

Fertigungstechnik - Erlangen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred Geiger

Knuth Götz

84

Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion



Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion

938

Böchererz A. 0238

Universität Erlangen
Abteilung für
Technische Informatik
und Elektrische Systematik
Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann
Erlangenstr. 7-9 91058 Erlangen

Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur 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: 5. Mai 1998
Tag der Promotion: 22. Juli 1998
Dekan: Prof. Dr.-Ing. G. Herold
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter



Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Götz, Knuth:

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion / Knuth Götz. Hrsg. von Klaus Feldmann. -
Bamberg : Meisenbach, 1998
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 84)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1998
ISBN 3-87525-112-1 ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© Meisenbach Verlag Bamberg 1998

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

Römer 8,28

Die vorliegende Dissertation 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 wohlwollende Förderung bei der Durchführung der Arbeit und sein mir entgegengebrachtes Vertrauen, das mir das eigenverantwortliche Arbeiten auf diesem Forschungsgebiet ermöglichte.

Mein besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter, Institut für Elektronik-Technologie der Technischen Universität Dresden, für die engagierte Übernahme des Koreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Geiger, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie der Universität Erlangen-Nürnberg, dem Vorsitzenden meines Promotionsverfahrens.

Herzlich danke ich allen Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, mit denen ich die Arbeit aus verschiedenen Blickwinkeln diskutieren konnte und die mir wertvolle Ratschläge und Anregungen für das Gelingen der Arbeit gaben. Den Diplomanden, Studienarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften, die sich mit außergewöhnlichem Engagement an den Forschungsaufgaben beteiligt haben, danke ich für ihre Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. S. Sander, Herrn Dipl.-Ing. R. Feuerstein, Herrn Dipl.-Ing. M. Reichenberger, Herrn Dipl.-Inf. C. Felbinger, Frau cand.-ing. M. Lierl, Frau A. Herzner, Herrn cand.-inf. E. Ugurlu und Herrn cand.-inf. D. Eizenhöfer für ihre intensive Mithilfe bei der Korrektur der Arbeit.

Ich danke meinen Eltern, die mich von früher Jugend an ermutigt und auf meinem Weg unterstützt haben.

Erlangen, Juli 1998

Knuth Götz

Die vorliegende Dissertation 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 hervorragende Förderung bei der Durchführung der Arbeit und sein mit entgegengebrachtem Vertrauen, das mir das eigenverantwortliche Arbeiten auf diesem Forschungