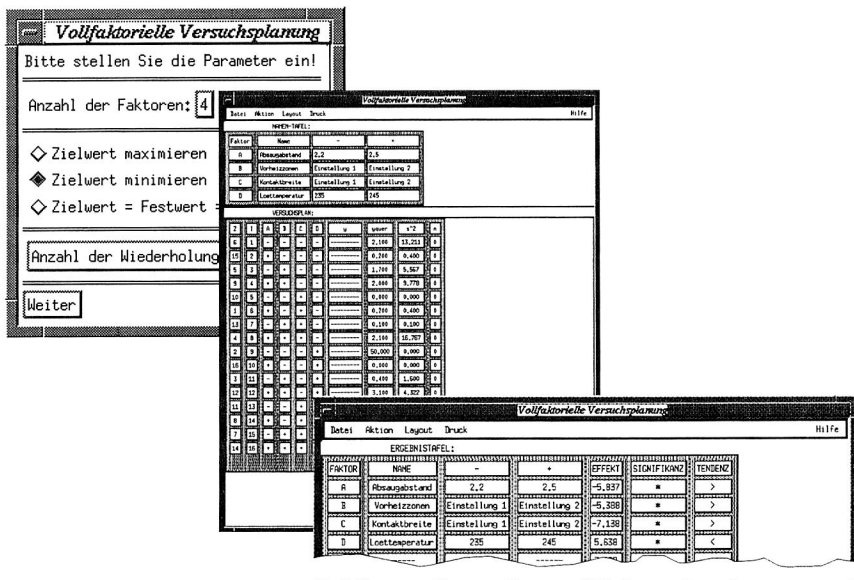


Bild 24: Exemplarische Darstellung der vollfaktoriellen Versuchsplanung mit dem in das Informationsmodell integrierten Programmsystem REVERS

Aufgabe der Analysewerkzeuge im hier vorgestellten Modell ist die Unterstützung bei der Versuchskonzeption und Auswertung der Versuchsergebnisse nach den Vorgaben der methodischen Versuchplanung. Eine wesentliche Forderung für den Einsatz der Analysewerkzeuge ist die Kompatibilität mit dem zugrundeliegenden Informationsmodell. In der hier vorgestellten Realisierung wird diese Forderung durch die einheitliche Datenbasis im relationalen Datenbankmodell erfüllt. Bild 24 zeigt die auf dem integrierten Informationsmodell aufsetzenden Werkzeuge zur systematischen Versuchplanung und Auswertung. Es werden die verschiedenen Ansätze der vollfaktoriellen und teilfaktoriellen methodischen Versuchplanung sowie die spezifischen Ausprägungen der Methodik nach Taguchi und Shainin unterstützt [68]. Im Rahmen der vergleichend mit dem Werkzeug durchgeführten Prozeßuntersuchungen (s.a. Kap 8.2) hat sich jedoch der Einsatz der klassischen Versuchsmethodik als besonders vorteilhaft erwiesen.

3.2.5 Regelungsmodell zur Steigerung der Prozeßsicherheit

Die vernetzte Betrachtung zur Analyse von Interprozeßabhängigkeiten ist die Grundlage für prozeßübergreifende Regelungsansätze zur Steigerung der Prozeßsicherheit. Generell sind ebeneninterne und ebenenübergreifende Regelungsmechanismen zu unterscheiden. Ebenenintern, d. h. hier bezogen auf die Fertigungsebene, ist weiterhin zu unterscheiden zwischen prozeßinternen Regelkreisen, die innerhalb eines Prozeßschrittes wirken und prozeßübergreifenden Regelungsansätzen. Letztere können sich entweder auf vorgelagerte Prozeßschritte (Rückwärtsverkettung) oder auf nachgelagerte Prozeßschritte (Vorwärtsverkettung) auswirken (Bild 25). Häufig müssen aus erkannten Schwachstellen innerhalb der Prozeßkette auch ebenenübergreifende Regelkreise angestoßen werden. Beispiele hierfür sind Layoutänderungen, um die Prozeßverhältnisse beim Lötprozeß zu verbessern, Änderungen in der Bestückreihenfolge oder ggf. der Wechsel von Materialien. Die Initiierung ebenenübergreifender Regelkreise wird im vorliegenden Ansatz durch die Personen, die mit der Analyse der ebeneninternen Wechselwirkungen beauftragt sind, durchgeführt. Es werden daher innerhalb des hier verfolgten Modells keine instrumentalisierten Werkzeuge zur Rückkopplung von Qualitätsdaten an die Entwicklung oder Arbeitsplanung vorgestellt. Formalisierte ebenenübergreifende Ansätze der Qualitätsregelung sind z. B. in [69] beschrieben. Bild 25 zeigt das Konzept der prozeßintegrierten übergreifenden Regelung auf [70]. Jedem Prozeßschritt ist ein Stationsrechner zugeordnet, der als Prozeßanschaltung zur Prozeß- und Prüfdatenerfassung dient. Weiterhin kann ein Prozeß mit einem lokal hinterlegten Informationsmodell überwacht und geführt werden. Die prozeßinternen Regelungsmechanismen der Einzelprozesse bleiben unverändert. Zusätzlich wird mit dem Stationsrechner die Kommunikation mit dem übergeordneten Informationsmodell hergestellt und ggf. werden vorwärts- bzw. rückwärtsverkettete Regelkreise zu anderen Prozeßschritten ausgelöst.

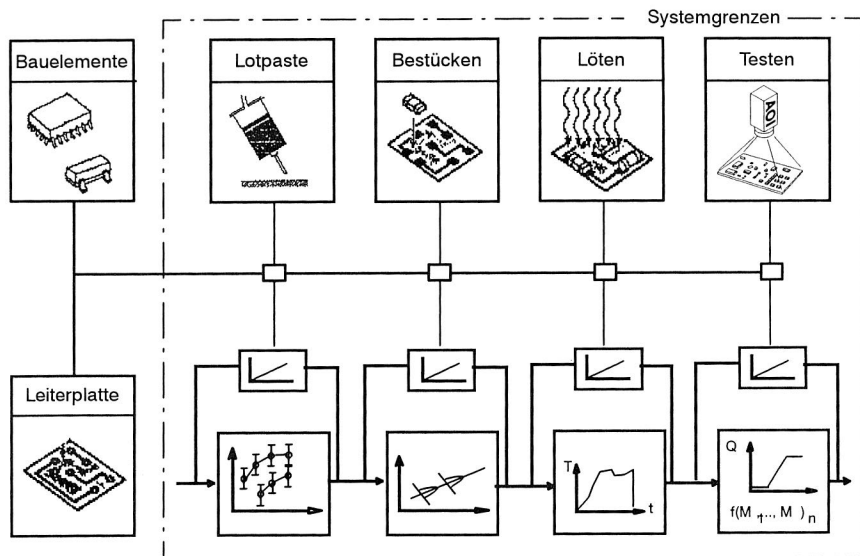


Bild 25: Konzept der prozeßintegrierten übergreifenden Regelung der Fertigungsqualität mit vorwärts- und rückwärtsverketteten Regelungsmechanismen

3.3 Vorgehensweise zur prozeßübergreifenden Analyse und Optimierung

Wie in Kapitel 2 bereits dargestellt, bestehen die besonderen Herausforderungen der Elektronikproduktion in der Komplexität aufeinander aufbauender Fertigungsschritte, die zudem mit vielfältigen wechselseitigen Querbeziehungen behaftet sind. Eine isolierte Optimierung einzelner Fertigungsschritte führt zwangsläufig zur Bildung lokaler Suboptima in Einzelprozessen. Die Vorgehensweise der hier vorgeschlagenen Methodik zur Analyse von Ursache-Wirkungsketten in der Elektronik erfolgt in 3 getrennten Phasen. Diese sind eine vorbereitende Analyse der Prozeßzusammenhänge, auf deren Grundlagen in einer zweiten Phase gezielte Untersuchungen durchgeführt werden, um daraufhin in der dritten Phase treffsichere Optimierungsmaßnahmen ergreifen zu können (Bild 26). Im hier vorgeschlagenen Rahmenkonzept werden verschiedene Qualitätstechniken, wie Einflußgrößensammlung mit Fischgrätendiagrammen, Fehlerbaumanalyse, Prozeß-FMEA und die methodische Versuchsplanung in einem geschlossenen Ansatz zusammengeführt. Die Durchgängigkeit der verschiedenen Werkzeuge wird mittels einer konsistenten Datenbasis in einer relationalen Datenbankumgebung gewährleistet.

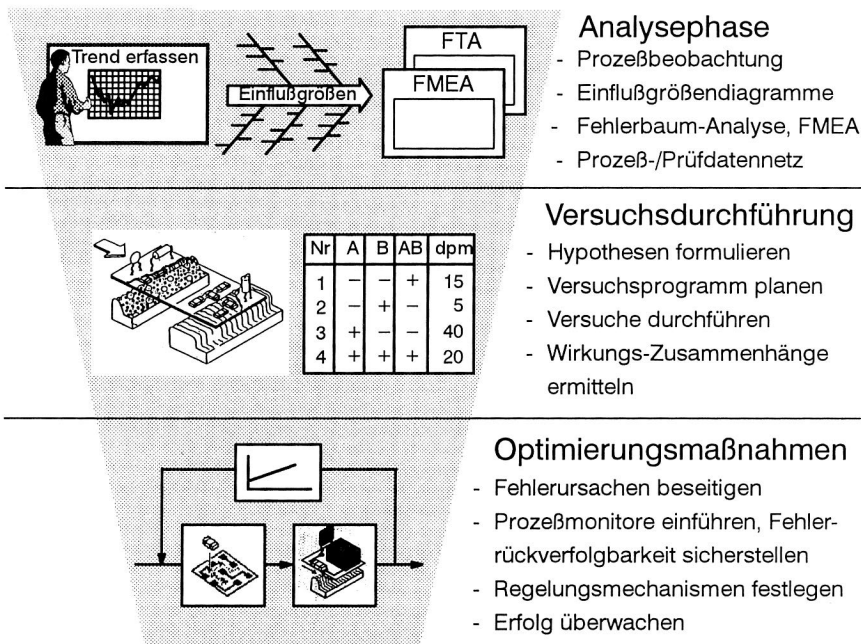


Bild 26: Systematischer Ansatz zur Prozeßoptimierung mit den Phasen für Analyse, Versuchsdurchführung und Optimierung der Prozesse

3.3.1 Strukturierung der Prozeßkette und Sammlung von Einflußgrößen

In Bild 27 sind die Prozeßschritte Lotpastenauftrag, Bestücken und Löten in der Prozeßkette vereinfacht dargestellt. Die Einflußgrößen lassen sich in durch den Prozeß beeinflussbare und nicht beeinflussbare Größen untergliedern. Während die beeinflussbaren Parameter während des Prozeßablaufs gesteuert bzw. geregelt werden können, müssen die nicht beeinflussbaren Parameter ggf. vor dem Prozeßeintritt geprüft und während der Prozeßzeit als konstant behandelt werden. Weiterhin werden die Parameter in material-, prozeß-, und maschinenbezogene Parameter unterschieden, die jeweils durch verschiedene Störgrößen überlagert sein können.

Die Erfordernis, eine prozeßkettenbezogene Betrachtung durchzuführen, wird schon in der Überlagerung geometrischer Fertigungstoleranzen aus einzelnen Prozeßschritten deutlich. Die Superposition der verschiedenen geometrischen Einflußgrößen aus der Leiterplattenfertigung, dem Lotauftrag, der Bestückung von Bauelementen und dem Löten erlaubt die Bildung eines geometrischen Prozeßmodells für die Reflow-Oberflächenmontage (Bild 28).

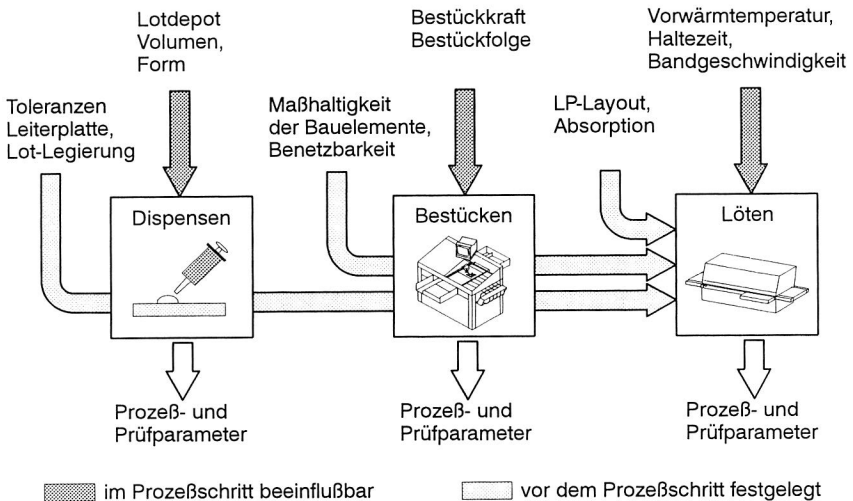


Bild 27: Vernetzte Betrachtung der Einflußgrößen auf die Prozesse, unterschieden nach im Prozeß beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Größen

Erste Abweichungen von der Sollgeometrie ergeben sich durch Fertigungstoleranzen bei der Herstellung der Leiterplatten. Vor allem bei größeren Leiterplatten mit typischen Abmessungen von ca. 450 x 360 mm wirken sich Schrumpfungen und Verwölbungen der Substratmaterialien im Herstellprozeß besonders stark aus [17]. Ebenso treten bei den Bauelementen Fertigungstoleranzen auf, die insbesondere bei kleinen Rastermaßen die Verarbeitungsfähigkeit beeinflussen. Da die Prozesse in diesem Falle nicht robust gegenüber derartigen Störgrößen sind, werden bei Bauelementen mit kleinen Rastermaßen Koplanarität und mögliche Rasterfehler in der Regel vor dem Bestückvorgang geprüft.

Während des Bestückvorgangs werden lokale Paßmarken standardmäßig auf den Leiterplatten eingesetzt, um die Bestückkoordinaten optisch zu ermitteln. Beim Lotpastenauftrag mittels Schablonendruck erfolgt in neueren Automaten ebenfalls eine optische Korrektur für die Positionierung der Druckschablone relativ zur Leiterplatte [71]. Druckbildverzerrungen innerhalb der Leiterplatte können hingegen nicht ausgeglichen werden. Beim Lotpastenauftrag mittels Dispenstechnologie werden derzeit noch keine optischen Lagekorrelationen durchgeführt, der Lotpastenauftrag erfolgt an der programmierten Sollposition.

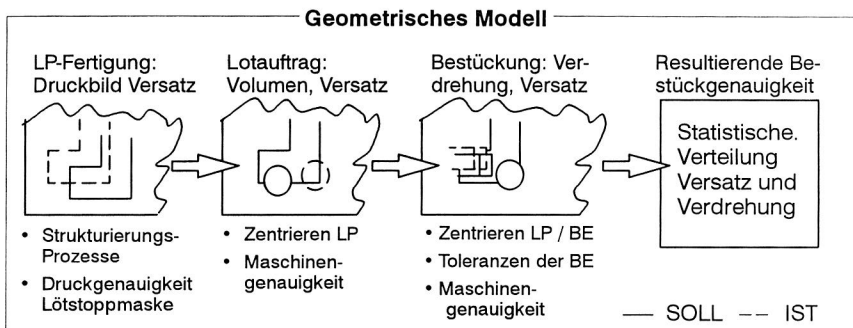


Bild 28: Aufbau des geometrischen Prozeßmodells

Ist hinreichend Lotmaterial im direkten Kontakt mit den Bauelementeanschlüssen und den Landeflächen auf der Leiterplatte vorhanden, so schwimmt das Bauelement während des Reflow-Lötprozesses auf und verändert erneut seine Lage. In der Regel kommt hierbei jedoch der sogenannte Selbstzentriereffekt zum Tragen, d. h. das Bauelement zentriert sich hierbei relativ zu den Landeflächen auf der Leiterplatte [66]. Die für den Anwender letztendlich relevante Bestückgenauigkeit des Bauelements relativ zu den Anschlußkonturen der Leiterplatte ist daher beeinflusst durch die geometrischen Toleranzen der Leiterplatten und Bauelemente sowie durch die Genauigkeiten der Prozesse Lotpastenauftrag, Bauelementebestückung und Löten. Teilweise können sich unterschiedliche Toleranzen gegenseitig ausgleichen.

Insbesondere bei großen vielpoligen Bauelementen mit Kantenlängen von 15 - 30 mm und Rastermaßen kleiner 0,5 mm sind die genannten geometrischen Einflußfaktoren in der Gesamtheit jedoch sehr kritisch einzustufen. Für detailliertere Darstellungen des geometrischen Modells und insbesondere für Toleranzkettenanalysen sei auf die Arbeiten von Sauer, Wolter et.al. verwiesen [64, 65].

In Bild 29 sind exemplarisch die ineinander verzahnten Prozeßmodelle aus den Einzelprozessen Leiterplatten- und Bauelemente-Herstellung, Lotmaterial, Lotauftrag, Bestücken und Löten dargestellt. Um Qualitätssteigerungen zu erzielen, sind zunächst die grundsätzlichen Wirkzusammenhänge zu ermitteln, um daraufhin Optimierungs- und Regelungsmaßnahmen durchführen zu können.

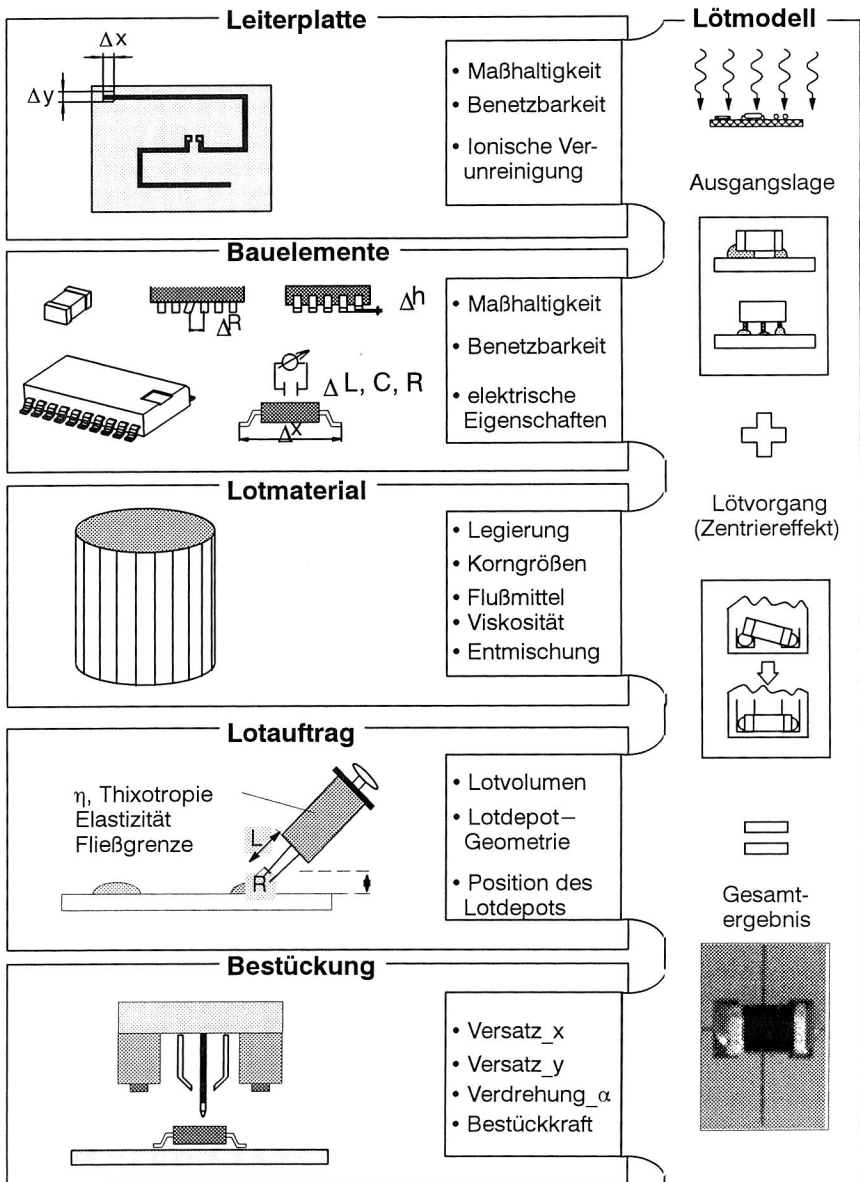


Bild 29: Vernetzte Betrachtung ineinander verzahnter Prozeßmodelle mit ihren Auswirkungen auf die resultierende Fertigungsqualität

3.3.2 Analyse potentieller Ursache-Wirkungsbeziehungen

Zunächst sind zu Beginn der Analysephase vorbereitende Maßnahmen erforderlich. Dies beinhaltet die Bestimmung der Systemgrenzen und die Sammlung relevanter Informationen. Die Strukturierung der Informationen erfolgt im ersten Schritt vorteilhaft als Einflußgrößendiagramm in Form sog. Fischgrätendiagramme. Dabei werden die Einflußfaktoren nach Mensch, Maschine, Methode, Material und Mitwelt geordnet. Die Einflußgrößensammlung geschieht in einer hierarchischen Vorgehensweise, d. h. zunächst wird die Prozeßkette in Einzelprozesse zerlegt, wobei diese wiederum in Subprozesse mit relevanten Einflußgrößen auf das Prozeßergebnis zerlegt werden können. Der Vorteil dieser Vorgehensweise der Dekomposition liegt darin, daß z. B. dieselben Einflußgrößen der Positioniersysteme, Transportsysteme etc., die in jedem Prozeßschritt vorkommen, nicht erneut erfaßt werden müssen.

Um Fehlerzusammenhänge und Qualitätseinflüsse systematisch zu strukturieren und gleichzeitig einen hohen Anteil von Erfahrungswissen zu hinterlegen, wird in einem nächsten Schritt die Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse (FMEA) eingesetzt. Die gegenüber dem Standard-FMEA-Verfahren weiterentwickelte, rechnergestützte Systematik unterstützt die Abbildung der ermittelten Parameter im Gesamtzusammenhang der Prozeßkette [67].

3.3.3 Verifikation von Wirkmechanismen durch Bestätigungsexperimente

Die in der ersten Phase als qualitätsrelevant erachteten Parameter und die Festlegung eines problemspezifischen Prozeß- und Prüfdatennetzes sind die Ausgangsbasis für detailliertere Untersuchungen. Aufgrund der Einflußgrößensammlung und der intensiven Prozeßbeobachtung bestehen in der Regel bereits erste Vermutungen bezüglich wesentlicher Prozeßabhängigkeiten. Diese Hypothesen müssen experimentell nachgewiesen werden. Um aussagefähige Resultate zu erzielen, ist hierzu eine systematische Vorgehensweise erforderlich. Die Planung der Versuche sowie die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nach den Vorgaben der methodischen Versuchsplanung. Nach einer Vorauswahl der wesentlichen Versuchsparameter werden zunächst einfaktorielle Versuche, danach für wenige Parameter vollfaktorielle Versuche durchgeführt.

3.3.4 Optimierungsmaßnahmen zur Schaffung robuster Prozesse

Sind die wesentlichen systematischen Störgrößen des untersuchten Prozesses durch die oben dargestellten Vorgehensweisen ermittelt, sind vorrangig Maßnahmen zur nachhaltigen Beseitigung der Störfaktoren zu ergreifen. Es ist hierbei zwischen kurz-, mittel- und langfristigen Maßnahmen zu unterscheiden.

Beispiele für *kurzfristig* zu ergreifende Maßnahmen sind Änderungen in den Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen, Unterweisung der Maschinenbediener, Beschaffung und Installation einfacher Meß- und Prüfeinrichtungen, um kritische Prozeßgrößen zyklisch an der Maschine zu überwachen, Änderung bzgl. der Anlieferqualität von Fertigungs- und Fertigungshilfsmaterialien, z. B. Lote, Flußmittel usw.

Mittelfristig sind Optimierungen am Prozeß sowie am Produkt durchzuführen, um die Prozeßausbeute zu erhöhen. Beispiele hierfür sind Layoutänderungen der Baugruppe oder die Beschaffung besserer Maschinen und Vorrichtungen, die zum Beispiel eine höhere Zuverlässigkeit und Genauigkeit aufweisen.

Schließlich beziehen *langfristige* Maßnahmen den Wechsel von Baugruppen- und Fertigungstechnologien in die Optimierung ein, wobei dieser Weg aufgrund der schnellen Innovation in der Elektroniktechnologie vorgezeichnet ist. Ein Beispiel hierfür ist der Ersatz hochpoliger Fine-Pitch-Bauelemente mit bei der Bestückung technologisch schwieriger zu beherrschenden kleinen Rastermaßen durch BGA-Bauelementeformen, die durch die Nutzung der gesamten Gehäusegrundfläche zur flächigen Kontaktierung in einem leicht zu verarbeitenden Rastermaß mit Standard-Bestückautomaten erheblich einfacher zu montieren sind.

4 Integration automatisierter optischer Inspektionssysteme in die Elektronikbaugruppenmontage

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Randbedingungen und Anforderungen an die prozeßintegrierte Qualitätssicherung, die Zielgrößen und Beurteilungskriterien für die Qualität elektronischer Baugruppen vorgestellt sowie ein Rahmenkonzept für die prozeßintegrierte Qualitätssicherung entwickelt. Dabei wurde die Notwendigkeit geeigneter Monitore zur Charakterisierung der Fertigungsqualität und Verknüpfung mit relevanten Prozeßparametern als Grundlage für die prozeßintegrierte Qualitätssicherung beschrieben. In Kapitel 4 werden nun die technischen Möglichkeiten für den Aufbau derartiger integrierter Prozeßmonitore näher untersucht. Wesentlicher Schwerpunkt ist die Analyse zerstörungsfreier automatisierter Prüfverfahren, die sich für eine Integration in die Prozeßkette der Elektronik eignen. Hierzu werden zunächst die wesentlichen Prüfaufgaben in der Prozeßkette analysiert. Verschiedene Verfahrensprinzipien für die automatisierte prozeßbegleitende Prüfung werden vorgestellt und eine Einordnung für die verschiedenen Prüfaufgaben entwickelt. Insbesondere werden die Verfahrensansätze für die optische Inspektion mittels

- CCD-Kameraverfahren
- Laserinspektion
- Röntgeninspektion

analysiert und systematisch gegenübergestellt. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf im Rahmen dieser Arbeit durchgeführter Entwicklungen zur automatisierten Laser- und Röntgeninspektion, auf Felduntersuchungen an im Einsatz befindlichen Inspektionsgeräten sowie Systemevaluierungen, die in Kooperation mit der Industrie bei der Einführung derartiger Systeme durchgeführt wurden [72, 73, 74].

4.1 Sichtprüfaufgaben in der Prozeßkette

In Bild 30 sind die prinzipiellen Sichtprüfaufgaben in der Prozeßkette der Elektronikbaugruppenproduktion dargestellt. In der industriellen Praxis liegt der Schwerpunkt bei der Durchführung einer visuellen Inspektion der Baugruppen am Ende der Prozeßkette, da hier die resultierende Qualität aus den vorangegangenen Prozeßschritten offenkundig wird. Der Nachteil dieser Vorgehensweise zeigt sich im Falle von auftretenden Fehlern mit dem hohen Aufwand, der durch Nacharbeit und Reparatur an den Baugruppen entsteht. In Anbetracht der Tatsache, daß ca. 75 Prozent aller

Lötfehler in verdeckter Form bereits vor dem Löten vorhanden sind [56], wird deutlich, daß eine Integration von Prüfaufgaben in die Prozeßkette bzgl. der Fertigungsqualität und den Fertigungskosten vorteilhaft ist. Im folgenden werden die Aufgaben für die prozeßbegleitende Prüfung von Elektronikbaugruppen dargestellt.

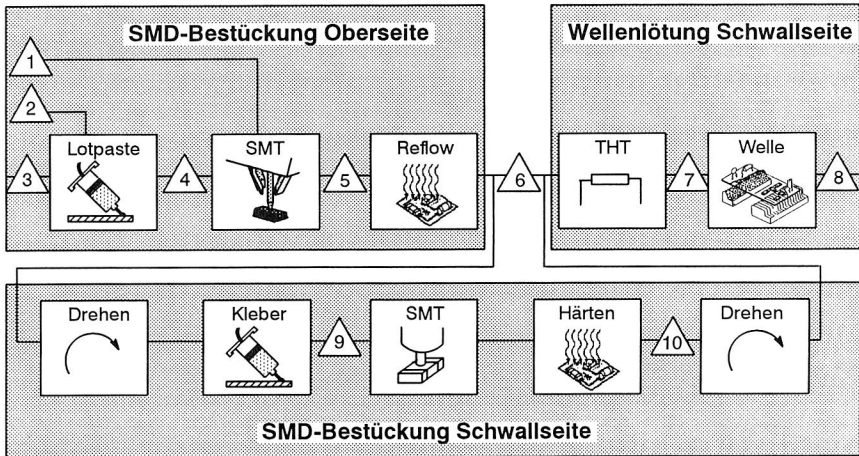


Bild 30: Anordnung verschiedener Prüfaufgaben in der Prozeßkette (△ Prüfschritt)

Nr.	Prüfaufgabe	Prüfkriterien	automat	visuell
1	Prüfung der Bauelementegeometrie	Koplanarität, Anschlußraster	X	
2	Lotpasteninspektion	Konsistenz, Korngrößenverteilung		X
3	Leiterplatteninspektion	Maßhaltigkeit, Benetzbarkeit	X	X
4	Prüfung des Lotpastenauftrags	Position, Form, Lage, Volumen	X	X
5	Bestückprüfung (SMT)	Anwesenheit, Verdrehung, Versatz	X	X
6	Lötstellenprüfung (SMT)	Benetzung, Lotmenge, Brücken,...	X	X
7	Bestückprüfung (THT)	Anschlußdraht vorh., Biegewinkel..	X	X
8	Lötstellenprüfung (SMT / THT)	Benetzung, Lotmenge, Ausbläser..	X	X
9	Prüfung des Kleberauftrags	Position, Form, Lage, Volumen		X
10	Bestückprüfung (SMT / THT)	vgl. 5 u. 7	X	X

Tabelle 1: Prüfaufgaben in der Prozeßkette der Leiterplattenbaugruppenproduktion

4.1.1 Prüfung von Leiterplatten, Bauelementen, Lotmaterialien

Prinzipiell wird in der Elektronikproduktion auf die Sichtprüfung der Materialien vor der Verarbeitung weitgehend verzichtet, die Qualität der Materialien wird über Liefervereinbarungen sichergestellt [75]. Eingangsprüfungen in der Baugruppenproduktion beschränken sich zumeist auf Stichproben und werden durch geschultes Personal mit dem Mikroskop oder spezifischen Meßplätzen, wie Benetzungswaagen, Viskosimetern etc. durchgeführt [76, 77]. Einen Sonderfall stellt die Koplanaritätsprüfung von Bauelementen dar, die in der Regel bei Gehäusebauformen mit Rastermaßen unter 0,5 mm prozeßintegriert erforderlich ist [78]. Prozeßintegrierte automatisierte Ansätze zur Durchführung einer Koplanaritätsmessung innerhalb des Bestückautomaten unmittelbar vor der Bestückung werden in Kapitel 8 noch vertiefend dargestellt.

Eingangsprüfung der Materialien		
Leiterplatte	Bauelemente	Lotpaste
<ul style="list-style-type: none"> • Lötbarkeitsprüfung (DIN/IEC 326 Teil 2) • Kriterienkataloge (IPC A600C, VDI/VDE 3710) • Haftfestigkeit der Leiterbahnen 	<ul style="list-style-type: none"> • Benetzungstest • Koplanaritätsprüfung • Rasterfehler • elektrischer Test • Burn In Test 	<ul style="list-style-type: none"> • Viskosität, z. B. Rotationsviskosimetrie • Solder Balling Test • Trocknung • Mikroskopische Analyse • Auspreßtest

Bild 31: Übersicht zu verschiedenen Eingangsprüfungen zur Sicherstellung der Verarbeitungsfähigkeit der Materialien

4.1.2 Kontrolle des Lotpastendrucks

Viele Lötfehler haben ihre Ursache in einer mangelhaften Ausführung des Lotpastendrucks, z. B. indem beim Druckvorgang aufgrund verstopfter Schablonenöffnungen zu wenig oder kein Lot an den erforderlichen Stellen der Leiterplatte aufgetragen wird [79, 80]. Um zu vermeiden, daß derartige potentielle Lötfehler durch die gesamte Prozeßkette weitergereicht werden und schließlich nach dem Löten nur mit großem Aufwand zu beheben sind, wird in der Regel zumindest stichprobenweise eine visuelle Sichtprüfung nach dem Lotpastenauftrag durchgeführt. Die Prüfung sollte insbesondere nach jedem Rüstvorgang am Lotpastendrucker, nach dem Wechsel der Druckschablonen und nach jedem Wechsel von Fertigungslosen erfolgen. Die Prüfkriterien bei der Inspektion des Lotpastendrucks und analog für den Lotpastenauftrag bzw. Kleberauftrag mittels Dispenstechnologie sind in Bild 32 aufgelistet.

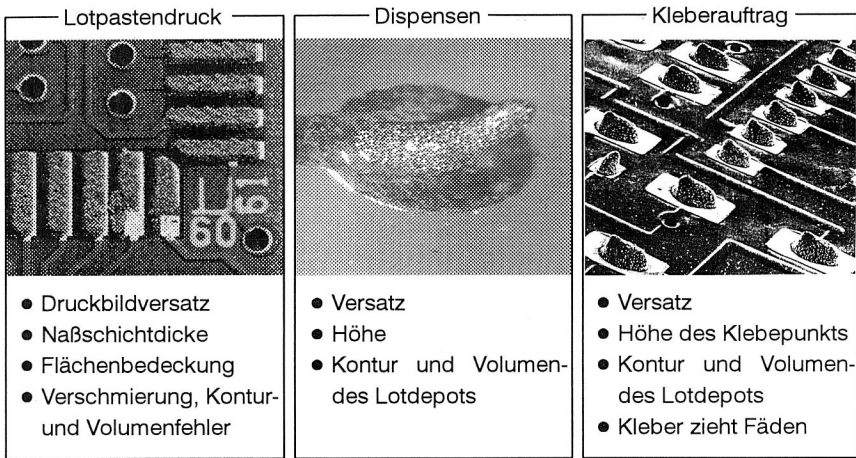


Bild 32: Prüfparameter für den Prozeßschritt Lotpasten- bzw. Kleberauftrag

Bei der Inspektion des Lotpastenauftrags sind das aufgebrauchte Lotvolumen, die korrekte Positionierung des Lotdepots relativ zum Leiterplattenpad und das Druckbild die wesentlichen Prüfkriterien [81]. Weiterhin sind Mindestabstände zwischen den Lotdepots bzw. zu angrenzenden Metallisierungsflächen wie Leiterbahnen, Durchkontaktierungen etc. zu überwachen.

4.1.3 Bestückprüfung

Die Prüfparameter für eine Sichtprüfung nach dem Bestückvorgang sind bei oberflächenmontierten Bauelementen mit der Prüfung der Identität und Anwesenheit des Bauelements in der richtigen Position und Lage charakterisiert. Bei bedrahteten Bauelementen in Durchsteckmontage werden die Anwesenheit, die überstehende Drahtlänge sowie die sog. Clinchrichtung, d. h. der richtige Biegewinkel des überstehenden Anschlußdrahtes geprüft. In der Regel wird keine explizite 100%-Sichtprüfung durch speziell für diese Aufgabe vorgesehenes Prüfpersonal, sondern durch eine stichprobenweise Sichtprüfung durch die Linienbediener durchgeführt.



Bild 33: Prüfparameter für den Prozeßschritt Bestückung

4.1.4 Lötstellenprüfung

Der Sichtprüfung nach dem Lötprozeß kommt eine entscheidende Bedeutung zu, da hier die Fehler der gesamten Prozeßkette offenkundig werden. Häufig werden daher auch Fertigungsfehler, die nicht notwendigerweise im Lötvorgang ihre Ursache haben, als Lötfehler bezeichnet [53]. Typische Lötfehler sind im folgenden genannt bzw. in den einschlägigen Normen, Richtlinien und Qualitätskompendien detailliert wiedergegeben [82, 83].

- Lotbrücken
- Benetzungsfehler
- Lotmangel
- Lotrückstände, z. B. Lotperlen,
- Lotzapfen
- Grabsteineffekt
- Kleber auf Lötflächen
- Poren
- Flußmittlrückstände, Kontaminationen

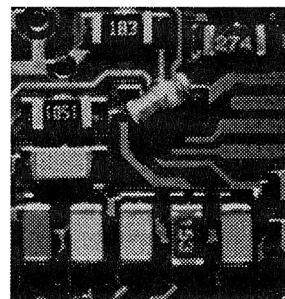
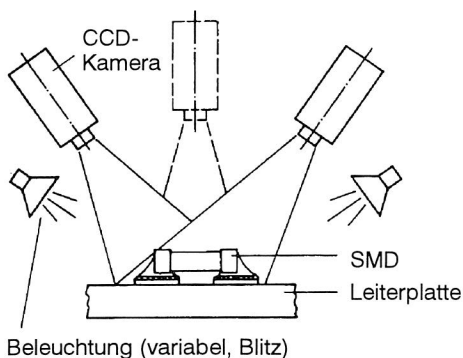
Unabhängig von der grundsätzlichen Problematik der Lötstelleninspektion geeignete Prüfkriterien zu definieren (vgl. Kap. 2) und der Kritik bzgl. der Aussagefähigkeit einer visuellen Beurteilung von Lötstellen ist die Auseinandersetzung mit den prinzipiellen Möglichkeiten zur automatisierten Lötstelleninspektion zwingend notwendig. Dies ist erforderlich, da im laufenden Fertigungsgeschehen objektive Fertigungsfehler wie Lotbrücken oder kein Lot zuverlässig erkannt werden müssen. Ebenso ist für die Realisierung der Vision Nullfehlerrate eine kontinuierliche objektiv messende Prozeßüberwachung unabdingbar. Die Fragestellung nach dem Sinn der Lötstelleninspektion stellt sich vor diesem Hintergrund nicht, jedoch wird offenkundig, daß die eine weitgehende Anwenderflexibilität in den Prüfentscheidungen vorhanden sein muß (vgl. Kap. 7).

4.2 Optische Inspektionsverfahren für die Baugruppenprüfung

Eine sinnvolle Gliederung der verschiedenen Verfahren zur Automatisierung der Sichtprüfungsaufgaben in der Elektronik erfolgt am besten nach dem Sensorprinzip des jeweils verwendeten bildgebenden Systems. Wie im folgenden noch gezeigt werden wird, beeinflusst das Sensorprinzip die Eignung der Systeme für die Anwendungen der Elektronikbaugruppeninspektion ganz entscheidend. Für die Bilderfassung kommen vorwiegend unterschiedliche Ausprägungen von CCD-Kamerainspektion, Laserspektion und Röntgeninspektion in Betracht. Die wesentlichen Verfahrensprinzipien wurden im Hinblick auf die damit erfassbaren Prüfkriterien untersucht, um eine Einordnung der Verfahren für das im vorigen Abschnitt aufgezeigte Prüfspektrum zu ermöglichen. Die Erklärungen und Beispiele dienen der Begründung und Veranschaulichung der am Ende des Kapitels getroffenen Einordnung der Verfahren und Ableitung der darauffolgenden Entwicklungsarbeiten.

4.2.1 2D-Bilderfassung mit CCD-Kamerasystemen

Der generell am weitesten verbreitete Ansatz zur automatisierten Inspektion basiert auf dem Einsatz von Bildverarbeitungssystemen mit Grauwert- oder Farb-CCD-Kameras. Der naheliegende Vorteil dieser Systeme liegt in der ausgereiften und relativ preiswerten Bildaufnahmetechnik mit CCD-Halbleiterkameras und einer breiten Palette von zugehörigen Hardwarekomponenten, wie z. B. Erweiterungsplatinen für Standardrechnersysteme. Durch das große technische Anwendungsspektrum von CCD-Kamera-



Typischer Anwendungsfall:
Bestückprüfung

Bild 34: Prinzipieller Aufbau von Systemen für die Elektronikbaugruppeninspektion auf der Basis von CCD-Kameras

systemen bestehen zudem bereits umfangreiche Erfahrungen in der automatisierten Bildanalyse, d.h. bei der Vorverarbeitung und Auswertung von Bildinformationen, die in der Regel einen Bildinhalt mit 256 Graustufen wiedergeben [84].

In der Elektronikbaugruppeninspektion stellen jedoch die extremen Helligkeitsunterschiede, hervorgerufen z.B. durch Reflexionen an spiegelnden bzw. teilweise auch matt glänzenden Lötstellen, und den chargenbedingten Helligkeitsschwankungen der Bauteile und Leiterplatten eine große Schwierigkeit für eine gesicherte Bildaufnahme und Bildauswertung dar. Dies wirkt sich insbesondere beim Einsatz der CCD-basierenden Verfahren für die Lötstelleninspektion negativ auf die Erkennungssicherheit der Systeme aus. In Bild 35 sind am Beispiel zweier oberflächenmontierter verlöteter Bauelemente die zugrundeliegenden Sensorinformationen und die zum Einsatz kommenden Auswertestrategien bei der Lötstelleninspektion mit Grauwertbildverarbeitung dargestellt. Die Aufnahmen wurden mit marktverfügbaren Systemen an realen Einsatzfällen erstellt. Aufgrund der komplexen Spiegelungsverhältnisse an Lötstellen erscheint eine zuverlässige reproduzierbare Lötstelleninspektion nicht möglich.

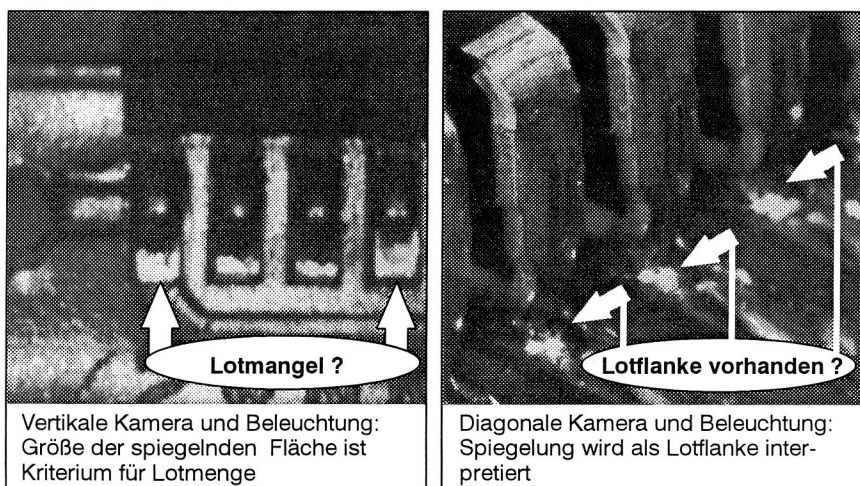


Bild 35: Beispiel für Sensorinformation und Auswertestrategien zur automatisierten Lötstellenanalyse mit CCD-Kamerasystem (links: SO-Gehäuse, rechts: PLCC)

Diesem Umstand kann nur mit aufwendigen Beleuchtungseinrichtungen Rechnung getragen werden. Es kommen Mehrkamerasysteme, die in Reihe bzw. winklig angeordnet werden, in Kombination mit flexiblen, freiprogrammierbaren Beleuchtungseinrichtungen in Form von Mehrfachblitzsystemen, kuppelförmige Leuchtdiodenanordnungen etc. mit verschiedenen Lichtwellenbereichen zum Einsatz [85].

Ein spezifischer Ansatz eines Farbkameraverfahrens mit einer strukturierten Beleuchtung ist in Bild 36 dargestellt. Das System besitzt drei verschiedenfarbige, konzentrisch übereinander angeordnete ringförmige Beleuchtungseinheiten, die in unterschiedlichem Winkel auf das zu untersuchende Bauelement oder die zu untersuchende Lötstelle auftreffen. Die verschiedenfarbigen Lichtstrahlen werden je nach Auftreffwinkel vom Objekt reflektiert und von einer CCD-Farbkamera aufgenommen. Bei nahezu waagrechten Flächen überwiegt im reflektierten Licht der Farbanteil grün, während bei stark geneigten Flächen der blaue Farbanteil dominiert. Für die Auswertung steht also ein farbiges Bild der Lötstelle zur Verfügung, wobei die Farbverteilung die Neigungswinkel der Lotflanken charakterisiert. [86]

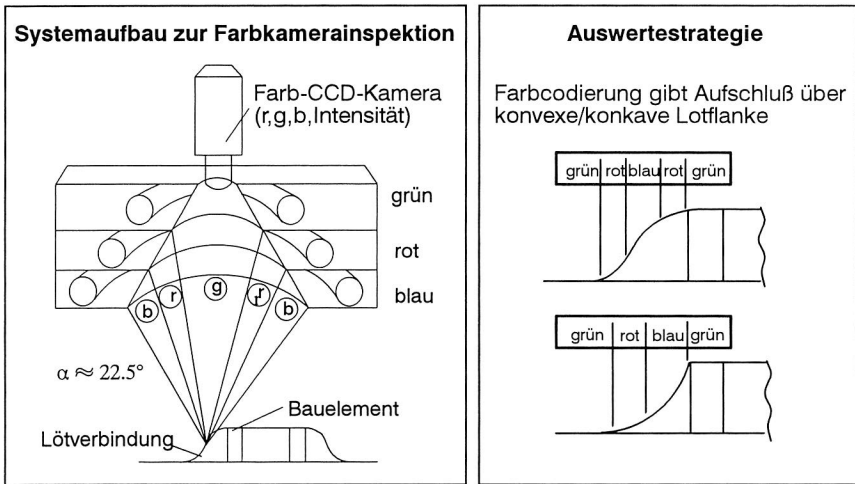


Bild 36: Sonderverfahren zur Elektronikbaugruppeninspektion mittels Farbkamera und spezifischer Rot/Grün/Blau-Beleuchtungseinheit

4.2.2 Erfassung räumlicher Strukturen mittels Laserinspektion

Um die genannten Nachteile von CCD-Kamerasystemen zu überwinden, befinden sich weltweit Laserinspektionssysteme für die Elektronikbaugruppeninspektion in der Entwicklung und Erprobung. [86, 87, 88]. Die wesentlichen Verfahrensansätze basieren auf verschiedenen Meßprinzipien zur räumlich geometrischen Vermessung von Prüfobjekten, z. B. der Lasertriangulation oder der dynamischen Fokussierung (Bild 37, siehe auch Kapitel 5). Die besonderen Herausforderungen bei deren Anwendung für die Aufgabenstellungen der Elektronikproduktion sind die geforderten Auflösung bei sehr hohen Prüfgeschwindigkeiten, um hinreichend schnell für einen Inline-Fertigungseinsatz in Bestückungslinien zu sein [89].

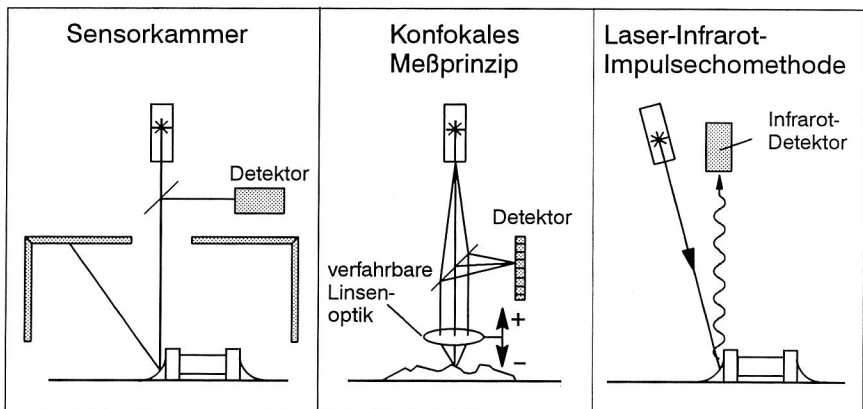


Bild 37: Ausgewählte Verfahren der Laserinspektion

Ein Sonderverfahren in der Klasse der Laserinspektionssysteme stellt die Inspektion mit der Lasersensorkammer dar. Das System arbeitet mit einem He/Ne-Laser, dessen Strahl über einen verstellbaren Galvanometerspiegel durch eine Öffnung in einer Sensorbox auf die Lötstelle abgelenkt wird. Der Laserstrahl wird dabei in Abhängigkeit von der Ausprägung der Lötstellenoberfläche in einem bestimmten Winkel reflektiert und von der Sensorbox registriert. Je nach reflektiertem Strahl liefert die Sensorbox eine Zahl für den entsprechenden Winkelbereich. Eine Lötstelle wird mit "gut" beurteilt, wenn sie folgende Charakteristika erfüllt. Der Lötmeniskus an Pin und Pad muß konkav sein, und die Höhe und Länge der Lötstelle muß innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen liegen. Falls die Lötstelle schlecht benetzt ist oder eine kalte Lötstelle vorliegt, wird sich der Lotmeniskus an der Grenzstelle Pin-Lot oder Pad-Lot konvex ausbilden. Eine Beurteilung der Lötstelle bezüglich Zuverlässigkeit oder mechanischer Festigkeit wird dem-

nach durch den Benetzungswinkel vorgenommen. Die Lötstelle wird umso besser bewertet, je kleiner die Benetzungswinkel an Pin und Pad sind. Ein sehr kleiner Benetzungswinkel stellt demnach in diesem Prüfverfahren das Idealbild einer Lötstelle dar. Je Abtastvorgang, der quer zur Pin oder Bauteilrichtung stattfindet, ergibt sich ein Durchschnittswert für den Winkelbereich. Nach dem Abtasten der gesamten Lötstelle liegt eine Zahlenreihe vor, mit der eine Gut/Schlecht-Beurteilung der Lötstelle möglich ist. Anhand der fallenden oder steigenden Ziffernfolge kann festgestellt werden, ob eine konvexe oder konkave Lötstellenoberfläche vorliegt. Auch Anfang und Ende und somit die Länge des Lotmeniskus sind so ermittelbar. Das System ist schwerpunktmäßig für die Lötstellenkontrolle entwickelt und führt keine direkte Bestückkontrolle durch. Anhand der Ausformung der Lötstelle und der Lötstellenbeurteilung können jedoch Rückschlüsse auf die Bestückung gezogen werden.

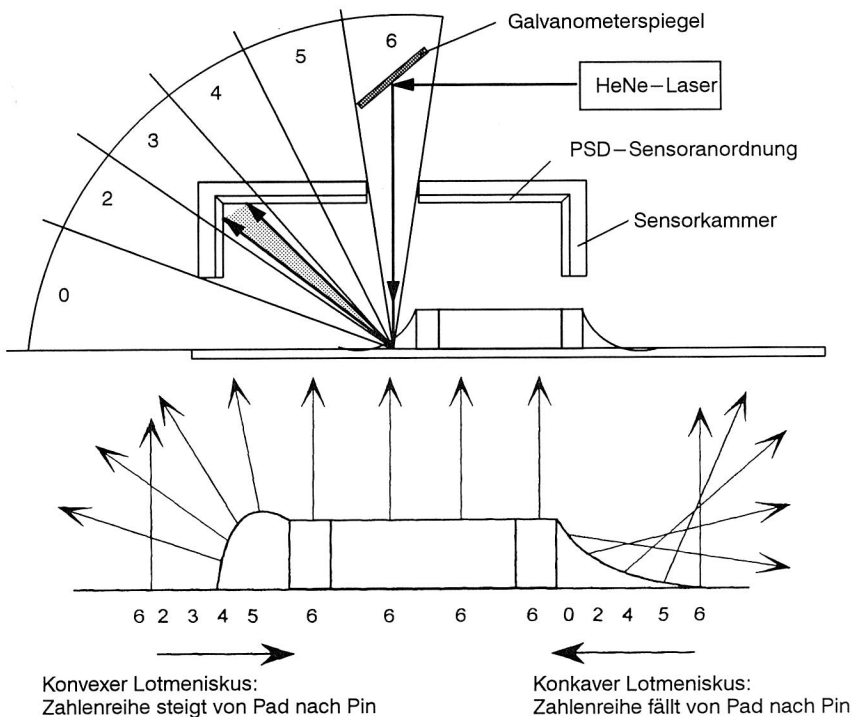


Bild 38: Laserinspektionssystem zur Analyse des Lotmeniskus – die konvexe bzw. konkave Ausprägung des Meniskus dient als Fehlerkriterium

Fazit zur Laserinspektion

Die direkt topometrische Meßwerterfassung mittels der 3D-Laserinspektion erlaubt eine zuverlässigere automatisierte Analyse der in der Regel auch dreidimensional ausgeprägten Fertigungsfehler elektronischer Baugruppen. Einige Beispiele hierfür werden in Kapitel 5 erläutert. Angesichts der bereits bei den CCD-Kamerasystemen genannten sehr schwierigen Spiegelungsverhältnisse an elektronischen Baugruppen liegt ein weiterer Vorteil der Laserinspektion in der aktiv messenden Beleuchtung. Durch die Möglichkeit der Intensitätsregelung der Laserquelle kann eine relativ große Bandbreite unterschiedlicher Oberflächen erfaßt werden. Die Problematik der Sekundärreflexionen an spiegelnden Lotoberflächen oder Leiterbahnen wirkt sich jedoch auch hier als Störgröße bei der Meßwerterfassung aus. Durch eine synchrone Erfassung des Meßsignals auf mehreren unterschiedlich angeordneten Detektoren kann diese Störgröße jedoch weitgehend eliminiert werden. Diesen Vorteilen steht die insgesamt aufwendigere Technologie gegenüber.

Die Grenzen der 3D-Laserinspektion sind durch die fortschreitende Miniaturisierung der Bauelemente und zum Teil auch durch neue Verbindungstypen gegeben. Die Laserinspektion setzt einen ungehinderten visuellen Zugang zu den zu prüfenden Stellen voraus. Gerade bei reflowgelöteten SMD-Bauelementen sind die wesentlichen Teile der Lötstelle oft unter den Bauelementeanschlüssen verborgen. Im Falle der sogenannten Ball Grid Array-Technologie bleibt der visuelle Zugang gänzlich verwehrt. Hier kann insbesondere die Röntgeninspektion einen wichtigen Beitrag leisten, um robuste Prozeßmonitore aufzubauen.

4.2.3 Materialspezifisch volumetrische Analyse mittels Röntgeninspektion

Die Anwendung der Röntgenstrahlung für die Inspektion elektronischer Baugruppen bietet gegenüber den bisher genannten Verfahren einige wesentliche Vorteile. Im Mittelpunkt steht hierbei der vorteilhafte Einsatz der Röntgentechnologie für die Lötstelleninspektion. Insbesondere SMD-Lötstellen können lichtoptisch selbst bei hoher Vergrößerung nicht einwandfrei beurteilt werden, da wesentliche qualitätsbestimmende Kriterien, wie z. B. der Lotmeniskus unterhalb der Bauelemente, visuell nicht zugänglich sind. Im Falle der Ball Grid Array Technologie befinden sich sogar die gesamten Lötstellen unterhalb des montierten Bauelementes. Hier bietet die Röntgeninspektion die Möglichkeit, derartige visuell nicht zugängliche Stellen zu inspizieren. In Bild 39 ist der prinzipielle Aufbau eines Röntgeninspektionsgerätes mit den wesentlichen Elementen Röntgenröhre, Prüfobjekt und Röntgenbildwandler mit nachgeschalteter CCD-Kamera dargestellt.

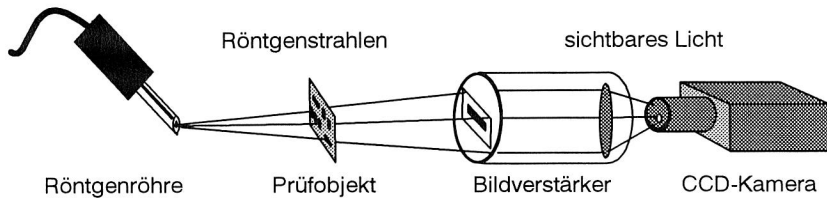


Bild 39: Prinzipieller Aufbau der Röntgeninspektion nach dem Durchstrahlungsprinzip

Die Absorption von Röntgenstrahlung beim Durchgang durch Materie wird mit dem exponentiellen Schwächungsgesetz beschrieben [90]. Demnach wird ein Photonenstrahl der Intensität I_0 nach Durchlaufen einer Strecke x geschwächt auf

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad \text{mit } I = I(E) \text{ und } \mu = \mu(E, Z)$$

wobei I_0 die Primärintensität der Röhre und I die Intensität am Detektor darstellt. Die Absorption der Röntgenquanten in Materie ist dabei abhängig von der Energie der Röntgenstrahlung und den Materialeigenschaften des Absorbers, die im wesentlichen durch dessen Kernladungszahl Z determiniert werden. D. h. das Absorptionsgesetz lässt sich streng genommen in der einfachen Form nur für monochromatische Strahlung und einelementiges Probenmaterial anwenden, wobei μ als totaler Massenschwächungskoeffizient sich aus der Summe der wirkenden Absorptionseffekte Photo-, Compton- und Paarbildungseffekt berechnet. Da es sich im vorliegenden Falle aber um ein Strahlenspektrum handelt, das sich aus einer Überlagerung der

charakteristischen Strahlung und der kontinuierlichen Bremsstrahlung des Targetmaterials in der Röntgenröhre bildet, sowie die durchstrahlten Materialien Legierungen bzw. Verbundwerkstoffe sind, stellt die genannte Gleichung nur eine grobe Näherung dar. Bei bekanntem Schwächungskoeffizienten μ läßt sich daher durch Umwandlung des exponentiellen Schwächungsgesetzes die Dicke des durchstrahlten Materials im Röntgenprojektionsbild am jeweiligen Ort abschätzen.

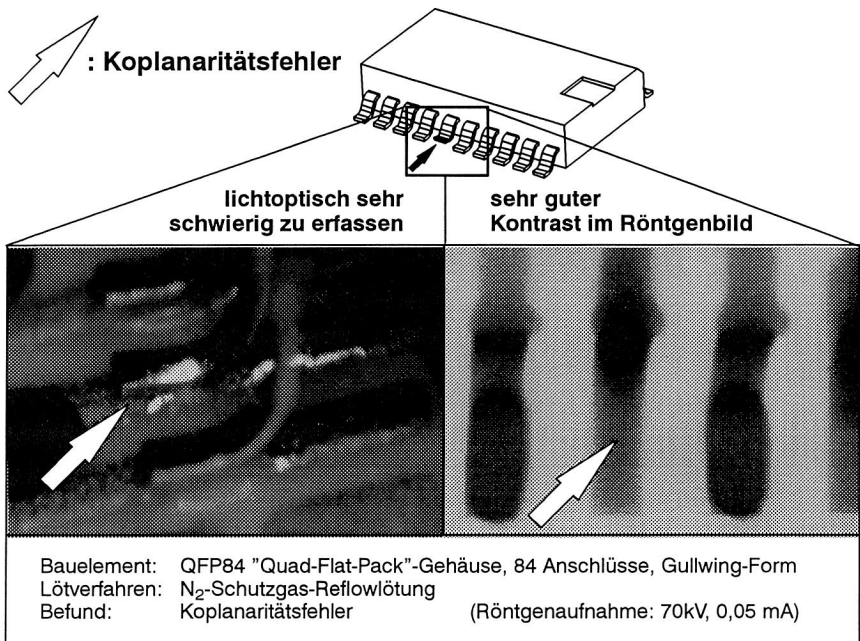


Bild 40: Vorteilhafter Einsatz der Röntgeninspektion für die Lötstellenprüfung: Visuell schwer detektierbare Lötstelle mit Gefahr eines Frühausfalles

Der besondere Vorteil der Röntgeninspektion für die Lötstelleninspektion ist der sehr gute Bildkontrast, der sich durch die starke Röntgenabsorption von Lotlegierungen im Gegensatz zur relativ schwachen Absorption der restlichen Baugruppenmaterialien ergibt. Einflüsse des Leiterplattenmaterials und der Bauelemente können weitgehend vernachlässigt werden, da sie keine hohen Röntgenabsorptionskoeffizienten aufweisen. Auch Oberflächeneigenschaften und Spiegelungsverhältnisse an der Lötstelle, die anderen optischen Prüfverfahren Probleme bereiten, sind irrelevant. Die Bildgewinnung ist daher bereits vom Sensorprinzip her sehr robust gegenüber Störungen, die bei lichtoptischen Verfahren durch Farb- oder Helligkeitsschwankungen

bzw. Reflexionen etc. herrühren. Durch den sehr guten Bildkontrast und die gute Reproduzierbarkeit in der Bildwiedergabe wird die automatische Auswertung der Bildinhalte bedeutend einfacher und zuverlässiger. Eine automatische Bildanalyse zur Diagnose kann auf dieser Grundlage sehr treffsicher und reproduzierbar gestaltet werden [91]. Der Vorteil der Röntgeninspektion schon bei der Bildgewinnung wurde bei den im Rahmen der Arbeit durchgeführten experimentellen Röntgenuntersuchungen für ein breites Bauelementespektrum nachgewiesen [92]. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei im vorteilhaften Einsatz der Röntgeninspektion für die Lötstelleninspektion von Bauelementen mit sehr kleinen Rastermaßen [93] sowie für die sog. Ball-Grid-Array-Gehäuse [94]. Während die lichtoptische Betrachtung der Baugruppen die vorliegenden Fertigungsfehler nur schwierig diagnostizieren läßt, kann die Interpretation der Röntgenbilder sehr einfach erfolgen (vgl. Bilder 40-42).

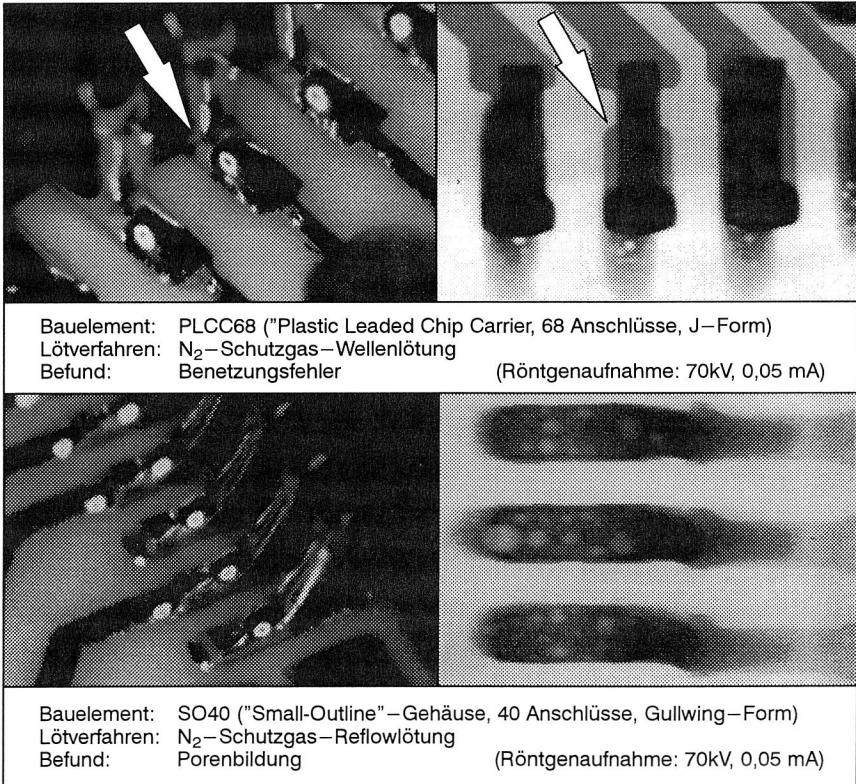


Bild 41: Röntgeninspektion visuell nicht zugänglicher Lötstellen an PLCC-Bauelementen (oben) und Porenanalyse bei visuell einwandfreien Lötstellen (unten)

Dies zeigt sich bei Erfassung einer unsicheren Lötverbindung, die durch einen Koplanaritätsfehler beim Bestückvorgang verursacht wurde (Bild 40). Die unterschiedliche Verteilung des Lotmaterials aufgrund des nicht plan auf die Kontaktfläche der Leiterplatte gesetzten Anschlusses ist deutlich sichtbar. Weiterhin erlaubt die Röntgeninspektion den Zugang zu visuell schwer zugänglichen und verdeckten Stellen, wie z. B. Lötstellen von PLCC-Gehäusen (Bild 41 oben). Darüberhinaus kann auch die innere Struktur der Lötstellen erfaßt werden, z. B. um Poren zu erkennen (Bild 41 unten).

Während die röntgenoptische Inspektion anfangs trotz der genannten prinzipiellen Vorteile aufgrund des höheren gerätetechnischen Aufwands und den damit verbundenen Kosten vielfach abgelehnt wurde, ist ihre sinnvolle Anwendung für die neuerdings praktizierte Ball-Grid-Array-Technologie uneingeschränkt anerkannt. (Bild 42). Die wesentlichen Verfahren der Röntgeninspektion – Durchstrahlung, Laminographie, Tomosynthese und Planare Computertomographie – die für die Anwendung in der Elektronikproduktion in Betracht kommen, sind im folgenden zu ihrem aktuellen Entwicklungsstand mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt.

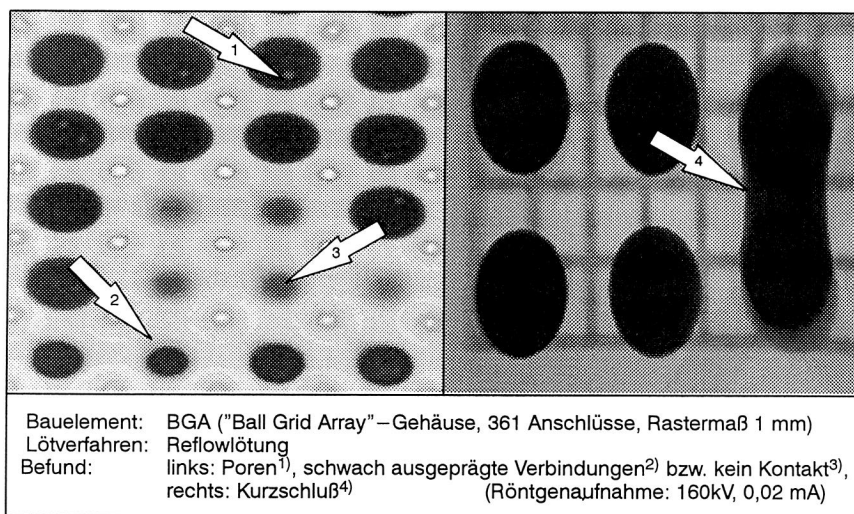


Bild 42: Röntgeninspektion zur Analyse von Lötverbindungen in Ball Grid Array-Technologie

- Röntgendurchstrahlung

Das Durchstrahlungsverfahren ist das meistverbreitete Verfahren zur Röntgeninspektion in der Elektronikindustrie. Der geometrische Aufbau ist in Bild 43 dargestellt. Der Prüfling kann zwischen der Röntgenröhre und dem Bildaufnehmer bewegt werden, wobei sich die Vergrößerungsverhältnisse nach dem Strahlensatz der Geometrie berechnen lassen. Diese Vergrößerung ist aber nur die optische Vergrößerung. Die tatsächliche Ortsauflösung, d. h., die Bildqualität wird durch die Qualität der Röntgenröhre und der nachgeschalteten Aufnahmekette mit Röntgenbildverstärker und CCD-Kamera stark beeinflusst [95].

Der Nachteil des reinen Durchstrahlungsverfahrens liegt in der Überlagerung von Bildinhalten bei beidseitig bestückten Baugruppen. Im Standardfall ist die Röntgenröhren-Bildverstärkerkombination für eine vertikale Durchstrahlung der Baugruppen angeordnet. Je nach Aufbau können jedoch auch der Prüfling bzw. die Röhren-Bildverstärkerkombination in mehreren Achsen bewegt werden, um beliebige Schrägdurchstrahlungen zu realisieren (s. a. Kap. 6.2). Für eine Vielzahl der erforderlichen Prüfaufgaben an Elektronikbaugruppen ist das Verfahren der Radioskopie ausreichend [96]. Abgesehen von den Überlagerungseffekten bietet das Durchstrahlungsverfahren den Vorteil einer besseren Bildqualität, sowie der schnelleren Bildaufnahme.

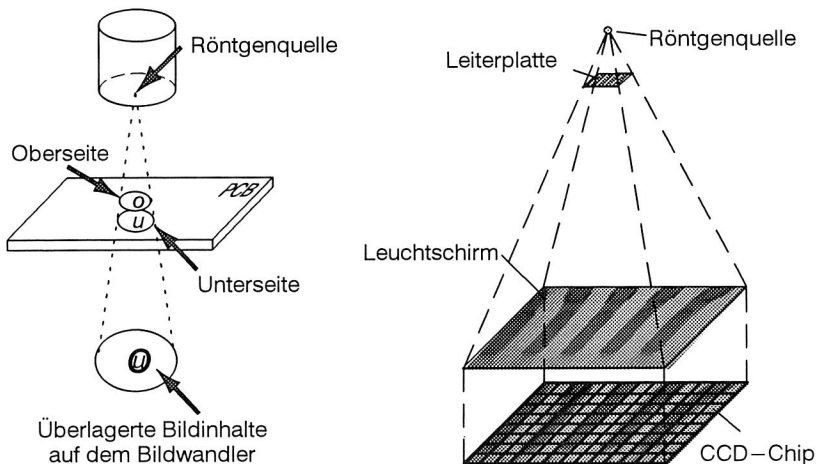


Bild 43: Röntgeninspektion nach dem Durchstrahlungsprinzip: Bei beidseitiger Baugruppenbestückung erschweren überlagerte Bildinhalte die Bildauswertung

Röntgenlaminographie

Bei der Laminographie handelt es sich um eine sog. Verwischungstomographie. Der Vorteil der Laminographie besteht in der Möglichkeit, Prüfobjekte schichtenweise aufzulösen [97]. Aufgrund der aus verschiedenen Schrägdurchstrahlungen eines Prüfobjektes erzielten Bildinformationen, die über eine oder mehrere Rotationsumläufe integriert werden, geht hauptsächlich die Bildinformation einer ausgewählten Schnittebene in das Integrationsbild ein. Ein Prüfobjekt kann so schichtenweise aufgelöst und z.B. überlagerte Bildinhalte von Bauelementen, Multilayerleiterplatten und Durchkontaktierungen voneinander getrennt dargestellt werden [98]. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch, daß prinzipiell alle Materialien, die sich im Strahlengang befinden, als Ergebnis in die Bildinformation eingehen. Die vorteilhafte Fähigkeit, Prüfobjekte schichtenweise aufzulösen, führt daher systembedingt zu einer schlechteren Bildqualität gegenüber reinen Durchstrahlungsbildern. Ein kritischer Anwendungsfall ist hierbei die Inspektion von BGA-Kontaktierungen mit hochschmelzenden Loten, d. h. hohem Bleianteil (Pb-90Sn-10), da hier benachbarte BGA-Kontakte im Strahlengang einen starken Einfluß auf das Gesamtbild aufweisen [99, 100].

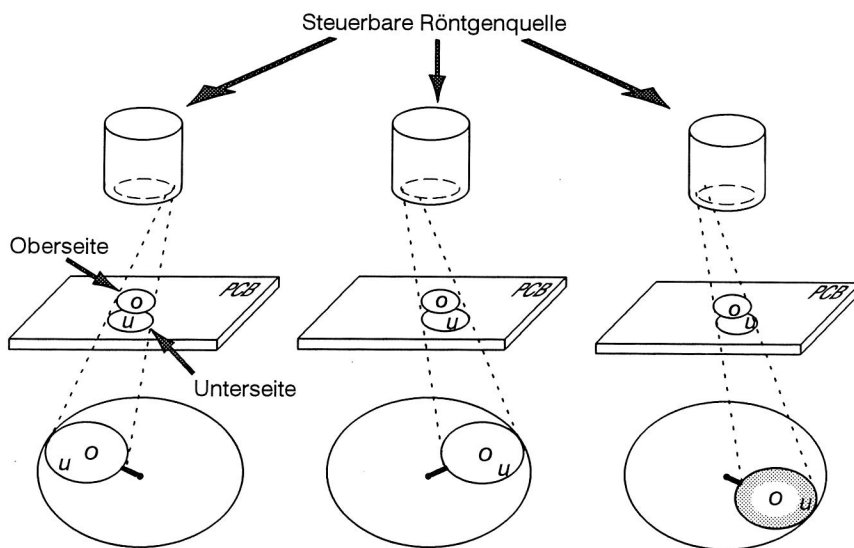


Bild 44: Funktionsprinzip der Laminographie zur getrennten Erfassung unterschiedlicher Schichten des Prüfobjektes (nach FOUR PI [97])

- Tomosynthese

Die Tomosynthese stellt eine Fortentwicklung des Durchstrahlungsverfahrens im Hinblick auf die Kombination mit der digitalen Tomographie für Anwendungen der Elektronikproduktion dar. Der Grundaufbau ist vergleichbar mit der in Bild 43 bereits dargestellten Durchstrahlungsanordnung. Die Besonderheit des Verfahrens liegt in der Fähigkeit, zusätzlich zur vertikalen Durchstrahlung auch Schrägdurchstrahlungsbilder zu erzeugen, ohne die geometrische Anordnung der Röhren-Bildverstärkerkombination zu verändern [101]. Dies geschieht durch die gezielte Auslenkung des Elektronenstrahls, der in der Röntgenröhre zur Erzeugung der Strahlung auf ein Targetmaterial, z. B. eine Wolframelektrode, beschleunigt wird. Das Verfahren erfordert einen entsprechend großen Bildverstärker, um die geometrische Strahlenanordnung ohne Bewegung des Bildverstärkers zu erfassen. Auf Basis der so erzeugten Schrägdurchstrahlungsbilder läßt sich auf algorithmischem Weg eine schichtenauflösende Darstellung errechnen. Der Vorteil des Verfahrens liegt dabei in der Kombination der für viele Prüfinhalte ausreichenden schnellen Bilderfassung mittels Durchstrahlung und dem fallweise anwendbaren Tomosyntheseverfahren für kompliziertere Diagnoseschritte [102].

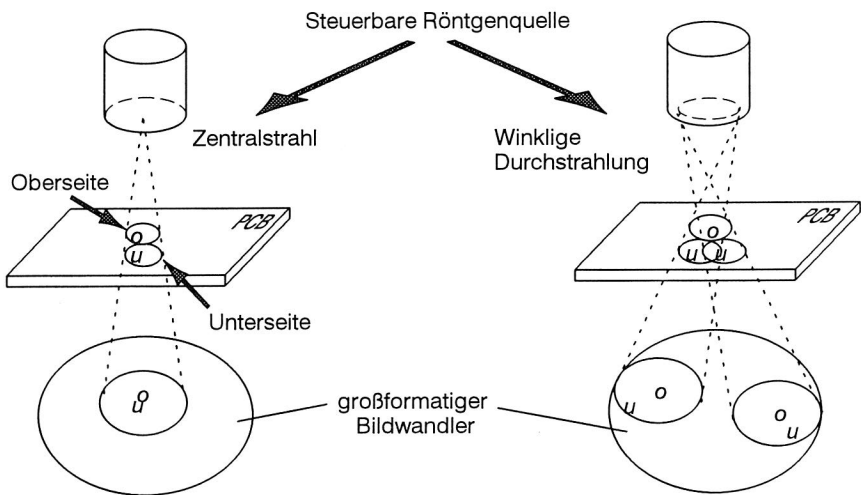


Bild 45: Die digitale Tomosynthese kombiniert das Durchstrahlungsprinzip mit der schichtenweisen Auflösung durch eine digitale Rekonstruktion

- Planare Computertomographie (PCT)

Die Anwendung der Planaren Computertomographie in der Elektronikproduktion befindet sich innerhalb des an der Universität Erlangen durchgeführten DFG-Sonderforschungsbereiches "Produktionssysteme in der Elektronik" in Entwicklung [103]. Das Verfahren basiert im Gegensatz zu den bekannten rotatorischen Tomographieverfahren auf einer linearen Relativbewegung der Elektronikbaugruppe innerhalb der Röntgenröhren-Bildverstärkeranordnung, um mehrere Ansichten des dreidimensional zu rekonstruierenden Baugruppenvolumens zu erhalten. Mit einer algebraischen Rekonstruktionsmethode lassen sich so aus den verschiedenen Durchstrahlungsbildern räumliche Informationen, z. B. zur Tiefenlokalisation von Lunkern errechnen. Der Nachteil des sehr rechenintensiven Verfahrens liegt derzeit noch in den relativ langen Rechenzeiten. Derzeit wird an der Beschleunigung des Verfahrens durch parallele Rechnerarchitekturen gearbeitet, eine Praxisanwendung ist daher erst mittelfristig zu erwarten [104].

4.2.4 Sonstige Verfahrensansätze

Neben den oben genannten Hauptgruppen prozeßbegleitender Prüfverfahren befinden sich einige weitere Prüfverfahren in der Erprobung bzw. Anwendung. Hierzu zählen die Infrarot-Impulsecho-Methode, die Anwendung der Ultraschallmikroskopie und die Thermographie.

Infrarot-Impulsecho-Verfahren ("Vanzetti-Prinzip")

Bei der Infrarot-Impulsecho-Methode wird die Qualität von Lötstellen mit dem Erwärmungs- und Abkühlverhalten von Lötstellen korreliert, die mit einem Nd-YAG-Laser aufgeheizt werden. Kritische Punkte des Verfahrens sind in der sequentiellen Durchführung der einzelnen Prüfvorgänge und im Anlernen der gut/schlecht-Entscheidungen des Systems mittels der Aufheiz-/Abkühlkurven einer Lernstichprobe von als gut deklarierten Lötstellen begründet. [105]

Ultraschallanalyse

Die Ultraschallmikroskopie wird insbesondere für die Prüfung von Die-Bond-Verbindungen eingesetzt. Eine breite Anwendung des Verfahrens, die über Fragestellungen der Prozeßentwicklung unter Laborbedingungen hinaus geht, erscheint aufgrund der Notwendigkeit flüssiger Übertragungsmedien und der eventuellen Gefährdung der Prüfobjekte durch die mechanische Belastung im Ultraschallbereich fraglich [106-108].

Thermographie

Die Anwendung von infrarotempfindlichen Thermokameras, die durch die Erfassung eines Temperaturfeldes Aufschluß über die thermische Belastung von Baugruppen unter Betriebsbedingungen geben, erscheint insbesondere in Kombination mit elektrischen Testverfahren in der Phase der Prototypentwicklung von Baugruppen sinnvoll. Gegebenenfalls kann durch konstruktive Maßnahmen die Temperaturbelastung einzelner Bauelemente verringert werden. Darüberhinaus wird die Infrarot-Thermographie zur Prozeßforschung an Lötprozessen angewandt [66]. Für die prozeßbegleitende Prüfung weiterer Qualitätsmerkmale, insbesondere für den Serientest der Verbindungsqualität, sind bisher keine Anwendungsfälle bekannt.

4.3 Beurteilungskriterien für die automatisierte Inspektion

In den vorhergehenden Abschnitten dieses Kapitels wurden die wesentlichen automatisierten Sichtprüfverfahren für die Elektronikbaugruppenproduktion qualitativ beschrieben, um eine Einordnung für die verschiedenen Anwendungsfelder zu ermöglichen. Da sich jedoch sowohl das anwenderseitige Anforderungsprofil, als auch systemseitig das Leistungsvermögen der Prüfverfahren von Fall zu Fall sehr stark unterscheiden können, ist eine strukturierte Vorgehensweise bei der Auswahl und Einführung derartiger Systeme unerlässlich. Abgesehen von sehr globalen und allgemein gehaltenen Vorgehensweisen für die Einführung von prozeßbegleitenden automatisierten Sichtprüfsystemen [109] haben sich bisher keine einschlägigen Standards herausgebildet. Die Vergleichbarkeit von verschiedenen Untersuchungen bzgl. der Leistungsfähigkeit der Systeme ist somit oftmals nicht gegeben [110]. Daher werden in diesem Abschnitt die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Auswahl und Einführung prozeßintegrierter Prüfverfahren sowie einige grundlegende Beurteilungskriterien bereitgestellt.

4.3.1 Prinzipielle Eignung für gefordertes Fehlerspektrum

Um die Anforderungen an ein automatisiertes Prüfsystem zu spezifizieren, ist die Beschreibung der mit den Systemen zu erfassenden Fertigungsfehler erforderlich. Besondere Schwierigkeiten werden hierbei durch die ungenauen bzw. widersprüchlichen Vorgaben der Prüfkriterien hervorgerufen. Doch schon die Klassifikation unstrittiger, für den menschlichen Betrachter klar zu erkennender Fertigungsfehler kann in der automatisierten Inspektion zu Problemen führen. Zum Beispiel kann eine Lötstelle, die wegen gänzlich fehlendem Lot als fehlerhaft detektiert werden müßte, durch das Prüfsystem unter Umständen als korrekt gefertigte Lötstelle angesehen werden. Die Gründe hierfür sind Schwächen bzgl. der Bildaufnahme oder der

Beleuchtungseinrichtung. Eine Grobauswahl möglicher Prüfverfahren muß demzufolge im ersten Schritt auf den bereits vom Prüfprinzip vorgegeben Stärken und Schwächen der Verfahren aufsetzen (Bild 46). Im nächsten Schritt sind die prinzipiellen Möglichkeiten der verschiedenen Verfahren den geforderten Prüfaufgaben gegenüberzustellen. Hierzu wurde im Rahmen der Arbeit auf der Basis umfangreicher

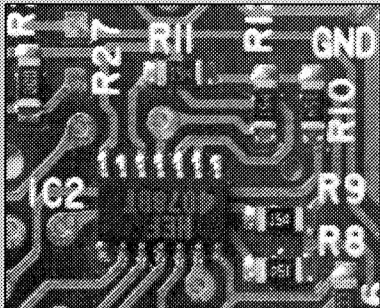
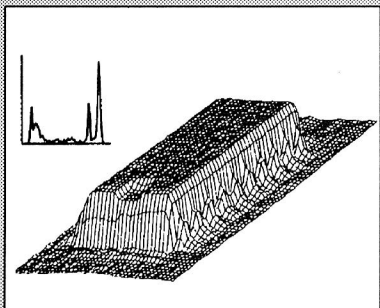
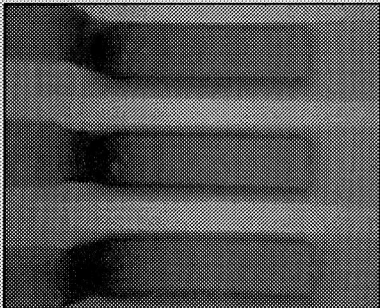
<p>CCD-Kamera-Inspektion</p> <ul style="list-style-type: none"> + Robuste Standard-Kameratechnik + Schnelle Bilderfassung im Videotakt (20 Bilder/sec) + Geringe Systemkosten – Hohe Abhängigkeit von Beleuchtung und Oberflächenreflexionen – Probleme mit Abschattung bei dicht bestückten Baugruppen 	
<p>3D-Laser-Inspektion</p> <ul style="list-style-type: none"> + Topometrisches Erfassung räumlicher Strukturen + aktiv messende Beleuchtung – Fehlmessungen aufgrund von Sekundärreflexionen – Abschattungsprobleme bei dicht bestückten Baugruppen 	
<p>Röntgen-Inspektion</p> <ul style="list-style-type: none"> + hervorragendes Prüfprinzip zur Lötstelleninspektion + invariant gegenüber Störungen durch Farbschwankungen im Lötstopplack, Bestückungsdruck, etc. – Aufwand für Röntgenfernsehkette und Strahlenschutz 	

Bild 46: Vor- und Nachteile der betrachteten Verfahrensprinzipien für die Elektronikbaugruppeninspektion

Systemuntersuchungen [73] eine Einordnung verschiedener Verfahrensalternativen bzgl. ihrer Leistungsfähigkeit für die Aufgaben der Bestückungs- und Lötstellenprüfung erarbeitet (Bild 47).

<div> <div>Prüfverfahren</div> <div>Qualitätskriterien</div> </div>	Graubildverarbeitung	Farbbildverarbeitung	Thermoanalyse	Röntgendurchstrahlung	Röntgenlaminographie	Laser – Sensorkammer	rgb – Beleuchtung-analyse	Triangulationsverfahren
Lötfehler								
Lotrückstände	○	○	—	◐	◐	○	○	○
Lotzapfen, Lotspitzen	◐	◐	○	●	●	◐	◐	●
Lotperlen	○	○	○	●	◐	○	○	◐
Lotüberstand Landeflächen	◐	◐	—	●	●	◐	◐	◐
Berührung Lot/BE – Gehäuse	○	○	○	○	○	—	○	◐
Lotbrücken	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	◐
Grabsteineffekt	●	●	◐	●	●	●	●	●
Kleber auf Lötflächen	○	◐	◐	○	○	◐	◐	◐
Hohlräume	—	—	○	●	●	—	—	—
Nichtlötung (kein Lot vorhanden)	◐	◐	●	●	●	◐	◐	◐
Kalte Lötstelle	—	—	○	—	—	—	—	—
Flußmittelrückstände, Kontamination	○	○	—	—	—	—	○	—
Bestückfehler								
Beschädigungen	◐	◐	—	○	○	—	○	◐
BE fehlt	●	●	◐	●	●	●	●	●
BE falsch (unterschiedliche Gehäuse)	◐	◐	—	○	○	○	◐	◐
BE verpolt (Marke am Gehäuse)	◐	◐	—	—	—	—	○	◐
<div> <div>● Überprüfung gut möglich</div> <div>○ Überprüfung eingeschränkt möglich</div> <div>◐ Überprüfung möglich</div> <div>— Überprüfung nicht möglich</div> </div>								

Bild 47: Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Verfahren für die Bestück- und Lötstellenprüfung

Eine besonders kritische Aufgabenstellung stellt hierbei die Lötstelleninspektion dar. Vertiefend zur in Bild 47 wiedergegebenen Beurteilung der Systeme im Hinblick auf ihrer prinzipiellen Eignung für ein vorgegebenes Fehlerspektrum wurde ebenso die Fähigkeit zur Ermittlung elementarer Qualitätskriterien untersucht (Bild 48). Von den alternativen Verfahrensprinzipien CCD-Kamera-, Laser- und Röntgeninspektion hat im Anwendungsfall der Lötstellenprüfung, die Röntgeninspektion eindeutige Vorteile, da sie im Grunde bereits bei der Bildgewinnung die Lötstellen mit sehr hohem Kontrast darstellt. Eine darauf aufsetzende automatische Bildauswertung und Prüfentscheidung kann dementsprechend zuverlässiger erfolgen (vgl. Kap. 4.2.3).

Qualitätskriterien \ Prüfverfahren								
	Graubildverarbeitung	Farbbildverarbeitung	Thermoanalyse	Röntgendurchstrahlung	Röntgenlaminographie	Laser – Sensorkammer	rgb-Beleuchtungsanalyse	Triangulationsverfahren
Beurteilungskriterien an SMT-Lötverbindungen								
Verlauf der Lotflanke an der Anschlußstirnfläche	●	●	—	●	●	●	●	●
Verlauf der Lotflanke an der Beinchenferse	—	—	—	●	●	—	—	—
Lotmenge insgesamt	—	—	●	●	●	○	○	●
Benetzungshöhe an der Anschlußstirnfläche	○	○	—	●	●	●	○	●
Benetzungshöhe an der Beinchenferse	—	—	—	●	●	—	—	—
Lotumflossener Anschlußumfang	●	●	—	●	●	○	○	●
Lotnahtlänge an der Anschlußstirnfläche	○	○	—	●	●	●	○	●
Lotnahtlänge an der Beinchenferse	—	—	—	●	●	—	—	—

Bild 48: Prinzipielle Leistungsfähigkeit der Verfahren für verschiedene Qualitätskriterien an SMD-Lötstellen (● gut ● mittel ○ wenig geeignet)

4.3.2 Erkennungssicherheit und Fehlerschlupf

Ist die prinzipielle Aussagefähigkeit und Eignung eines Prüfverfahrens für ein gefordertes Aufgabenspektrum sichergestellt, so muß im nächsten Schritt einer System-einführung eine quantitative Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Systeme durchgeführt werden. Die wesentlichen Faktoren zur Beurteilung der Aussagefähigkeit eines Prüfverfahrens sind die Kennwerte Erkennungssicherheit und Fehlerschlupf. Idealerweise kann ein Prüfsystem 100% aller tatsächlichen Fertigungsfehler einwandfrei klassifizieren. Da dieser Idealfall nach dem heutigen Stand der Technik in der Regel nicht gegeben ist, läßt sich komplementär der sog. Fehlerschlupf eines Prüfsystems ermitteln. Der Fehlerschlupf ist der Anteil defekter Lötstellen, die vom Inspektionssystem nicht erkannt werden, bezogen auf die Anzahl der fehlerhaften Lötstellen.

$$\text{Erkennungssicherheit} = \frac{\text{Erkannte Fehler}}{\text{Anzahl aller Fehler}} = 1 - \text{Fehlerschlupfrate}$$

$$\text{Fehlerschlupfrate} = \frac{\text{Nicht erkannte Fehler}}{\text{Anzahl aller Fehler}}$$

Da in der Praxis jedoch die in der obigen Definition benannte Bezugsgröße "Anzahl aller Fehler" in der Regel nicht bekannt ist, wird bei der Durchführung von Systemtests die Fehlerschlupfrate auch auf die Gesamtheit aller untersuchten Lötstellen bezogen. Dies stellt eine starke Vereinfachung dar, denn die so ermittelte Fehlerschlupfrate ist abhängig von der tatsächlich auftretenden Fehlerrate. Dennoch wurde diese Vorgehensweise in den gemeinsam mit Industriepartnern durchgeführten Systemuntersuchungen sowohl von Systemherstellern als auch den Anwendern akzeptiert, da dieser Pragmatismus eine beträchtliche Vereinfachung in der Vorgehensweise darstellt.

4.3.3 Irrtümliche Fehlerzuweisung (Pseudofehlerrate)

Für den wirtschaftlichen Einsatz sowie für die generelle Akzeptanz eines automatisierten Systems zur Sichtprüfung ist weiterhin die sog. Pseudofehlerrate ein entscheidendes Kriterium. Die Pseudofehlerrate wird auch mit dem Begriff Fehlalarmquote bezeichnet. Sie quantifiziert den Anteil der Prüfentscheidungen des Systems, die ein nach objektiven Kriterien als gut einzustufendes Prüfobjekt irrtümlicherweise als fehlerhaft deklarieren. Da in der Regel die Anzahl der fehlerhaften Lötstellen sehr klein im Verhältnis zu allen auf der Baugruppe vorhandenen Lötstellen ist, kann als alternative Bezugsgröße auch die Gesamtzahl der Lötstellen angewendet werden.

$$\text{Pseudofehlerrate} = \frac{\text{Pseudofehler}}{\text{Anzahl guter Prüfobjekte}}$$

$$\text{Pseudofehlerrate} \approx \frac{\text{Pseudofehler}}{\text{Prüfobjekte}} \quad (\text{für Fehlerzahl} \ll \text{Anzahl aller Prüfobjekte})$$

Da derartige Fehlentscheidungen zu erhöhtem Aufwand bei der Nachkontrolle am Reparaturplatz führen, ist die Pseudofehlerrate ein wesentliches Kriterium, das beim Wirtschaftlichkeitsnachweis eines Systems berücksichtigt werden muß. Der erhoffte Rationalisierungseffekt wird dadurch erheblich beeinträchtigt, denn im ungünstigen Fall einer zu hohen Pseudofehlerrate muß im Zweifelsfall jede Baugruppe aus dem Fertigungsfluß ausgeschleust werden und am Reparaturplatz visuell betrachtet werden. Das Ziel, die visuelle Sichtprüfung weitgehend einzusparen wird auf diesem Wege verfehlt, denn der visuelle Prüfaufwand ist dabei weitgehend identisch mit der rein visuellen Sichtprüfung. Zusätzlich fallen jedoch noch die Kosten für das automatisierte Inspektionssystem und die Personalkosten für die Betreuung des Sichtprüfautomaten an.

Bild 49 zeigt den Zusammenhang der in diesem Abschnitt beschriebenen Kenngrößen Erkennungssicherheit und Pseudofehlerrate auf. Eine weitere wichtige Beurteilungsgröße stellt die Reproduzierbarkeit der Sichtprüfergebnisse dar, die im nächsten Abschnitt erläutert wird.

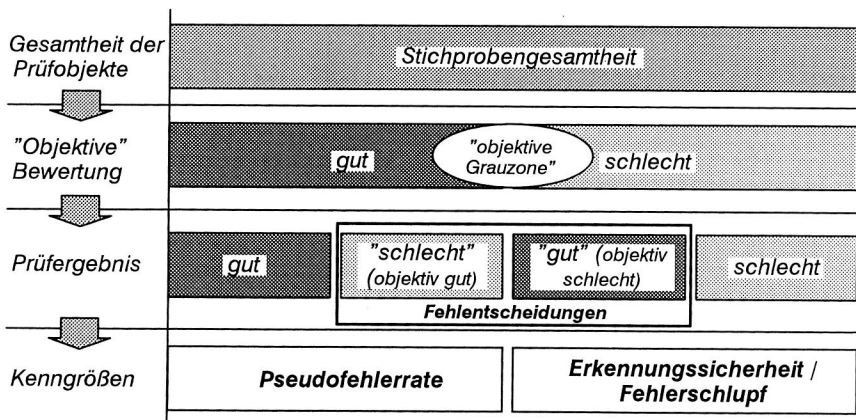


Bild 49: Zusammenhang zwischen Erkennungssicherheit und Pseudofehlerrate bei der automatisierten Inspektion

4.3.4 Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse

Da es sich bei den hier betrachteten automatisierten Inspektionssystemen um komplexe Meß- und Prüfsysteme handelt, die in der Regel attributive Merkmale, z. B. verschiedene Lötstellenfehlertypen, als Prüfergebnis protokollieren, muß die Reproduzierbarkeit der Prüfentscheidungen in der Praxis auf der Basis der vorhandenen Prüfprotokolle bestimmt werden. Um die Stabilität von Prüfentscheidungen in einer pragmatischen Vorgehensweise zu bestimmen, wird eine Testbaugruppe wiederholt geprüft. Die Anzahl der stets gleich klassifizierten Prüfbjekte wird daraufhin mit der Gesamtzahl der jeweils in einem Lauf geprüften Objekte in Beziehung gesetzt. Idealerweise würde sich der Prüfautomat in keinem Falle selbst widersprechen. Die durchgeführten Feldanalysen zeigen jedoch durchaus Schwankungen in der Fehlerbeurteilung auf. Dies läßt sich unter anderem auf Streuungen in der Meßwerterfassung der Prüfsysteme zurückführen.

Die Größe "Stets gleich klassifizierte Prüfbjekte" ist bei umfangreichen Prüfprotokollen von Baugruppen mit einer großen Anzahl von Prüfbjekten mitunter aufwendig zu ermitteln. Soll aus Zeitgründen nicht die gesamte Anzahl aller Prüfbjekte einer Baugruppe in die Bestimmung der Reproduzierbarkeit eingehen, so können zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit auch ausgewählte Prüfbjekte auf der Baugruppe betrachtet werden, die in der Regel beim Betrieb des Prüfsystems vom Bediener als Fehler oder Pseudofehler erkannt wurden.

Die Auswertung beschränkt sich dabei in der Regel auf einige Pseudofehler sowie einige fehlerbehaftete Prüfbjekte, deren Reproduzierbarkeit in den Prüfergebnissen getrennt für das jeweilige Prüfbjekt ermittelt wird (RF_i , RP_i). Somit kann die Reproduzierbarkeit getrennt für Fehlertypen sowie Pseudofehler angegeben werden. Ein zusammengefaßter Vergleichswert kann als Gesamtreproduzierbarkeit nach folgenden Gleichungen errechnet werden.

Reproduzierbarkeit	$R = \frac{\text{Stets gleich klassifizierter Prüfbjekte}}{\text{Prüfbjekte}} = \frac{RF + RP}{n + m}$
Reproduzierbarkeit Fehlererkennung	$RF_i = \frac{\text{Detektierte Fehlerart } i}{\text{Anzahl der Wiederholungen}} \quad RF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RF_i$
Reproduzierbarkeit Pseudofehler	$RP_i = \frac{\text{Auftreten eines Pseudofehlers } i}{\text{Anzahl der Wiederholungen}} \quad RP = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m RP_i$

Bild 50: Definitionen zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit der Inspektionssysteme

4.3.5 Durchführung von Systemtests an automatisierten Inspektionssystemen

Zur Ermittlung der Kennwerte Fehlerschlupf und Pseudofehlerrate sind ausführliche Systemtests erforderlich. Diese können gestuft nach folgender Vorgehensweise durchgeführt werden. Der erste Schritt der Systemevaluierung mit Prüfmustern dient der Potentialeinschätzung von verfügbaren Systemen durch den Anwender und ist mit wenig Aufwand durchführbar. In einem zweiten Schritt muß ein quantifizierter Leistungsnachweis erbracht werden, der in der Regel nach der Systemeinführung als Teil der Abnahme des Systems dient. In einem dritten Schritt sind regelmäßige Systemtests und Fähigkeitsnachweise auch im laufenden Betrieb der Systeme sinnvoll.

Schritt 1: Systemevaluierung mit präparierten Prüfmustern

In einer ersten Evaluierungsphase zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit verfügbarer Systeme anhand praktischer Tests ist die Verwendung präparierter Prüfmuster sinnvoll. Hierbei werden für den vorgesehenen Einsatzfall repräsentative Flachbaugruppen gezielt mit charakteristischen Fertigungsfehlern versehen. Dies geschieht z. B. durch das künstliche Einbringen von Lötbrücken mit dem Handlötkolben, das Entfernen von Bauelementen oder durch das Absaugen von Lot an einer Lötstelle.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Möglichkeit das Verhalten des Systems für möglichst viele verschiedene Fehlertypen innerhalb eines Prüfablaufs zu erfassen. Der Nachteil der Vorgehensweise ist in der künstlichen Einbringung der Fertigungsfehler begründet. Besonders bei kleinen Rastermaßen entsprechen die behelfsmäßig mit verschiedenen "Kunstgriffen" erzeugten Fehlertypen in der Regel nicht den tatsächlich auftretenden Fertigungsfehlern.

Da die so durchgeführten Analysen in der Regel innerhalb eines Tages gemeinsam mit dem Systemhersteller durchgeführt werden, ist die kleine Zahl von möglichen Versuchsdurchläufen nicht geeignet, statistische Aussagen zu unterstützen. Derartig durchgeführte praktische Systemtests eignen sich daher gut für die Entwicklung eines besseren Verständnisses der potentiellen Stärken und Schwächen eines Prüfsystems, erlauben jedoch aus den genannten Gründen keine quantifizierten Aussagen, da die statistische Basis nicht gegeben ist.

Schritt 2: Leistungsermittlung in realer Fertigungsumgebung

Zur Ermittlung quantifizierter Leistungskennwerte müssen ausführliche Systemtests anhand realer Baugruppen erfolgen. Dies kann z. B. während einer mit dem Systemanbieter vereinbarten Testinstallation geschehen. Ein Hauptproblem bei der Evaluierung der Tauglichkeit des Systems ist, daß die objektive Fehlerrate der geprüften

Baugruppen aus der laufenden Produktion nicht bekannt ist. Eine bewährte Vorgehensweise ist daher die zeitweise Kopplung der Prüfergebnisse mit einer parallel durchgeführten Sichtprüfung durch geschultes Prüfpersonal.

Nach einer Vorprüfung der Baugruppen durch einen Sichtprüfer werden die Baugruppen durch das automatisierte Prüfsystem geprüft. Auf diese Weise kann die Fehlerschlupfquote des automatisierten Systems ermittelt werden. Vom System zusätzlich erkannte Fehler weisen auf den bei der Sichtprüfung vorhandenen Fehlerschlupf hin. Die vom Prüfsystem erkannten Fehler werden ebenfalls durch eine personelle Sichtprüfung quergeprüft und ggf. für die Bestimmung der Fehlalarmquote des Systems verwendet. In der Vorgehensweise bleibt die Möglichkeit, daß tatsächliche Fehler weder vom Prüfpersonal, noch vom automatisierten Prüfsystem erkannt werden, offen. Letzteres kann jedoch als geringfügiger Fehler bzgl. der Leistungskriterien vernachlässigt werden. Als Beispiel für die Ermittlung quantifizierter Leistungskennwerte automatisierter Inspektionssysteme ist in Kapitel 5.4 ein Systemtest der entwickelten 3D-Laserinspektion dargestellt.

Schritt 3: Systemuntersuchungen auf Einzelparameterebene

Um während des Einsatzes eines automatisierten Inspektionssystems die Zuverlässigkeit der Prüfentscheidungen zu überwachen und diese durch gezielte Feinabstimmung von Systemparametern zu steigern, bietet sich die systematische Analyse der

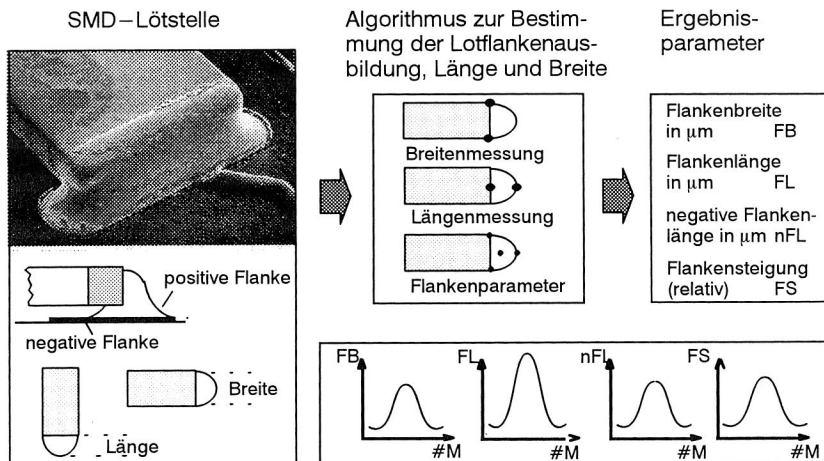


Bild 51: Fähigkeitnachweise am Beispiel eines Prüfprozesses zur automatisierten Lötstelleninspektion

aus dem System generierten Prüfparameter an [111]. Hierzu werden die Meßwerte des Prüfsystems auf Einzelparameterebene analysiert. In Bild 51 sind ausgewählte Meßgrößen, wie Flankenbreite, Flankenlänge und Flankensteigung, die ein Röntgeninspektionsalgorithmus ermittelt, exemplarisch dargestellt. Bei Wiederholungsmessungen läßt sich eine Streuung der Meßwerte ermitteln (Bild 52). Die Beurteilung der zulässigen Streubreite ist jedoch von den Entscheidungsgrenzen der auf diesen Meßgrößen arbeitenden Prüfalgorithmen abhängig. Im konkreten Fall der in Bild 52 dargestellten Meßgröße erwies sich diese Relation als unkritisch und der Prüfprozeß konnte als fähig eingestuft werden. Im Falle der Überlagerung von Entscheidungsgrenzen der Prüfalgorithmen mit der Meßwertstreuung des Prüfsystems verschlechtern sich Erkennungssicherheit und Pseudofehlerrate der Systeme drastisch. In Kapitel 7 werden Lösungsmöglichkeiten zur anwenderflexiblen Reaktion und Feinabstimmung der Prüfsysteme aufgezeigt.

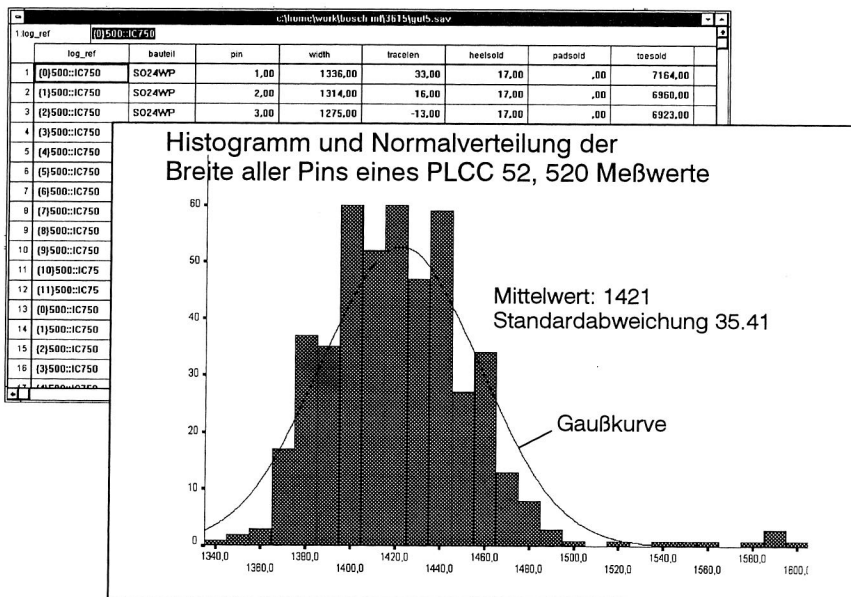


Bild 52: Erfassung von Meßwerten zur Ermittlung der Streuung des Prüfsystems in Relation zu den Schwellwerten für Prüfentscheidungen

5 Entwicklung von 3D-Laserinspektionssystemen für die Elektronikmontage

In Kapitel 4 wurden die Grenzen der CCD-Kamerainspektion für Anwendungen in der Elektronikproduktion aufgezeigt, während Laser- und Röntgenverfahren sich für bestimmte Anwendungen als vorteilhaft erwiesen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher der Ansatz der räumlichen Inspektion mittels Lasermeßtechnik spezifisch für die Anforderungen der Elektronikindustrie aufgegriffen. Bild 53 erläutert die Struktur dieses mit verschiedenen europäischen Industriepartnern durchgeführten Forschungsvorhaben TRIOS [112]. Die Entwicklung geeigneter 3D-Laserinspektionsgeräte für die Elektronik wurde mit drei Schwerpunkten bearbeitet. Ein zentrales Element stellt die Entwicklung hinreichend genauer und vor allem sehr schneller 3D-Lasersensoren für den Einsatz in Elektronikfertigungslinien dar. Die 3D-Musterverarbeitung hat die Aufgabe, die anfallenden Sensordatenmengen in Echtzeit auszuwerten und eine Klassifikation der Prüfergebnisse durchzuführen. Mit einer CAD/CAM-Kopplung für die automatisierte optische Inspektion wurde eine verbesserte Prüfsicherheit erreicht sowie der Erstellungsaufwand für die Prüfprogramme drastisch reduziert. Der Einsatz der automatischen Inspektion wird so auch in der Fertigung von kleinen Losgrößen wirtschaftlich. Mit den Entwicklungsarbeiten wurden systemtechnische Lösungen für die Leiterplattenprüfung, Lotpasteninspektion, Bestück- und Lötstellenprüfung aufgezeigt.

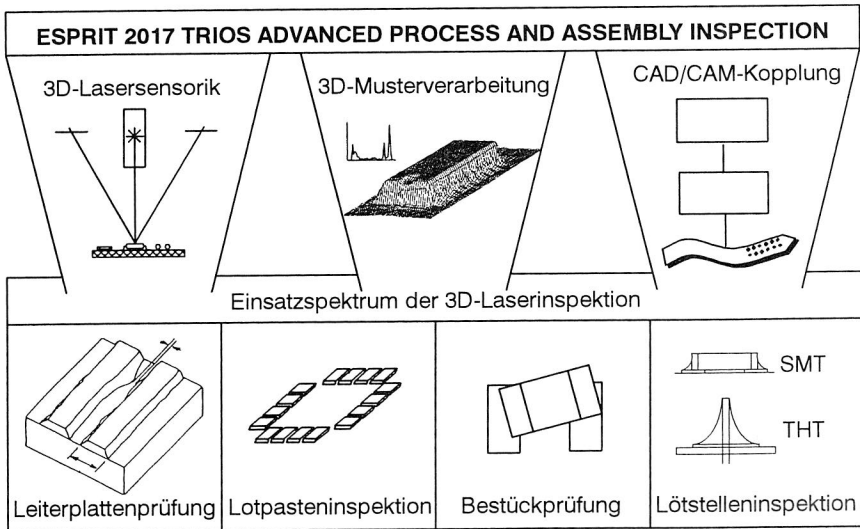


Bild 53: Schwerpunkte der Entwicklungsarbeiten im Projekt ESPRIT 2017 TRIOS

5.1 Entwicklung schneller 3D-Laserscanner

Um die dreidimensionale Erfassung der Baugruppengeometrie zu realisieren, wurden die Meßprinzipien Lasertriangulation und das Konfokale Meßprinzip verwendet (Bild 54). Für die Triangulationsmessung tastet ein Laserstrahl die Baugruppe ab, der senkrecht auftreffende Strahl wird von der Baugruppe reflektiert und auf winklig zum einfallenden Laserstrahl angeordneten positionsempfindlichen Detektoren erfaßt. Entsprechend der Niveauunterschiede wird der Laserstrahl verschieden stark abgelenkt und trifft auf den Detektoren an unterschiedlichen Stellen auf. Diese Auslenkung wird trigonometrisch zur reflektierenden Höhenebene des Prüfobjektes in Beziehung gesetzt.

Beim konfokalen Meßprinzip wird die höhenabhängige Fokussierung eines Laserstrahls auf dem Prüfobjekt ausgewertet. Um die geforderten hohen Abtastraten zu verwirklichen, werden in beiden Fällen Polygonspiegel eingesetzt, um ein linienförmiges Abtasten zu ermöglichen. Die Prüfobjekte werden durch motorisches Verfahren der Baugruppen unterhalb der so erzeugten Abtastbahnen erfaßt [112].

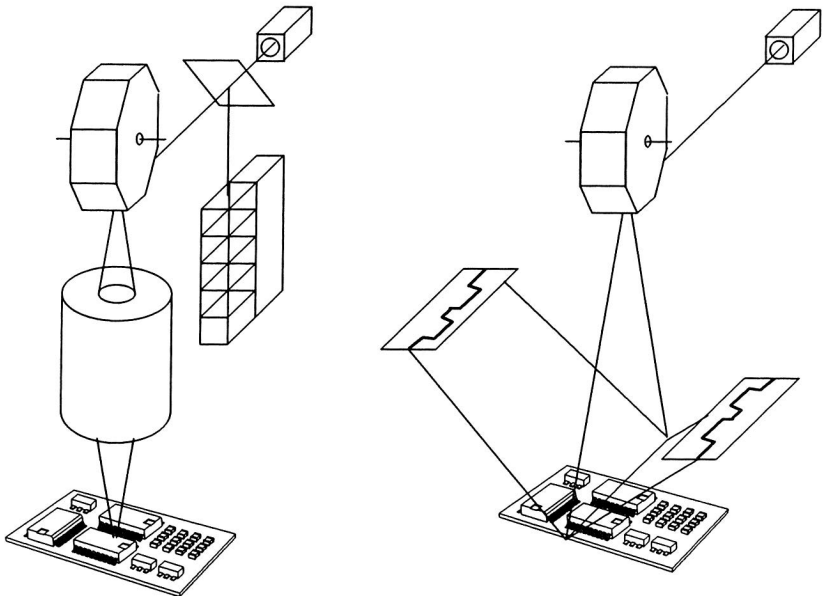


Bild 54: 3D-Laserinspektion mit den alternativen Verfahren Lasertriangulation und Konfokales Meßprinzip (schematisierte Darstellung der TRIOS-Laserscanner)

5.1.1 3D-Scanner auf Basis der Lasertriangulation

In Bild 55 ist das Wirkprinzip des Triangulationsscanners detaillierter dargestellt. Über einen rotierenden Polygonspiegel wird der Laserstrahl durch eine spezifische Linsenoptik auf das Prüfobjekt gerichtet und tastet dort sequentiell eine Linie ab, die durch den Polygonspiegel und die Linsenoptik vorgegeben ist. Das für das Triangulationsprinzip erforderliche rückgestreute Licht wird über Spiegel und Linsenoptik erfaßt und über den Polygonspiegel auf verschiedene Detektoren gelenkt. Die Auslenkung des rückgestrahlten Lichtes wird auf zwei symmetrisch angeordneten positionsempfindlichen Detektoren erfaßt. Durch eine interne Logik können durch den Vergleich der symmetrisch angeordneten Detektoren Meßfehler erkannt werden, wie sie z. B. durch Sekundärreflexionen verursacht werden.

Um den sehr unterschiedlichen optischen Eigenschaften von Elektronikbaugruppen gerecht zu werden, wird zusätzlich die Intensität des rückgestreuten Lichtes auf Detektoren erfaßt und damit eine Intensitätsregelung der Laserquelle durchgeführt. Auf diese Weise können durch die dynamische Regelung der Laserintensität die unterschiedlichen Reflexionsbedingungen von spiegelndem Lot oder mattschwarzen Bauelementgehäusen ausgeglichen werden, um stets ein zuverlässiges Meßsignal zu erhalten.

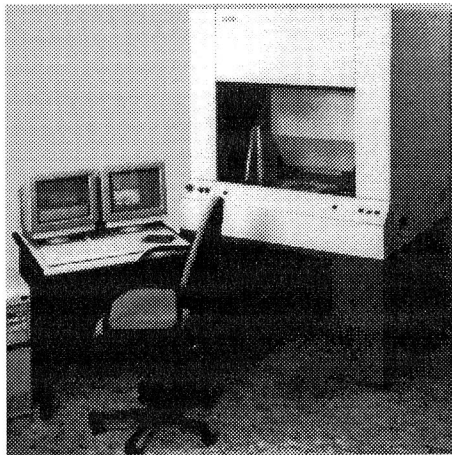
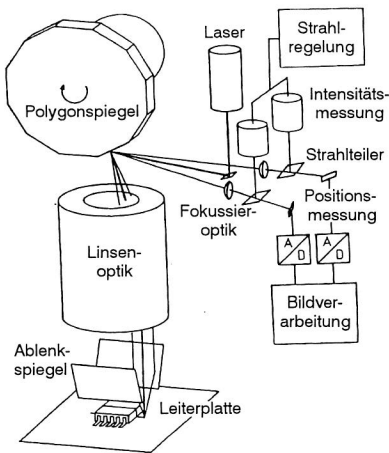


Bild 55: Funktionsprinzip des TRIOS-Laserscanners für die Aufgabenfelder Lotpasteninspektion, Bestückprüfung, Lötstellenprüfung (Werkfoto Siemens)

5.1.2 Konfokales Meßprinzip

Um die durch das Triangulationsprinzip bedingten Beschränkungen durch die Abschattung des Laserstrahls bei sehr dicht bestückten Baugruppen zu überwinden, wurde zusätzlich das Prinzip der konfokalen Lasermikroskopie für Inline-Anwendungen weiterentwickelt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, durch den vertikal auf die Oberfläche der Prüflinge gerichteten Laserstrahl zu messen. Das Meßprinzip erfordert die Fokussierung des Strahles auf ein bestimmtes Höhenniveau, von dem aus die maximale Intensität zurückgestrahlt wird. Bei handelsüblichen Meßmikroskopen kann durch die Fokussierung des einfallenden Laserstrahles mittels der vertikalen Bewegung der Linsenoptik ein Prüfobjekt mit einer relativ hohen Genauigkeit von $0,1\ \mu\text{m}$ abgetastet werden [113]. Auch spiegelnde Oberflächen lassen sich gut detektieren. Der Nachteil der dort eingesetzten Technologien liegt in den für InLine-Anwendungen inakzeptablen Meßraten von ca. 100 Hz, die durch die Trägheit der bewegten Linsenoptik vorgegeben sind [114].

Im hier verfolgten Ansatz wurde das konfokale Meßprinzip daher durch eine bewegungslose Meßanordnung realisiert. Bild 56 zeigt die Anordnung einer Lochblendenkaskade auf, die mittels Detektion der maximalen Intensität eine Höhenzuordnung des Prüfobjekts erlaubt. Im Verbund mit dem Polygonspiegel und einer geeigneten Linsenoptik lassen sich so Meßraten von ca. 1 Mhz sowie eine Ortsauflösung von ca. $5\ \mu\text{m}$ erzielen.

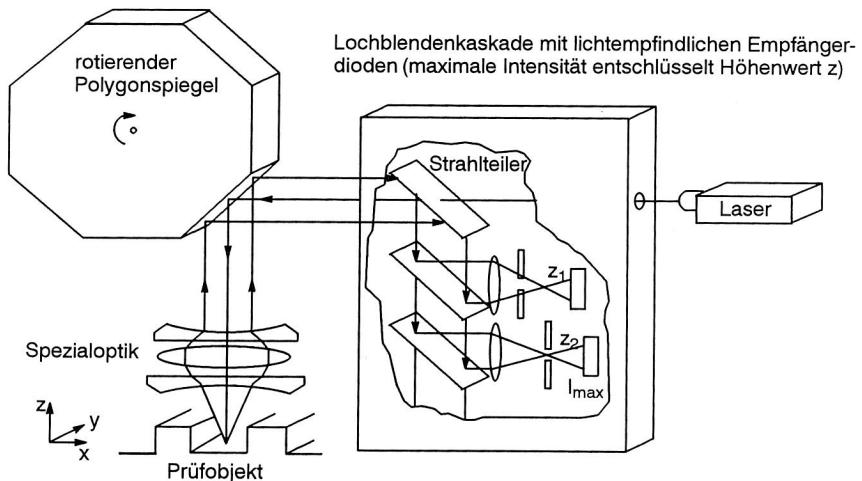


Bild 56: Konfokales Meßprinzip mit Strahlteiler-Lochblendenanordnung zur Ermittlung der Höhenlage des am Prüfobjekt fokussierten Brennflecks

5.1.3 Leistungscharakteristika der Systeme

In Tabelle 2 sind die Leistungscharakteristika der entwickelten Systeme dargestellt. Neben dem Konfokalen 3D-Scanner wurden zwei Varianten von Triangulationsscannern entwickelt, die sich vor allem in der Prüfgeschwindigkeit unterscheiden. Die wesentlichen geometrischen Kriterien sind neben der lateralen Ortsauflösung in x und y sowie in der Höhenachse die Auflösung z und der maximale Meßbereich. Ein weiteres Kriterium ist die sogenannte Scanlänge, d. h. die Länge der Abtastbahn, die ohne Bewegung des Prüfobjektes durch die Ablenkung des Laserstrahles erreicht werden kann. Im Falle des Triangulationsscanners II wird durch eine spezifische Spiegeloptik eine Scanlänge von 290 mm verwirklicht, was zusammen mit einer sehr hohen Meßrate von 7 MHz äußerst hohe Prüfgeschwindigkeiten erlaubt.

TRIOS 3D-Laser- Scanner	Konfokaler 3D–Scanner	Triangulations– scanner I	Triangulations– scanner II
Meßdaten	parallele Erfassung von Höhen– und Grauwertinformation		
laterale Auflösung	5x5µm	40x40µm	25x25µm bis 50x50µm
Auflösung z	5µm	40µm	15...50µm
Meßbereich	1mm	6mm	2,5mm
Scanlänge	3,5mm	48mm	290mm
Meßrate	1MHz	1MHz	0,5...7MHz
max. Board	100x100mm	240x280mm	300x500mm
Geschwin- digkeit	0,8 cm ² /sec	13cm ² /sec	7,5dm ² /min
typische Anwen- dungsfelder	<ul style="list-style-type: none"> • Mikroverdrahtung • Chip-on-board 	<ul style="list-style-type: none"> • Bestückungs- • Lötstellenprüfung 	<ul style="list-style-type: none"> • Leiterplatten- • Lotpastendruck- • Bestückungs- • Lötstellenprüfung

Tabelle 2: Leistungscharakteristika der in TRIOS entwickelten 3D-Laserscansysteme

Auf der Basis der Meßrate und der Ortsauflösung läßt sich die Prüfgeschwindigkeit als vermeßbare Fläche pro Zeiteinheit errechnen. Die maximalen Boardabmessungen werden durch den mechanischen Aufbau der Geräte bestimmt, die mit einer translatorisch verfahrbaren Werkstückaufnahme ausgestattet sind. Die typischen anvisierten Anwendungsfelder des hochauflösenden konfokalen 3D-Laserscanner mit einer Ortsauflösung von 5 µm in x-, y-, und z-Richtung sind Mikroverdrahtungen

für Multi-Chip-Module und Verdrahtungen bei Chip-On-Board-Technologie. Der Triangulationsscanner I dient mit einer Ortsauflösung von $40\text{ }\mu\text{m}$ vor allem zur Bestückungsprüfung und zur Inspektion von wellengelöteten gemischt bestückten Baugruppen, d. h. Baugruppen mit bedrahteten und oberflächenmontierten Bauelementen. Der besondere Vorteil des Triangulationsscanners II liegt in der sehr schnellen Bildaufnahmetechnik, die ihn vor allem für die Inspektion von Leiterplatten, die Prüfung des Lotpastendrucks und für die Bestückungs- und Löstellenprüfung geeignet macht.

5.2 Entwicklung zuverlässiger Klassifikatoren zur 3D-Mustererkennung

Die vorteilhafte Nutzung dreidimensionaler topometrischer Daten zeigt sich in Bild 57 am Beispiel eines verlöteten SMD-Widerstands. Die beiden Darstellungen zeigen einen korrekt gelöteten neben einem Widerstand ohne Lot. Während die mit einer CCD-Kamera aufgenommenen Bilder in einer automatischen Bilderkennung aufgrund von schwankenden Spiegelungsverhältnissen sehr schwierig auszuwerten sind, sind die sehr gut reproduzierbaren 3D-Meßdaten gut geeignet für eine automatisierte und zuverlässige Bildauswertung.

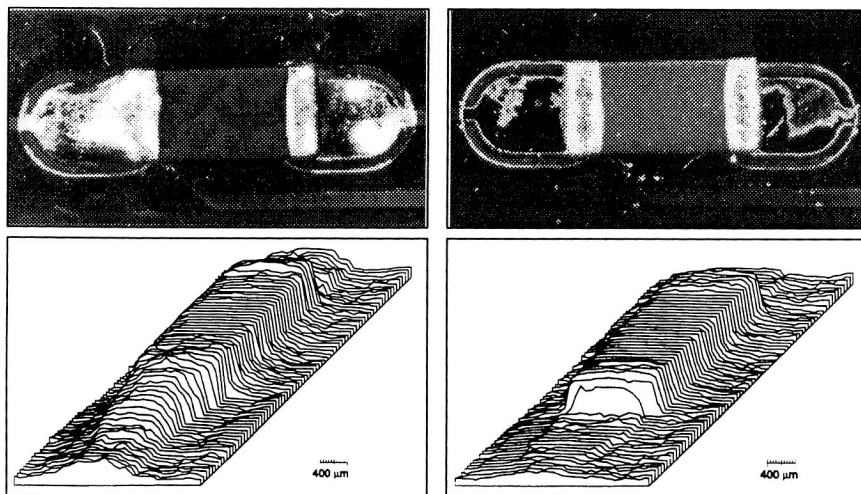


Bild 57: Einsatz der 3D-Laserinspektion für die Lötstellenprüfung, SMD-Widerstand links wellengelötet, rechts kein Lot

5.2.1 Histogrammanalysen

Durch die dreidimensionale Erfassung der Prüfobjekte werden relativ einfache und treffsichere Auswertelgorithmen zur Klassifikation von Fertigungsfehlern möglich. Es wurden daher eine Reihe von Prüfroutinen auf dieser Grundlage erfolgreich realisiert. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz von Histogrammanalysen in ausgewählten Regionen des Prüfobjektes, wie in Bild 58 erläutert. Bei Lötstellen von bedrahteten Bauelementen sind verschiedene Fehlertypen mit herkömmlicher Grauwertbildverarbeitung sehr schwierig zu detektieren. Bei den räumlich mit der 3D-Laserinspektion erfaßten Lötstellen ist schon eine einfache Analyse des Höhenhistogramms hinreichend um die Fehlertypen zu unterscheiden.

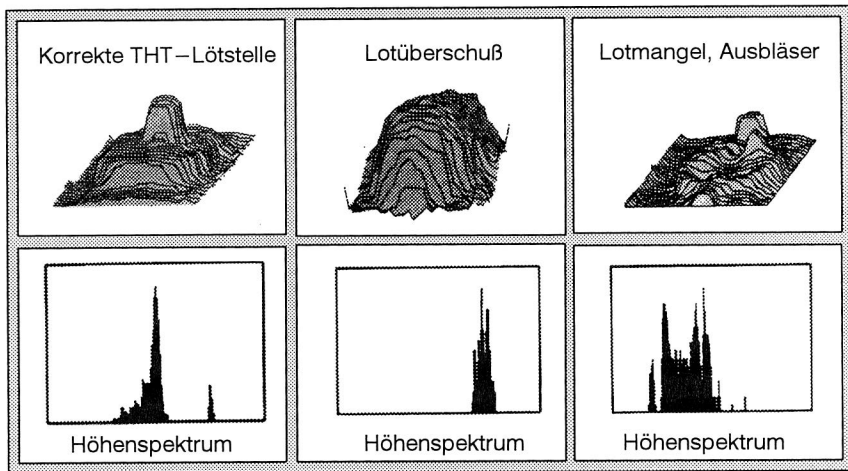


Bild 58: Histogrammanalyse zur Klassifikation von Lötstellen in Durchsteckmontage

5.2.2 Merkmalsextraktion

Um die verschiedenen Prüfaufgaben für die Elektronikbaugruppeninspektion mittels der 3D-Laserinspektion zu beherrschen, wurde eine Algorithmenbibliothek entwickelt, die aufbauend von grundlegenden Basisalgorithmen die Zusammenstellung von bauelementespezifischen Inspektionsalgorithmen erlaubt. Die grundsätzliche Algorithmenstruktur für die Inspektion eines auf die Baugruppe bestückten Bauelementes orientiert sich dabei an der Geometrie des Bauelementes. Ausgehend von den lokalen Koordinaten des Bauelementes werden die Arbeitsfenster für die verschiedenen Basisalgorithmen festgelegt. Bild 59 zeigt exemplarisch die Algorithmen und Arbeitsfenster für einen oberflächenmontierbaren Transistor.

Algorithmen und Arbeitsfenster für den Small Outline Transistor Gehäuseform SOT 23



Nr. Algorithmus

- #1 Querprofil seidl. Lotmeniskus
- #2 Histogramm Pin1
- #3 Lotflanke Zehenspitze
- #4 Lotbrückentest
- #5 Lotflanke Zehenspitze
- #6 Histogramm Pin2
- #7 Querprofil seidl. Lotmeniskus
- #8 Querprofil seidl. Lotmeniskus
- #9 Lotflanke Zehenspitze
- #10 Querprofil seidl. Lotmeniskus

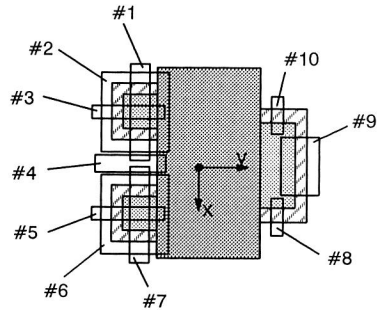


Bild 59: Parametrierung von Basisalgorithmen und Prüfregionen auf der Basis der CAD-Daten der Flachbaugruppen

5.2.3 Algorithmenparametrierung

Entsprechend zu den in 5.2.1 und 5.2.2 beispielhaft erläuterten Prüfalgorithmen wurde eine Algorithmenbibliothek für das Spektrum der oberflächemontierten und bedrahteten Bauelementen erstellt (Bild 60). Für die Erhöhung der Erkennungssicherheit der Prüfalgorithmen werden hierbei zusätzlich lokale Referenzmarken in Form von Paßmarken und Höhenreferenzen berücksichtigt. Auf diese Weise kann auch die Pseudofehlerrate der Prüfsysteme gesenkt werden, da sich Schrumpfun gen oder Verwerfungen der Leiterplattenbasismaterialien nicht negativ auf die Prüfalgorithmen auswirken.

Die in der objektorientierten Algorithmenbibliothek enthaltenen Prüfroutinen müssen daher für eine spezifische Baugruppe zu einem Prüfablauf zusammengestellt und parametrier t werden. Die Prüfobjekte und Prüfaufgaben werden auf Basis der CAD-Daten der Baugruppen parametrier t und in ablauffähige Prüfprogramme für übertragen. Hierfür wurde eine spezifische CAD/CAM-Verfahrenskette für die 3D-Laserinspektion entwickelt, die im nächsten Abschnitt detailliert vorgestellt wird.

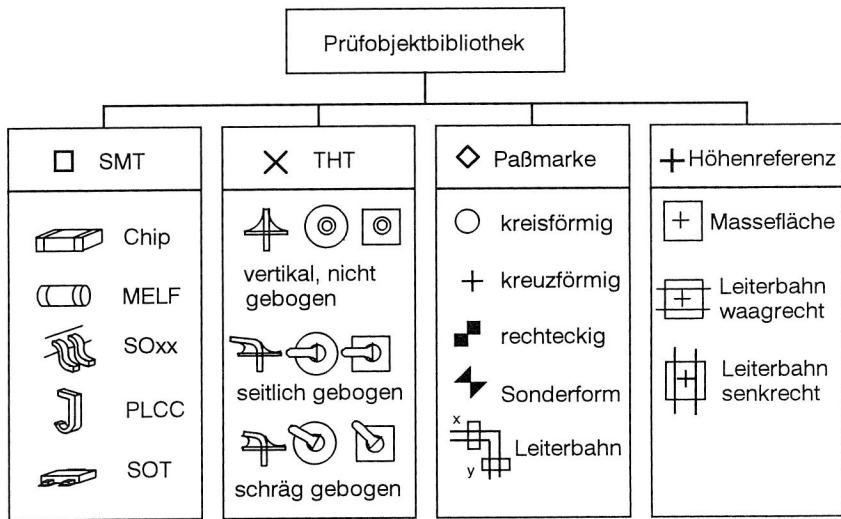


Bild 60: Objektorientierte Algorithmenbibliothek für die 3D-Laserinspektion gemischt bestückter Baugruppen (SMT / THT)

5.3 Entwicklung einer CAD/CAM-Verfahrenskette für die optische Prüfung von Elektronikbaugruppen

In Kapitel 2 wurden die aufwendige Prüfprogrammierung und die zum Teil noch unbefriedigende Prüfsicherheit automatisierter Inspektionssysteme als wesentliche Defizite aufgezeigt, die derzeit noch den Einsatz automatisierter Inspektionssysteme behindern. Ein Bestandteil der vorliegenden Dissertation ist daher die Entwicklung problemspezifischer CAD/CAM-Verfahrensketten für die optische Inspektion von Elektronikbaugruppen. Die Ziele, die mit einer durchgängigen CAD/CAM-Verfahrenskette für diese Anwendung verfolgt werden sind:

- Verbesserung der Prüfsicherheit durch exakte, aus den CAD-Daten abgeleitete Referenzinformationen.
- Schnelle effiziente Prüfprogrammerstellung, um die Systeme auch bei variantenreicher Fertigung und kleinen Stückzahlen einsetzen zu können.

Die Planung des Prüfablaufes sowie die Referenzdaten für die gut/schlecht-Entscheidungen der automatischen Mustererkennung werden direkt aus den CAD-Entwicklungsdaten der Leiterplattenentflechtung abgeleitet. Der Aufwand für die Generierung der ablauffähigen Prüfprogramme wird damit von einem bisher üblichen

Zeitaufwand von mehreren Tagen auf wenige Stunden reduziert, da die Prüfprogramme in direkt ablauffähiger Form generiert werden. Auf diese Weise reduziert sich der manuell durchzuführende Programmieraufwand auf Feinabstimmungen in der Algorithmenparametrierung während der Anlaufphase neuer Baugruppentypen. Die wesentlichen Schritte, die in der hier realisierten CAD/CAM-Verfahrenskette für die Inspektion elektronischer Baugruppen durchgeführt werden, sind in Bild 61 im Überblick dargestellt und werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

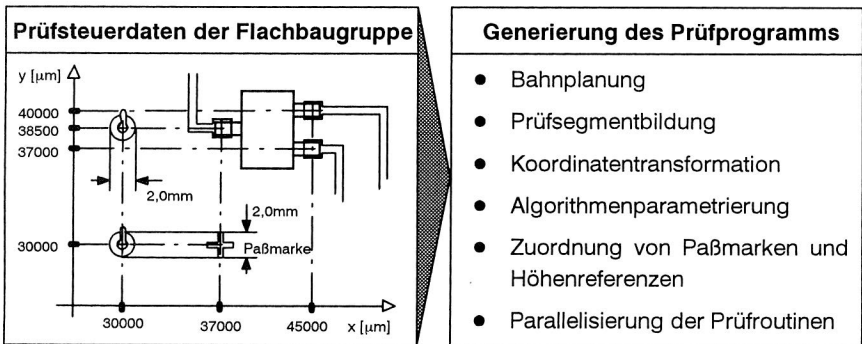


Bild 61: Aufgaben der Prüfprogrammerzeugung auf Basis der CAD-Daten der Flachbaugruppe

5.3.1 CAD-Referenzdaten

Zu Steigerung der Prüfsicherheit werden Höhenreferenzen und optische Paßmarken aus den CAD-Daten extrahiert und als weitere Referenzdaten in die Musterverarbeitung integriert. Der Nutzen der relativ umfassenden Adaption der Algorithmen zur Musterverarbeitung mit lokalen Höhenreferenzen und Paßmarken liegt vor allem in der sichereren Prüfaussage. Der Problematik der Detektion von Pseudofehlern, die durch Schrumpfungen oder Verwerfungen der Leiterplattenbasismaterialien hervorgerufen werden, kann so wirksam entgegnet werden. Bild 62 zeigt beispielhaft eine Zuordnung von Prüfenstern für die Lötstellenprüfung mit Paßmarken und lokalen Höhenreferenzen. Paßmarken stellen eine optische Zentrierhilfe für den Bestückungsvorgang dar und sind bei Bestückautomaten Stand der Technik [49]. Die vorab bekannten Sollpositionen der Paßmarken werden durch ein Bildverarbeitungssystem mit den Istpositionen verglichen, und dadurch werden translatorische und rotatorische Abweichungen der Leiterplatte von ihrer Ideallage ermittelt. Mit den korrigierten Koordinaten können die Analysealgorithmen präzise arbeiten. Analog zu diesen lateralen Toleranzen können auf den Flachbaugruppen auch Höhenschwan-

kungen auftreten, welche beispielsweise infolge der thermischen Belastung während des Lötprozesses entstehen. Um die spezifischen Vorteile der topometrischen 3D-Laserinspektion nutzen zu können, benötigt das Bildverarbeitungssystem deshalb auch noch sogenannte Höhenreferenzen, auf die sich die Analysealgorithmen während der Berechnungen beziehen können. Dafür eignen sich zum Beispiel Leiterbahnstücke in der unmittelbaren Nähe der zu prüfenden Lötstelle. Eine andere Alternative stellen kleine Kupferflächen dar, die entweder von der Baugruppenfunktion schon als Abschirmungs- oder Masseflächen vorhanden sind, oder eigens für diesen Zweck zur prüfgerechten Gestaltung während der Baugruppenentwicklung erzeugt werden. Um die erforderlichen CAD-Referenzdaten aus den verfügbaren CAD-Layoutdaten zu generieren, wurden entsprechende Postprozessoren und ein spezifisches ASCII-Datenübertragungsformat im Rahmen der Arbeit entwickelt und in das Anwendungssystem integriert [115].

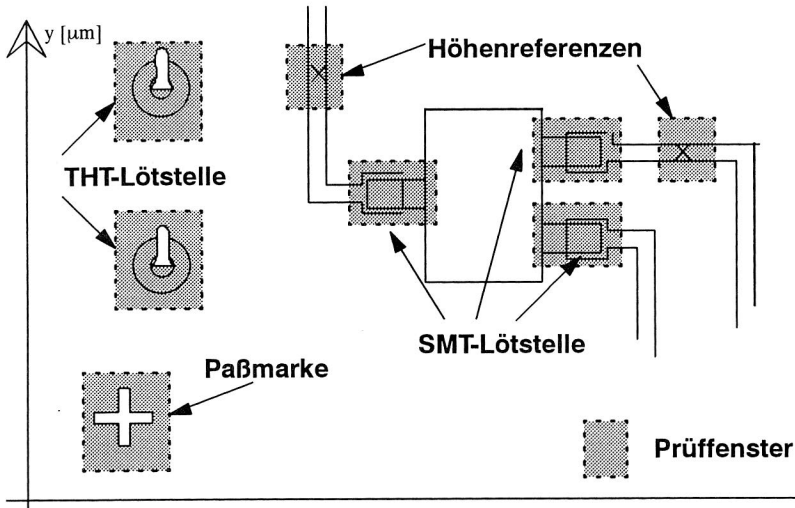


Bild 62: Prüffenster, Paßmarken und Höhenreferenzen für die automatisierte 3D-Laserinspektion, abgeleitet aus den CAD-Daten der Flachbaugruppe

5.3.2 Optimierung der Abtastbahnen und Prüfsegmente

Im hier betrachteten Beispiel einer CAD/CAM-Verfahrenskette für die 3D-Laserinspektion stellt das mäanderförmige Abtasten der Baugruppen den zeitlichen Engpaß für das Erreichen möglichst kurzer Prüfzeiten dar (vgl. Kap. 5.1.3). Die hinreichend schnelle Verarbeitung der anfallenden Sensorinformation wird mit einem modular

erweiterbaren Parallelrechnerkonzept sichergestellt (vgl. Kap 5.3.3). Das heißt, daß die Planung der Abtastbahnen zur sequentiellen Bildaufnahme die wesentliche Optimierungsaufgabe darstellt. Aus den oben erwähnten Prüfsteuerdaten wird daher eine optimierte Sequenz der Abtastbahnen für die Baugruppe ermittelt. Innerhalb der Abtastbahnen werden einzelne Prüfsegmente gebildet, die als inhaltlich abgeschlossenes Arbeitspaket jeweils einem Parallelprozessor des Bildverarbeitungssystems zugewiesen werden. Zu beachten sind dabei folgende Randbedingungen.

- Die mit dem 3D-Laserscanner zu erfassende Fläche soll minimal sein.
- Ein Prüfobjekt soll vollständig in einem Prüfsegment enthalten sein.
- Die Bearbeitungszeit für die einzelnen Prüfsegmente soll in etwa gleich sein.
- Jedem Prüfobjekt sollen Höhereferenzen und Paßmarken zugeordnet sein.

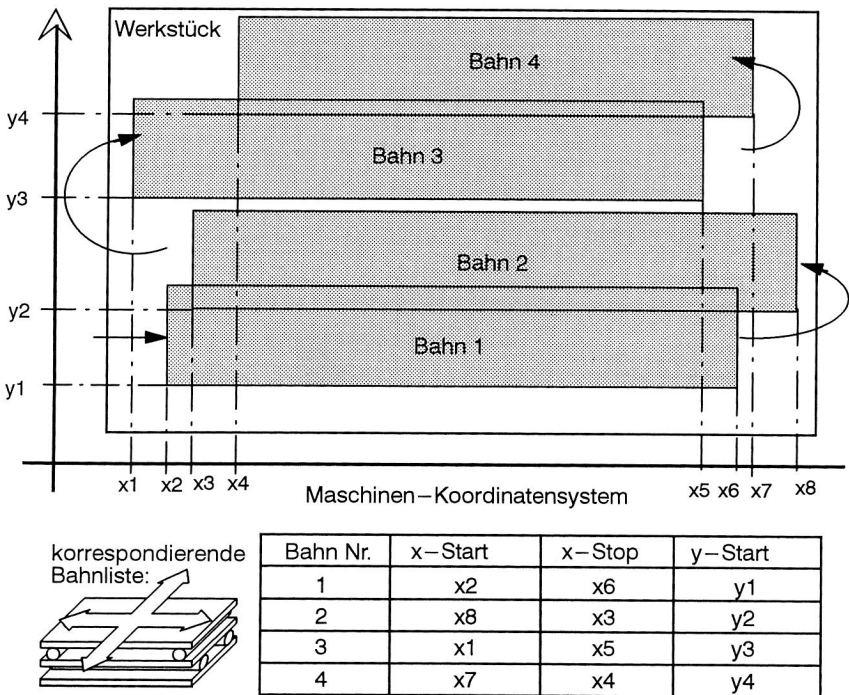


Bild 63: Planung optimaler Abtastbahnen mit minimaler Bahnüberlappung und Fahrwegoptimierung am Bahnende

Im ersten Schritt der Bahnplanung werden die einzelnen Abtastbahnen für den Scanner festgelegt. Der Verlauf der Abtastbahnen wird durch die Lage der Arbeitsrahmen der Prüfobjekte auf dem Werkstück bestimmt. Nachdem möglichst kurze Prüfzeiten angestrebt werden, sollten die Abtastbahnen möglichst kurz sein und trotzdem alle Objekte erfassen. Grundbedingung ist, daß der Arbeitsrahmen eines Prüfobjekts in mindestens einer Abtastbahn komplett vorliegen muß. Bei ungünstigen Objektkonstellationen können sich Bahnen deshalb überlappen. Diese Überlappung sollte jedoch minimal sein, damit nicht unnötig viele Bahnen gefahren werden müssen. An den Bahnenden sind weitere Optimierungen realisierbar. Falls am Ende einer Bahn und am Anfang der darauffolgenden keine Prüfobjekte vorliegen, kann der Abtastvorgang bereits früher gestoppt werden (Bild 63).

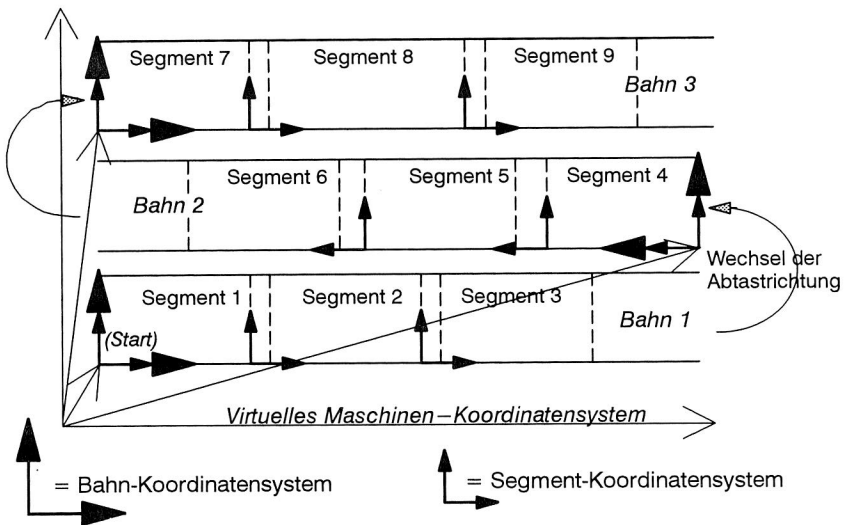


Bild 64: Aufteilung der Abtastbahnen in Prüfsegmente zur parallelen Bildauswertung

Die einzelnen Abtastbahnen werden daraufhin in Prüfsegmente unterteilt. Die Höhe eines Prüfsegments entspricht der Breite der Abtastbahnen. Ein Segment wird also durch seine Startposition innerhalb der Bahn und durch seine Länge charakterisiert (Bild 64). Jedes Segment soll die gleiche Anzahl von Objekten enthalten, damit die Parallelprozessoren der Bildverarbeitung gleichmäßig ausgelastet werden. Eine Ausnahme bilden die Segmente am Bahnende, dort werden auch weniger als die geforderte Zahl von Objekten zugelassen. Genauso wie die Bahnen den Arbeitsrahmen eines Objekts komplett umschließen, müssen auch die Prüfsegmente die

Arbeitsrahmen der Objekte ganz erfassen. Analog sind auch hier wieder Überlappungen erforderlich, um sicherzustellen, daß alle erforderlichen Informationen in einem Prüfsegment an einen Parallelprozessor des Bildverarbeitungssystems weitergereicht werden. Aufgrund der verschiedenen Bestückdichte der Baugruppen können sich somit unterschiedlich große Prüfsegmente ergeben. Innerhalb der Aufbereitung der Prüfalgorithmen werden alle Bezugskoordinaten direkt in das während des Prüfablaufs gültige lokale Koordinatensystem umgerechnet, das sich zum Beispiel beim Wechsel der Abtastrichtung ändert. Darüberhinaus muß jeder Lötstelle genau eine Paßmarke und genau eine Höhenreferenz zugewiesen werden, ohne die der Analysealgorithmus nicht arbeiten kann (Bild 65). Dabei waren die folgenden Gesichtspunkte zu beachten.

- Um Fehler möglichst gering zu halten, sollte diejenige Referenz ausgewählt werden, die den geringsten Abstand zur Lötstelle besitzt.
- Am zeitlichen Ablauf der Bahnen und Segmente innerhalb einer Bahn wird nichts mehr verändert, d.h es darf bei der Zuordnung nur auf Segmente zugegriffen werden, die bereits eingeplant wurden, nicht auf folgende Segmente.
- Die Zuordnung darf nicht flachbaugruppenübergreifend erfolgen, d.h. die Referenzen müssen derselben Flachbaugruppe angehören wie das Prüfobjekt selbst. Da die Flachbaugruppen mechanisch auf der Werkstückaufnahme einzeln montiert sind, bestehen untereinander große Lagetoleranzen sowohl lateral als auch in z-Richtung. Damit werden Referenzen aus anderen Flachbaugruppen unbrauchbar.

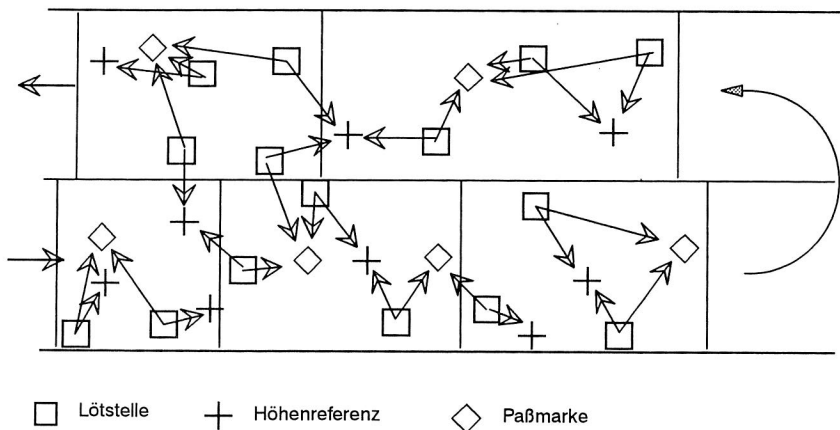


Bild 65: Zuordnung von Höhenreferenzen und Paßmarken zu Lötstellen

5.3.3 Parallele Verarbeitung der Bildsegmente

Um die geforderten schnellen Prüfzeiten durch eine synchrone Verarbeitung der anfallenden Sensordaten zu erreichen, wurde der Ansatz der parallelen Verarbeitung der Bildinformationen gewählt. Die Prüfsegmente werden direkt nach der Erfassung der Sensordaten segmentweise an einen von bis zu acht parallelen Bildverarbeitungsprozessoren gemeinsam mit dem durch die CAD/CAM-Kopplung vorbereiteten direkt ablauffähigen Prüfprogramm weitergereicht. Der Bildprozessor gibt nach der Auswertung des Bildsegmentes lediglich die Prüfergebnisse mit den relevanten Bildausschnitten und ein Fertigstellungssignal an den Systemrechner zurück und kann daraufhin mit einem neuen Prüfsegment versehen werden. Die Fehlerdaten werden auf dem übergeordneten Systemrechner zwischengespeichert und nach Prüfablauf für das Bedienpersonal auf dem Bildschirm dargestellt.

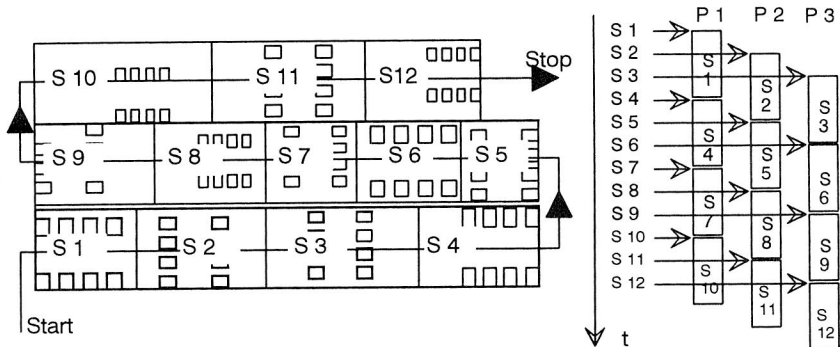


Bild 66: Sequentielles mäanderförmiges Abtasten der Prüfobjekte und Zuweisung der Prüfsegmente an die Parallelprozessoren der Bildverarbeitung

5.4 Systemtests zur 3D-Laserinspektion

Abschließend wurden die entwickelten 3D-Laserinspektionssysteme einem eingehenden Systemtest innerhalb der Baugruppenfertigungen der Partnerunternehmen unterzogen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf dem Test des schnellen Triangulationsscanners II für den Anwendungsfall der Lotpasteninspektion und dem Test des Triangulationsscanners I für den Lötstellentest an gemischt bestückten Elektronikbaugruppen. Für die Beurteilung und Ermittlung der Kennzahlen wurden die in Kap. 4.3 beschriebenen Vorgehensweisen verwendet. Die mit Lotpaste bedruckten Leiterplatten bzw. die wellengelöteten Baugruppen wurden parallel zur

automatisierten Inspektion visuell durch ausgebildetes Prüfpersonal untersucht. In Tabelle 3 sind die wesentlichen Ergebnisse gegenübergestellt. Im Falle der Lotpasteninspektion wurden 500 Baugruppen aus einer Videorecorderproduktion verwendet, die jeweils mit 2.860 schablonengedruckten Lotdepots mit einem Rastermaß von 0,5 mm versehen waren. In der Gesamtheit der ca. 1,5 Millionen inspizierten Lotdepots waren mit 98 Volumenfehlern und 56 Positionsfehlern (vgl. Kap 4.1.2) insgesamt 154 Fertigungsfehler vorhanden. Dies entspricht einer Fehlerrate von 108 defects per million. Mittels visueller Inspektion konnten ca. 75% aller Fertigungsfehler erkannt werden, während die 3D-Laserinspektion die Erkennungssicherheit auf über 97% steigern konnte. Aufgrund des geringeren Fehlerschlupfes von 2,6 % gegenüber 24,7 % bei der visuellen Prüfung konnte der Anteil der Baugruppen, die fehlerfrei an den nächsten Prozeßschritt weitergegeben wurden von 92 % auf 98 % gesteigert werden. Die Quote der Fehlalarme war mit 6,4 ppm sehr gut. Für den Anwendungsfall der Lötstelleninspektion wurden 60 Baugruppen mit insgesamt 170 Lötfehlern aus der Fertigung entnommen. Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit wurde der Prüfablauf für jede Baugruppe mit 10 Wiederholungen durchgeführt. Hierbei wurde eine Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse mit 99,8% ermittelt. Da hier keine direkter Vergleich mit einer visuellen Inspektion unter Serienbedingungen durchgeführt wurde, sind die ermittelten Werte für Fehlerschlupf und Erkennungssicherheit den Erfahrungswerten des Anwenders gegenübergestellt.

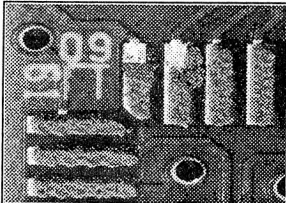
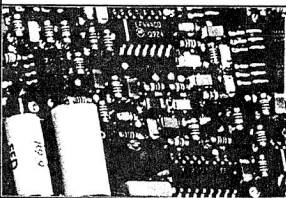
	Inspektion des Lotpastendrucks 500 Baugruppen aus realer Fertigung, 225 x 140 mm 0,5 mm Rastermaß, 2.860 Lotdepots/Baugruppe Stichprobengesamtheit 1.430.000 Prüfobjekte 154 Defekte (98 Volumenfehler, 56 Positionsfehler)			
	3D-Laserinspektion		Visuelle Inspektion	
Fehlerschlupf	4 Fehler	2,6 %	38 Fehler	24,7 %
Erkennungssicherheit	150 Fehler	97,4%	116 Fehler	75,3 %
Pseudofehlerrate	9 Fehlalarme	6,4 ppm		./.
	Lötstelleninspektion 60 Baugruppen gemischt bestückt, 170 Lötfehler 10 Wiederholungen, 1700 Prüfobjekte			
	3D-Laserinspektion		Visuelle Inspektion	
Fehlerschlupf	4 Fehler	3,7 %		15 %
Erkennungssicherheit	150 Fehler	96,3 %		85 %
Pseudofehlerrate	9 Fehlalarme	0,5 %		./.
Reproduzierbarkeit		99,8 %		./.

Tabelle 3: Evaluierung der 3D-Laserinspektionssysteme mit Systemtests

6 Entwicklung eines flexiblen Prüfzellenkonzepts auf Basis der Röntgeninspektion

In den vorherigen Kapiteln 4 und 5 wurden Entwicklungen für die Integration automatisierter Inspektionssysteme in die Elektronikproduktion vorgestellt. Die dabei dargestellten Arbeiten zielen auf die direkte Integration der automatisierten Inspektion in die Fertigungslinie. Bei der Anwendung des in Kapitel 3 vorgestellten Modells zur prozeßintegrierten Qualitätssicherung in der Elektronik (s. a. Kapitel 8) zeigt sich jedoch auch ein großes Potential für eine lediglich fertigungsnahe Integration geeigneter Prozeß- und Prüfmonitore, um eine systematische Qualitätssteigerung zu unterstützen. Der aktuelle Stand der Technik ist geprägt von einerseits hochautomatisierten Speziaisystemen für die Inline-Anwendung und andererseits universellen Offline-Laborprüfsystemen, die jedoch nicht ausreichend für einen fertigungsnahen Einsatz geeignet sind. Um diesem Defizit entgegenzuwirken und den zukünftigen Anforderungen an derartige kapitalintensive Prüfanlagen gerecht zu werden, wird in diesem Kapitel ein flexibles Prüfzellenkonzept vorgeschlagen, das die verschiedenen Ansätze für Laboruntersuchungen, teilautomatisierte sowie vollautomatisierte Prüfsysteme miteinander vereint. Bild 67 zeigt exemplarisch die fertigungsnahe Anbindung einer Röntgenprüfzelle an die Prozeßkette der Elektronikproduktion. Entscheidend ist hierbei eine räumliche, organisatorische und datentechnische Anbindung an die Produktion, um z. B. mittels Stichproben die Fertigung überwachen und Rückkopplungen an das Fertigungsgeschehen zu ermöglichen.

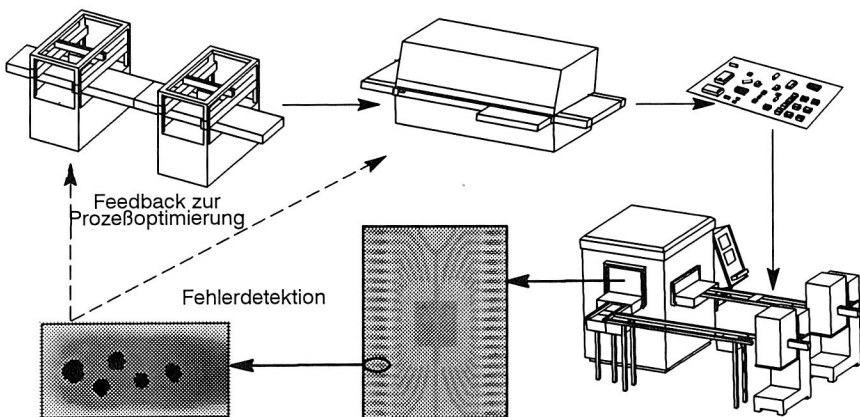


Bild 67: Fertigungsnahe Einbindung einer Röntgeninspektionszelle in die Elektronikbaugruppenproduktion zur Prozeßüberwachung und -optimierung

6.1 Anforderungen an ein flexibles Prüfzellenkonzept

Die konsequente Ausrichtung auf robuste Fertigungsprozesse impliziert einen weitgehenden Verzicht auf alle Prüfschritte, die nicht zur Überwachung und Führung der Fertigungsschritte erforderlich sind. Der Schwerpunkt beim Einsatz von Prüfsystemen verlagert sich damit auf die Einführung neuer Produktvarianten und Fertigungstechnologien. Beispiele für die Umstellung auf neue Fertigungsprozesse sind der Übergang zum Schutzgaslöten oder die Einführung neuer Gehäusetechnologien, alternativer Materialien etc. Hier muß der erfolgreiche Übergang zu den neuen Verfahren durch intensive Beobachtung der Fertigungsqualität bis zum endgültigen Nachweis der Prozeßfähigkeit sichergestellt werden.

6.1.1 Anforderungsanalyse für verschiedene Einsatzfälle flexibler Prüfsysteme

Der Laborbetrieb von Röntgenmikroskopen ist in der Elektronikfertigung bei der Bauelementeproduktion zur Überprüfung von Bonddrähten nach dem Spritzguß der Gehäuseumhüllung sowie in der Fertigung von Multilayerleiterplatten bekannt [116]. Die Funktionalität der eingesetzten Systeme beschränkt sich hierbei jedoch auf den interaktiven Betrieb, indem die Prüffentscheidungen durch das Bedienpersonal getroffen werden. Ein kritischer Engpaß in der Automatisierung stellt die Entwicklung leistungsfähiger Bildverarbeitungssysteme für Röntgenbilder dar. Optional werden hierfür von den Geräteherstellern einfache Mechanismen der Bildverarbeitung, z. B. zur Kontrastverbesserung oder zur Unterdrückung des Bildrauschens durch Integration oder Mittelung von mehreren Bildinhalten angeboten. Aufgrund der Komplexität der automatischen Bildauswertung konzentrieren sich bisherige Automatisierungsansätze auf dedizierte Spezialexsysteme, die in der Regel mit einem hohen Investitionsaufwand verbunden sind.

Im Hinblick auf eine möglichst flexible Automatisierung unterschiedlicher Inspektionsaufgaben ist ein möglichst universell einsetzbares System erforderlich. Die Flexibilität bezieht sich damit auf verschiedenen Prüfaufgaben, Produktspektren und Einsatzarten. Für den effizienten Einsatz während einer Technologieeinführungsphase ist vor allem eine leichte Bedienbarkeit und gute Dokumentationsmöglichkeiten der Prüfergebnisse wesentlich. Weiterhin besteht, wie bereits in Kapitel 4 aufgezeigt wurde, ein breitgefächertes Einsatzfeld der Röntgeninspektion für alle Fragen zur Prozeßqualifizierung der Verbindungstechniken auf der Basis von Lotlegierungen, da sehr gute Kontrastverhältnisse im Röntgenbild sowie eine materialspezifisch-volumetrische Analyse der Verbindungen ermöglicht werden.

6.1.2 Konkretisierung der Anforderungen am Beispiel der Einführung neuer Gehäuse- und Verbindungstechniken (BGA)

Ein besonderes Beispiel ist die Einführung der Ball-Grid-Array-Technologie und deren Prozeßqualifizierung mittels Röntgentechnologie [117]. Die Besonderheit bei dieser Gehäuse- und Verbindungstechnologie ist die flächige Anordnung der Verbindungen unterhalb der Grundfläche der Bauelemente. Auf diese Weise lassen sich hohe Anschlußzahlen auch bei grobem Rastermaß der Verbindungen realisieren.

Der Nachteil bei der Einführung dieser BGA-Verbindungstechnik ist, daß die Verbindungen im gelöteten Zustand visuell nicht mehr zugänglich sind, da sie unterhalb der kontaktierten Bauelemente verborgen sind. Eine zerstörungsfreie Analyse der Verbindungen ist daher nur mittels der Materie durchdringenden Verfahren wie Röntgen- oder Ultraschallanalyse möglich. Alternativ hierzu wird auch zu Untersuchungen mittels Infrarotanalyse berichtet, die Experimente befinden sich hier jedoch noch im Versuchsstadium [105]. Für den problemlosen Einsatz unter Fertigungsbedingungen sind Röntgenverfahren prädestiniert, da keine flüssigen Kopplungsmedien wie bei Ultraschall oder aufwendige Versuchsanlagen zur Infrarotthermographie benötigt werden. Im folgenden wird am Beispiel der Einführungsphase der Ball Grid Array Technologie ein Konzept für eine flexible Röntgeninspektionszelle vorgeschlagen, das die Anforderungen der verschiedenen Anwendungen und Einsatzforderungen durch verschiedene Bedienmodi in einem System vereint.

Grundsätzlich sind bei der Röntgenprüfung von BGA-Kontaktierungen verschiedene Einsatzmotivationen und daraus resultierende Systemanforderungen zu unterscheiden. Zunächst ist bei der Technologieeinführung von BGA-Gehäusen bis zur Produktionsreife eine Qualifizierung der verwendeten Materialien und Bauelemente des Baugruppenlayouts sowie der Fertigungsprozesse erforderlich. Hier bietet die Röntgeninspektion eine komfortable zerstörungsfreie Prüfmöglichkeit an. In diesem Anwendungsfall der Röntgeninspektion stehen neben hohen Vergrößerungsmöglichkeiten und guter Bildqualität vor allem die flexiblen Einsatzmöglichkeiten und eine komfortable Bedienoberfläche mit guten Analyse- und Dokumentationshilfen im Vordergrund. Auch nach abgeschlossener Technologieeinführung kann die Serienproduktion auf diese Weise anhand von Stichprobenprüfungen überwacht werden.

Der Einsatz der Röntgeninspektion im Serienbetrieb einer Baugruppenproduktion mit BGA-Technologie eröffnet neben der Erfüllung der geforderten Prüfaufgabe an der BGA-Verbindung, die Möglichkeit auch andere Lötstellentypen zu erfassen sowie mit Hilfe der Röntgeninspektion einen Prozeßmonitor für verschiedene Regelkreise zur Prozeßoptimierung in der Baugruppenfertigung aufzubauen. Ein Beispiel ist die auch für den BGA-Prozeß sehr wichtige Kontrolle des Lotpastendrucks, der sich ebenfalls vorteilhaft mittels Röntgeninspektion überwachen läßt,

6.2 Systemkonzept und Steuerungsarchitektur einer flexiblen Röntgenprüfzelle

Aufgrund der immer schnelleren Produktlebenszyklen und der entsprechend raschen Entwicklung der Baugruppentechologien gewinnt das Prinzip einer flexiblen Prüfzelle an Bedeutung. Die kurzen Produktlebenszyklen erfordern einen besonderen Schwerpunkt in einer raschen und zuverlässigen Technologieeinführungsphase. Produkt- und Prozeßtechnologien müssen sehr schnell zur Serienreife qualifiziert werden können, d. h. hier steht die Anwendung der Sichtprüfautomaten zur Prozeßanalyse im Vordergrund, während Aufgaben der Qualitätsprüfung der Baugruppen an Bedeutung verlieren. Das hier vorgeschlagene Konzept erlaubt eine fertigungsnahe Analyse der Prozesse und unterstützt dabei insbesondere eine leichte interaktive Handhabung des Prüfsystems. Auf diese Weise fallen bei neuen Technologien zunächst keine Programmierzeiten für die Erstellung von Prüfprogrammen an. Im zweiten Schritt lassen sich aus den interaktiven Analysefunktionen Prüfroutinen in Form von Makroprozeduren zusammenstellen, um den Prüfablauf zu automatisieren. In einem dritten Schritt werden häufig wiederkehrende Prüfaufgaben mit spezifischen Prüfprogrammen unterstützt. Um die vielseitigen Einsatzfälle der Röntgeninspektion in der Elektronik systemtechnisch zu unterstützen, wurde daher basierend auf den unterschiedlichen Anforderungen ein Konzept für die flexibel automatisierte Inspektion auf der Basis der Röntgenanalyse entwickelt (Bild 68) [118].

Flexible Röntgenprüfzelle **IQX**

- ☐ Arbeitsraum 500 x 500 mm²
- ☐ 5-Achsen Werkstückmanipulation
- ☐ Variable Vergrößerungsverhältnisse
- ☐ Komfortabler interaktiver Betrieb
- ☐ Inline-Einsatz im Automatik-Modus
- ☐ Algorithmen zur BGA-Inspektion
- ☐ CAD-Kopplung
- ☐ Reparaturplatzanbindung, CAQ-System

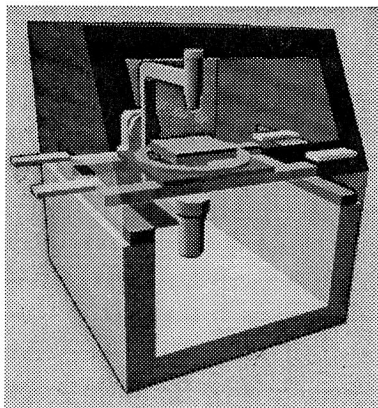


Bild 68: Charakteristika der flexibel automatisierten Röntgenprüfzelle IQX

6.2.1 Einbindung in den Materialfluß

Systemuntersuchungen an marktverfügbaren Prüfsystemen haben bei der Mehrzahl der untersuchten Systeme Restriktionen bezüglich der möglichen Integration der Prüfsysteme in den Fertigungsfluß ergeben. Anwenderseitig sollten verschiedene Durchlaufrichtungen sowie alternativ auch eine einseitige Beschickung der Systeme gewährleistet werden. Die erforderlichen Anpaßarbeiten durch entsprechende Leiterplattentransportsysteme stellen in der Regel einen unerwünschten Zusatzaufwand bei der Einführung der Systeme dar. Weiterhin sollten die Systeme auch bei einem geänderten Layout der Fertigungslinien ohne Anpaßarbeiten einsetzbar sein. Bei der Konzeption der flexiblen Röntgenprüfzelle wurde daher in Zusammenarbeit mit einem Systemhersteller großer Wert auf die Flexibilität des Leiterplattentransports gelegt. Es werden durch rein steuerungstechnische Programmänderungen verschiedene Durchlaufrichtungen sowie die einseitige Beschickung unterstützt. Der Transport der Leiterplatten oder Werkstückträger erfolgt auf handelsüblichen Doppelgurtbändern und entspricht den einschlägigen Standards in Leiterplattenhandhabung und Transport. Um unterschiedliche Leiterplatten und Nutzenformate prüfen zu können, ist eine automatische Breitenverstellung des Transportbands zwischen 50 und 460 mm vorgesehen. Alternativ zu einer direkten Integration des Prüfsystems in die Fertigungslinie kann die Beschickung auch mit handelsüblichen Leiterplattenkassetten erfolgen (Bild 69). Um Analysen an komplexen Teilen zu ermöglichen, können Werkstücke von Hand bei geöffneter Fontür in den Werkstückmanipulator eingelegt bzw. entnommen werden.

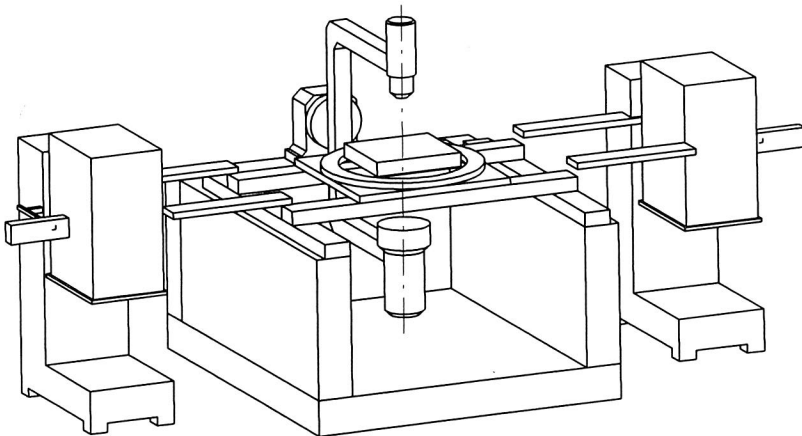


Bild 69: Materialflußkonzept der automatisierten flexiblen Röntgenprüfzelle IQX (Strahlenschutzgehäuse nicht dargestellt)

6.2.2 Kinematischer Aufbau für wahlfreie Prüfaufgaben

Insbesondere in der Phase der Einführung und Qualifizierung neuer Technologien ist eine Voraussage der geforderten kinematischen Freiheitsgrade für die Durchstrahlung der Prüfobjekte nur sehr schwer möglich. Im vorliegenden Anwendungsfall der Qualifizierung der BGA-Technologie hat sich die Möglichkeit einer wahlfreien Schrägdurchstrahlung als wesentlich erwiesen [94]. Diese Anforderung ergibt sich aus den Eigenschaften hochschmelzender BGA-Kontaktierungen, die aufgrund des hohen Bleianteils (Pb90Sn10) in der Verbindung nur mit sehr hoher Röntgenintensität vertikal durchstrahlt werden können. Dies ist mit den heute verfügbaren hochauflösenden Mikrofokus-Röntgenröhren (160 ... 200 kV Beschleunigungsspannung) nur schwer zu bewerkstelligen. Die Schrägdurchstrahlung ist für die Betrachtung der Lotmenisken der Verbindungen erforderlich. Aus einer systematischen Analyse verschiedener Lösungsmöglichkeiten wurde die in Bild 70 dargestellte Kinematik als Kombination von Leiterplattenmanipulator und Röntgenröhren-Bildverstärker ausgewählt. Die Leiterplatte kann in der Ebene des Leiterplattentransport mit zwei translatorischen Achsen (x, y) sowie einer rotatorischen Bewegungseinheit (α) manipuliert werden. Ergänzend können wahlfreie Vertikal- und Schrägdurchstrahlungen durch den Schwenkarm der Röntgenröhren-Bildverstärker-Kombination erzielt werden (β). Um zudem verschiedene Vergrößerungsverhältnisse erzielen zu können, sind sowohl Röhre wie Bildverstärker mit einer translatorischen Achse manipulierbar (z_1, z_2).

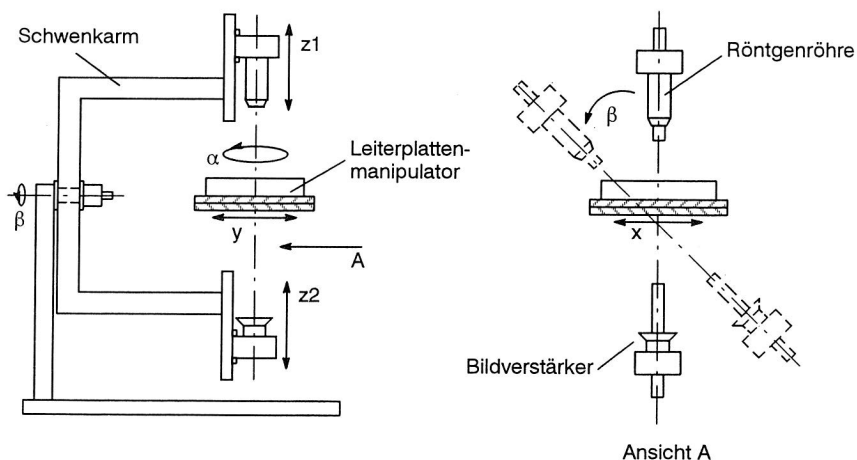


Bild 70: Kinematische Freiheitsgrade der Manipulatorachsen für die Werkstückhandhabung und die Röntgenröhren / Bildverstärkereinheit

Der zugrundeliegende kinematische Aufbau erlaubt so die universelle Prüfung bleibiger Werkstücke mit Maximalabmessungen von 500 x 460 mm, wobei eine Schrägdurchstrahlung von maximal 45° an allen Prüforten aus allen Raumlagen möglich ist. In herkömmlichen Röntgenmikroskopen wird eine Schrägdurchstrahlung in der Regel durch ein einseitiges Verfahren des Bildverstärkers oder der Röntgenröhre realisiert [vgl. 119]. Die dabei auftretenden geometrischen Verzerrungen sowie die sich ergebenden Änderungen in der Strahlungscharakteristik sind jedoch nur für die visuelle Betrachtung zu vernachlässigen, bei der hier angestrebten automatisierten Bildauswertung kann so jedoch keine zuverlässige Prüfaussage gewährleistet werden. Die hier gewählte koaxiale Anordnung von Röntgenröhre und Bildverstärker bietet demgegenüber den Vorteil, daß in allen Raumlagen konstante Verhältnisse in der Strahlungscharakteristik vorherrschen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die mit dem Konzept der flexiblen Prüfzelle verfolgte Automatisierbarkeit der Prüfaufgaben. Für die automatisierte Bildauswertung sind reproduzierbare Strahlungsverhältnisse unerlässlich. Eine Möglichkeit, den in jedem Falle auftretenden charakteristischen Intensitätsabfall im äußeren Bereich des Mikrofocus-Strahlungskegels zu berücksichtigen ist die Subtraktion eines Hintergrundbildes von den gewählten Bildinhalten. (Bild 72).

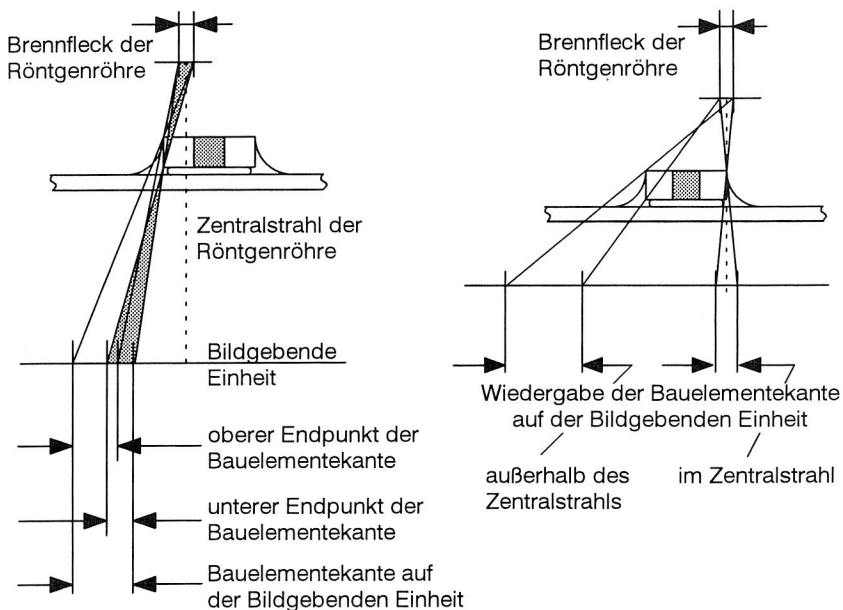
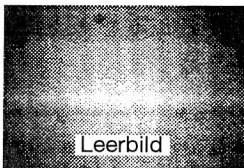
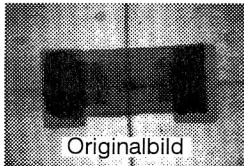
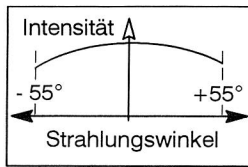
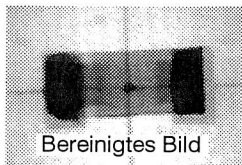


Bild 71: Einfluß der Brennfleckgeometrie auf die Bildqualität und geometrische Verzerrung außerhalb des Zentralstrahls bei der Mikrofocus-Röntgentechnik



=



Aufriß der Strahlungsgeometrie und Maßnahmen zum Ausgleich des Intensitätsabfalls im Strahlungskegel

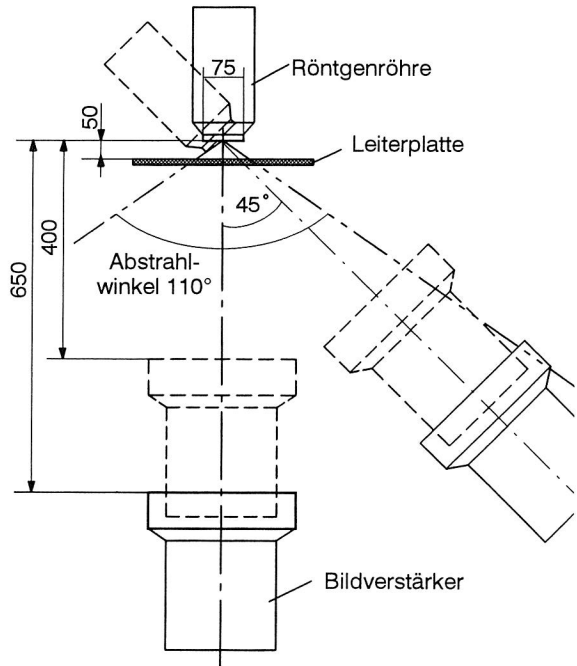


Bild 72: Prinzipskizze zur Analyse der Schrägdurchstrahlung mit coaxialer Röntgenröhren - Bildverstärkeranordnung

Der Grundaufbau des Systems erfolgt in massiver Granitblockausführung, um eine schwingungsarme und genaue Werkstückmanipulation zu ermöglichen. Bild 73 zeigt eine als CAD-Modell angefertigte Prinzipdarstellung der flexiblen Prüfzelle. Der zugrundeliegende kinematische Aufbau erlaubt die universelle Prüfung beliebiger Werkstücke mit Maximalabmessungen von 500 mm x 460 mm wobei eine Schrägdurchstrahlung von maximal 45° an allen Prüforten aus allen Raumlagen möglich ist. Letzteres erfolgt durch die Leiterplattendrehereinheit, die 360° Drehungen der Leiterplatte in der Transportebene ermöglicht. Um die kinematischen Freiheitsgrade des entwickelten flexiblen Prüfsystems noch vor dem mechanischen Aufbau des Gesamtsystems überprüfen zu können wurden die verschiedenen Einsatzfälle in einem volumetrischen 3D-CAD-Modell simuliert. Bild 73 zeigt eine ausgewählte Ansicht, die eine Schrägdurchstrahlung am Rand des Prüfobjektes simuliert.

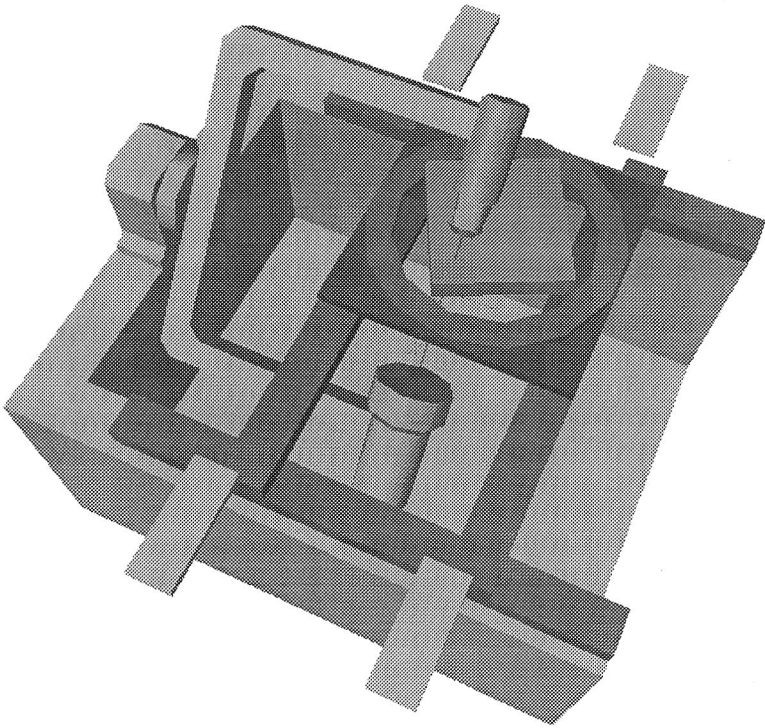


Bild 73: Kinematische Offline-Simulation der wahlfreien Schrägdurchstrahlung

6.2.3 Modulares Steuerungskonzept

Die Steuerungsarchitektur der flexiblen Prüfzelle ist in Bild 74 dargestellt. Es sind drei unabhängige Steuerungsrechner für den CNC-Manipulatorbetrieb, die Bildverarbeitung und die Röntgensteuerung vorgesehen. Die Koordinierung des Gesamtsystems wird durch den Bildverarbeitungsrechner durchgeführt, da dies die Möglichkeit schafft auf einfache Weise flexible Prüfabläufe zu generieren, die von den Prüfergebnissen der Bildverarbeitung gesteuert werden. Die Kommunikation zwischen den Steuerungseinheiten geschieht durch zyklisches Abfragen von Statusmeldungen, die im Bildverarbeitungsrechner zusammengeführt werden. Bleiben Rückmeldungen durch den Bildverarbeitungsrechner aus oder werden Verriegelungsmechanismen ausgelöst, so schaltet das System ab.

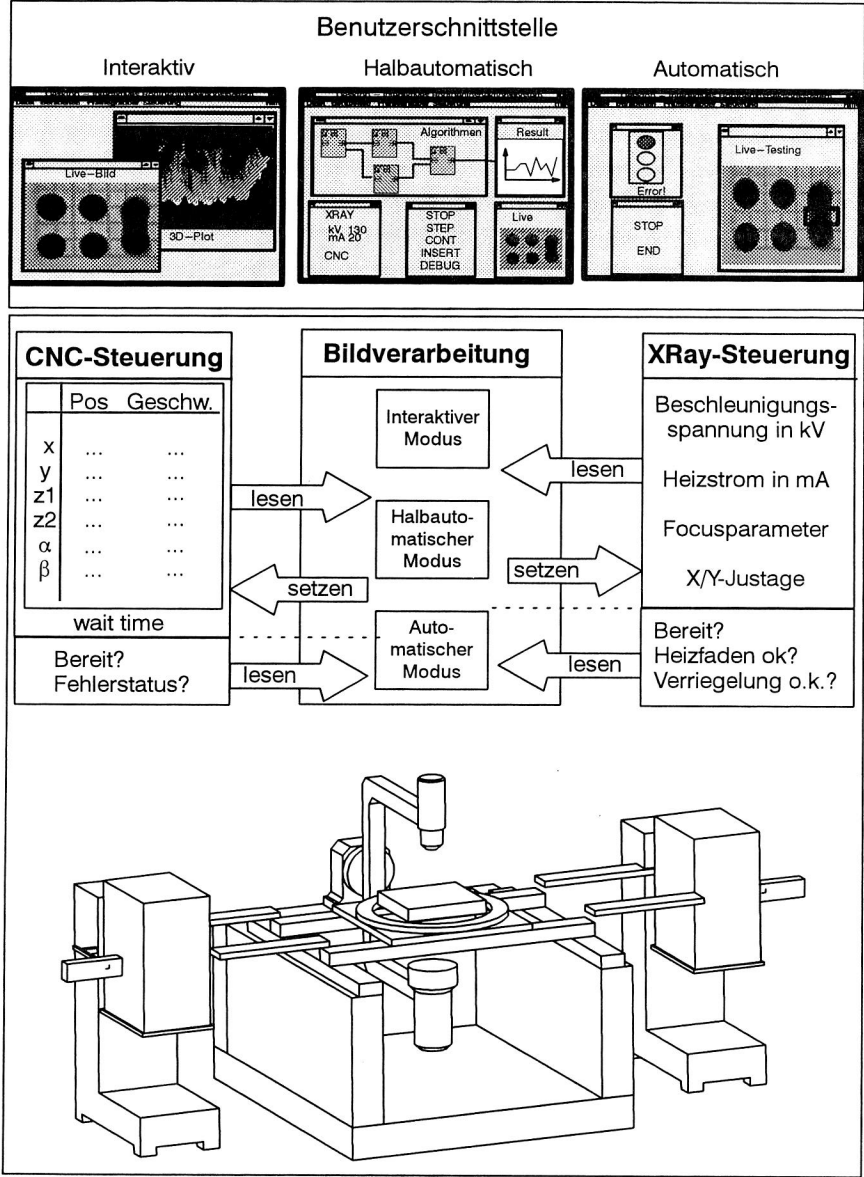


Bild 74: Bedienmodi und Steuerungsstruktur der flexiblen Röntgenprüfzelle

6.3 Flexible Benutzerschnittstelle für verschiedene Betriebsarten

Mit der hier vorgeschlagenen flexiblen Röntgenprüfzelle steht ein universelles Mikrofokus-Röntgenprüfsystem für die Leiterplattenbaugruppenproduktion zur Verfügung, die sich wahlweise im automatischen, halbautomatischen und interaktiven Betriebsmodus betreiben läßt. Damit werden die Vorteile der schnellen automatisierten Durchführung von Prüfaufgaben in der Serienfertigung elektronischer Baugruppen mit den Vorteilen einer problemlosen Nutzung der Mikrofokusröntgentechnologie für allgemeine Prozeßuntersuchungen und zerstörungsfreie Werkstoffprüfung verknüpft.

Kernstück des Systemkonzepts ist die konsequente Gestaltung einer leistungsfähigen Systemarchitektur in Verbindung mit einer für den Anwender leicht zu erlernenden interaktiven Bedienoberfläche. Um eine ergonomische Gestaltung der Benutzerschnittstellen des Inspektionsgerätes zu gewährleisten, sind alle Bedieneingaben in einer graphisch-interaktiven Weise realisiert. Die Betriebsarten für den manuellen Teilautomatischen und vollautomatischen Betrieb werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Um eine effiziente Programmierung von Prüfabläufen zu unterstützen, besteht zudem die Möglichkeit der Programmerstellung über eine CAD-Schnittstelle. Hierbei wird auf die Bestück- und Nutzendaten der zu prüfenden Baugruppe zurückgegriffen. Darauf aufbauend wird eine automatische Planung der Kamerafenster und der in den Kamerafenstern enthaltenen Prüfregionen durchgeführt. Innerhalb der Prüfregionen können bestehende Prüffensteranordnungen und Prüfalgorithmen zugewiesen werden. Hierbei kann analog zu der bereits in Kapitel 5 beschriebenen objektorientierten Algorithmenbibliothek der Anwender aus grundlegenden Basisalgorithmen komplexe Prüfroutinen selbständig erstellen.

6.3.1 Manueller Prüfmodus

Im interaktiven Betriebsmodus kann der Bediener die Parameter zur Ansteuerung der Röntgenwerte, sowie die Werkstückmanipulation direkt vorgeben und das Gerät als Röntgenmikroskop betreiben. Hierbei stehen ihm vielfältige Möglichkeiten der Bildverbesserung und Bildauswertung zur Verfügung (Bild 75). Beispiele sind speziell auf die Röntgenbildverarbeitung zugeschnittene Meßfunktionen und Algorithmen für die Kontrastanhebung, Kontursuche, Pseudo-3D-Darstellung, Falschfarbenmanipulationen und verschiedene Schwellwertoperationen.

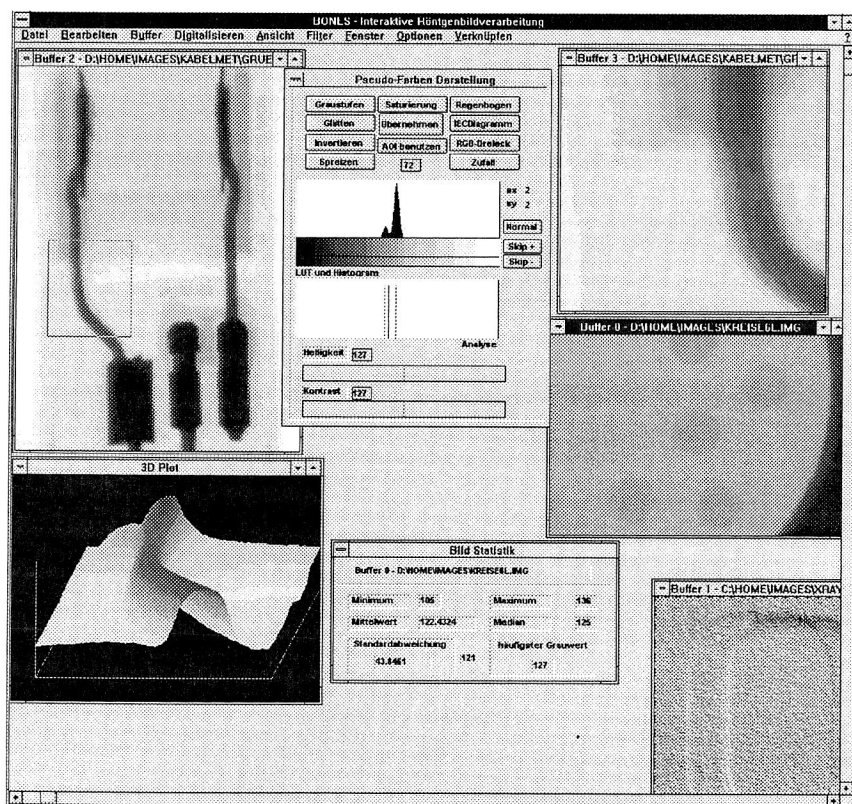


Bild 75: Unterstützung des Anwenders mit komfortablen Meß- und Analysefunktionen für den interaktiven Betrieb des Röntgenmikroskops

6.3.2 Halbautomatischer Betrieb

Zur Gestaltung von Prüfabläufen sowie zur Entwicklung von Prüfalgorithmen für den automatischen Betriebsmodus kann der Bediener Sequenzen von Bildaufnahmen sowie Sequenzen von Bildauswerteroutinen zu Auswertemakros und Prüfprogrammen zusammenstellen. Diese Vorgehensweise erlaubt einen anschließenden teilautomatisierten Betrieb der Anlage, die für eine spezifische Baugruppe automatisch Prüfpositionen anfährt und Bildauswerteroutinen ausführt und die Prüfergebnisse an der Benutzerschnittstelle oder als Datei zur Verfügung stellt.

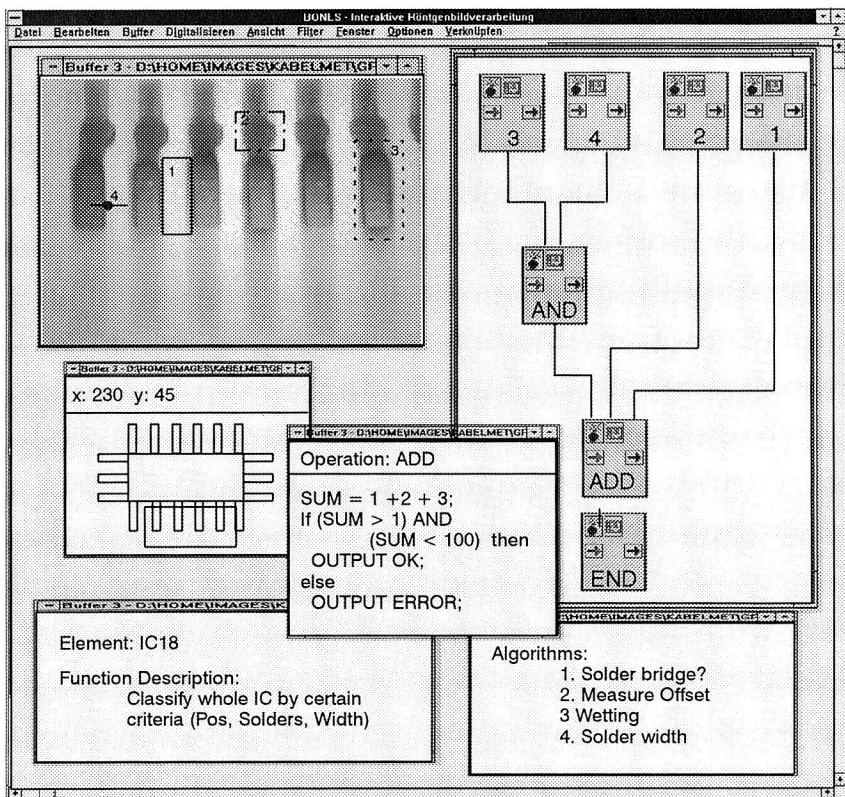


Bild 76: Verknüpfung von Bedien- und Analyseabläufen zu semiautomatischen Prüf- makros (Prototypische Bildschirmmasken der Entwicklungsumgebung)

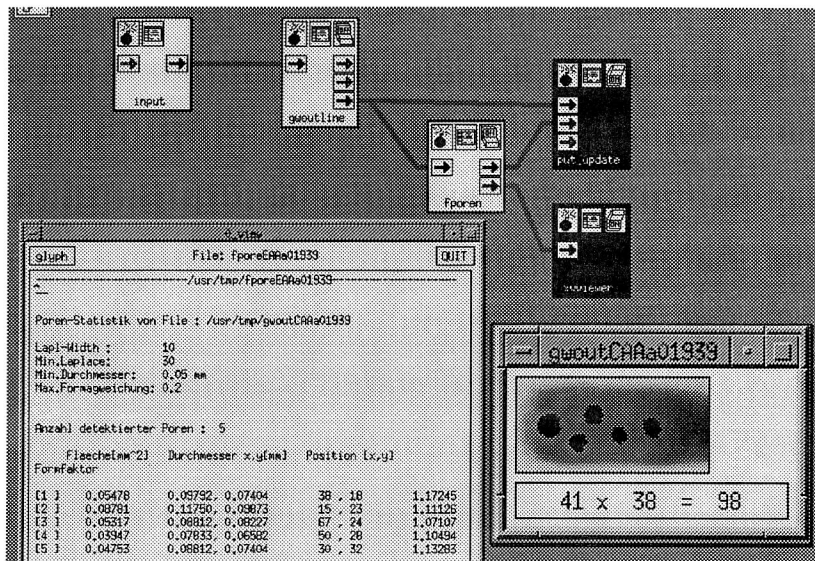


Bild 77: Bildschirmabzug der modularen Entwicklungsumgebung zur Konfiguration und Parametrierung von Auswertalgorithmen zur Lötstellenanalyse

6.3.3 Automatikmodus

Für den Einsatz in Serienanwendungen wird auf den vollautomatischen Betriebsmodus zurückgegriffen. Hierbei werden der komplette Prüfablauf, die Werkstückhandhabung, die Vorgabe von Röntgenwerten, Prüfpositionen, automatische Bildauswerterroutinen und Ausgabe von Fehlerprotokollen auf einem Protokolldrucker bzw. deren Übertragung in ein Qualitätsdatenerfassungssystem unterstützt. In Bild 78 ist die Merkmalsextraktion am Beispiel einer Algorithmenkaskade zur automatischen röntgenographischen Lötstelleninspektion dargestellt. Zunächst wird geprüft, ob das Bauteil korrekt bestückt ist, indem Anwesenheit und Bestückversatz ermittelt werden. Sind diese Vorabbedingungen erfüllt, wird das Umfeld der Lötstelle bzgl. Lotbrücken und Kurzschlüssen analysiert. Weiterhin erfolgt eine Überprüfung der Lötstelle im Hinblick auf die Lotmenge, hinreichende Benetzung der Anschlüsse und die Anwesenheit von Poren in der Lötstelle. Im Falle der Abwesenheit des Bauelements, Bestückversatz außerhalb der Toleranz, Kurzschlüssen oder definitiven Lotmengen-, Benetzungs- und Porenfehlern wird sofort auf Einzelparameterebene eine Fehlermeldung ausgegeben (Bild 79). Eine differenzierte Klassifikation wird dann gestartet, wenn ein oder mehrere Prüfmerkmalswerte außerhalb der zulässigen Toleranzzone liegt.

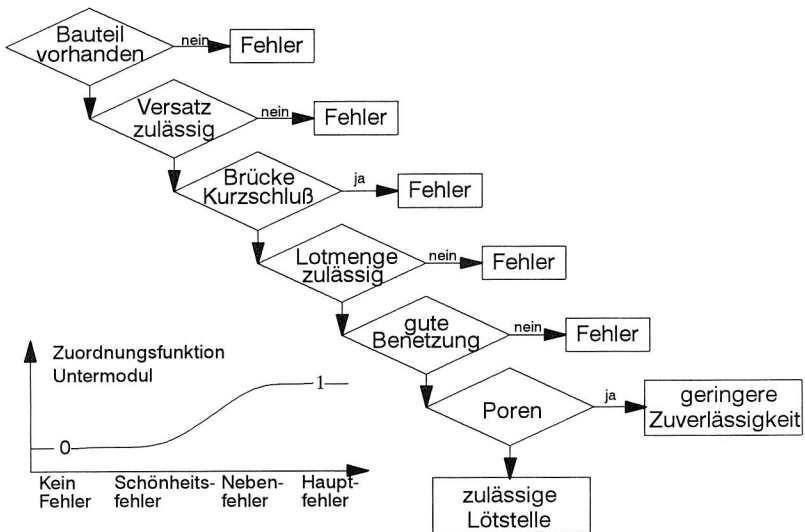


Bild 78: Algorithmenkaskade zur modularen Fehlerklassifikation von Lötstellen mittels automatisierter Bildauswertung

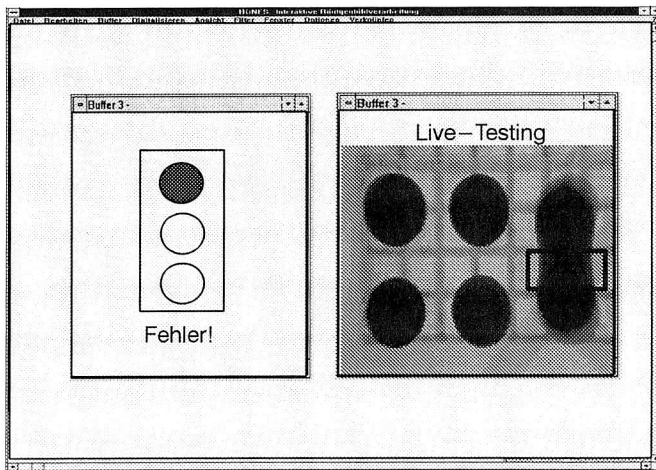


Bild 79: Anzeige der Prüfergebnisse im Automatikmodus

7 Anwenderflexible Klassifikation und Regelung der Fertigungsqualität

Zu Beginn der Arbeit wurde bereits auf die Vielfalt der zu berücksichtigenden Einflußfaktoren und die erforderliche Verknüpfung von Prozeß- und Prüfdaten in einem einheitlichen Informationsmodell hingewiesen (vgl. Kapitel 3). Der Schwerpunkt lag dabei vor allem in der Analyse von Wechselwirkungen in der Prozeßkette und der Bereitstellung geeigneter Monitore zur Überwachung der Prozesse und Produkte. Weiterhin wurde bereits aufgezeigt, daß die Fertigungsqualität elektronischer Baugruppen keine objektive Zielgröße darstellt, sondern in hohem Maße von den an die Produkte gestellten Anforderungen abhängt. Daraus resultiert die Forderung nach anwenderflexiblen Mechanismen zur Klassifikation und Regelung der Fertigungsqualität, deren Entwicklung im folgenden Kapitel vorgestellt wird. Es werden zwei Ansätze hierfür näher betrachtet, wobei auf eine Darstellung der verwendeten Grundlagen der sogenannten Unscharfen Logik und Neuronaler Netze verzichtet und diesbezüglich auf die einschlägige Literatur verwiesen sei (z. B. [120, 121]).

Mit dem Systemkonzept zur anwenderflexiblen Klassifikation wird zunächst eine Möglichkeit vorgestellt, mit der ein Anwender eine Auswahl verschiedener Prozeß- und Prüfdaten treffen kann, um diese als Eingangsoperanden für einen konfigurierbaren Klassifikations- und Regelungsmechanismus zu verwenden. Hierbei wird der Anwender im Werkzeug FuzzClass durch eine komfortable Bedienoberfläche bei der Realisierung derartiger signalbasierter Qualitätsregelkreise unterstützt.

Alternativ zur Diagnose der Fertigungsqualität durch gezielte Verknüpfung verschiedener Einzelparameter und deren Konfigurierung und Anpassung zu Diagnoseregeln werden in einem zweiten Ansatz lernende Verfahren für diese Aufgabenstellung untersucht. Hierbei werden die Eingangsinformationen summarisch durch konnektionistische Verfahren in eine zugeordnete Ausgangsinformation transformiert. Die Abbildung des Diagnosewissens wird durch den Anwender anhand einer Reihe von Beispielen festgelegt.

Die Mechanismen zur anwenderflexiblen Klassifikation und Regelung werden am Beispiel der Beurteilung der Lötstellenqualität von SMD-Baugruppen erläutert. Eine Verallgemeinerung auf beliebige, dem Prozeß- und Prüfdatenetz entnommene Eingangsinformationen zur Diagnose und Regelung ist ohne Änderungen der vorgestellten Werkzeuge möglich.

7.1 Geforderte Eigenschaften für die flexible Klassifikation und Regelung

Für die Überwachung und Regelung der Fertigungsqualität ist die Spezifikation geeigneter Kriterien erforderlich, die einen Prozessschritt bzw. ein Produktmerkmal bezüglich seiner Qualitätseigenschaften bewertbar machen [122]. Ein Beispiel für die sehr schwierige Bestimmung objektiver Bewertungskriterien sind die sehr umstrittenen Vorgaben zur Beurteilung der Lötstellenqualität. Gerade für Hochzuverlässigkeitsanwendungen ist diese Frage der Verbindungsqualität jedoch von größter Wichtigkeit. Die tatsächliche Lötstellenqualität wird letztendlich im Feldeinsatz des Produktes durch das Aufrechterhalten der mechanischen und elektrischen Funktion der Lötstelle entschieden. Während der Fertigung können hingegen nur indirekte Qualitätsparameter durch die Überwachung der verwendeten Materialien und Fertigungsprozesse sowie am Produkt mit zerstörungsfreien Prüfverfahren erfaßt werden. Eine wirksame Regelung der Fertigungsqualität muß sich daher auf die Erfassung derjenigen Kriterien konzentrieren, die in ursächlichem Zusammenhang mit der resultierenden Qualität stehen [123]. Eine Reihe von veröffentlichten Studien zeigen jedoch, daß dieser Zusammenhang durch die visuelle Inspektion nach genormten Prüfvorschriften nicht gewährleistet ist [124, 125]. Die geforderten Eigenschaften bezüglich einer mit der tatsächlichen Produktqualität korrelierenden Klassifikation der Fertigungsqualität sind daher mit den in Bild 80 genannten und in den folgenden Abschnitten beschriebenen Faktoren begründet.

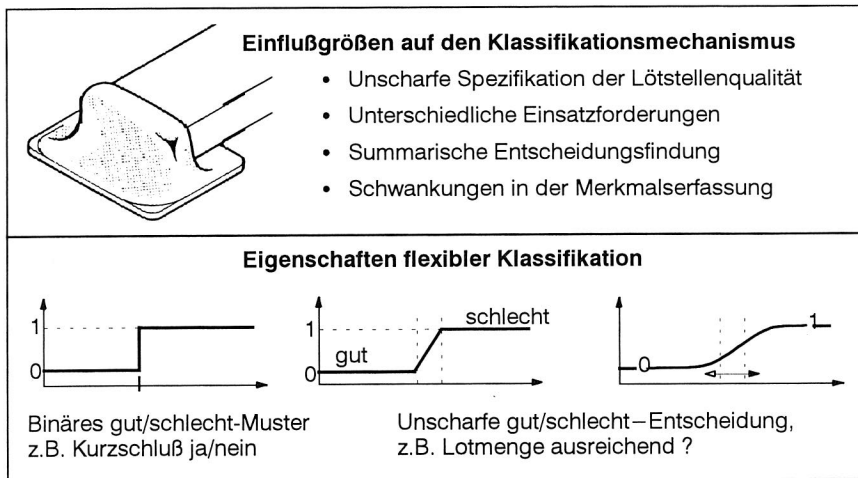


Bild 80: Anforderungen an die anwenderflexible Klassifikation der Lötstellenqualität

7.1.1 Einflußnahme auf Vorgaben zur Qualitätsbeurteilung

Die Erarbeitung objektiver Kriterien für die Beurteilung der Lötstellenqualität elektronischer Baugruppen ist weiterhin Gegenstand intensiver Forschung. Die hier vorgeschlagenen Prüf- und Regelungsstrategien müssen daher hinreichend flexibel sein, neuen Erkenntnissen durch die Änderung von Prüfkriterien bzw. durch die Änderung von Entscheidungsgrenzen innerhalb einzelner Prüfparameter zu folgen.

Auch bei profundem Verständnis der Versagensmechanismen und Kriterien zur Beurteilung der Qualität von Lötstellen ist eine pauschal gültige Spezifikation aufgrund der Verschiedenheit der Anwendungsfelder elektronischer Baugruppen nicht zu erwarten. Die Spezifikation der Beurteilungskriterien und der entsprechenden Entscheidungsgrenzen hängt sehr stark von den Einsatzanforderungen der Produkte und den potentiellen Versagensrisiken ab. Die Werkzeuge zur Klassifikation und Regelung der Fertigungsqualität müssen dementsprechend anwenderflexibel konfiguriert und parametrisiert werden können. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß diese Systemeigenschaften ohne Programmieraufwand direkt durch den Anwender der Systeme beeinflussbar sein müssen.

7.1.2 Wahlfreie Verknüpfung von Einzelkriterien

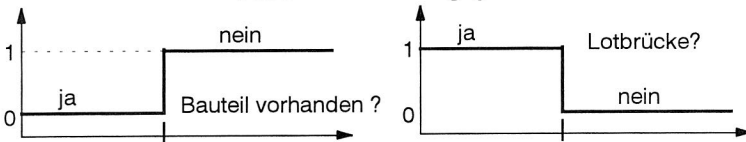
Die Beurteilung der Fertigungsqualität einer Lötstelle beruht auf der Interpretation einer Reihe verschiedener Faktoren, wie Lotmenge, Benetzungsgrad, Benetzungswinkel etc. Bei der visuellen Beurteilung durch geschultes Prüfpersonal wird die Lötstelle in der Gesamtheit mit einem Blick erfaßt und summarisch bewertet. Bei Zweifelsfällen wird die Lötstelle einer genaueren Betrachtung unterzogen, wobei verschiedene Einzelkriterien und deren Ausprägungen gegeneinander abgewogen werden. Wie in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt wurde, wird die Qualität elektronischer Baugruppen durch eine Reihe verschiedener Faktoren bestimmt, die aus der gesamten Prozeßkette resultieren. Der Prüfentscheid kann als Verknüpfung gewichteter Einzelfaktoren, die aus der gesamten Prozeßkette herrühren, betrachtet werden. Hierbei können neben den visuell erfaßten Informationen weitere Parameter bzw. Hintergrundinformationen in die Entscheidungsfindung eingehen. Bei der Abbildung dieser Vorgehensweise in eine automatisierte Klassifikation ist diese vernetzte Betrachtungsweise in die Konzipierung des Gesamtsystems einzubeziehen.

7.1.3 Robustheit gegenüber Schwankungen in der Merkmalerfassung

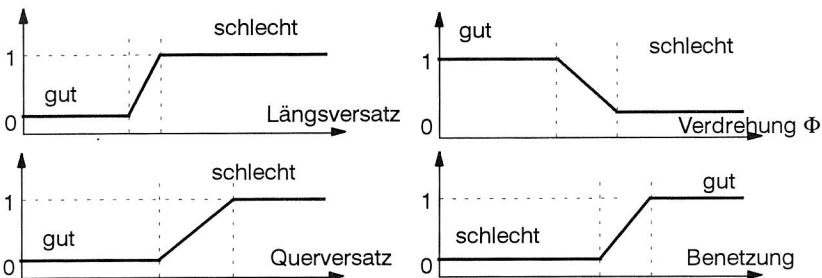
Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, weisen die verschiedenen Sensorprinzipien zur Erfassung von Prozeßparametern bzw. Prüfmerkmalen systembedingte Streuungen in der Erfassung der Merkmale auf. Ein Beispiel sind Schwankungen in der Bilderfas-

sung, die sich bei Grauwert- oder Laserinspektionssystemen durch Helligkeits- oder Farbschwankungen der Leiterplattenmaterialien ergeben können. Es ist offensichtlich, daß die Entscheidungsgrenzen außerhalb der Streubereiche der Parameter liegen müssen, damit die Prüfentscheidungen nicht von der Streuung der Prüfsysteme beeinflusst werden. Durchgeführte Felduntersuchungen an automatisierten optischen Inspektionssystemen zeigen jedoch, daß dies nicht immer der Fall ist, wie sich leicht mit einer Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse durch Wiederholungstests an einer Baugruppe zeigen läßt. Die Ursachen hierfür sind in der Regel ungünstig gesetzte binäre Entscheidungsgrenzen. Ein deutlich robusteres Verhalten der Klassifikationsmechanismen läßt sich durch die Einführung von Grenzbereichen und zugeordneten Zugehörigkeitsfunktionen erzielen.

Binäre Entscheidungsgrenzen



Einseitig begrenzte Übergangsfunktion, z.B. Verdrehung, Versatz, Benetzung der Anschlußkonturen



Beidseitig begrenzte Übergangsfunktion, z.B. Lotmenge

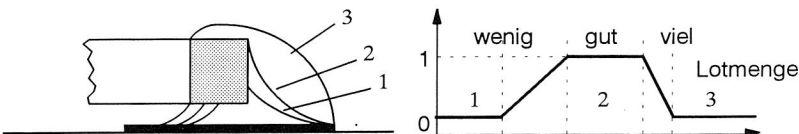


Bild 81: Anforderungen an die anwenderflexible Klassifikation der Lötstellenqualität

7.2 Anwenderflexible Klassifikation mittels Fuzzy-Logik

Die oben dargestellten Anforderungen führen zu einem modularen Ansatz für die Gestaltung eines Systemkonzepts zur anwenderflexiblen Klassifikation und Regelung der Fertigungsqualität elektronischer Baugruppen. Die Modularität ist insbesondere durch die Trennung von Merkmalsgewinnung, Klassifikation der Merkmalswerte und schließlich der Diagnose bzw. Ableitung von Regelungsmechanismen gekennzeichnet. Weiterhin müssen sowohl Prüfentscheidungen auf Basis einzelner oder kombinierter Prüfkriterien, als auch die Diagnose zur Ableitung von Regelungsmechanismen über eine leicht zu bedienende Benutzerschnittstelle konfiguriert werden können.

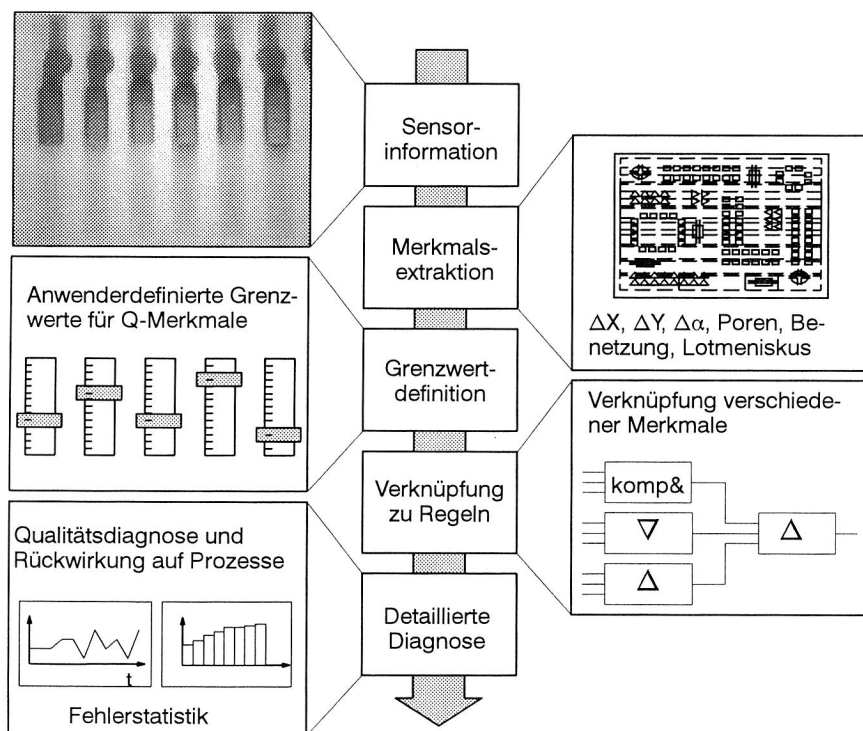


Bild 82: Applikationsspezifische gut-schlecht-Klassifikation bei der Lötstelleninspektion

In Bild 82 sind die verschiedenen Stufen zur anwenderflexiblen Klassifikation und Regelung der Fertigungsqualität dargestellt. Ausgangspunkt ist die von verschiedenen Prüfsystemen vorliegende Sensorinformation aus dem Prozeß- und Prüfdaten-netz der Fertigungslinie. Im hier betrachteten Fall der schwerpunktmäßigen Betrachtung der Lötstellenqualität werden Eingangsinformationen von 3D-Laser- und Röntgeninspektionssystemen verarbeitet. Mittels Mustererkennungsprogrammen werden Prüfmerkmalswerte aus der Sensordaten extrahiert. Im dargestellten Beispiel sind dies Anzahl, Lage und Durchmesser von Poren in Lötstellen, die durch Röntgenprüfung ermittelt werden (vgl. Kap 6). Die Grenzwerte für die Entscheidung zwischen guter und schlechter Qualität können daraufhin vom Anwender in Form von Zugehörigkeitsfunktionen definiert werden. In einem weiteren Schritt werden die Merkmalswerte logisch miteinander verknüpft und zu einer Gesamtaussage zusammengeführt. Dieses geschieht in einem regelbasierten Ansatz, indem die Eingangs- und Ausgangsoperanden mit verschiedenen Operatoren zu Diagnoseregeln verknüpft werden können. Es lassen sich somit unterschiedliche Merkmalswerte zu charakteristischen, gewichteten Merkmalsgruppen zusammenfassen. Den Ausprägungen der Merkmalswerte werden daraufhin entsprechende Diagnoseregeln für Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zugeordnet, die wiederum Regulationsmaßnahmen für eine Rückwirkung auf den Fertigungsprozeß anstoßen.

7.2.1 Merkmalsextraktion und Grenzwertdefinition

Auf Basis der extrahierten Prüfmerkmale sind die Schwellwerte für die Klassifikationsentscheidungen vorzunehmen. Ein Beispiel für die anwenderspezifische Parametrierung der gut/schlecht-Klassifikation ist die Beurteilung der Porenanzahl und Porengröße in einer Lötstelle (Bild 83). Der hier entwickelte Algorithmus zur Porendetektion erfaßt Anzahl, Durchmesser, Formfaktoren und die Lage von Poren innerhalb der Lötstelle. Die detektierten Merkmale werden über eine Algorithmenschnittstelle an das Klassifikationsmodul übergeben. Durch Vorgabe eines Parameters kann die Größe der zu detektierenden Poren definiert werden. D. h. in der nachfolgenden Qualitätsbeurteilung gehen nur die Poren in die Bewertung ein, deren Durchmesser eine kritische Grenze überschreitet. In einem nächsten Schritt wird dann die Lage der Poren innerhalb der Lötstelle analysiert und bewertet.

Die Röntgenprüfung liefert Qualitätsmerkmale der Lötstellen, wie Lotmenge, Benetzung, Versatz, Porenzahl und Porengröße. Innerhalb des Regelungsmodells werden diese Daten zu einer Qualitätsaussage verknüpft und Rückschlüsse auf die Fertigungsprozesse und potentielle Fehlerursachen gezogen. Weiterhin werden Abhilfemaßnahmen zur Fehlervermeidung angegeben, beziehungsweise Regulationsmechanismen angestoßen.

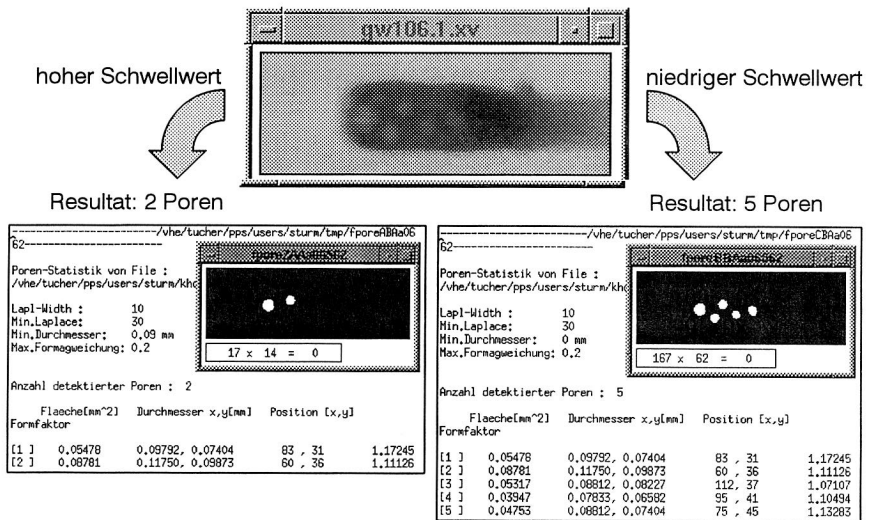


Bild 83: Automatisierte Porendetektion mit flexibel einstellbarem Schwellwert für die kritische Porengröße

7.2.2 Verknüpfung von Merkmalen zu Diagnoseregeln

Die Klassifikation von Prozeß- und Prüfparametern und die darauf basierende Initiierung von Steuerungs- und Regelungsaktionen erfolgt im System FuzzClass, dessen Benutzerschnittstellen in den Bildern 84 und 85 dargestellt sind [126]. Die aus dem Prozeß- und Prüfdatennetz resultierenden Parameter gehen als Eingangsgrößen in das System ein. Die Eingangsgrößen können zunächst auf Einzelparameterebene analysiert werden. Hierzu können für den Wertebereich eines Parameters Zustandsräume definiert werden. Bei Über- oder Unterschreitung von Warngrenzen oder Toleranzgrenzen, können sofortige Aktionen angestoßen werden. Darüber hinaus können die Einzelparameter mittels unterschiedlicher Operatoren zu hierarchischen Diagnoseregeln zusammengefaßt werden, die ihrerseits Regelungsmechanismen auslösen. Wird beim Prüfprozeß mittels Röntgen festgestellt, daß Lötstellen zu wenig Lot aufweisen, so stößt der rückwirkende Regelkreis die Ermittlung der Fehlerursache beim Lotpastenauftrag an. Während der Fehler beim Sieb- oder Schablonendruck in der Regel durch das Reinigen der Siebe oder Schablonen beseitigt werden kann, kommen beim Dispensprozeß beispielsweise die Faktoren der verstopften Pipette, der leeren Kartusche oder zu wenig Druck in Betracht. Prinzipiell stehen drei unterschiedliche Typen zur Verfügung:

- Unterschiedlich große Regelkreise, die sowohl in die Subprozesse selbst als auch umfassend in die Prozeßketten eingekoppelt sind.
- Vorwärtswirkende Regelkreise, die Stell- bzw. Korrekturgrößen an die folgenden Prozeßschritte übergeben.
- Rückwärtswirkende Regelkreise, die Stell- bzw. Korrekturgrößen an zurückliegende Prozeßschritte übergeben.

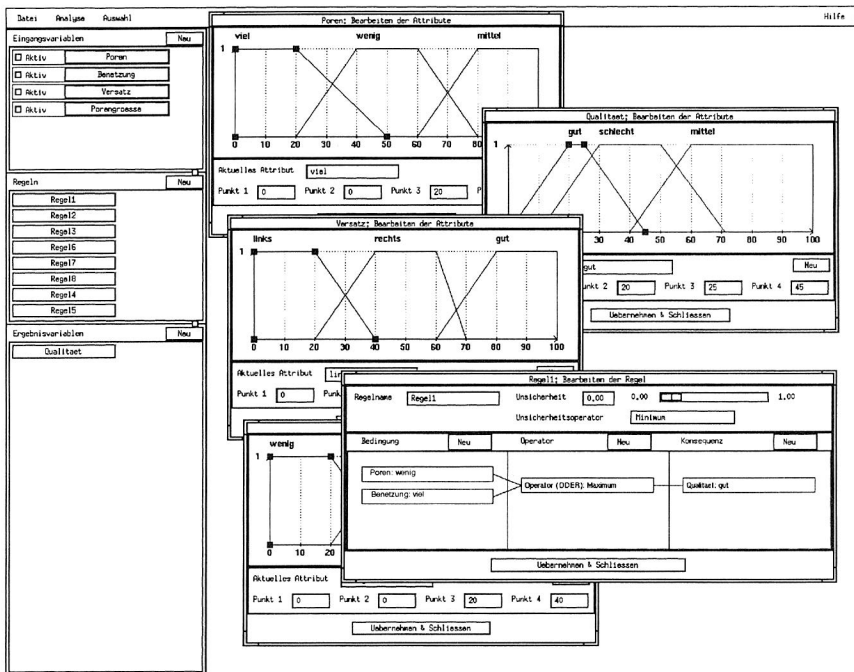


Bild 84: Flexible Eingabe der benutzerdefinierten Schwellwerte für die Qualitätsparameter

7.2.3 Initiierung von Regulationsmaßnahmen

Regelnde Reaktionen auf Abweichungen entweder der Prozeßparameter oder der Qualitätsvorgaben des Produktes besitzen drei zeitlich unterschiedliche Zeithorizonte. Diese werden in kurz-, mittel- und langfristig unterteilt. Die kurzfristigen Reaktionen werden von der Prozeßüberwachung oder von direkt nachgeschalteten Prüf-

prozessen angestoßen. Dies ist immer dann erforderlich, wenn schnell auf Abweichungen in der Parametereinstellung oder auf Fehler reagiert werden muß. Beim Dispensprozeß zeigt sich dies beispielsweise dann, wenn der Druck einen unzulässig hohen und die Abstandsmessung einen zu geringen Wert annimmt. Die Wertekombination weist auf eine verstopfte Dispensernadel, geänderte Viskosität, evtl. hervorgerufen durch Temperaturschwankungen, oder auf Probleme des Kartuschendruckstempels hin. Da in dem Zustand zu wenig Lotpaste auf die Leiterplatte aufgebracht wird, was in späteren Prozeßschritten zu unzureichend benetzten Lötstellen führt, muß hier schnell der Prozeß angehalten und der Fehler behoben werden. Mittelfristige Maßnahmen werden dann eingeleitet, wenn über einen längeren Zeitraum signifikante Parameter überwacht werden können, die von ihrer Sollvorgabe drifteten. Die Daten werden über ein Zeitintervall aufgenommen und verglichen. Bestückungsautomaten drifteten beispielsweise in der Absetzposition der Bauelemente, was dazu führt, daß diese bei Überschreiten des Grenzwertes nicht mehr die geforderte Überlappung zwischen Bauelementeanschluß und Leiterplattenpad besitzen. Hier werden bei Erkennen der Drifterscheinungen rechtzeitige mittelfristige Aktionen ausgelöst, um die Absetzpositionen wieder zu korrigieren.

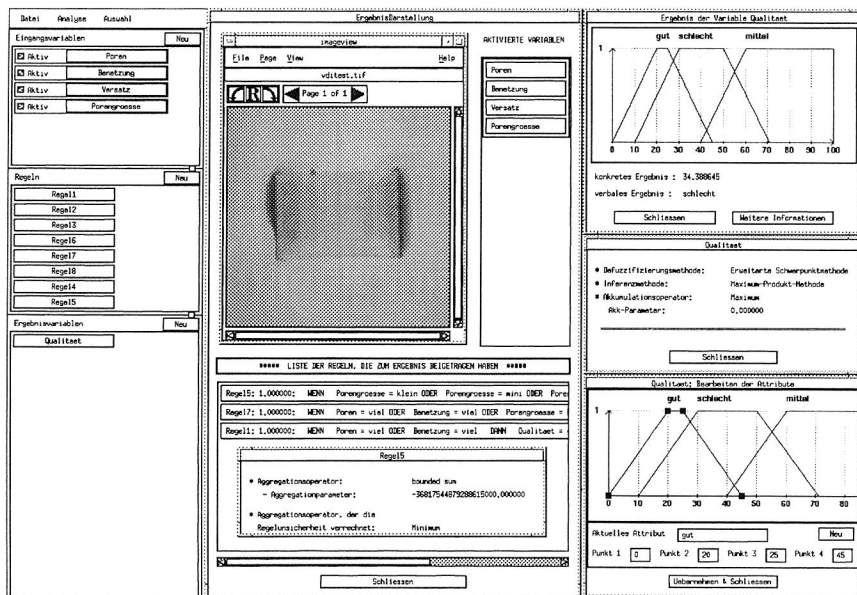


Bild 85: Klassifikationsprozeß für gelötete Bauelemente

7.3 Qualitätsoptimierung durch den Einsatz lernender Verfahren

Ausgehend von den zum Teil unscharf spezifizierten Vorgaben zur Beurteilung der Fertigungsqualität und der Erfordernis, anwenderspezifische Kriterien in die automatisierte Klassifikation und Diagnose einzubringen, wurde der Einsatz lernender Verfahren für diese Aufgabenstellung untersucht. Der Grundgedanke ist dabei, den Anwender zunächst beim Aufbau einer Klassifikationsumgebung im Sinne eines integrierten Prozeß- und Prüfdatennetzes zu unterstützen und daraufhin das Klassifikations-, Diagnose- und Regelungswissen mit Hilfe einer Menge von Beispielen in das System einzulernen. Für die Realisierung dieses Ansatzes bietet sich der Einsatz konnektionistischer Verfahren für den Aufbau signalbasierter Regelkreise an. In der Literatur sind derartige Ansätze vom Prinzip her in [127] sowie in Realisierungsbeispielen für einzelne Prozesse der Montagetechnik, z. B. bei akustischen Fügeprozeßüberwachungen beschrieben [128]. In der vorliegenden Arbeit wurden diese Ansätze auf die Elektronikproduktion übertragen sowie im Hinblick auf mehrstufige Prozeßfolgen erweitert. In einer experimentellen Untersuchung wurde die Tauglichkeit dieses Ansatzes am Beispiel der Diagnose von Lötverbindungen mittels Neuronaler Netze nachgewiesen [129].

Ein wesentlicher Vorteil bei der Verwendung Neuronaler Netze für Aufgaben der Klassifikation liegt darin, daß die Implementierung und Aktualisierung des notwendigen Klassifikations- und Diagnosewissens mit Hilfe einer Menge von Beispielsignalen zu realisieren ist. Im besonderen wurde dies exemplarisch für eine ausgewählte Anwendung der Lötstelleninspektion innerhalb der in Kapitel 8.1 dargestellten Laborumgebung einer Elektronikbestückungslinie getestet. Die Ergebnisse sind im folgenden zusammengefaßt. Ziel des hier dargestellten Ansatzes ist es, zunächst einen lernfähigen Prüfautomaten zur Verfügung zu stellen, der in der Baugruppenproduktion des Anwenders ohne Programmieraufwand anhand von Beispielen spezifisch auf die Vorgabekriterien des Anwenders trainiert werden kann.

Im nächsten Schritt können parallel auch weitere Prozeßparameter aus der Bestückungslinie als Merkmalsvektoren aufgefaßt und einem neuronalen Netz als Eingangsinformation zugeführt werden. Mit der klassifizierten Fertigungsqualität können so die Prozeßzustände im Neuronalen Netz trainiert werden, die zu guter bzw. schlechter Fertigungsqualität geführt haben. Dieser Schritt des Trainings des Neuronalen Netzes wird in der Literatur als überwachtes Lernen bezeichnet. Der Erfolg dieser Methode ist davon abhängig, daß die erfaßten Prozeßparameter in ursächlichem Zusammenhang mit der resultierenden Fertigungsqualität stehen. Ist dies nicht der Fall, läßt sich dies jedoch schon während der Trainingsphase erkennen, da sich kein Konvergenzverhalten einstellt. Vorausgesetzt, die erfaßten Prozeßparameter beeinflussen die resultierende Fertigungsqualität, so können direkt die Prozeßparameter klassifiziert und ggf. erforderliche Regelungsmaßnahmen angestoßen werden.

7.3.1 Neuronale Netze für die Klassifikation von Lötstellen

In einem ersten Ansatz wurde untersucht, inwiefern die komplexe Aufgabe der Klassifikation verschiedener Lötstellenfehler im Röntgenbild durch ein Neuronales Netz erfüllt werden kann. Um den Versuchsaufwand einzugrenzen, wurden die Untersuchungen zunächst auf einfache zweipolige oberflächenmontierbare Bauelemente, wie Widerstände oder Kondensatoren, d. h. zylindrische oder quaderförmige Bauelemente (Gehäusotyp Chip/quaderförmig und Melf/zylindrisch), konzentriert. Weiterhin wurde ausschließlich die direkte Verarbeitung der Bildinformation durch Neuronale Netze betrachtet. Alternative Ansätze verwenden verschiedene, mittels klassischer Musterverarbeitung gewonnene Bildmerkmale als Eingangsinformation für die Klassifikation durch das Neuronale Netz [130]. Bild 86 zeigt im Überblick den verfolgten Ansatz der direkten Bildverarbeitung und Klassifikation der Lötstellenqualität. Um den Eingangsvektor für das Neuronale Netz und den darauf folgenden Verarbeitungsaufwand für die Anzahl der Verbindungen im Netzwerk gering zu halten, wurden die Röntgenbilder einer Normierung und Datenkomprimierung unterzogen (Bild 87) Für das Training der Neuronalen Netze wurde das Werkzeug SNNS verwendet [131].

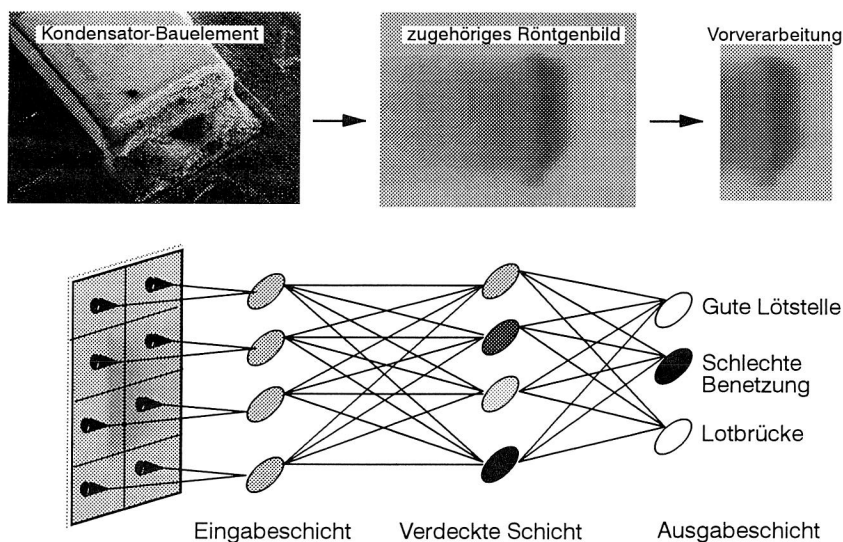


Bild 86: Prinzip der Lötstellenklassifikation mit neuronalen Netzen bei direkter Verwendung der komprimierten Bilddaten

7.3.2 Normierung durch Bildvorverarbeitungsschritte

Die digitalisierten Röntgenaufnahmen der Lötstellen variieren hinsichtlich der Pixelanzahl, Auflösung, Lage und der Ausrichtung des Bauteils im Bild. Vor der Weiterverarbeitung ist eine Standardisierung nötig, um der Forderung der neuronalen Informationsverarbeitung nach Homogenität gerecht zu werden. In einem ersten Vorverarbeitungsschritt wird die Position und die Ausrichtung des Bauteils innerhalb des Bildes ermittelt. Für das so ausgerichtete Bild wird daraufhin der Schwerpunkt berechnet um eine Lagenormierung vornehmen zu können. Der so berechnete Schwerpunkt dient als Mittelpunkt in dem neuen Bildformat, welches durch das "Abschneiden" der überstehenden Ränder entsteht. Bei der Röntgenaufnahme können sich die Bilder, aufgrund der variablen Einstellung der Z-Achse, in ihrer Auflösung unterscheiden. Verschiedene Auflösungen und die zu begrenzende Menge der im neuronalen Netz zu verarbeitenden Eingangsinformation, machen es notwendig, die Pixeldaten zu komprimieren. Die Kompressionsrate ergibt sich aus dem Quotienten der gewünschten Auflösung und der Pixelauflösung des aufgenommenen Bildes und ist eine kontinuierliche Größe. Das so gewonnene neue Bildraster wird über das Originalbild gelegt und die neuen Pixelwerte durch Mittelwertbildung berechnet.

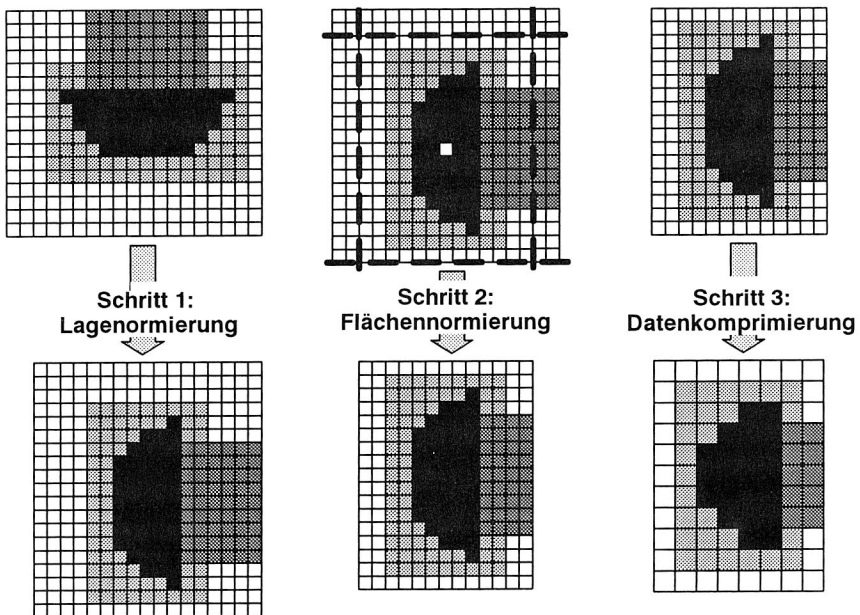


Bild 87: Bildvorverarbeitung zur Ermittlung der Eingabeschicht für das Neuronale Netz mit Algorithmen zur Lage- und Flächennormierung sowie Bildkompression

7.3.3 Aufbau einer Lernstichprobe und Training des Klassifikators

Ausgehend von den grundsätzlichen Fehlerarten wie Bestückversatz, Benetzungsfehler, zu viel oder zu wenig Lot etc. wurde eine Lernstichprobe als Trainingsdatenbasis erstellt. Neben der Quantität ist die Verteilung der Muster in der Lernstichprobe auf die einzelnen Fehlerklassen ein zu beachtender Faktor. Sie sollte dem Fehleranteil in der Anwendungswelt entsprechen. Dabei ist zu beachten, daß möglicherweise bestimmte Fehlerausprägungen eine größere Vielfalt enthalten und somit durch einen höheren Anteil in der Datenbasis repräsentiert werden müssen. Generell wird man in der Praxis auch über keine verlässlichen Angaben der tatsächlichen Verteilung auf die Fehlerklassen verfügen.

Eine mögliche Vorgehensweise zur Optimierung der Lernstichprobe bezüglich ihrer Verteilung besteht darin, ein adaptiertes Netz, dessen schlechtes Erkennungsverhalten auf die Unterrepräsentation einer oder mehrerer Fehlerklassen zurückzuführen ist, mit den nichterkannten Mustern erneut zu trainieren. Die von einem Prüfsystem als fehlerhaft oder indifferent klassifizierten Bauteile werden auf einen Reparaturplatz geschickt und einer visuellen Prüfung unterzogen. Zeigt sich bei dieser visuellen Prüfung, daß die Bewertung des Netzes nicht korrekt war, so werden die zugehörigen Muster in die bestehende Datenbasis aufgenommen und das Netz mit der erweiterten Lernstichprobe erneut trainiert. Dabei werden die von dem Netz fälschlicherweise als "Gut" klassifizierten Bauteile allerdings nicht erfaßt. Ihr Anteil lag in den durchgeführten Versuchen zwischen 0% und 1%.

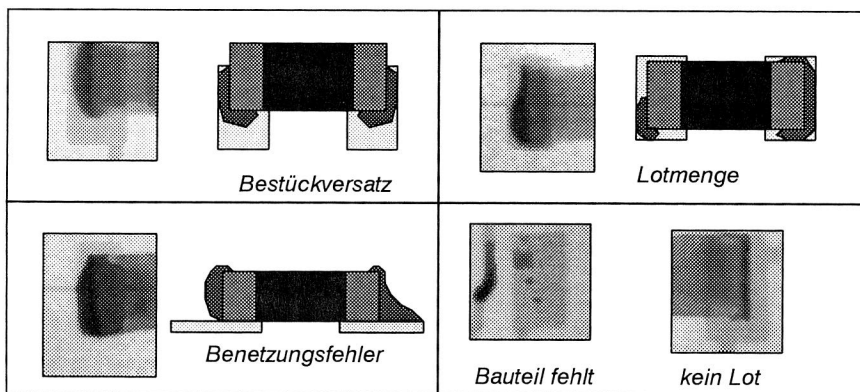


Bild 88: Beispiele aus der aus Versuchsreihen aufgebauten Lernstichprobe für das Training neuronaler Netze zur Lötstellenklassifikation

7.3.4 Ergebnisse bei der Anwendung in der Fertigungsumgebung

In einem weiteren Schritt wurden verschiedene Netztopologien auf ihre Eignung für die Klassifikationsaufgaben untersucht. Bild 89 zeigt exemplarisch ein dreischichtiges Netz mit je einer Ein- und Ausgabeschicht sowie einer verdeckten Zwischenschicht. Innerhalb der Versuchsdurchführung wurde die Größe der Eingabeschicht sowie die Größe und Anzahl der Zwischenschichten variiert. Als Ausgangsgröße und Trainingsparameter für den überwachten Lernvorgang sowie als Ausgangsgröße für die Klassifikation wurden 6 Fehlerklassen aus der Lernstichprobe gewählt

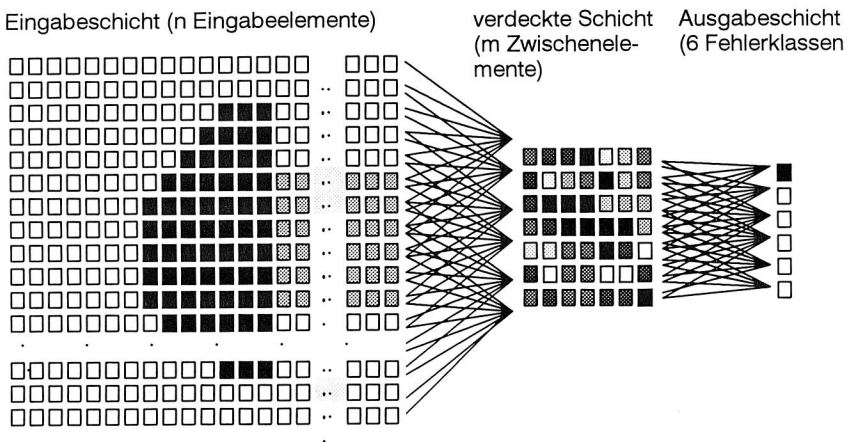


Bild 89: Schematische Darstellung der aufgebauten Neuronalen Netze für die Klassifikation von Lötstellen der Bauelementetypen Chip und Melf

Bild 91 ist das unterschiedliche Erkennungsverhalten verschiedener Netztopologien, d. h. verschiedener Anzahl von Eingangsoperanden und Zwischenschichten dargestellt. Die verschiedenen Netztopologien wurden mit derselben Lernstichprobe trainiert und daraufhin das Erkennungsverhalten mit einer Teststichprobe analysiert. Es zeigt sich, daß trotz der geringen Anzahl von Lernvorgängen aus der Lernstichprobe eine gute Erkennungssicherheit von über 95 % für die Teststichprobe erzielt wird. Je nach Netztopologie treten jedoch trotz gleicher Versuchsbedingungen starke Unterschiede im Erkennungsverhalten auf.

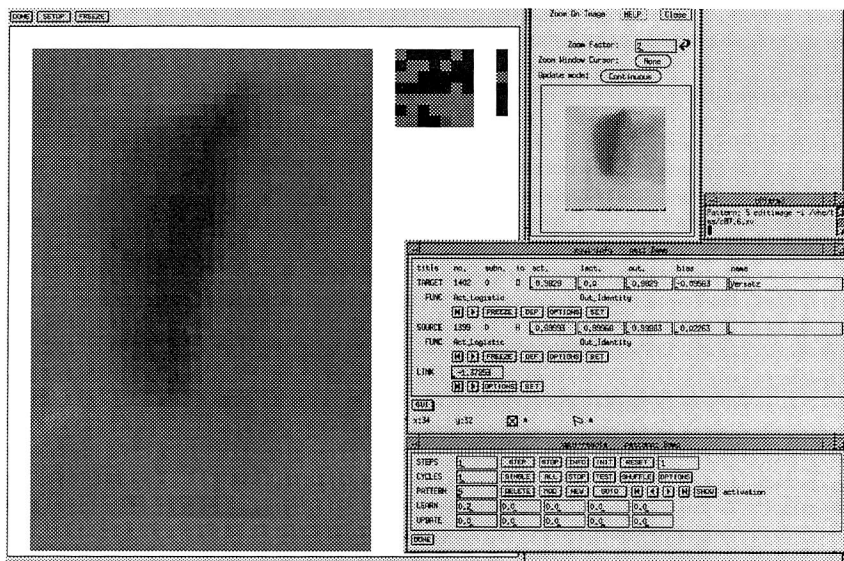


Bild 90: Anwendungsbeispiel: Klassifikation von SMD–Lötstellen mittels neuronalen Netzen (Bildschirmabzug)

Beim Erkennungsvorgang durch das Neuronale Netz wurde zwischen eindeutiger und indifferenter Klassifizierung unterschieden. Bei indifferenterem Verhalten wird neben der eindeutig richtigen Klassifizierung zusätzlich noch ein oder mehrere weiteres Ausgangsneuronen aktiviert. Dieses Verhalten entsprach in den vorliegenden Fällen den realen Verhältnissen, da verschiedene Lötstellenfehler oftmals mehrere Fehlermerkmale, z. B. Versatz und schlechte Benetzung, aufwiesen. In der Lernstichprobe wurden diese aber nur einer Klasse zugeordnet. Dennoch zeigt sich, daß das Neuronale Netz auch die Synthese aus verschiedenen Fehlerklassen in einem Schritt zu leisten vermag.

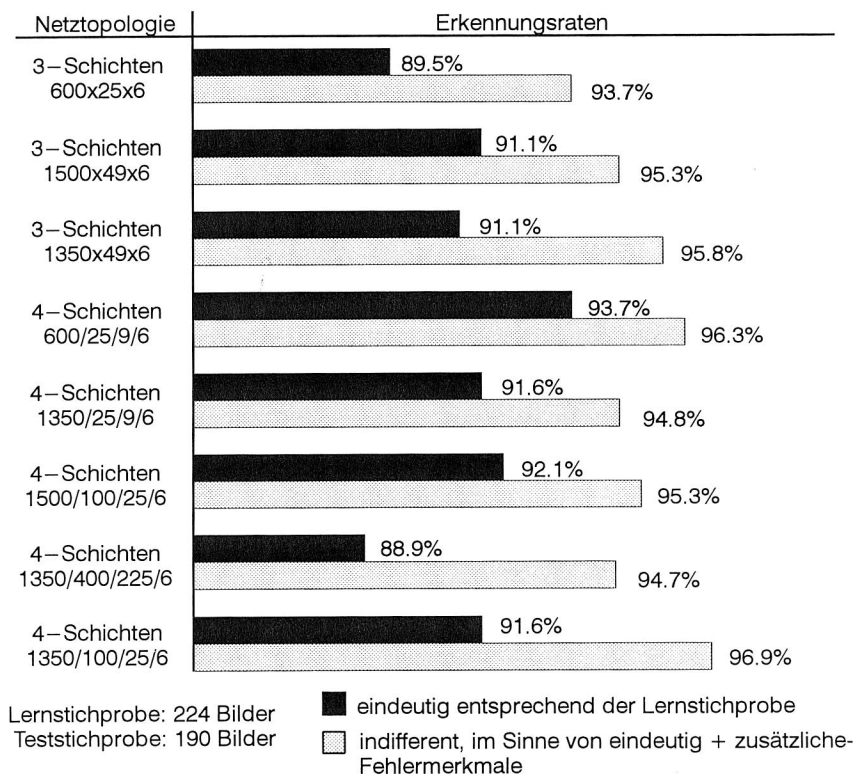


Bild 91: Vergleichende Analyse unterschiedlicher Netztopologien bei gleicher Lernstichprobe und Testmustern

8 Anwendung der prozeßintegrierten Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

In diesem Kapitel wird in ausgewählten Beispielen die Anwendung der entwickelten Methoden und Werkzeuge zur prozeßintegrierten Qualitätssicherung dargestellt. Mit den parallel zur konzeptionellen Entwicklung durchgeführten Praxisanwendungen sollte die Übertragbarkeit des Modells auf praktische Aufgabenstellungen sichergestellt werden. Hierzu wurden die unterschiedlichen Charakteristika, Randbedingungen und Einflußgrößen der praktischen Anwendungen genutzt, um eine Einordnung der verwendeten Ansätze durchführen zu können. Es wurden die folgenden unterschiedlichen Anwendungsfälle berücksichtigt:

- Nutzung der Methoden und Werkzeuge für dedizierte Laboruntersuchungen
- Anwendung für Einzelprozeßuntersuchungen in der industriellen Praxis
- Optimierung übergreifender Wirkzusammenhänge in Prozeßketten
- Integrierte Qualitätssicherung bei Neukonzeption von Fertigungsprozessen

8.1 Optimierung der Prozeßkette Lotpastenauftrag - Bestücken - Löten

Die in Kapitel 3 dargestellte Vorgehensweise beim Aufbau eines integrierten prozeßübergreifenden Informationsmodells wurde exemplarisch auf die Prozeßschritte Lotpastenauftrag mittels Dispensen, Bestückung oberflächenmontierter Bauelemente und Infrarot-Reflowlöten angewandt. Ziel der Untersuchungen war die prozeßübergreifende Ermittlung der Wechselwirkungen in der Prozeßkette [132]. Hierbei wurden die Qualitätseinflüsse der eingesetzten Materialien und die Auswirkungen unterschiedlicher Einstellgrößen in den Prozessen systematisch analysiert. Auf dieser Basis wurden dann optimale Einstellparameter für die gesamte Prozeßkette und die maximal zulässigen Prozeßschwankungen festgelegt.

Entsprechend der gewählten Vorgehensweise wurden zunächst die relevanten Einflußgrößen der Prozeßkette strukturiert und in Fischgrätendiagrammen abgebildet. Auf dieser Basis wurden die Anforderungen an das Prozeß- und Prüfdatennetz festgelegt. In Bild 92 ist die Systemumgebung für die Prozeßkette Lotpastenauftrag, Bestückung und Reflowlöten dargestellt. Die Prozesse werden durch die Erfassung von Maschinen- und Prozeßdaten und durch prozeßbegleitende Inspektion der Materialien und Baugruppen charakterisiert.

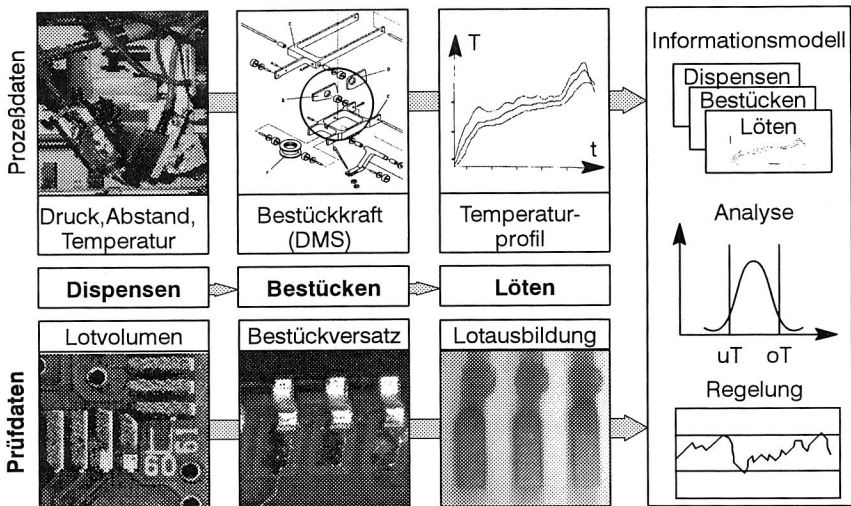


Bild 92: Aufbau eines prozeßübergreifenden Informationsmodells durch die Erfassung von Prozeß- und Prüfdaten für Lotpastenauftrag, Bestücken und Löten

8.1.1 Aufbau des Prozeßdatennetzes aus Maschinen- und Prozeßdaten

Für den Aufbau des Prozeßdatennetzes mußte die Prozeßkette durch zusätzliche Sensorik beim Lotpastenauftrag, Bestück- und Lötvorgang erweitert werden, um eine Reihe von qualitätsrelevanten Parametern zu ermitteln, die nach heutigem Stand der Technik nicht kontinuierlich als Meßgröße im Prozeß verfügbar sind. Der Lotpastenauftrag erfolgt in der Versuchsumgebung mittels eines über die Parameter Dosierzeit und Dosierdruck gesteuerten Kartuschendispensers. Um den vorliegenden Prozeß zu charakterisieren, wurde eine Druckmeßdose in den Dosierkopf integriert. Aufgrund der dadurch veränderten Gasvolumina in der Druckbeaufschlagung mußte daraufhin die Kennlinie des Dispensers neu kalibriert werden.

Da das Auspreßverhalten durch die Temperaturabhängigkeit der Lotpasten-Viskosität beeinflußt wird, wird zusätzlich die Temperatur an der Lotpastenkartusche mit einem Thermoelement erfaßt. Hiermit können auch die temperaturabhängigen Effekte beim Lotpastenauftrag direkt am Prozeß ermittelt werden. Weiterhin wurde ein Lasertriangulationssensor in den Dosierkopf integriert, um den Abstand der Dosiernadel von der Leiterplatte während des Dosierprozesses dynamisch zu erfassen. Um die herrschenden Bestückkräfte während des Bestückvorgangs erfassen zu können, werden Dehnmeßstreifen am Bestückkopf des Automaten angebracht und die Meß-

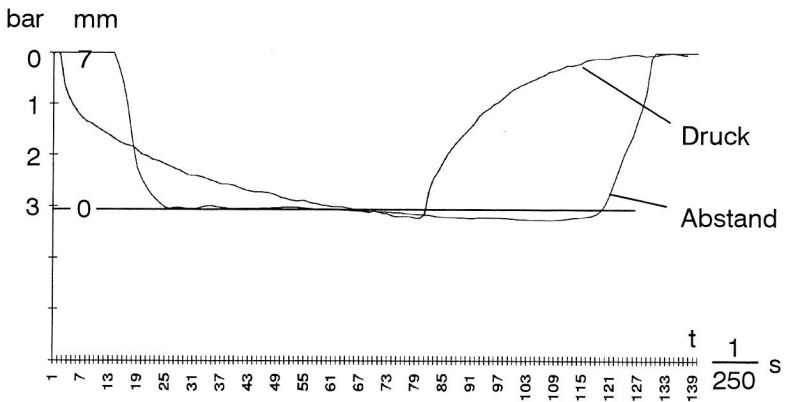
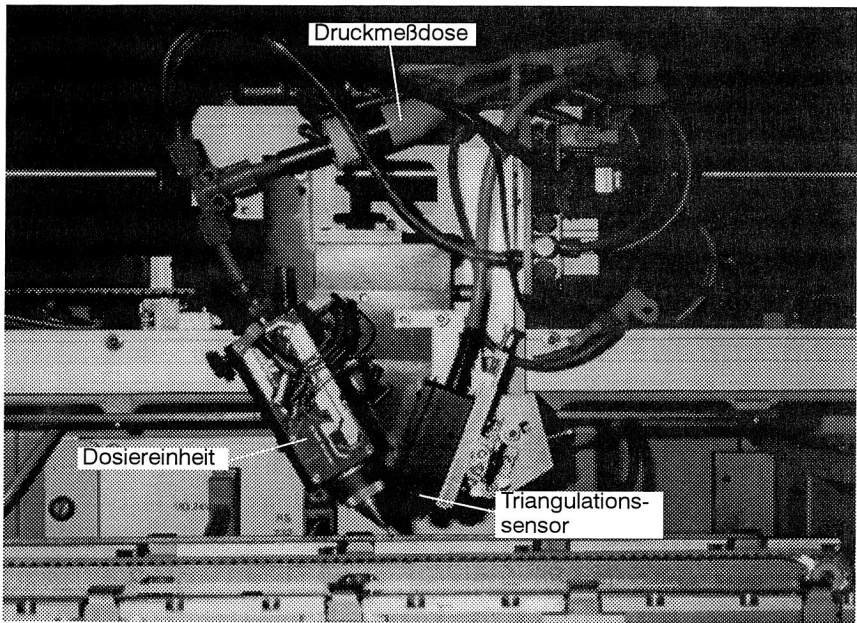


Bild 93: Versuchsaufbau im Dispenserkopf und Meßkurven von Dosierdruck und Dosiernadelabstand beim Lotpastenauftrag

daten über einen Meßverstärker dem Prozeßdatenerfassungsrechner zugeführt. Für die Erfassung des Temperatur-Zeitprofils werden Thermoelemente auf der Leiterplatte befestigt. Die Daten werden während des Durchlaufs der Leiterplatten durch

die Reflow-Lötanlage kontinuierlich gespeichert und stellen auf diese Weise die Temperatur-Zeit-Kurven, das sog. Lötprofil, für ausgewählte Meßpunkte auf den Leiterplatten zur Verfügung.

8.1.2 Aufbau des Prüfdatennetzes zur Charakterisierung der Prozeßergebnisse

Parallel zur Erfassung der Prozeßdaten werden die eingehenden Materialien und die Zwischenschritte bis zur Fertigstellung der Baugruppe mit zerstörungsfreien Prüfverfahren charakterisiert. Im einzelnen gehen folgende Informationen in das Prüfdatennetz ein: Die Verarbeitungsfähigkeit der verwendeten Materialien ist von entscheidender Bedeutung für die resultierende Fertigungsqualität. Zur Charakterisierung der verwendeten Lotpasten gehen in das hier dargelegte Informationsmodell die mittels eines Rotationsviskosimeters bestimmten rheologischen Eigenschaften, die Analyse der Pastenkonsistenz mittels Mikroskop sowie die Ergebnisse eines Auspreßversuches ein. Zusätzlich werden die geometrischen Toleranzen der Bauelemente und Leiterplatten mit dem Meßmikroskop erfaßt und im Informationsmodell festgehalten. Das durch den Dosierprozeß auf die Leiterplatte aufgebraachte Lotdepot wird mit einem Lasertriangulationsverfahren berührungslos vermessen und die Parameter Versatz, Volumen und Form ermittelt (Bild 94). Nach dem Bestücken wird die Lage der Bauelemente relativ zu den Anschlußflächen auf der Leiterplatte bestimmt. Die resultierenden Informationen sind der Bestückversatz in x- bzw. y-Richtung sowie der rotatorische Versatz. Zusätzlich wird die Lage der Bauelementeanschlüsse in der Lotpaste visuell begutachtet. In Bild 95 ist am Beispiel eines Bauelements mit Rastermaß 0,5 mm dargestellt, wie die Bauelementanschlüsse in die Lotdepots eingepreßt sind. Da in der Regel beim Reflowlöten auf den Auftrag von Kleber zur Bauelementefixierung verzichtet wird, ist die so realisierte Haftung des Bauelements auf der Leiterplatte erwünscht. Wird jedoch zu viel Lot aufgebracht, treten Kurzschlüsse in Form von Lötbrücken nach dem Lötprozeß auf. Nach dem Lötprozeß wird die resultie-

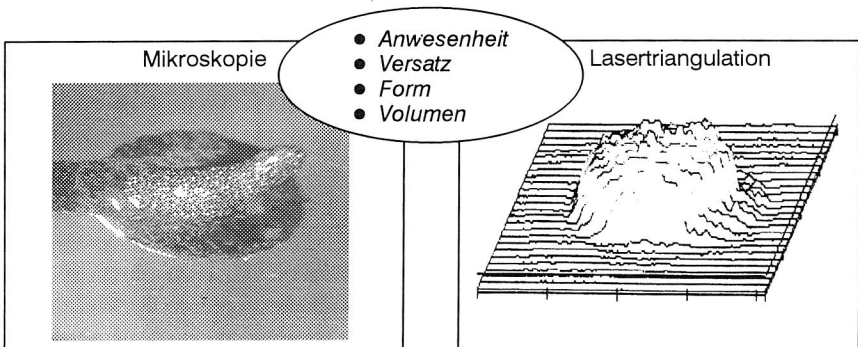


Bild 94: Vermessung der Lotdepots nach dem Dispensprozeß mit dem Verfahren der Lasertriangulation

rende Fertigungsqualität mittels visueller Inspektion unter dem Stereomikroskop sowie mittels Röntgendurchstrahlung analysiert. In das Informationsmodell gehen die aufgetretenen Lötfehler, z B. offene Lötstellen, Lötbrücken, schlechte Benetzung etc. ein.

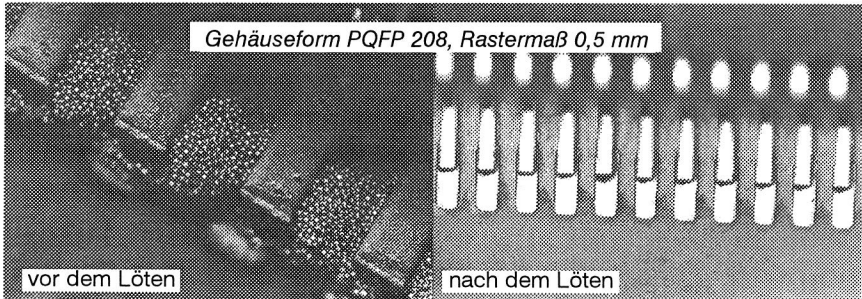


Bild 95: Mikroskopische Darstellung der in die Lotpaste bestückten Bauelementanschlüsse und resultierende Lötverbindung nach dem IR-Reflowlötén

8.1.3 Zusammenführung der Prozeß-und Prüfdaten im Informationsmodell

Das Informationsmodell für prozeßnahe Regelkreise hat die Aufgabe, die Daten aus den unterschiedlichen Quellen des Prozeß- und Prüfdatennetzes zusammenzufassen und zu verwalten (vgl. Kap. 3). In Bild 96 sind die Einflußparameter der Eingangsmaterialien dargestellt, die die Lotpaste, die Leiterplatte und die Bauelemente betreffen. Diese Parameter beeinflussen die Prozesse des Dispensens von Lotpaste, des Bestückens und des Lötens, die ebenfalls im Bild aufgezeigt werden. Eingangsparameter der Lotpaste, wie die Viskosität, korrelieren mit weiteren Parametern wie beispielsweise dem Auspreßverhalten und werden im weiteren noch von Prozeßparametern wie der Temperatur und dem Druck beeinflusst. Um eine konsistente Aufschlüsselung der Beziehungen der Material- und Prozeßparameter zueinander zu erhalten, werden die Korrelationen analysiert und im Informationsmodell abgebildet. Der physische Aufbau des Informationsmodells erfolgt mit einer zentralen, relationalen Datenbank. Die zentrale Stellung der Datenbasis ermöglicht zum einen die Aufnahme der Daten aus den einzelnen Prozeßschritten und zum anderen die einfache Bereitstellung der Daten für die Prozeßanalyse. Aufgrund der zentralen Stellung der Datenbasis ist eine durchgängige Verfolgung der eingesetzten Materialien sowie des Fertigungsablaufes und der beteiligten Prozesse möglich.

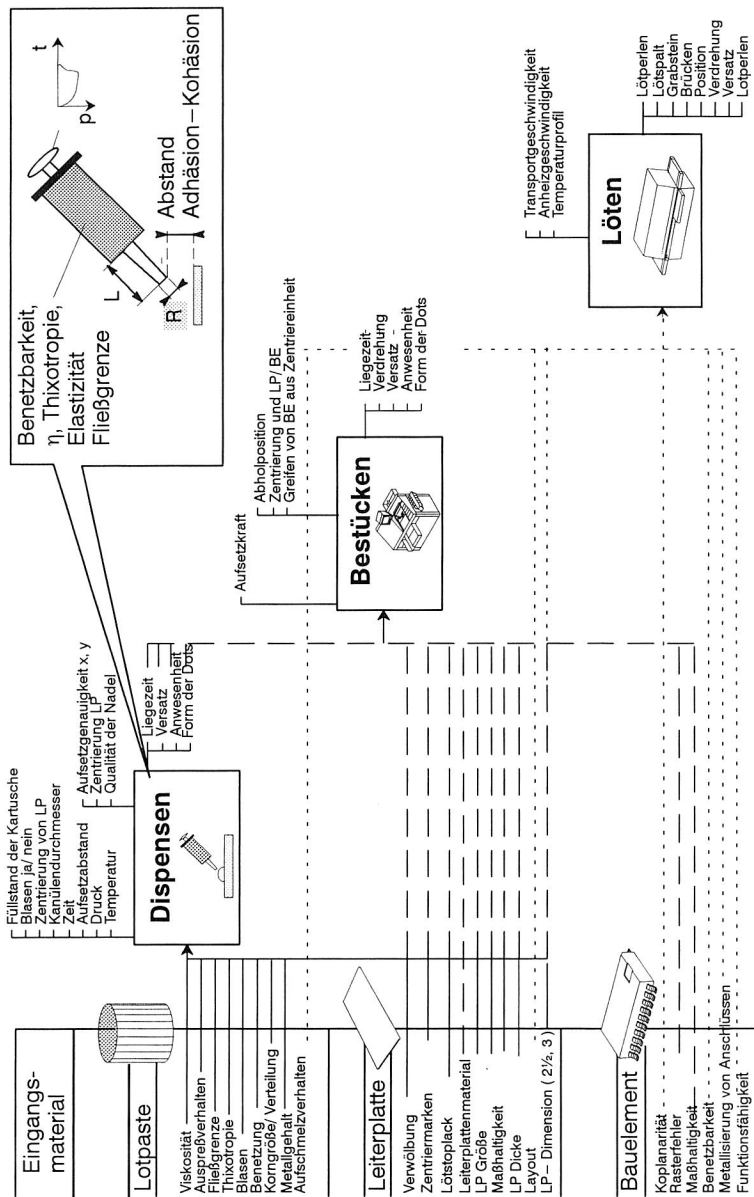


Bild 96: Auswahl aus den im Informationsmodell vernetzten Prozeß- und Prüfdaten der Prozesse Dispensen - Bestücken - Löten

8.1.4 Analyse von Prozeßabhängigkeiten

In der so aufgebauten Versuchsumgebung wurden zunächst während des Fertigungsbetriebs Informationen durch die Beobachtung der Fertigungsprozesse gesammelt und die bereits entwickelten Einflußgrößendiagramme, Prozeß-FMEA und Fehlerbaumanalysen detailliert. Als Schwerpunkt für die weitere Betrachtung kristallisiert sich der Prozeßschritt Lotpastenauftrag heraus, der insbesondere bei kleinen Bauelementerastermaßen offensichtlich die resultierende Fertigungsqualität maßgeblich beeinflusst. Auf Basis des vorliegenden Informationsmodells wurde mit den Werkzeugen zur methodischen Versuchsplanung ein Versuchsprogramm konzipiert und durchgeführt [133]. Die Ergebnisse sind im folgenden dargestellt.

Da für die Optimierung des vorliegenden Prozeßschrittes Lotpastenauftrag mittels Dispensen relativ wenig gesicherte Erkenntnisse über die tatsächlichen Einflußgrößen und deren Wechselwirkungen existierten, wurde folgende Vorgehensweise beschritten. Zunächst werden die Untersuchungsschwerpunkte durch eine Abschätzung des Einflusses einzelner Parameter festgelegt. Diese ausgewählten Faktoren werden einfaktoriell untersucht. Zur genaueren Untersuchung wird anschließend für die wichtigsten Variablen, d.h. für die im Rahmen der Experimente beeinflussbaren Parameter, ein vollfaktorieller Versuch durchgeführt. Der resultierende Versuchsplan besteht aus dem unten genannten Versuchsprogramm, das teils einfaktoriell, teils vollfaktoriell durchgeführt wird. Hierbei werden einzelne Versuchsergebnisse bei der Durchführung der jeweils folgenden Versuche berücksichtigt.

- Lotpastenvergleich
- Auspreßtest
- Einfluß der Dosiernadelform
- Einfluß der Nadellänge
- Einfluß des Abstands zwischen Leiterplatte und Dosiernadel
- Klassifizierung der Dotformen
- Parametereinstellungen für einen Zeit/Druck - Kartuschen Dispenser
- Vollfaktorielle Untersuchung der Parameter Dosierdruck, Dosierzeit, Nadellänge und Nadeldurchmesser
- Beurteilung der Ergebnisse nach dem Bestückungs- und Lötvorgang

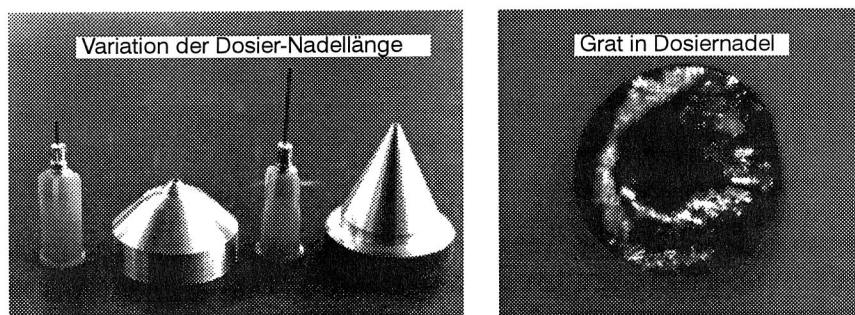


Bild 97: Kritische Einflußfaktoren Dosiernadellänge und Grate in der Dosiernadel

Nachdem mittels Auspreßtests geeignete Lotpasten für die weiteren Versuche ermittelt und wesentliche prinzipielle Einflußfaktoren der Fertigungs-ausrüstung in Form von einfaktoriellen Versuchen analysiert wurden, wird das Zusammenwirken der wesentlichen Kriterien Dosierdruck, Dosierzeit, Nadellänge und Nadeldurchmesser in einem vollfaktoriellen Versuchsprogramm untersucht, um Aufschluß über mögliche Wechselwirkungen der Einstellparameter geben zu können. Für alle Faktoren werden zwei Einstellwerte festgelegt, die auf Grund der vorangegangenen Versuche als sinnvolle obere bzw. untere Einstellwerte erscheinen. Als Versuchsergebnisse sind vor allem der Lotdepottdurchmesser und die Dosiersicherheit bzw. die Ausfallrate wichtig. Daher wird neben der Erfassung dieser einzelnen Ergebnisgrößen (Y1, Y2), die für sich gesehen nur ungenügende Aussagen liefern, eine kombinierte Zielgröße (Y12) geschaffen. Sie wird gebildet, indem der ermittelte Lotdepottdurchmesser, der in 10^{-1} mm angegeben ist, mit der Ausfallrate in % summiert wird. Die kombinierte Zielgröße stellt ein Maß für die Qualität des Dispensens für Bauelemente mit kleinen Rastermaßen dar. Je kleiner die Zielgröße ist, um so besser ist das Ergebnis zu bewerten. In Tabelle 4 sind die wesentlichen Ergebnisse zusammengestellt. Neben den Einstellparametern beim Dispensieren sind der Lotdepottdurchmesser d_i und die Aussagen über eine gegenseitige Berührung der einzelnen Depots vor und nach dem Aufsetzen der Bauelemente festgehalten. Ein einfaches Bewertungsschema gibt Aufschluß über die Güte der Lotverbindungen, wobei zu berücksichtigen ist, daß hier eine visuelle Sichtprüfung mit dem Mikroskop bzw. mittels Röntgenanalyse durchgeführt wurde, jedoch keine zerstörenden Prüfverfahren angewendet wurden. Das Bewertungssystem ist so aufgebaut, daß "+" für eine gute, "-" für eine schlechte und "0" für eine neutrale Wertung stehen. Da die Bildung von Lotbrücken das Ergebnis als Totalausfall kennzeichnen, werden die schlechten Wertungen dieser Art mit "---" bzw. bei mehr als 5% Brücken mit "----" bewertet.

Dispensparameter				Dispensergebnisse			Lötergebnisse			
d [mm]	p [bar]	t [ms]	Lage z. Transp. richtung	d [mm]	Berührung der Dots nach dem Dispensen	Berührung der Dots nach dem Bestücken	Brücken- bildung	Lotme- niskus	Poren	Löter- gebnis (Fazit)
0,33	2,50	80	quer	0,50	keine	keine	+	–	–	–
0,33	2,50	80	längs	0,50	keine	keine	+	–	0	0
0,33	2,50	80	schräg	0,50	keine	keine	+	–	0	0
0,33	3,00	130	quer	0,75	gering	gering	+	+	0	+ +
0,33	3,00	130	längs	0,75	mäßig	mäßig	– –	+	0	– –
0,33	3,00	130	schräg	0,75	gering	mäßig	– –	+	0	–
0,41	3,00	130	quer	0,90	mäßig	völlig	– – –	+	0	– –
0,41	2,25	130	längs	0,75	gering	mäßig	– –	+	0	–
zwei Dots nebeneinander auf einem Pad:										
0,41	2,50	90	quer	0,65	keine	gering	+	+	+	+ +
0,41	2,50	90	längs	0,65	gering	mäßig	+	+	+	+ +
0,33	2,50	90	quer	0,55	keine	gering	+	0	+	+
0,33	2,50	90	längs	0,55	keine	gering	+	0	+	+

Tabelle 4: Zuordnung der Lötergebnisse zur Bestimmung optimaler Dispensparameter

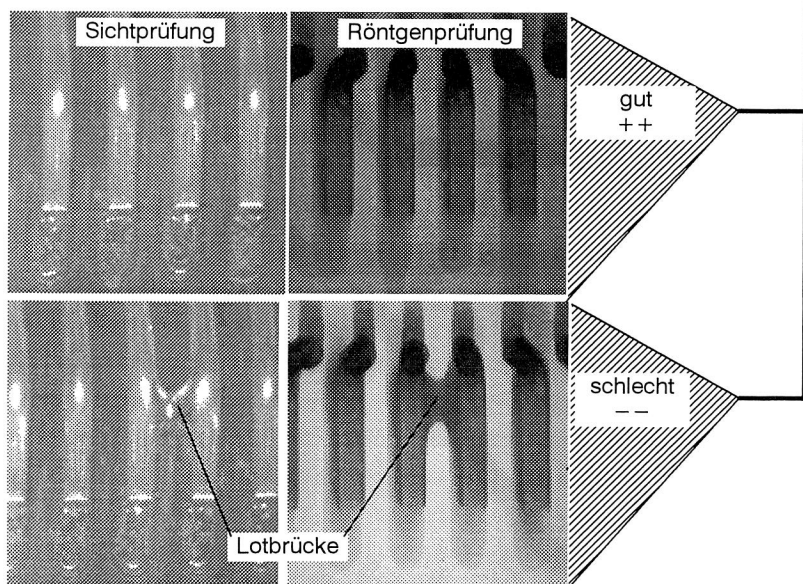


Bild 98: Versuchsplan und Auswertung der Ergebnisse zur Ermittlung optimaler Einstellparameter für den betrachteten Dispensprozess

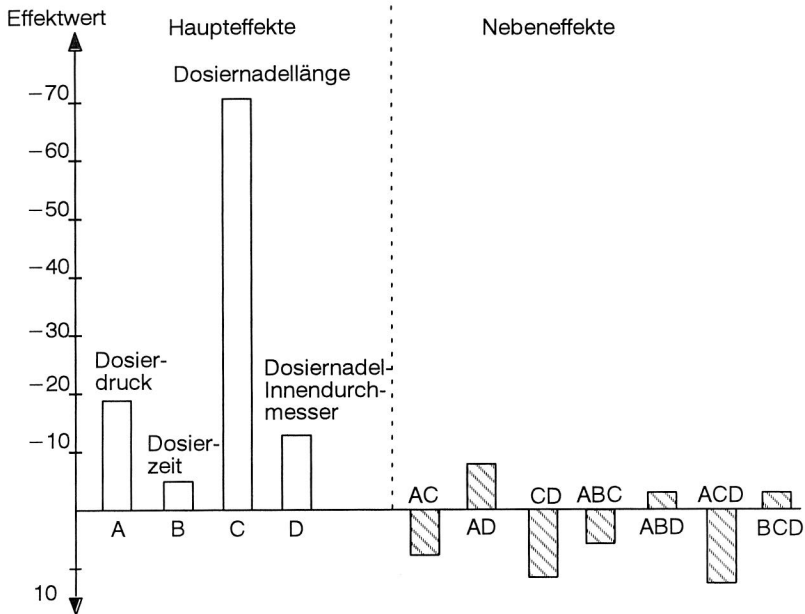


Bild 99: Bestimmung der Haupteinflussfaktoren auf das Dosierergebnis und die resultierende Lötstellenqualität

8.1.5 Maßnahmen zur Steigerung der Prozeßsicherheit

Um die Ergebnisse der vorangegangenen Versuche zusammenzufassen, und um dem Anwender eine Übersicht über die optimalen Einstellgrößen des Dispensers zu geben, wurden Nomogramme entworfen (s. Bild 100). In der oberen Hälfte des Nomogramms kann abgelesen werden, welchen Durchmesser die Lotdepots haben dürfen, damit bei einem vorgewählten Raster keine Brücken entstehen. Da bedacht werden muß, daß beim Lotpastenauftrag durch Dispensieren Durchmesser-schwankungen von bis zu 0,1 mm auftreten können, sollten die Lotdurchmesser möglichst niedrig gewählt werden. Um das erforderliche Lotvolumen aufzubringen, sind daher zwei Lotdepots nebeneinander auf der Längsachse der Lotanschlußflächen zu setzen. In der unteren Hälfte der Grafik kann für den ausgewählten Lotdepotdurchmesser eine zugehörige Einstellung des Dosierdrucks und der Dosierzeit ausgewählt werden. Bei Bauelementen, deren Anschlüsse eine längere Auflage auf den Lotanschlußflächen haben, können die Depots auch versetzt aufgetragen werden. In diesem Fall kann dann auch ein größerer Depotdurchmesser gewählt werden.

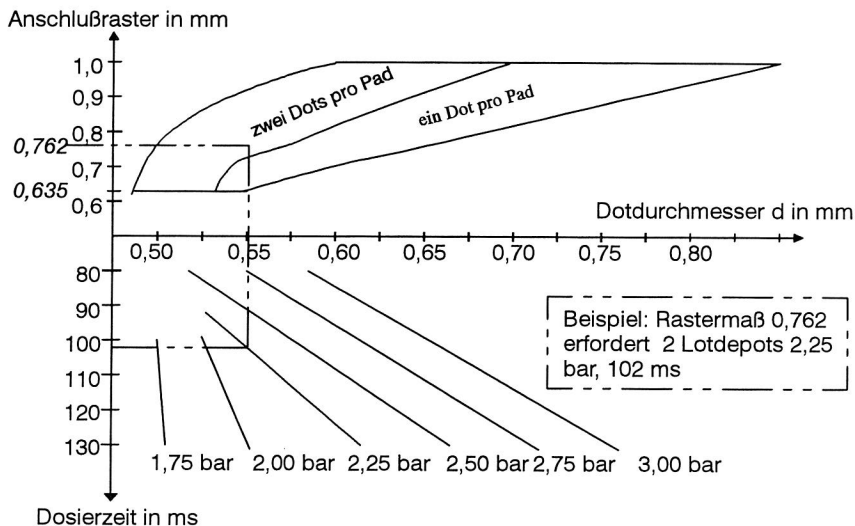


Bild 100: Parameterfeld für den untersuchten Lotpastendispenser zur Erzielung optimaler Verbindungsqualität

8.2 Anwendung in der Serienproduktion elektronischer Produkte

Die in Kapitel 3 vorgeschlagene Methodik zur Analyse und Regelung von Ursache-Wirkungsketten wurde in Zusammenarbeit mit verschiedenen industriellen Anwendern erprobt und weiterentwickelt. Kritische Punkte bei der Anwendung der Methodik in der industriellen Praxis sind in der Regel massive Beschränkungen in punkto Zeit und Kosten bei der Durchführung einer prozeßübergreifenden Analyse der Wirkzusammenhänge. Ziel der gemeinsam mit verschiedenen Industrieunternehmen durchgeführten Untersuchungen war, die Übertragbarkeit des Modells und der in der Laborumgebung entwickelten Werkzeuge auf industrielle Anwendungen sicherzustellen.

8.2.1 Optimierung in der Produktion von ABS-Beschleunigungssensoren

Im Rahmen eines mit einem Industrieunternehmen vereinbarten Optimierungsprojektes wurde die Methodik zur Sicherung der Prozeßfähigkeit bei einem sicherheitskritischen Klebevorgang in der Produktion von ABS-Beschleunigungssensoren angewandt. Für das Funktionsprinzip des betrachteten Beschleunigungssensors ist ein Magnet als seismische Masse auf eine Feder montiert. Im Falle von Beschleunigungsvorgängen wird die Bewegung der seismischen Masse als magnetische Feldänderung mittels eines Hall-Elements in einer Hybridelektronikbaugruppe erfaßt. Die Verbindung zwischen Magnet und Metallfeder erfolgt durch Kleben. Durch zerstörende Prüfung wurde in der Vorserienfertigung eine große Streuung der Festigkeit der Klebeverbindungen festgestellt. Da es sich um ein sicherheitsrelevantes Automobilzulieferprodukt handelt, war das Ziel die Schaffung eines prozeßfähigen Arbeitsablaufes zur Sicherstellung der kritischen Verklebung.

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Durchführung des Vorhabens ist in Bild 101 dargestellt. Zunächst wurden die wesentlichen Einflußfaktoren strukturiert und in Form von Fischgrätdiagrammen und in der Prozeß-FMEA dokumentiert. In dieser Phase wurden die Ergebnisse durch umfangreiche Recherchen unterstützt, z. B. durch Auswertung der einschlägigen Literatur und Interviews mit Erfahrungsträgern in Zentralabteilungen und anderen Bereichen des Unternehmens. Auf Basis der Vorarbeiten wurde ein Prozeß- und Prüfdatennetz konzipiert und Messungen der Prozeßparameter und Prüfungen der resultierenden Produktqualität durchgeführt. In der Anfangsphase konnten bereits erste Sofortmaßnahmen zur Stabilisierung des Prozesses getroffen werden, wie z. B. geänderte Arbeitsanweisungen, Einführung definierter Lagerbedingungen für die verwendeten Klebstoffe (FIFO-Prinzip, Gebrauchsdauer und Reduzierung der Topfzeiten), Oberflächenvorbehandlung der Fügepartner und geänderte Wartungsvorschriften für die Dosiereinrichtungen.

In der Folge wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit insgesamt 29 Versuchen zu den Schwerpunkten Dosiersystem für den Kleberauftrag, Aushärtemechanismus und Oberflächeneigenschaften der Fügepartner systematisch geplant und durchgeführt. Auf der Basis der Untersuchungen mußten vordringlich verschiedene Maßnahmen zur Sicherstellung klebegerechter Oberflächeneigenschaften getroffen werden. Die für den anaeroben Aushärtemechanismus verwendeten Ofenparameter erwiesen sich im vorliegenden Falle als bereits optimiert. Mittelfristig waren Entscheidungen bzgl. der verwendeten Dosiersysteme erforderlich, um die wesentliche Einflußgröße konstante Dosiermenge maschinentechnisch sicherzustellen. Zusammenfassend konnte die Prozeßfähigkeit durch die aus den Untersuchungen abgeleiteten Maßnahmen signifikant verbessert werden.

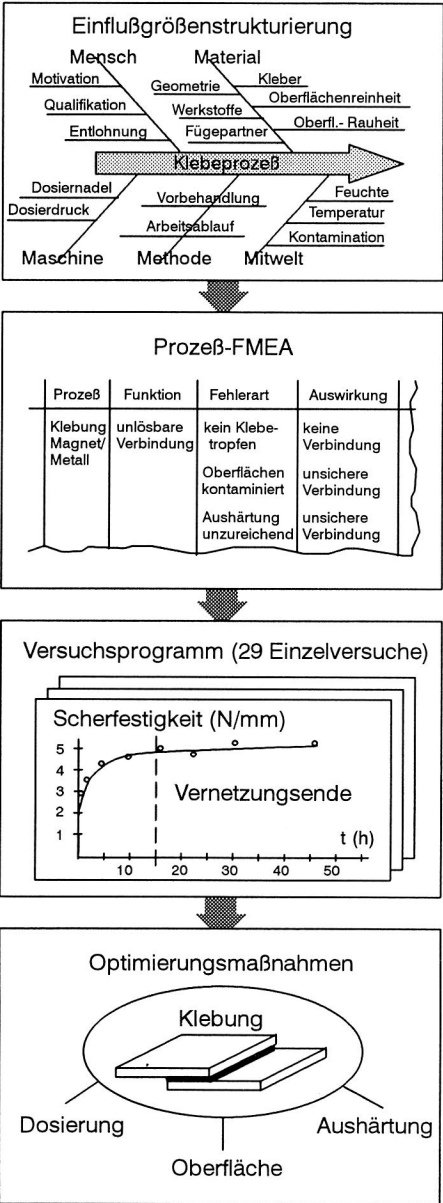
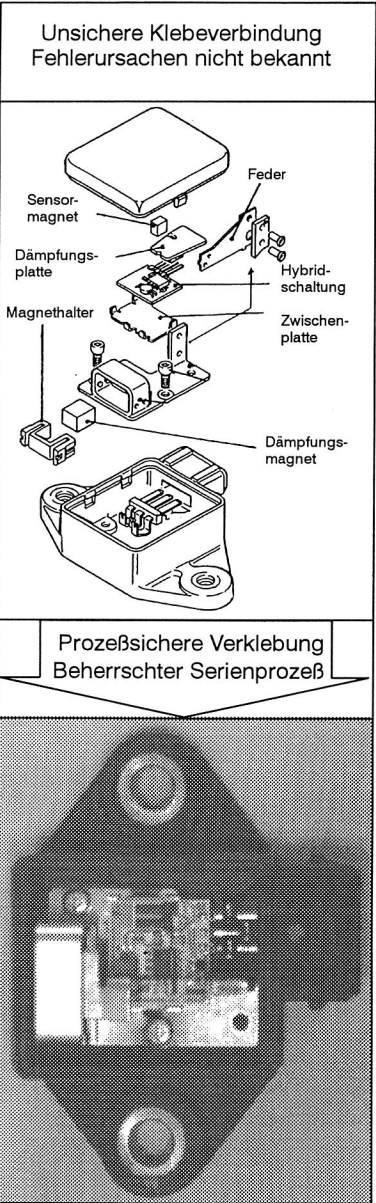


Bild 101: Anwendung der Methodik zur systematischen Prozeßoptimierung von Klebeverbindungen in sicherheitskritischen Baugruppen der Automobilelektronik

8.2.2 Übergreifende Prozeßoptimierung in einer Rechnerbaugruppenfertigung

In einem weiteren praktischen Anwendungsfall wurden die entwickelten Werkzeuge bei einem Computerhersteller auf die Produktion von komplexen Rechnerbaugruppen für Personal Computer und Workstations angewandt [134]. Die dort gefertigten Baugruppen unterliegen aufgrund der weltweiten Konkurrenzsituation für die weitgehend standardisierten Produkte einem hohen Kostendruck. Gleichzeitig sind die Anforderungen an die Qualität der Produkte ebenfalls sehr hoch, insbesondere um den preislich attraktiveren Markt für industrietaugliche Rechnerbaugruppen bedienen zu können. Die zu analysierende Baugruppenproduktion ist in drei Fertigungslinien aufgeteilt. Eine erste Analyse der Fehlerschwerpunkte zeigte Schwachstellen insbesondere im Umfeld der eingesetzten Wellenlötprozesse auf. Es kommen sowohl konventionelle Wellenlötanlagen als auch Stickstoffwellenlötanlagen zum Einsatz. Eine Zuordnung der Fertigungsfehler zu den einzelnen Anlagen oder aber anderen vor- oder nachgelagerten Fertigungsschritten war mit den beim Anwender verfügbaren Mitteln jedoch bisher nicht gelungen. Daher sollte mit der Methode der prozeßintegrierten Qualitätssicherung eine eingehende Analyse der Prozeßkette durchgeführt werden, um die Qualitätsausbeute der Fertigungslinien nachhaltig zu steigern.

Die hohen Kosten für einzelne Baugruppen, der hohe Maschinenstundensatz der kapitalintensiven Anlagen und die Auslastung der Linien im Dreischichtbetrieb hatten zur Folge, daß die Durchführung der Analyse mit den Anforderungen einer laufenden Fertigung verträglich gestaltet werden mußte. Ziel des Vorhabens war die Steigerung der Prozeßqualität und die Vermeidung "zufälliger" Prozeßschwankungen. Dazu sollten im wesentlichen alle Einfluß- bzw. Störparameter und deren Wechselwirkungen erfaßt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Qualität der Lötprozesse bewertet werden. In Form eines Prozeßmodells sollten alle prozeßbestimmenden und qualitätsrelevanten Informationen zur Beschreibung des Wellenlötens auf eine strukturierte datentechnische Sicht abgebildet werden. Dabei müssen die Prozeßwerte der vorgelagerten Prozeßschritte berücksichtigt werden. Für den praktischen Einsatz in der Fertigung sollten aus den gewonnenen Erkenntnissen detaillierte baugruppenspezifische Einstellvorgaben für die Maschinenbediener abgeleitet werden. Gemäß der in Kapitel 3.3 (s. Seite 37ff) aufgezeigten Vorgehensweise erfolgte die Prozeßoptimierung in drei Phasen.

Phase 1: Analysephase

Zur Bewertung der eingesetzten Maßnahmen ist es zunächst erforderlich, eindeutige Merkmale zur Quantifizierung der Prozeßlage zu definieren. Aufgrund der zahlreichen Fehlermöglichkeiten ist es in diesem Fall sinnvoll, die üblichen Kenngrößen zur qualitativen Beurteilung von Leiterplatten als Zielgrößen heranzuziehen. Diese Qualitätskennwerte sind:

1. Verschmutzung der Leiterplatte
2. Anzahl offener Lötstellen
3. Anzahl der Zinnschlieren
4. Anzahl der Zinnschlüsse (Lötbrücken)
5. Anzahl und Grad fehlerhaft platzierter oder fehlender Bauelemente

Während die ersten vier Zielgrößen im wesentlichen durch die Prozeßparameter beim Wellenlötprozeß bestimmt werden, werden fehlerhaft platzierte Bauelemente überwiegend durch Einflüsse in vorgelagerten Prozessen (Kleberauftrag, Bestücken) verursacht. Da im Rahmen der hier beschriebenen Vorgehensweise schwerpunktmäßig der Wellenlötprozeß im Mittelpunkt der Optimierungsbemühungen steht, werden bei der Beurteilung der Prozeßergebnisse primär die ersten vier Zielgrößen berücksichtigt. Um aussagekräftige Vergleichswerte zu erhalten, ist die reproduzierbare Erfassung der Kenngrößen eine grundlegende Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz bewertender Methoden. Die Fehler Lötstellen, Zinnschlieren und Zinnschlüsse werden mit den in der Fertigungslinie vorhandenen Qualitätskontrollen (visuelle Prüfung, In-Circuit-Test und Funktionstest) festgestellt. Die Erfassung der Verschmutzung erfolgt über die Ionenvergleichsmessung.

Einflußgrößen	Einstellparameter	Störgrößen
Lötmaschinen Leiterplattenvolumen Leiterplattendicke Leiterplattenlayout Fluxerart Flußmittelart Lotzusammensetzung Lötstoplack	Schaumfluxer <ul style="list-style-type: none"> • Luftvoreinstellung • Luftfeineinstellung • Absaugabstand Sprühfluxer: <ul style="list-style-type: none"> • Voreinstellung • Verfahrenweg Transportgeschwindigkeit über Fluxer, Vorheizung, Lotwelle Vorheizzonen: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatur Lotwelle: <ul style="list-style-type: none"> • Motordrehzahl • Fließgeschwindigkeit • Wellenhöhe • Lötwinkel Lot: <ul style="list-style-type: none"> • Lottemperatur 	Peripherie: <ul style="list-style-type: none"> • Verunreinigungen • Bedienpersonal • Lötrahmen • Schattenbildung • Greifrahmen • Netzschwankungen Fluxer: <ul style="list-style-type: none"> • Flußmittelauftragsmengenschwankung • Absaugleistungsschwankung • Absaugabstand Lotwelle: <ul style="list-style-type: none"> • Schwankung der Lotwellen-Drehzahl • Schwankungen der Lotwellenhöhe • Lotniveauschwankung

Tabelle 5: Auszug aus den im Informationsmodell hinterlegten Einfluß- und Störgrößen beim Wellenlötprozeß

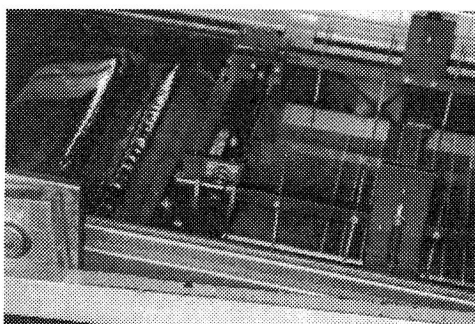
Zunächst wurden die vorliegenden Informationen, Datenbestände, Statistiken usw. zusammengetragen. Dieser Schritt dient der vollständigen Sammlung möglicher Einfluß- und Störgrößen sowie Einstellparameter. Dabei wurden als Informationsquellen Systemhersteller, Anwender, Anlagenbediener, Literaturquellen berücksichtigt und umfangreiche Prozeßbeobachtungen durchgeführt. Die Auswertung statistischer Daten und die Kenntnisse über veränderte Randbedingungen in der Vergangenheit waren dabei ein wichtiger Bestandteil. Tabelle 5 zeigt eine kleine Auswahl der erkannten Einfluß- und Störgrößen sowie Einstellparameter. Zur Gewichtung der Einflußgrößen wurde auf der Basis dieser Daten eine systematische Analyse der Schwachstellen in Form einer Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse (FMEA) durchgeführt. Neben den eingesetzten Hilfs- bzw. Betriebsstoffen machen sich sowohl bei den Lötanlagen als auch bei den Fluxersystemen die anlagenspezifischen Besonderheiten besonders stark bemerkbar. Dadurch erhöht sich zwangsläufig der Aufwand zur Untersuchung aller beteiligten Komponenten. Ziel dieser Maßnahmen ist die strukturierte Darstellung und Bewertung aller erkannten Einfluß- und Störgrößen sowie Wechselwirkungen und deren Signifikanz für die betrachteten Qualitätskenngrößen.

Phase 2: Versuchsdurchführung

Die ersten Ansatzpunkte bei der Schwachstellenanalyse betreffen die Wartung und Bedienung der Maschinen und die visuelle Prüfung. Mit der Bildung von Qualitätszirkeln werden organisatorische Umstrukturierungen durchgeführt, die in der Reduzierung der Reaktionswege - von der Erkennung von Qualitätsproblemen bis zu ihrer Behebung - resultieren. Zur Systematisierung der Korrekturmaßnahmen werden detaillierte Maschinenprotokolle und klare Orientierungshilfen für das Prüfpersonal eingeführt. Bei der Sichtprüfung bestehen diese beispielsweise aus Mikroskopaufnahmen mit typischen guten, akzeptablen und schlechten Lötergebnissen. Damit wird der aktuelle Zustand der Anlage fortlaufend erfaßt und mit eindeutigen Prüfergebnissen korreliert. Neben der Sensibilisierung des Bedienpersonals werden dadurch reproduzierbare Versuchsbedingungen sichergestellt sowie umfangreiche und aussagekräftige Prozeßdaten erfaßt.

In der nächsten Stufe werden die einzelnen Lötanlagen und deren Peripherieeinrichtungen analysiert. Dabei sind unzulässige Toleranzen der verwendeten Löt- bzw. Greifrahmen, unzureichende Einstellmöglichkeiten oder fehlende Skalen zu beanstanden. Die Anbringung zusätzlicher Justiervorrichtungen, Meßuhren und exakter Einstellskalen schafft die Voraussetzungen für reproduzierbare Maschineneinstellungen. So wird beispielsweise eine Skala zur Überwachung des Lotniveaus angebracht. Neben der Fließgeschwindigkeit ist dieser Wert besonders wichtig, da Lotniveau und Motordrehzahl die Wellenhöhe bestimmen, aus der sich die maßgebliche Wellenkontaktbreite ergibt. Die Überprüfung der Skalierung erfolgte mit Hilfe einer temperaturbeständigen Glasplatte, auf der parallele Striche mit einer

speziellen, wärmeaushärtenden und hitzebeständigen Leiterplattenfarbe aufgebracht sind (Bild 102). Ein weiterer wichtiger Prozeßkennwert ist der Temperaturverlauf auf der Leiterplatte, der im wesentlichen von den Vorheizzonen und der Transportgeschwindigkeit bestimmt wird. Zur Kontrolle des Temperaturprofils wurden Temperaturschleppversuche unternommen. Dazu werden auf der Leiterplattenoberseite Thermofühler und ein Data-Pack zur Erfassung und Speicherung der Meßwerte aufgebracht. Die Auswertung der Meßwerte erfolgt anschließend auf einem PC. Bild 102 zeigt typische Temperaturverläufe auf der Boardunterseite (1), der Boardoberseite (2) und auf einem Bauteil (3).



Transportgeschwindigkeiten [cm/min]
Temperatur der Vorheizzonen [°C]:
Temperatur des Lötbaades [°C]:
Chipwelle:
Deltawelle:

V1=80 V2=80 V3=100
300 300 300 310 320 320
235
513 U/min 650 Skala
789 U/min 850 Skala

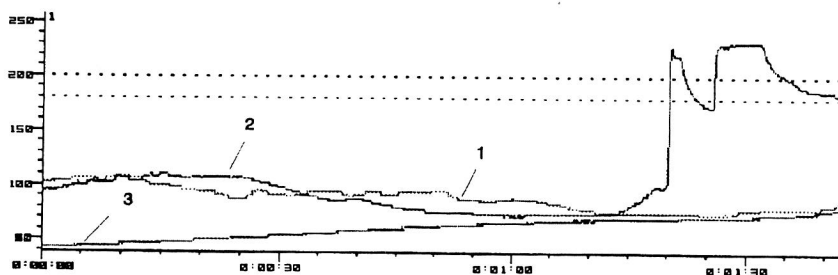


Bild 102: Vorbereitende Analysen zur Stabilisierung der Prozesse im Vorfeld methodischer Versuchsdurchführungen

Weiterhin wurde das Auftreten von Lotperlen mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme untersucht. Dabei wurden im wesentlichen zwei Ursachen für diese Fehlerquelle festgestellt. Zum einen führen fehlerhafte Justiervorgänge, verrutschte Dichtungen oder Verschmutzungen innerhalb der Lotkanäle zu einem unregelmäßigen Fließverhalten der Lötwellen und damit der Emittierung von Lotperlen. Darüber hinaus werden aus der Schmelze heraus Lotperlen emittiert, die durch den Impuls des herabstürzenden Lotes verursacht werden. Durch die Anbringung zusätzlicher

Lochbleche oder Abdeckungen in diesen Bereichen konnte dieser Effekt spürbar reduziert werden.

Statistische Versuchsplanung Versuch 1

Einstellparameter:	Einheit	+	-
1) Transportgeschw. V2	cm/min	100	80
2) Lötwinkel	°	8	6.5
3) Kontaktbreite Chipw.	mm	2	0
Kontaktbreite Deltaw.	mm	5	3.5
4) Vorheizzone 1	°C	270	250
Vorheizzone 2	°C	280	270
Vorheizzone 3	°C	320	285
Vorheizzone 4	°C	350	300

Konstante Parameter:	Einheit	Wert
1) Transportgeschw. V1	cm/min	80
2) Absaugungsabstand	cm	2.3
3) Löttemp.	°C	245
4) Löt niveauhöhe	cm	1.7
5) Fluxereinstellung	bar	2
6) Fluxereinstellung	%	60
7) Fluxerauftragsmenge	konstant	

Mittelwerte der Zielgrößen der 16 Einstellungen

Einstellung	Verwendete Einst. für	Einstellparameter				Verschmutzung $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ NaCl	Anzahl der offenen Lötstellen	Anzahl der Zinnschlüsse	Anzahl der Zinnschlieren
		1	2	3	4				
1	V	T	Ta	-	-	1.09	0.1	1.0	1.4
2	V			+	-	2.25	0.0	Ta 1.0	4.7
3	V			-	+	4.09	1.4	1.0	Ta 6.2
4	V	T	Ta	+	-	3.8	0.8	1.0	1.3
5	V			-	-	0.96	0.2	1.0	4.5
6	V	T	Ta	+	+	1.12	0.0	1.1	8.9
7	V	T	Ta	-	+	1.39	0.0	1.1	3.7
8	V			+	-	3.18	0.6	1.0	11.5
9	V		Ta	-	-	1.45	0.0	0.6	0.6
10	V	T		+	-	3.05	0.0	0.7	0.0
11	V	T		-	+	1.55	0.0	0.9	V/T 0.4
12	V		Ta	+	-	1.9	0.3	1.0	0.1
13	V	T		-	-	B/V/T/Ta 0.8	B/V/T/Ta 0.0	1.2	B 0.0
14	V		Ta	+	+	0.7	0.0	1.66	50.0
15	V		Ta	-	+	1.45	0.0	5.4	0.8
16	V	T		+	-	1.4	0.0	3.3	0.0

Vollfaktorielle Auswertung: (V)

Teilfaktorielle Auswertung: (T)

Auswertung Taguchi: (Ta)

Beste Einstellungen aller vier Zielgrößen: (B)

x	1.87	0.21	1.44	5.89
s	1.05	0.39	1.22	12.2

Ergebnisse der Statistischen Versuchsplanung

	Geschw. über der Welle	Lötwinkel	Kontaktbreite über der Welle	Vorheizzeiten	Geschw. über der Welle	Lötwinkel	Kontaktbreite über der Welle	Vorheizzeiten	Geschw. über der Welle	Lötwinkel	Kontaktbreite über der Welle	Vorheizzeiten	Geschw. über der Welle	Lötwinkel	Kontaktbreite über der Welle	Vorheizzeiten
Einstellungsvorschlag Vollfaktoriell:	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
Einstellungsvorschlag Teilfaktoriell:	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
Einstellungsvorschlag Taguchi:	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+

Bild 103: Versuchsplan und Versuchsauswertung bzgl. der Wechselwirkungen beim untersuchten Wellenlötprozeß

Trotz konstanter Prozeßbedingungen traten jedoch immer noch markante Qualitätssprünge auf. Deshalb wurde auf die Methoden der Statistischen Versuchsplanung zurückgegriffen, um zum einen den Einfluß als signifikant betrachteter Parameter zu bestätigen und zum anderen weitere Einflüsse oder Wechselwirkungen zu ermitteln.

Neben der eigentlichen Analyse der einzelnen Einflußgrößen sollten die alternativen Verfahren hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Grenzen gegenübergestellt werden. Die Verwendung vollfaktorieller Versuchsmatrizen hat den Vorteil, daß die Auswertematrizen der alternativen Verfahren abgeleitet und unmittelbar gegenübergestellt werden können. Nachteilig an der klassischen Methode ist der fakultative Zusammenhang zwischen Anzahl der Parameter und Versuchsläufe (2^k). Mit der Anzahl von fünf Parametern werden in der Regel die Grenzen des praktischen Einsatzes erreicht. Da relativ viele Parameter untersucht werden sollten, wurden zwei vollfaktorielle Versuchspläne mit jeweils vier Parametern durchgeführt. Dabei wurden Parameter mit erwartungsgemäß geringen Wechselwirkungseffekten in einem Versuchsplan untersucht.

Die Bewertung der Auswertematrizen erfolgte jeweils einzeln für alle vier Zielgrößen. In Bild 103 werden Parameter, Einstellwerte, Versuchs- und Auswertematrizen und Ergebnisse der konkurrierenden Methoden in Abhängigkeit von der jeweiligen Zielgröße gegenübergestellt. Übereinstimmungen werden besonders bei der voll- und teilfaktoriellen Versuchsplanung deutlich. Die Methode nach Taguchi führte häufig zu abweichenden Einstellvorgaben. Es hat sich gezeigt, daß trotz des erhöhten Aufwandes den vollfaktoriellen Versuchsplänen der Vorzug zu geben ist, da die statistische Zuverlässigkeit der gewonnenen Daten gewährleistet ist. Die sichere Auswertung hochvermengter Versuchspläne setzt zum einen so hohe Prozeßkenntnisse voraus, daß der Aufwand für umfangreiche Versuche in der Regel nicht gerechtfertigt erscheint. Zudem konnte nachgewiesen werden, daß die Ergebnisse bei hochvermengten Versuchsplänen allein durch die willkürliche Festlegung der Parameterreihenfolge entscheidend beeinflusst werden. Nach der Auswertung und Umsetzung der gewonnen Erkenntnisse konnte das Prozeßergebnis beim Wellenlöten dauerhaft verbessert werden. Die Ergebnisse spiegeln sich in der zeitlichen Entwicklung der Fehlerrate wider (Bild 104), denen die einzelnen Phasen der integrierten Vorgehensweisen überlagert werden.

Phase 3: Optimierungsmaßnahmen

Die Beseitigung erkannter Schwachstellen führte bereits zu einer deutlichen Stabilisierung der Lötprozesse. In der Phase der anlagenspezifischen Änderungen werden die Systemhersteller besonders stark mit in die Optimierungsbemühungen integriert. Parallel zu diesen Änderungen werden z.B. die herstellerspezifischen Wartungs- bzw. Reinigungsvorschriften überarbeitet und entsprechend modifiziert.

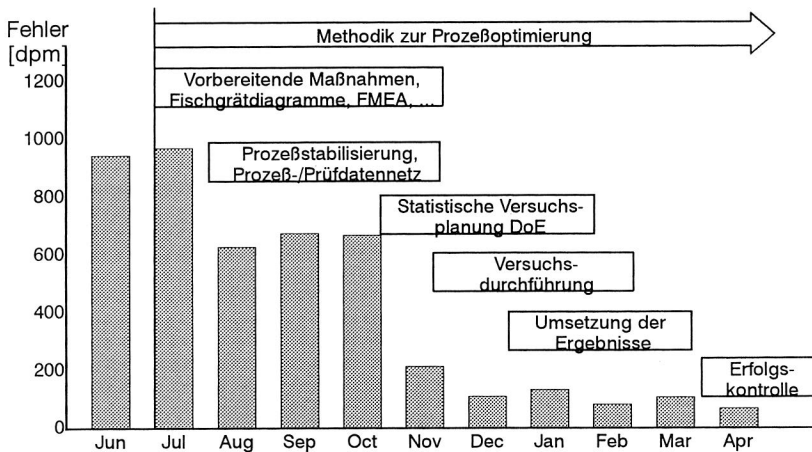


Bild 104: Fehlerentwicklung während der methodischen Prozeßoptimierung (Fehler gemessen in dpm bei Sichtprüfung, Incircuit-, und Funktionstest)

Der Verlauf der Kurve macht deutlich, daß allein durch vorbereitende prozeßtechnische und organisatorische Maßnahmen die Prozesse stabilisiert und damit die Fehleranteile deutlich reduziert werden konnten. Der Einsatz der Statistischen Versuchsplanung wird durch die verbleibenden Prozeßschwankungen gerechtfertigt, die aus der Darstellung der komprimierten Daten nicht deutlich werden. Die Ursachen für diese als willkürlich betrachteten Störungen konnten mit den Statistischen Methoden zum großen Teil geklärt und beseitigt werden.

8.2.3 Konzeption eines integrierten Bestück- und Laserlötautomaten

Die in der vorliegenden Arbeit verfolgten Ansätze wurden in die Konzeption eines neuen kombinierten Bestück- und Laserlötautomaten eingebracht, um den Anforderungen einer prozeßintegrierten Qualitätssicherung bei der Neukonzeption von Fertigungssystemen Rechnung zu tragen [135]. Die Entwicklung des Laserlötautomaten wird in einem europäischen Forschungsprojekt unter der Federführung eines Industriekonsortiums derzeit durchgeführt [136]. Ausgangspunkt der Entwicklung eines kombinierten Bestück- und Lötautomaten war der Wunsch, Bauelemente mit kleinen Rastermaßen auch mit universellen Werkzeugen montieren zu können. Bisher wird bei der Montage vielpoliger Bauelemente mit kleinen Rastermaßen vorwiegend das Impuls- oder Bügellötverfahren eingesetzt. Der Lötvorgang wird hierbei durch sog. Thermoden, d. h. elektrisch beheizte Bügel, die zugleich als Niederhalter für die Bauelementanschlüsse während des Lötvorgangs dienen, realisiert. Eventuell vor-

handene Koplanaritätsfehler der Bauelementeanschlüsse können durch eine einstellbare Kraft ausgeglichen werden, mit der die Thermode den Kontakt der Bauelemente- mit den Leiterplattenanschlüssen sicherstellt. Für einen bestimmten Bauelementetyp sind daher spezifische Werkzeuge für den Bügellötvorgang erforderlich. Der besondere Ansatz innerhalb des europäischen Forschungsprojektes ESPRIT 6140 ALERT ist durch den Einsatz von Laserlicht für die Realisierung des Lötvorgangs bei vielpoligen Bauelementen mit kleinen Rastermaßen gekennzeichnet. Neben dem Vorteil, auf bauteilspezifische Werkzeuge verzichten zu können, läßt sich durch die Kombination verschiedener Prozessschritte und Regelkreise innerhalb einer Maschine eine prozeßintegrierte Qualitätssicherung für das Bestücken und Löten hochpoliger Bauelemente realisieren.

Bild 105 zeigt den prinzipiellen mechanischen Aufbau des kombinierten Bestück und Lötautomaten. Es handelt sich um einen sogenannten "Pick and Place"-Automaten, d. h. einen Bestückautomaten mit beweglichem Bestückkopf, der über der während des Bestückvorgangs fixierten Leiterplatte verfährt. Im Bestückkopf sind 4 koaxiale Kameras integriert, um den Bestück- und Lötvorgang zu überwachen und zu regeln. Der Lötvorgang an sich wird mittels 2 Lasereinheiten realisiert. Mit dem so ausgestatteten Automaten lassen sich folgende Vorteile in einem prozeßintegrierten Fertigungskonzept realisieren.

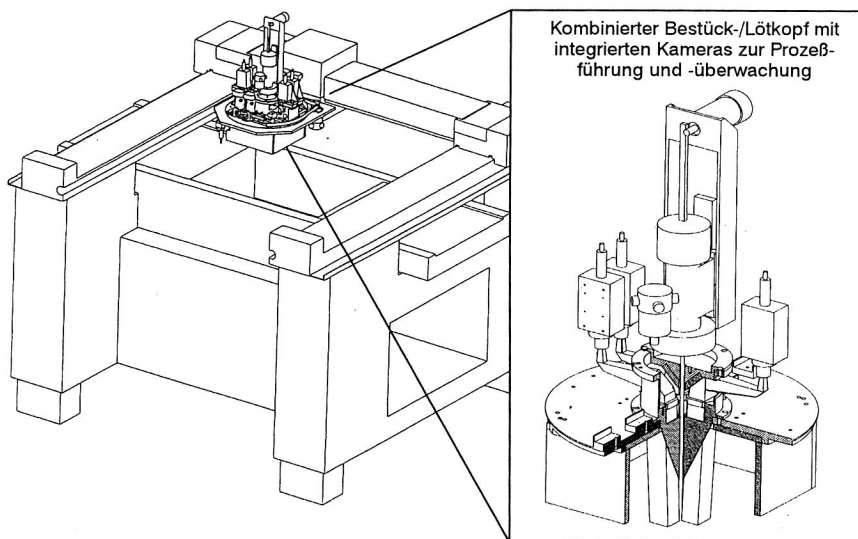


Bild 105: Maschinenkonzept und Bestückkopf des ALERT-Laserlötautomaten

Die Bauelemente werden in einer integrierten Prozeßfolge vom Zuführmodul gegriffen, auf die Leiterplatte bestückt und gleich nachfolgend verlötet ("Pick, Place and Fix"). Damit ist eine prozeßbegleitende Inspektion der Zwischenstadien sowie eine abschließende Qualitätskontrolle innerhalb der Verfahrensfolge realisierbar. Der kombinierte Prozeßschritt des Bestückens und Lötens ersetzt die insbesondere bei kleinen Rastermaßen kritischen Prozeßschritte Kleberauftrag, Lotpastenauftrag sowie herkömmliche Lötverfahren, die für derartige Anwendungen nur mehr eingeschränkt tauglich sind. Die thermische Belastung der Bauelemente oder Substratmaterialien ist aufgrund der lokalen Wärmezufuhr in der Lötstelle nicht gegeben bzw. minimal. Daher lassen sich auch wärmeempfindliche Substratmaterialien verarbeiten.

Das Laserlöten läßt sich ideal mit bestehenden Reflow- oder Wellenlötfertigungslinien kombinieren, indem die kritischen Bestück- und Lötvorgänge für Fine-Pitch-Bauelemente additiv durchgeführt werden können. Dies stellt insbesondere für die in der Konsumelektronik bisher sehr häufig eingesetzten Wellenlötprozesse eine wirtschaftliche Möglichkeit dar, diese als bewährte Fertigungsprozesse weiterzuverwenden und zudem neue hochintegrierte Bauelementetechnologien in den Produkten einzusetzen. Innerhalb einer Produktfamilie unterscheiden sich die Baugruppenvarianten in der Regel lediglich durch wenige verschiedene hochintegrierte IC-Schaltkreise. Die erforderliche Lotmenge kann je nach Technologie in verschiedenen Varianten durch Wellenlöten, Lotpastenauftrag und anschließendes Reflowlöten oder mittels vorbeloteten Leiterplatten, wie z. B. SIPAD, OPTIPAD-Technologie etc. erfolgen. Die Vorgangsfolge für den kombinierten Bestück- und Laserlötvorgang ist in den folgenden Bildern 106 - 108 dargestellt.

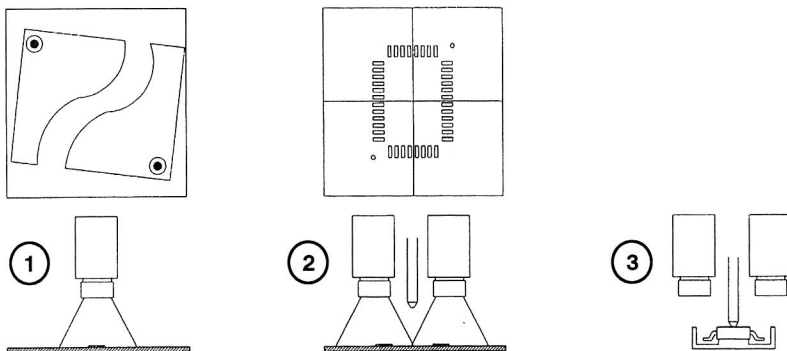


Bild 106: Kombierter Bestück- und Lötvorgang – Vermessung der Bestückkoordinaten und Aufnehmen des Bauelementes

Schritt ① : Vermessen der globalen Paßmarken der Leiterplatte

In einem ersten Schritt werden nach dem Spannen der Leiterplatte die globalen Paßmarken der Leiterplatte mit dem Bastückkopf angefahren und damit die tatsächliche Position und Verdrehung der Leiterplatte in der Maschine errechnet. Alle im folgenden anzufahrenden Koordinaten der Leiterplatte werden daraufhin entsprechend korrigiert.

Schritt ② : Vermessen der lokalen Paßmarken

Da die Leiterplatten aufgrund von Schrumpfungen und Verwerfungen auch geometrische Toleranzen der Leiterstrukturen aufweisen, werden die lokalen Paßmarken der Bauelementeanschlüssen angefahren und vermessen. Die errechneten Istkoordinaten und eventuelle Verdrehungen werden gespeichert, damit sie während des Bestückvorgangs berücksichtigt werden können.

Schritte ③ - ⑥ : Abholen des Bauelementes vom Zuführmodul, Koplanaritätsprüfung, Vermessen des Bauelementes, Fluxauftrag

In den weiteren Schritten wird zunächst das Bauelement von seiner Abholposition im Zuführmodul aufgegriffen und zu einem in die Maschine integrierten Vision-Modul transportiert. Dort erfolgt eine Koplanaritätsprüfung der Bauelementeanschlüsse sowie ein laterales Vermessen der Anschlüsse bzgl. Teilungsfehler im Rastermaß und die Ermittlung der Istposition des Bauelementes auf der Pipette des Bestückkopfes. Der Versatz und eventuelle Winkelfehler werden beim Bestückvorgang berücksichtigt. Vor dem Bestücken wird daraufhin der für den späteren Lötvorgang erforderliche Flußmittelauftrag in einer in die Maschine integrierten Station vorgenommen.

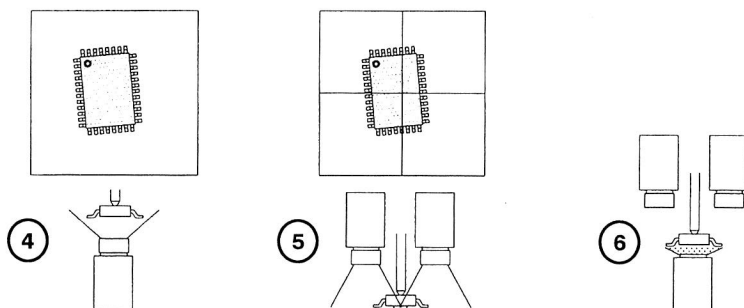


Bild 107: Kombierter Bestück- und Lötvorgang – Vermessung der Bauelementebeinchen und des Leiterplattenanschlußrasters

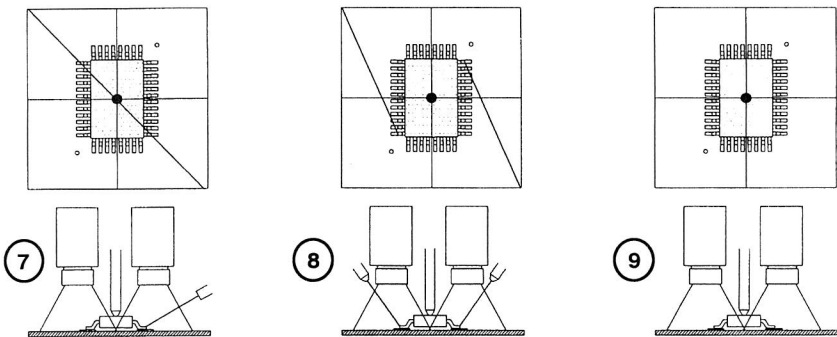


Bild 108: Kombinierte Bestück- und Lötvorgang – Messung der Leiterplattenverwölbung, Laserlöten und Lötstellenkontrolle

Schritt ⑦: Bestücken des Bauelements und Vermessung der Leiterplattenhöhe

Aufgrund der aus den vorigen Schritten ermittelten Istkoordinaten der Leiterplattenanschlüsse und der Lage des Bauelementes auf der Pipette des Bestückkopfes wird die optimale relative Bestückposition errechnet und das Bauelement bestückt. Optional kann bei besonders kritischen Bestückvorgängen eine Online-Korrektur der Bestückgenauigkeit durchgeführt werden. Hierzu wird während des Bestückvorgangs die relative Lage der Bauelementeanschlüsse zu den Landeflächen auf der Leiterplatte mit den 4 koaxialen Kameraeinheiten überwacht und ggf. Feinkorrekturen durch die Steuerung vorgenommen. Ist das Bauelement in seiner Sollposition bestückt, wird eine Höhenmessung vorgenommen, um ein zielgenaues Ansteuern der Bauelementeanschlüsse im darauf folgenden Laserlötvorgang sicherzustellen. Hierzu wird eine Streifenprojektion im CCD-Kamerabild ausgewertet, um das tatsächliche Höhenniveau der Leiterplatte zu berechnen.

Schritt ⑧: Laserlöten

Die Wärmeeinbringung für das Aufschmelzen der Lotlegierung erfolgt durch ein kontinuierliches Abfahren der Bauelementeanschlüsse mit 2 Lasereinheiten, die relativ zum Bauelement bewegt werden. Da die Fokussierung des Laserlichtes auf die Bauelementeanschlüsse entscheidend für eine definierte Wärmeeinbringung ist, werden die nach dem Bestücken ermittelten Korrekturwerte für das Höhenniveau hierbei berücksichtigt.

Schritt ⑨ : Lötstelleninspektion

Nach dem Lötvorgang kann optional eine sofortige Inspektion der Lötstellen durchgeführt werden. Hierzu können die koaxialen Kameras verwendet werden, wobei dieser Ansatz relativ eingeschränkt für eine Lötstelleninspektion tauglich ist (vgl. Kap 4). Deutlich bessere Möglichkeiten der Inspektion des Lötgergebnisse sind in der vorliegenden Maschinenkonzeption durch den Einsatz des Lasers auch für diese Aufgabe zu erzielen. Im Inspektionsmodus wird der Laserstrahl mit einer Frequenz von 2 bis 3 kHz bei geringer Leistung von ca. 3 W betrieben. Beim kontinuierlichen Überstreichen der Lötstellen mit dem modulierten Laserlicht werden durch das diskontinuierliche Aufheizen der Anschlüsse entsprechende mechanische Wellen in die Materialien induziert. Ein in die Pipette des Bestückkopfes integrierter Ultraschallsensor nimmt die entsprechenden Vibrationen auf, während das Bauelement mit einer konstanten Kraft auf die Leiterplatte gedrückt wird. Bei nicht kontaktierten Anschlüssen wird die Vibration nicht entsprechend in das Bauelement übertragen, d. h. das Antwortsignal ist signifikant verändert [137]. Im vorliegenden Maschinenkonzept kann das Prinzip für zwei Anwendungsfälle eingesetzt werden. Dies ist die Koplanaritätsprüfung vor dem Löten bzw. die Detektion nicht verlöteter Anschlüsse nach dem Löten.

8.3 Bewertung alternativer Qualitätssicherungsstrategien in der Elektronikfertigung

8.3.1 Problematik bei der Bewertung

Die Problematik in der Integration fortschrittlicher Ansätze in die Produktion liegt in der Festlegung eines geeigneten Prüfkonzpts. Durch die Kombination verschiedener Prüfschritte und –methoden und die direkte Einbindung in die Prozeßkette sollen die Qualität gesteigert und die Fertigungskosten gesenkt werden. Aufgrund der Komplexität wird diese Fragestellung bisher vorwiegend heuristisch angegangen [138]. Die Erfahrungen von Anwendern automatisierter optischer Inspektionssysteme zur prozeßbegleitenden Inspektion differieren stark. Dies läßt sich sowohl auf die spezifischen Besonderheiten der jeweiligen Fertigungsspektren aber auch auf die verschiedenen Erwartungshaltungen der Anwender zurückführen. Es werden hierbei unterschiedliche "Prüf–Philosophien", z.B. das Für und Wider von Lötstellen-tests im Gegensatz zu alleinigen Bestückungstests diskutiert [139, 140]. Um alternative Prüfkonzpte quantifiziert zu vergleichen, wird ein Analyse- und Bewertungsschema für Prüfkonzpte vorgeschlagen. Anhand eines Fallbeispiels wird die praktische Anwendung des entwickelten Ansatzes dargestellt.

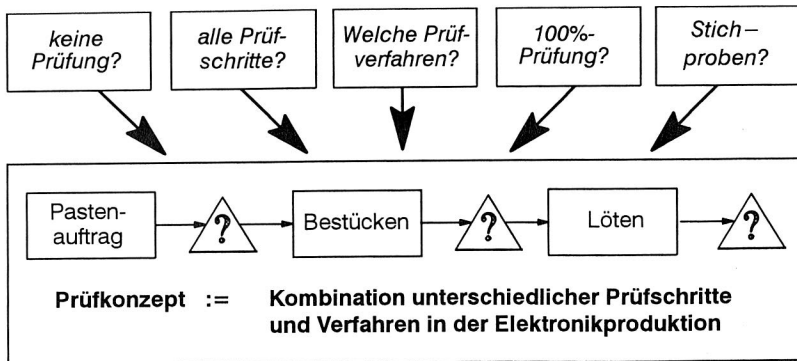


Bild 109: Grundfragen für die Planung eines Prüfkonzeptes

8.3.2 Bewertungsmodell zur Analyse alternativer Prüfstrategien

Die Erfordernisse zur Festlegung eines Prüfkonzeptes orientieren sich an den zu fertigenden Produkten, der daraus resultierenden Prozeßkette und den angestrebten Qualitätsregelkreisen [141]. Darüberhinaus bestehen oft Randbedingungen, die gewisse Prüfschritte zu einem festgelegten Zeitpunkt in der Prozeßabfolge vorschreiben, z.B. Normen und Abnahmerichtlinien des Kunden. Auch der Einsatzfall der Produkte, die Sicherheitsanforderungen an die Schaltung und die entstehenden Kosten bei einem Versagensfall der Produkte im Feldeinsatz müssen berücksichtigt werden. Neben den reinen Ausfallkosten für die Reparatur des Gerätes im Garantiefall sind hier die schwer quantifizierbaren Faktoren wie Verlust des Markenimages, Herabstufung in der Lieferantenqualifizierung eines großen Abnehmers oder unter Umständen auch Fragestellungen der direkten Produzentenhaftung wesentliche Einflußfaktoren. In Einzelfällen wird die Planungsproblematik zusätzlich dadurch verschärft, daß wesentliche Festlegungen bzgl. der Produkteigenschaften noch nicht bekannt sind, da das Produkt und die dazugehörige Fertigungslinien parallel entwickelt werden.

Wesentliche Elemente des Analysemodells sind die zugrundeliegenden oder zu erwartenden Fehlerarten und Fehlerhäufigkeiten am Produkt. Sie führen zu Fehlervektoren pro Bauelementart und Fertigungsschritt. Auf der anderen Seite kann ein korrespondierender Prüfvektor, der die Fehlererkennungssicherheit bzw. den Fehlerschlupf eines Prüfverfahrens charakterisiert, ermittelt werden. Bild 111 zeigt am Beispiel der Prozeßkette Pastenauftrag, Bestücken und Löten die Erstellung möglicher Prüfkonzeptalternativen auf. Eine Betrachtung aller Alternativen, die durch vollständige Enumeration gebildet werden kann, ist jedoch nicht sinnvoll. Zunächst wird der Planer die zwingend vorgeschriebenen Prüfschritte festlegen und hierfür

mögliche Verfahrensalternativen berücksichtigen. Für die weiteren in Betracht kommenden Prüfschritte für die gesamte Prozeßkette ist ebenfalls eine Vorauswahl sinnvoll.

Technologieabschätzung und Anforderungsspezifikation



Markt

- Lieferantenverträge
- Produzentenhaftung
- Jahresstückzahlen
- Markenimage, Qualitätsziel
- Sicherheitsforderungen

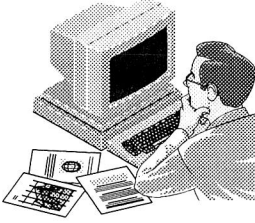
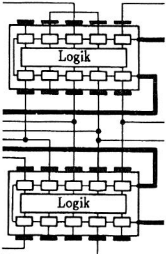
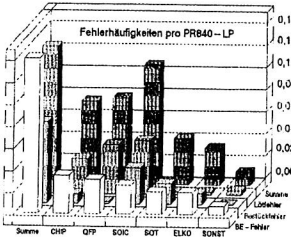
Produkte

- Gehäuse- und Baugruppentechologien
- Anzahl Bauelemente und Lötstellen / Board
- Einsatzbedingungen
- Qualität & Zuverlässigkeit
- Ausfallraten

Prozesse

- Prozeßtechnologien
- Maschinen- und Prozeßfähigkeiten
- Maschinen-Taktzeiten
- Übergang zu neuen Verfahren, z.B. BGA, ...

Analyse der Qualitätslage und Grobplanung

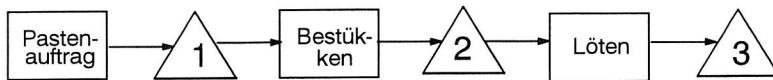


Fehler-Prognostik

Vorauswahl der Prüfverfahren

Präventive Maßnahmen

Bild 110: Vorbereitende Schritte bei der Ermittlung eines Prüfkonzepts



Prozeßschritt mit
Fehlerhäufigkeitsvektor \mathfrak{H}
(Häufigkeit einer Fehlerart i:

$$h_i = \sum_{j=1}^n m_j p_j$$



Prüfschritt mit
Fehlerschlupfvektor \mathfrak{S}
(1 – Erkennungssicherheit pro
Fehlerart i)

Prüfschritte und Verfahren		Prüfkonzept- alternativen				
1	CCD – Verf. Typ1	×		×		
	CCD – Verf. Typ2		×			
	3D – Laser Typ1					
	Sichtprüfung				×	
	Laserinspektion					
2	CCD – Verf. Typ3			×		
	CCD – Verf. Typ4		×			
	3D – Laser Typ2	×				
	3D – Laser Typ4					
3	CCD – Verf. Typ3		×	×		
	Laser – Verf. Typ2					
	Laser – Verf. Typ3			×		
	X – Ray Verf. Typ1					×
	X – Ray Verf. Typ2	×			×	

Bild 111: Erstellung der Prüfkonzeptalternativen

– Fehlervektor \mathfrak{H}

Der Fehlervektor \mathfrak{H} beschreibt die zu erwartenden Fehlerhäufigkeiten für einen Fertigungsprozeß aufgegliedert nach Fehlerarten für jedes Bauelement bzw. jeden Fehlertyp. Für einen bestimmten Bestückautomaten ist z. B. aufgrund von Maschinendatenerfassungssystemen bekannt, daß im Mittel für den Bauelementtyp Chip 0204 von einer Bestückfehlerate von 5%, für Bauelemente vom Typ Melf hingegen nur von 0,8% auszugehen ist. Analog werden für den Lotpastenauftrag oder den Lötprozeß entsprechende Fehlervektoren gebildet.

– Fehlerhäufigkeit h

Die Fehlerhäufigkeit h , d. h. die Anzahl der Fehler pro Baugruppe, resultiert aus der Summe aller relativen Einzelfehlerhäufigkeiten pro Bauelementart, jeweils multipliziert mit der Anzahl der auf die Leiterplatte gesetzten Bauelemente.



Prozeßschritt

Fehlerrate (Fehlervektor):

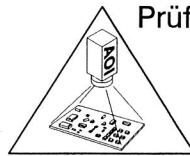
Für jede Fehlerart existiert Wahrscheinlichkeit, mit der sie an einem beliebigen Fehlerort auftritt.

Beispiel:

Fehlervektor eines Bestückautomaten

$$\mathcal{H} = (h_{(0204)}, h_{(\text{sonst. CHIP})}, h_{(\text{melf})}, h_{(\text{PLCC})}, \dots)$$

Fehlervektor wird durch Qualitätsdatenerfassung ermittelt.



Prüfschritt

Erkennungsrate (Prüfvektor):

Für jede Fehlerart existiert Wahrscheinlichkeit, daß sie mit einem Prüfverfahren entdeckt wird

Fehlerschlupfrate:

Für jede Fehlerart existiert Wahrscheinlichkeit, daß das Prüfverfahren einen tatsächlichen Fehler nicht erkennt

(Fehlerschlupfrate = 1 – Erkennungsrate)

$$\mathcal{S} = (S_{(0204)}, S_{(\text{sonst. CHIP})}, S_{(\text{melf})}, S_{(\text{PLCC})}, \dots)$$

Pseudofehlerrate:

Für jede Fehlerart existiert Wahrscheinlichkeit, daß das Prüfverfahren irrigerweise einen Fehler meldet

Bild 112: Elemente des Bewertungsmodells zur Analyse von Prüfkonzeptalternativen

– Prüfvektor \mathcal{S}

Der Prüfvektor \mathcal{S} charakterisiert die Fähigkeit eines bestimmten Prüfverfahrens, die im Fehlerhäufigkeitsvektor beschriebenen Einzelfehlerarten zu detektieren. Hierbei ist von einem für das Prüfverfahren charakteristischen Fehlerschlupf und von einer charakteristischen Pseudofehlerrate auszugehen. Zum Beispiel sind elektrische Bauelementefehler a priori nicht mit einem optischen Testsystem zur Bestückkontrolle zu detektieren. Demzufolge ist der korrespondierende Fehlerschlupf gleich 100% (in der Vektordarstellung = 1) zu setzen. Der betrachtete Fertigungsfehler wird in der Analysesystematik durch die Multiplikation der Vektorkomponenten erhalten, d.h. an nachfolgende Prüfschritte bzw. an die resultierende Ausgangsqualität h_E unverändert weitergereicht.

8.3.3 Synthese einer Prüfstrategie (Fallbeispiel)

Für einen konkreten Einsatzfall in einer Elektronikbaugruppenfertigung von Telekommunikationsgeräten wurden mit der aufgezeigten Systematik für den Neuanlauf eines geplanten Produkts alternative Prüfstrategien entwickelt und bewertet [142]. Zunächst wurden die Ausgangslage, die zu erwartende Technologieentwicklung und das Qualitätsziel analysiert. Da es sich um eine Neuentwicklung handelte, mußten Abschätzungen bzgl. des zu erwartenden Bauelementespektrums und der zu erwartenden Testtechnologien, wie z. B. Einsatz von BoundaryScan-Methoden, mit der Entwicklung abgestimmt werden. Die Fehlerfolgekosten bei Ausfällen im Feld sowie die gerade noch akzeptable Feldausfallrate wurden durch die im Unternehmen vorliegenden Erfahrungen der Abteilungen Marketing und Kundendienst ermittelt.

Um die Erfahrungen aus dem bestehenden Fertigungsspektrum zu nutzen, wurde eine Referenzleiterplatte mit ähnlichem Bauelementespektrum, die jedoch in der Komplexität und der Integrationsdichte auf Baugruppenebene geringeren Anforderungen genügen mußte, analysiert. Hierzu wurden die Fehlerdaten von 5400 Baugruppen bauelementspezifisch aufgeschlüsselt, um so zusammen mit der abgeschätzten Technologieentwicklung eine Grundlage für die Bestimmung der im Bewertungsmodell erforderlichen Fehlervektoren zu schaffen. Parallel wurden mit Testboards derselben Referenzbaugruppe Systemtests bei verschiedenen Prüfautomatenherstellern durchgeführt. Hiermit wurden die korrespondierenden Fehler-schlupfvektoren der in Betracht kommenden Prüfsysteme ermittelt. Die zugehörigen fixen und variablen Prüfkosten wurden aufgrund der Herstellerangaben sowie eigenen Untersuchungen bestimmt.

Zur Synthese der in Betracht kommenden Prüfkonzepte wurden zunächst die zwingend erforderlichen Prüfungen festgelegt. Im vorliegenden Falle bestehen diese aus den elektrischen Tests Boundary Scan mit Built In Self Test und den für die Mobilkommunikation zwingend erforderlichen Abgleichtest und Endtest des komplett montierten Gerätes. Alternative elektrische Prüfungen wie z.B. Incircuit-Test waren aufgrund der Kontaktierungsschwierigkeiten der Prüfadapter bei den genannten hohen Integrationsdichten unmöglich. Die Analyse der alternativen Prüfkonzepte erstreckte sich daher auf die prozeßbegleitenden Prüfschritte nach dem Lotpastenauftrag, die Bestückprüfung und die Lötstellenprüfung.

Mit der aufgezeigten Systematik ließen sich für verschiedene Prüfkonzepte die Grenzstückzahlen ermitteln, die bei Über- oder Unterschreiten durch die Fertigungsstückzahlen verschiedene Prüfkonzepte sinnvoller erscheinen lassen. Mit der systematischen Entwicklung und Bewertung von Prüfkonzepten können für die komplexe Fragestellung der Integration neuer Prüfverfahren in die Produktion Entscheidungshilfen gegeben werden.

8.4 Erkenntnisse aus der Anwendung der prozeßintegrierten Qualitätssicherung

8.4.1 Anwendung der Methodik in einer Laborumgebung

Schon die Betrachtung der vereinfachten dreistufigen Prozeßkette Lotpastenauftrag, Bestücken und Löten vergegenwärtigt die Komplexität bei der Umsetzung der Aufgabenstellung einer prozeßübergreifenden Optimierung. Der Aufbau eines Prozeß- und Prüfdatennetzes erweist sich bei den bestehenden marktüblichen Produktionsgeräten als sehr aufwendig und ist aufgrund der erforderlichen Anpassung maschineninterner Schnittstellen nur in Zusammenarbeit mit den Geräteherstellern realisierbar. Im selben Maße kann die Rückwirkung auf den Fertigungsprozeß im Sinne einer automatisierten Prozeßregelung nur mit erheblichen Anpaßaufwand in den verschiedenen Maschinensteuerungen erfolgen.

Ebenso kann die Charakterisierung der Prozeßergebnisse durch zwischengeschaltete zerstörungsfreie Prüfverfahren in dieser umfassenden Form nicht auf industrielle Anwendungen übertragen werden, da dort aufgrund der zeitlichen Restriktionen allenfalls Stichprobenprüfungen möglich sind. Für neuralgische Punkte der Prozeßkette, wie z. B. für die Überprüfung des Lotpastenauftrags, müssen jedoch Inline-taugliche Systeme konzipiert werden, um eine beherrschte Produktion sicherzustellen [143]. Ein Beispiel für eine technische Realisierung einer für die Linienproduktion geeigneten Lotpasteninspektion ist in Kapitel 5 mit dem TRIOS-Laserscanner, der zu einem deutlichem Qualitätshub in der direkt produzierten Fertigungsqualität führt (vgl. Kap. 5.4).

Der Schwerpunkt und der besondere Nutzen in der Anwendung der vorgestellten Methodik der vernetzten Prozeß- und Prüfdaten liegt daher in der systematischen Analyse von Prozessen und Prozeßzusammenhängen. Es fällt auf, daß bei eingehender Analyse der Prozesse zunächst eine Reihe von Störgrößen entdeckt werden, die einer beherrschten Produktion widersprechen und vor einer systematischen Versuchsdurchführung eliminiert werden müssen. Schon das hierbei entwickelte Prozeßverständnis und der Aufbau der Fehlergraphen im Informationsmodell gekoppelt mit zugehörigen Abhilfemaßnahmen unterstützt maßgeblich die Sicherung der Prozesse. Aufgrund der Vielfalt von Einflußgrößen ist für die Durchführung experimenteller Untersuchungen eine methodische Versuchsplanung unverzichtbar. Der besondere Vorteil der in einem relationalen Datenmodell integrierten Datenbasis zeigt sich hier besonders deutlich, da die Prozeßdaten sowie die Versuchsergebnisse direkt zur Auswertung zur Verfügung stehen. Die Tauglichkeit und die spezifischen Besonderheiten der vorgeschlagenen Methodik sind damit für die wissenschaftliche Analyse von Prozeßketten der Elektronik belegt.

8.4.2 Einsatz der Methode in industriellen Anwendungen

Die oben aufgeführten Beispiele sowie weitere hier nicht explizit dargestellte Anwendungen der vorgeschlagenen prozeßintegrierten Qualitätssicherung lassen Rückschlüsse auf die erreichbaren Verbesserungspotentiale zu. Grundsätzlich ist dabei zwischen Anwendungen zur Optimierung bestehender Fertigungssysteme und der Berücksichtigung der Vorgehensweise bei der Konzeption neuer Fertigungssysteme zu unterscheiden.

In der Anwendung der Vorgehensweise auf bestehende Prozesse der Elektronikfertigung wird der Schwerpunkt zur Analyse komplexer Wirkmechanismen offenbar. In allen betrachteten Beispielen konnten schon in der ersten Phase, d. h. bei der grundsätzlichen Analyse der Prozeßketten mittels Einflußgrößendiagrammen und Fehlermöglichkeits- und Einflußanalysen deutliche Schwachpunkte in den Prozessen aufgezeigt werden. Optimierungen, die in Form von Sofortmaßnahmen durchgeführt werden, führen hierbei in der Regel durch das Abstellen wesentlicher Störfaktoren zu einer signifikanten Prozeßstabilisierung und Steigerung der Fertigungsqualität. Das Aufwand-Nutzenverhältnis kann in dieser ersten Phase als optimal eingestuft werden. Ebenso wird in diesem Zusammenhang deutlich, daß die Qualität der eingehenden Materialien bzw. vorgelagerter Prozeßschritte die resultierende Fertigungsqualität maßgeblich beeinflußt. Durch eine Eingrenzung der verwendeten Materialien und Verbesserungen im Hinblick auf sachgerechte Behandlung der Materialien und Halbwaren konnten in den betrachteten Fällen deutliche Qualitätssteigerungen erzielt werden. Für den Ansatz der übergreifenden Regelung innerhalb der Prozeßkette durch vorwärts- und rückwärts gerichtete Regelkreise müssen in der Praxis folgende Einschränkungen gemacht werden. In bereits bestehenden Prozeßketten ist die Integration geeigneter Monitore für den Aufbau des erforderlichen Prozeß- und Prüfdatennetzes in der Regel mit großem steuerungstechnischem Aufwand verbunden. Zusätzlich wird jeder Eingriff durch die unter Produktionsbedingungen herrschende Auslastung der Fertigungssysteme erschwert. Die Implementierung prozeßübergreifender automatisierter Regelungsansätze wird in bereits bestehenden Fertigungslinien durch heterogene Kommunikations- und Steuerungsstrukturen behindert. Es zeigt sich, daß bei Anwendung auf bereits bestehende Fertigungsprozesse ein Schwerpunkt in der *Stabilisierung* der Prozesse liegt, indem die Beseitigung von Störgrößen und die Ermittlung optimaler Einstellparameter unterstützt wird.

Die *prozeßintegrierte Regelung* der Fertigungsqualität durch die Ausregelung von Fertigungsschwankungen läßt sich hingegen besser bei der Neukonzeption von Fertigungssystemen verwirklichen. Hier können die erforderliche Integration von Sensorsystemen und die steuerungstechnischen Schnittstellen von Anfang an besser berücksichtigt werden. Als Beispiel für die Berücksichtigung prozeßintegrierter Regelkreise bei der Neugestaltung von Fertigungssystemen wurde ein kombinierter Bestück- und Laserlötprozeß in Kapitel 8.2.3 vorgestellt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Unter dem Schlagwort "Qualität produzieren anstatt Qualität erprüfен" hat sich in der Produktionstechnik ein genereller Wandel in den verfolgten Ansätzen zur Qualitätssicherung vollzogen. Diese einfach anmutende Vorgehensweise gestaltet sich in der Elektronikproduktion jedoch weiterhin schwierig. Schon die Spezifikation der Qualität elektronischer Baugruppen ist durch unterschiedliche Anforderungen und Einsatzbereiche der Endprodukte sehr komplex. Die besonderen Problemstellungen der Elektronikproduktion zeigen sich im Zusammenwirken aufeinander folgender Fertigungsschritte und in der hohen Anzahl von Einflußgrößen auf die letztlich erreichte Produktqualität. Physikalisch-chemische Eigenschaften der Bauelemente und Leiterplatten, Kleber- und Lotmaterialien stehen mit den Fertigungsparametern von Lotpasten- oder Kleberauftrag, Bestücken und Löten über die gesamte Prozeßkette verteilt in Wechselwirkung.

Der Stand der Forschung ist daher geprägt durch die intensive Auseinandersetzung mit den Qualitätseigenschaften und Versagensmechanismen elektronischer Baugruppen und dem ständigen Streben nach beherrschten Prozessen, die sich an die schnellen Innovationszyklen bei Produkten, Gehäuse- und Verbindungstechnologien anpassen müssen. Die Methoden zur Prozeßsicherung und zur Qualitätsprüfung werden jedoch noch weitgehend isoliert voneinander eingesetzt. Die Qualitätsprüfung wird in der Regel am Ende der Prozeßkette mittels visueller Prüfung und elektrischen Tests durchgeführt. Fehler werden so relativ spät erkannt, die Nacharbeit am fertigen Produkt ist mit hohen Kosten verbunden und die Rückwirkung auf die Prozesse kann zudem erst relativ spät erfolgen. Aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung und Integration elektronischer Baugruppen verschärft sich die Problematik der visuellen Prüfung. Neben mangelhafter Treffsicherheit und Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse ist die Korrelation zwischen den verwendeten Sichtprüfkriterien und dem Ausfallverhalten der Baugruppen nicht zweifelsfrei gegeben. Die dadurch unnötig herbeigeführte Nacharbeit führt neben erhöhten Fertigungskosten zur Herabsetzung der Baugruppenqualität.

Ziel der vorliegenden Dissertation war daher, die bisher getrennten Aufgabenfelder zur Prozeßsicherung und Qualitätsprüfung in einem geschlossenen Ansatz zusammenzuführen. Es wird eine prozeßintegrierte Qualitätssicherung vorgeschlagen, die der Qualitätsteigerung in der Elektronik bei gleichzeitig reduzierten Fertigungskosten dient. Parallel wird mit den entwickelten Werkzeugen eine durchgängig protokollierte und überwachte Produktion unterstützt. Das systematische Zusammenführen beherrschter Fertigungs- und Prüfprozesse in der Elektronikbaugruppenproduktion wird durch die Vernetzung der Prozeß- und Prüfdaten in einem gemeinsamen Informationsmodell ermöglicht. Das in einer relatio-

nen Datenbank implementierte Informationsmodell ist die Grundlage für darauf aufsetzende Werkzeuge zur Analyse, Optimierung und Regelung der Fertigungsqualität.

Um die prozeßintegrierte Erfassung der erforderlichen Prozeß- und Prüfdaten zu erreichen, werden in einem weiteren Schwerpunkt der Arbeit Systemlösungen zur automatisierten optischen Inspektion in der Baugruppenmontage entwickelt. Hierzu werden mögliche Verfahrensansätze analysiert und deren Einsatzpotential aufgezeigt. Mit dem Übergang zu Laser- und Röntgengestützten Inspektionsverfahren können prozeßbegleitend die Fertigungsprozesse deutlich besser charakterisiert und geführt werden. Bestehende Defizite bei der Sichtprüfung durch Prüfpersonal sowie die Schwächen von herkömmlichen CCD-kamerabasierenden Inspektionsverfahren werden hierbei überwunden. Die fertigungsintegrierte 3D-Laserinspektion des Lotpastenauftrags stellt einen wichtigen Schritt auf dem Weg zu einer fehlerfreien Produktion reflowgelöteter Baugruppen dar, da dies ein besonders kritischer Fertigungsschritt in der Prozeßkette ist. Die Einsatzfähigkeit der 3D-Laserinspektion erfordert vor allem kurze Prüfzeiten und eine gute informationstechnische Einbindung, die durch eine CAD/CAM-Verfahrenskette für die optische Baugruppeninspektion sichergestellt wird. Mit der Entwicklung einer flexibel automatisierten Röntgeninspektionszelle wird der Elektronikproduktion ein geeigneter Prüfmonitor zur Verfügung gestellt, der sowohl die Aufgabe der Lötstelleninspektion zuverlässig erfüllt, als auch eine sehr gute Überwachung und Führung der Fertigungsprozesse erlaubt. Neben der direkten materialflußtechnischen Integration in die Fertigungsline, besteht mit der flexiblen Prüfzelle eine interessante Alternative für die Einführung und Qualifizierung neuer Fertigungs-, Gehäuse- und Verbindungstechnologien.

Um die verschiedenen Randbedingungen und Anforderungen an eine prozeßintegrierte Qualitätssicherung zu beherrschen, wird mit dem System FuzzClass ein Werkzeug zu anwenderflexiblen Klassifikation und Regelung der Fertigungsqualität vorgestellt. Im selben Maße erlaubt der Einsatz lernender Verfahren auf der Basis Neuronaler Netze eine weitreichende Anwenderflexibilität. Am Beispiel einer spezifischen Aufgabenstellung zur Lötstelleninspektion mittels Röntgen wird die Tauglichkeit dieses Ansatzes nachgewiesen. Exemplarische Anwendungen der prozeßintegrierten Qualitätssicherung zeigen den Nutzen der entwickelten Werkzeuge und erlauben eine Bewertung der verschiedenen Vorgehensweisen, die stark von den jeweiligen Randbedingungen und eingesetzten Fertigungstechnologien abhängen. Die größten Potentiale lassen sich durch die Berücksichtigung der prozeßintegrierten Qualitätssicherung bei der Neukonzeption von Fertigungstechnologien erschließen. Das Beispiel eines kombinierten Bestück- und Laserlötprozesses mit integrierter Prozeß- und Prüfdatenerfassung weist auf die in weiterführenden Arbeiten noch zusätzlich zu erschließenden Potentiale hin.

10 Literaturverzeichnis

1. Feldmann, K. Produktionssysteme in der Elektronik. in: Sonderforschungsbereich 356 - Produktionssysteme in der Elektronik - Bericht des Forschungsverbundes 1992 - 1995, Hrsg. Feldmann, K.; Geiger, M., Erlangen 1995
2. Rommel, G. et. al. Qualität gewinnt - Mit Hochleistungskultur und Kundennutzen an die Weltspitze. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1995
3. VDI/VDE Prozeßmeß- und Prüftechnik für Leiterplattenbaugruppen in SMD-Technik, VDI/VDE-Richtlinie 3715, Mai 1995, Beuth-Verlag Berlin, 1995
4. Sauer, W. Zuverlässigkeitsuntersuchungen von SMT-Weichlötstellen im visuellen Grenzfallbereich. Zwischenbericht zum BMFT - Verbundprojekt Nr. 44/91, Geschäftszeichen 41-4013-13 MV 02, VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik, Berlin 1994
5. Engelmaier, W. Quality and Reliability Optimization through DfM - Design for Manufacturing and DfR - Design for Reliability. Tagungsband Productronica 1995. VDI ADB, München 1995, S. 109-121
6. Schmidt, E. Auto-Elektronik kommt zügig voran. VDI-nachrichten Nr. 44, 1994, München, 4.11.1994, S.9
7. Stadler, R.
Zirngibl, W. Anforderungen der Automobilindustrie an die Elektronik-Lötstelle. Statusseminar zum BMFT Verbundprojekt Nr. 44/91, VDI/VDE-Technologiezentrum Berlin, Oberpfaffenhofen 8.11.1993
8. Tegethoff, M. On Clustering of Defects and Yield of SMT Assemblies. Proceedings 1994 IEMT Symposium, September 12-14, 1994 La Jolla, CA USA, S. 75-79
9. Pfeifer, T. Qualitätsmanagement - Strategien, Methoden, Techniken. Hanser-Verlag, München 1993

10. Stoll, G. Bedeutung der Produkthaftung für die Prüfung elektronischer Geräte. VDI-Berichte Nr. 966, VDI-Verlag, Düsseldorf 1992. S. 237-245
11. Hartmann, Th. Optische Inspektion. Leiterplatte'94 Bd. 2. Bestückung, Baugruppenprüfung, Hybride, VDI-Berichte Nr. 1133, VDI-Verlag, Düsseldorf 1994. S. 181-203
12. Lau, J. Solder Joint Reliability, Theory and Applications. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992
13. de Kluizenaar, E. Some of today's questions on solders, soldering and soldered joints. Statusseminar zum BMFT Verbundprojekt Nr. 44/91, VDI/VDE-Technologiezentrum Berlin, Oberpfaffenhofen, 8.11.1993
14. Engelmaier, W. Reliability for surface mount solder joints: physics and statistics of failure. DVS Berichte Band 153, Düsseldorf 1993, S. 149-160
15. Bauer, R. Analyse technologischer Konzeptionen elektronischer Baugruppen für zukünftige recyclinggerechte Lösungen. SMT/ASIC/Hybrid'93, vde-Verlag, Berlin 1993, S. 105-116
16. Rahn, A. The Basics of Soldering. John Wiley & Sons Inc., New York 1993
17. Klein-Wassink, R.J. Soldering in Electronics. 2. Auflage, Verlag Eugen Leuze, Saulgau 1992
18. Beuers, J.; Patschek, G. Schlamp, G. Mechanische Eigenschaften von Weichlotmaterialien für die Anwendung in der Mikroelektronik. DVS-Berichte 1992, Bd. 141, DVS-Verlag, Düsseldorf, S.25-30
19. Fenech, A.; Plano, B.; Lavigne, N.; Optimization of Technological Choices in SMT with respect to Thermomechanical Stress. Proceedings 1994 IEMT Symposium, September 12-14, 1994 La Jolla, CA USA, S. 86-93
20. de Kluizenaar, E.-E. Reliability of soldered joints: Thermal shock, growth of intermetallic layers and solder fatigue testing, DVS-Berichte 1990, Bd. 129, DVS Düsseldorf, S.252-258
21. de Kluizenaar, E.-E. Reliability Requirements for Soldered Joints – an Industrial Point of View. in: Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid, 03.-05. Mai 1995, S. 783 - 791 vde-Verlag, Berlin 1995

22. Dudek, R.; Auersperg, J.; Michel, B. Bestimmung mechanischer Beanspruchungszustände in SMD-Aufbauten mit Mitteln der Festkörpermechanik. SMT/ASIC/Hybrid'92, vde-Verlag, Berlin 1992, S. 167-176
23. Dudek, R.; Faust, W.; Hartmann, H.-J.; Michel, B. Beanspruchung von Lötverbindungen oberflächenmontierter IC's in Abhängigkeit von der Pin-Form. SMT/ASIC/Hybrid'93, vde-Verlag, Berlin 1993, S. 117-131
24. Wood, N.O. Predicting SMT Solder Joint Reliability Using Calculated Temperatures. EP&P Electronic Packaging & Production, June 1992, S.72-74
25. Nicewarner, E. Historical Failure Distribution and Significant Factors Affecting Surface Mount Solder Joint Fatigue Life. Soldering & Surface Mount Technology, No. 17. May 1994
26. Warnke, A.; Harning, M.; Schomburg, U. Inelastische temperaurabhängige Ermüdung von Lötstellen oberflächenmontierter Komponenten. DVS Berichte Band 153, Düsseldorf 1993, S. 140-148
27. Schmitt-Thomas, K. Verhalten von Lötverbindungen unter thermischer und mechanischer Beanspruchung, DVS-Berichte 1986, Bd. 102, DVS-Verlag, Düsseldorf, S.133–136
28. McKeown, S.-A. Solder Life Prediction of Leadless and Leaded Surface Mount Components under Thermal Cycling and Vibration. International Electronics Packaging Conference (1993, Binghampton) ASME Proceedings Advances in Electronic Packaging EEP Vol. 4–2, ASME 1993. S. 984–994
29. Sauer, W.; Wohlrabe, H. Ein phänomenologisches Zuverlässigkeitsmodell für SMT-Lötstellen. in: Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid, 03.-05. Mai 1995, vde-Verlag, Berlin 1995. S. 743 - 754
30. Lea, C. Evidence that Visual Inspection Criteria for Soldered Joints are no Indication of Reliability, Soldering & Surface Mount Technology, No. 9 Oktober 1991, S.19–24
31. Strauß, R. Der Unterschied zwischen 'Löterfolg' und 'Lötqualität' und seine Bedeutung für die Qualitätskontrolle und das Nachlöten, DVS-Berichte 1992, Bd. 141, DVS-Verlag, Düsseldorf, S. 30–33

32. Pillar, W.O. SMT Inspection versus Performance, Proceedings of the Technical Program Conference, Nepcon West '91, Feb. 24–28, 1991, Anaheim, California, S.11–22
33. Lea, C. The Harmfulness of Reworking Cosmetically Defective Solder Joints. Soldering & Surface Mount Technology, 1990 No. 5, S.4–9
34. Strauß, R. Metallurgische Überlegungen beim Reparaurlöten von bestückten Leiterplatten. in: DVS-Berichte Bd. 129, S. 155-157, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1990
35. DGQ Begriffe zum Qualitätsmanagement, DGQ-Schrift 11-04, Dt. Ges. für Qualität e.V., 5. Auflage, Beuth-Verlag, Berlin 1993
36. DGQ/DQS Audits zur Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen. DGQ-DQS-Schrift 12-64, Dt. Ges. für Qualität e.V., Beuth-Verlag, Berlin 1993
37. Schulze, C. Einflußgrößenanalyse im Vorfeld der statistischen Versuchsplanung. Qualität und Zuverlässigkeit, QZ 36 (1991) 6, S. 334–339
38. Ishikawa, K. What is Total Quality Control? The Japanese Way, Prentice Hall Inc. Eaglewood Cliffs, 1985, S. 89–101
39. Schulz, H.; Hahner, W. Modifizierte FMEA als Instrument der Produktentwicklung. Qualität und Zuverlässigkeit, QZ 36 (1991) 8, S. 480–485
40. Rauwerdink, J. Value Management zur Verbesserung der Qualität und Produktivität auch in der Prdoduktion elektronischer Baugruppen. in: Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid, 03.-05. Mai 1995, S. 523-527, vde-Verlag, Berlin 1995
41. Guinet, J.; Lambert, X. Optimization of Fine Pitch Solder Paste Dispensing by Experimental Design. Proceedings of the Technical Program Surface Mount International, August 30 – September 1, 1994, S. 473–479 San Jose, CA USA
42. Weckenmann, A.; Schwan, T. Rechnergestützte adaptive Versuchsplanung für variantenflexible Elektronikproduktion. in: Sonderforschungsbereich 356 Produktionssysteme in der Elektronik. Hrsg. Feldmann, K.; Geiger, M., Erlangen 1995

43. Sauer, W.; Wohlrabe, H. Ein Simulationsbaustein zur Analyse und Optimierung von Qualitätskontroll- und Regelmethoden. in: Quality'91, Stuttgart 1991
44. DGQ DGQ Schriften 16–31 bis 16–33: SPC 1–3 Statistische Prozesslenkung (und folgende), Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1990
45. Dale, B. G. Questions on the Use of SPC in PCB Manufacture. Proceedings of the 5th Printed Circuit World Convention 5, Glasgow, Scotland, 1990
46. Schönebeck, H. Prozeßnahe Regelkreise. SMT/ASIC/HYBRID 1991, Hrsg.: H. Reichl, A. Eder, VDE–Verlag GmbH, Berlin, 1991
47. Boswell, D. Surface Mount and Mixed Technology Guidelines – A Handbook for professional Engineers. Technical Reference Publications, Port Erin, Isle of Man, 1991
48. Pfeifer, T.; Grob, R.; Schmid, R. Expertensystem für die SPC. Qualität und Zuverlässigkeit, QZ 36 (1991) 7, S. 432–436
49. Schiebel, G. Wichtige Kriterien bei SMD-Bestückautomaten in Richtung Verarbeitung extremer Gehäuseformen. VDI-Berichte Nr. 1133, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
50. Pfeifer, T. et.al. Qualitätssicherung als Schlüsselfunktion in allen Bereichen der Produktion. in: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. AWK, Aachener Werkzeugmaschinen–Kolloquium, Hrsg. Weck, M.; Eversheim, W.; König, W.; Pfeifer, T.; S. 436 – 514, VDI–Verlag, Düsseldorf, 1990
51. VDI/VDE Prüfung von Leiterplattenbaugruppen LPBG: Empfehlungen der VDI/VDE Gesellschaft für Feinwerktechnik, VDI/VDE (Hrsg). Carl Hanser Verlag, München, 1990
52. Kinzelmann, M. Flexibles Fertigungssystem zur qualitätssicheren Produktion von SMT-Flachbaugruppen mit kurzen Durchlaufzeiten. SMT/ASIC/Hybrid'93, vde-Verlag, Berlin 1993, S. 297-306
53. Habenicht, G.; Holzner, G.; Janker, A.; Würmseher, H. Baugruppeninspektion in der automatisierten Fertigung. in: Addendum zum Tagungsband SMT/ASIC/Hybrid'92, 2. –4. Juni 1992, vde-Verlag, Berlin 1992

-
54. Ehrmüller, F.; Linse, V. Arbeitsorganisatorische Integration einer belastungsreduzierenden Technologie für die Sichtprüfung von Leiterplattenbaugruppen. in: SMT/ASIC/Hybrid'91, vde-Verlag, Berlin 1991, S. 471-480; (zugl. BMFT-Fördervorhaben FKZ 01 HH 368/0)
55. Donnell, A.J.; Fanelli, C.P.; Thomas, J.W. Visual Soldering Inspection Inconsistencies - Interpretation of MIL-SPEC Visual Acceptance Criteria. Technical Memorandum AT&T Bell Laboratories, Burlington, 1989
56. Maier, W. Lötfehler: Erkennung, Ursachen, Gegenmaßnahmen – ein Erfahrungsbericht. Tagungsband zum DGQ/ZVEI Symposium Qualität in der Elektronik, Productronica 91, München, 1991
57. Göpel, H. Integration des Boundary Scan in bestehende Testsysteme und -Technologien. SMT/ASIC/Hybrid'93, vde-Verlag, Berlin 1993, S. 405-410
58. Frank, W. Rechnergestützte Verfahren zur Leiterplattenprüfung und Diagnose. Tagungsbericht Leiterplatte'90, VDI – Berichte Nr. 805, VDI – Verlag, Düsseldorf, 1990
59. Rasp, R. A. In-Line Prüfung hochwertiger Produkte. in: SMT/ASIC/Hybrid'91, vde-Verlag, Berlin 1991, S. 139-154
60. Goodwin, Ch. Justification for Automatic Inspection of Surface Mount Assemblies. in: Electronic Packaging & Production, August 1992, Supplement S. 65-69
61. Feldmann, K.; Sturm, J. Yield Improvement in SMT Production by Integrated Process Monitoring and Testing. 15th. IEEE/CHMT Int'l. Electronics Manufacturing Technology Symposium, October 4–6, 1993, Santa Clara, CA USA
62. Kamiske, G. F. Qualität und Produktivität. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, Zwf CIM 85 (1990) 1, S. 5–7
63. VDI/VDE Leiterplattenbestückung, Bestimmung der Genauigkeit und der Leistung von SMD-Bestückautomaten. VDI/VDE-Richtlinie 3712, VDI-Gesellschaft für Mikro- und Feinwerktechnik, Beuth-Verlag, Berlin, 1991

64. Sauer, W.;
Wolter, K.-J.;
Keil, M. Experimentelle Bestimmung der Maschinenfähigkeit von Bestückautomaten während ihres Einsatzes. In: Flexible Produktionssystem für innovative Elektronik, Münchner Messe und Ausstellungsgesellschaft (Hrsg.), Productronica, München, 1993, S. 69-77
65. Sauer, W. Ein optimaler Qualitätsregelkreis für die SMD-Bestückung. VDI-Berichte 1133, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994, S. 139-148
66. Feldmann, K.
Gerhard, M. Variantenbezogene Prozeßführung beim Infrarotlöten. in: Sonderforschungsbereich 356 Produktionssysteme in der Elektronik. Hrsg. Feldmann, K.; Geiger, M., Erlangen 1995
67. Zöllner, B. Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Hanser-Verlag, München, 1995
68. Krug, S. Präventive Qualitätssicherung in der flexiblen Montage. Tagungsband zum VDI-Seminar Planung und Auslegung modularer Montagesysteme, Fürth, 1993
69. Pfeifer, T. ;
Hollmann, F.
(Hrsg.) Innovative Qualitätssicherung in der Produktion - Ergebnisse des Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft. FQS-Schrift 96-04, März 1994, Berlin 1994
70. Feldmann, K.
Sturm, J. Closed Loop Quality Control in Printed Circuit Assembly. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, Volume 17, Number 2, June 1994.
71. N.N. MPM-Sieb- u. Schablonendrucker, Technische Produktinformation, 1995
72. Feldmann, K.
Sturm, J. Prozeßbegleitende Prüfverfahren in der Elektronikproduktion. in: VDI-Berichte Nr. 966, VDI-Verlag, Düsseldorf 1992
73. Brüggemann, K.
Seiß, T.
Schmidt, G.
Sturm, J. Spezifikation objektiver Beurteilungskriterien für die Lötstellenqualität und Analyse automatisierter Prüfverfahren. Firmenschrift der Robert Bosch GmbH, Ansbach, Erlangen 1993
74. Feldmann, K.;
Sturm, J. Analyse von Fine-Pitch-Lötstellen durch Röntgenuntersuchungen. DVS-Berichte Band 153 Weichlöten in Forschung und Praxis, S. 177–187, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1993

-
75. Ries, A. Von der Eingangsprüfung zu Ship to Stock-Verträgen, Tagungsband zum VDI-Seminar Rationelle Produktion in der Elektronik, Erlangen, 1993
76. Lea, C. Solderability and its Measurement. Engineering Science and Education Journal, Vol 2 No 2, April 1993, p 77-84,
77. Höninger, H.; Schmitt-Thomas, K. Schurig, J. Neue Perspektiven und Einsatzmöglichkeiten der Benetzungsprüfung elektronischer Komponenten und Hilfsstoffe. in: Tagungsband SMT/ES&S/HYBRID 1995, vde-Verlag, Berlin, 1995
78. Schiebel, G. Wichtige Kriterien bei SMD-Bestückautomaten bezüglich Verarbeitung extremer Gehäuseformen (Super Fine Pitch, Bare Chip, ...) in: Surface Mount Technologies, ASIC & design automation, hybrid and advanced packaging technologies. Berlin 1994. S. 421-437
79. Reithinger, M. SMT-Montage in der Flachbaugruppenfertigung. Tagungsbericht zur Leiterplatte'94, Band II, zugl. VDI-Berichte Nr. 1133, S. 1-20, Düsseldorf, 1994
80. Schütt, J.; Deger, M. Qualitätssicherung beim Lotpastendruck. in: Surface Mount Technologies, ASIC & design automation, hybrid and advanced packaging technologies. Berlin 1994. S. 89-98
81. Hielscher, G. Untersuchungen verschiedener Druckformarten bezüglich ihrer Anwendung zum Ultra fine pitch - Lotpastendruck. in: Surface Mount Technologies, ASIC & design automation, hybrid and advanced packaging technologies. Berlin 1994. S. 409-419
82. ANSI ANSI/J-STD 001: Joint Industry Standard Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies, EIA, Washington and IPC, Lincolnwood, April 1992
83. DVS Merkblatt DVS 2611: "Visuelle Beurteilung von Weichlötstellen", DVS-Verlag, Düsseldorf, 1993
84. Mahon, J.; Gunning, J. Sub-Pixel resolution for low cost SMT component placement inspection systems. Journal of Electronics Manufacturing (1993) 3, 61-67

85. Mengel, P. Optische und physikalische Methoden für die Flachbaugruppenprüfung. *Feinwerktechnik und Meßtechnik* 98 (1991) 12, S. 543-547
86. Vardaman, J. (Ed.) Surface Mount Technology: Recent Japanese Developments Springer-Verlag 1994
87. N.N. Matsushita/Panasonic Produktinformation zum Laserinspektionsautomaten IPK, Hamburg, 1994
88. N.N. Produktinformationen zu den Laserinspektionsgeräten der Fa. CyberOptics, Chicago, 1994
89. Beelen-Hendriks, C. Automatic Inspection in Reflow soldering. in: *Surface Mount Technologies, ASIC & design automation, hybrid and advanced packaging technologies*. Berlin 1994. S. 109-122
90. Bräunig, D. Wirkung hochenergetischer Strahlung auf Halbleiterbauelemente. Berlin, Springer-Verlag 1989
91. Wolter, K. – J. Statistical Characteristics for Automatic X-Ray Inspection of Solder Joints. Tagungsband zum VDI-ADB Kongreß Innovative Produktion elektronischer Baugruppen, Productronica 1995, München 7.-9. Nov. 1995, S.135-144
92. Sturm, J. Mikrofocus-Röntgeninspektion in der Fertigung von Elektronikbaugruppen – Prozeßbegleitende Lötstelleninspektion. feinfocus Symposium, 29.04.1993, Garbsen
93. Feldmann, K.; Röntgenographische Analyse von Fine-Pitch-Lötstellen. in: Sturm, J. Verbindungstechnik in der Elektronik, VTE, Heft 4, Dezember 1993, S. 158–163
94. Kaiser, Ch.; Automatische Röntgeninspektion von BGA. in: Tagungsband Sturm, J. SMT/ES&S/Hybrid, 03.-05. Mai 1995, vde-Verlag, Berlin Wolter, K.-J. 1995. S. 143-153
95. N.N. Grundspezifikation: Röntgendurchleuchtung von Bauelementen der Elektronik. Europäische Norm DIN EN 100012, Deutsche Fassung, Beuth Verlag, Berlin, 1995
96. Bell, H.; Röntgeninspektion für Reflowlötten – Anwendererfahrungen. John, C. Elektronik Produktion und Prüftechnik EPP, Februar 1995 S. 47- 49

-
97. McBee, Ch. Scanned Beam Laminography. Circuits Manufacturing, January 1990
98. Stephan, J. Lötstelleninspektion mit Röntgenlaminographie - Anforderungen, Einsatzstrategien, Applikationen. in: Tagungsband / SMT/ASIC/Hybrid, 15. – 17. Juni 1993. Hrsg.: Alfred Eder; Herbert Reichl. vde-Verlag, Berlin 1993. S. 365-375
99. Hagio, A.; Crawshaw, R. Tackling ball grid arrays. TEST The European Industry Journal. November/December 1994
100. Rooks, S.; Benhabib, B.; Smith, K.C. Development for an Inspection process for Ball-Grid-Array Technology Using Scanned Beam Laminography. Proceedings of the Nepcon West 94, Anaheim, California, 1994, S. 277 - 289
101. Flaherty, J.M. X-Rays stay on the leading Edge. Test & Measurement World, April 1993
102. Rooks, S. X-Ray Inspection of Flip Chip Attach using digital tomosynthesis. Proceedings of the Nepcon West 94, Anaheim, California, 1994, S. 195 - 202
103. Seitzer, D.; Hanke, R. Neubauer, C. Intelligente Röntgenprüfung zur Qualitätssicherung in der Elektronikindustrie. in: Sonderforschungsbereich 356 Produktionssysteme in der Elektronik. Hrsg. Feldmann, K.; Geiger, M., Erlangen 1995
104. Neubauer, C.; Schröpfer, S.; Hanke, R. X-Ray Inspection of Solder Joints by Planar Computer Tomography (PCT). Proceedings 1994 IEMT Symposium, September 12–14, 1994 La Jolla, CA USA, S.60 - 64
105. Iwata, Y.; Ijyuin, M.; Nakata, S. Investigation on detecting the defects at the micro joints by infrared thermal imaging with laser irradiation. EUPAC, 1st European Conference on Electronic Packaging Technology & 7th Int'l. Conf. Interconnection Technology in Electronics. DVS-Verlag, Düsseldorf 1994, S.39-42
106. Adams, T. Nondestructive Internal Inspection of Mounted Components. Surface Mount Technology, November 1993
107. Adams, T. Failure Analysis. Circuits Assembly, December 1993

108. Boseck, S. Zerstörungsfreie Fehlersuche sowie Charakterisierung von Werkstoffen und Substratschichten mit dem akustischen Rastermikroskop (SAM) EUPAC, 1st European Conference on Electronic Packaging Technology & 7th Int'l. Conf. Interconnection Technology in Electronics. DVS-Verlag, Düsseldorf 1994, S.32-38

109. ZVEI Einsatz von Vision-Systemen zur Prozeßkontrolle. ZVEI-Rahmenpflichtenheft des ZVEI-Arbeitskreises Produktionstechnik, Frankfurt, 1992

110. Mahon, J. Reliability and Robustness in Industrial Computer Vision. in Vernon (Ed.), Computer Vision: Craft, Engineering and Science, New York, 1994.

111. Hansen, J. L.;
Zirk, W. E.;
D'Esposito, L. What is the Capability of your Measurement Process? Annual Quality Congress - 47, Boston, 1993 - Proceedings. American Society for Quality Control, Milwaukee, 1993. S. 676-681

112. N.N. ESPRIT 2017 TRIOS - Automated Process and Assembly Inspection by 3D-Vision, Final Report May 1993, CEC Commission of the European Communities, Directorate Generale DG XIII, Brussels, 1993

113. Wilson, T. Confocal Microscopy. in Confocal Microscopy. T. Wilson, ed., Academic Press, New York, 1990

114. N.N. Technische Dokumentation, UBM-Lasermessplatz, Ettlingen 1995

115. N.N. ESPRIT 2017 TRIOS - Report on overall system design for testbed applications. CEC Commission of the European Communities, Directorate Generale DG XIII, Brussels, 1993

116. Herrmann, G.
(Hrsg.) Handbuch der Leiterplattentechnik. Eugen Leuze Verlag, Saulgau, 1993

117. Wolter, K.-J.;
Kaiser, C.;
Sturm, J. Automatische Röntgeninspektion von BGA. ZVE-Technologieforum Verarbeitung von Ball Grid Arrays (BGA), Oberpfaffenhofen, 1995

-
118. Sturm, J. X-Ray Diagnosis in Electronics Manufacturing. Tagungsband zum VDI-ADB Kongreß Innovative Produktion elektronischer Baugruppen, Productronica 1995, München 7.-9. Nov. 1995, S.145-154
119. N.N. Technische Spezifikation Feinfocus FXS 160.32, Garbsen 1995
120. Spies, M. Unsicheres Wissen: Wahrscheinlichkeit, Fuzzy-Logik, neuronale Netze und menschliches Denken. Heidelberg, Spektrum Akad. Verlag, 1993
121. Zimmermann, H.-J. Fuzzy-Technologien - Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale. Düsseldorf, VDI-Verlag 1993
122. Cecil, J.; Erraguntla, M.; Mayer, R. A Fuzzy Inferential Approach for the Diagnosis of Defects in Electronics Assembly. Proceedings 1994 IEMT Symposium, September 12-14, 1994 La Jolla, CA USA, S.70 - 75
123. Feldmann, K.; Sturm, J. Integrated Process and Quality Control in Electronics Production, in: Annals of the German Academic Society for Production Engineering, WGP, 1994, Darmstadt 1994
124. Keller, J. Solder Joint Failure Detection: Does Inspection Assure Reliability? in Soldering & Surface Mount Technology, No 3 October 1989, S. 56-58
125. Rahn, A. Defekt oder Perfect? Betrachtungen zur Null-Fehler-Theorie. Pronic 2/1992, S. 12-14
126. Feldmann, K.; Sturm, J. Closed Loop Quality Control in Electronics Production based on Fuzzy Logic and Neural Nets. EUFIT'94, Proceedings of the 2nd European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing. Aachen, September 20-23, 1994.
127. Pfeifer, T.; Ritschel, W. Eine verbesserte Klassifikationssicherheit bei der Signalauswertung als Grundlage signalbasierter Qualitätsregelkreise. in: Pfeifer, T.; Hollmann, F. (Hrsg.) Innovative Qualitätssicherung in der Produktion - Ergebnisse des Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft. FQS-Schrift 96-04, März 1994, Berlin 1994

128. Reinhart, G.
Löffler, Th. Signalklassifikation im Rahmen der akustischen Fügeprozeß-
überwachung. tm – Technisches Messen 62 (1995) 10, Ol-
denbourg Verlag, S. 370-375

129. Feldmann, K.;
Götz, K.; Sturm, J.;
Zöllner, B. Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion. tm – Techni-
sches Messen 62 (1995) 10, Oldenbourg Verlag, S. 386-392

130. Croal, I.F.;
Mason, J.P. ANNIE: Applications of Neural Networks for Industry in Eu-
rope, Project Handbook, Harwell Laboratory, CEC DG XIII
ESPRIT-CIME Secretariat, Brussels, 1991

131. N.N. SNNS - Stuttgarter Neuronale Netze Simulator, Universität
Stuttgart, 1994

132. Feldmann, K.;
Götz, K.;
Sturm, J.;
Zöllner, B. Prozeßbegleitende Qualitätssicherung in der Elektronikpro-
duktion. in: Sonderforschungsbereich 356 Produktionssy-
steme in der Elektronik. Hrsg. Feldmann, K.; Geiger, M., Er-
langen 1995

133. Rothhaupt, A.;
Sturm, J. Systematische Untersuchungen zum Lotpastenauftrag mit
tels Dispensen für unterschiedliche Rastermaße. in SMT/
ASIC/HYBRID, 15. – 17. Juni 1993,

134. Feldmann, K.;
Krug, S.;
Sturm, J. Präventive Qualitätsmaßnahmen zur Optimierung des Wel-
lenlötens. in: Qualität und Zuverlässigkeit QZ 39 (1994) 3, S.

135. Feldmann, K.
Götz, K.;
Sturm, J. CAD/CAM Process Planning for Laser Soldering in electro-
nics assembly. Proceedings of the 26th Int'l. CIRP Seminar
on Manufacturing Systems - LANE'94, erlangen 1994

136. v. Gastel, J. ALERT: Advanced Laser Reflow Soldering for Surface Mount
Technology. in: VDI-Berichte Nr. 1133, Tagungsbericht Leiter-
platte'94, Karlsruhe 2./3. Mai 1994, Bd. 2. Bestückung, Bau-
gruppenprüfung, Hybride, VDI-Verlag, Düsseldorf 1994. S.
107-128

137. Großer, V. et.al. Mechanisch-thermische Versagensdetektion an Leiterplatten
mittels numerischer und laseroptischer Verfahren. in: Ta-
gungsband SMT/ES&S/HYBRID 1995, vde-Verlag, Berlin,
1995

Lebenslauf

1. Persönliche Daten

Name	<u>Jürgen</u> Bernhard Sturm
geboren	am 30.6.1963 in Bayreuth
Familienstand	verheiratet, 2 Kinder

2. Ausbildung

9/69 - 8/73	Grundschule in Nürnberg
9/73 - 6/82	Gymnasium Röthenbach a.d. Pegnitz
6/82	Abschluß: Abitur
11/82 - 6/89	Studium der Fertigungstechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
6/89	Abschluß: Diplom-Ingenieur (Fertigungstechnik)

3. Berufstätigkeit

6/89 - 12/94	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
1/95 - 6/96	AEG Daimler Benz Industrie, Projektleiter Business Process Reengineering
seit 7/96	TEMIC TELEFUNKEN microelectronic GmbH, Bereichsleiter Logistik

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

Projektiertung 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 :
Prozßführung 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 Optikdiagnostik 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 Rebhahn

**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 Schulz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschneiden von Blechformteilen

165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1996. 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.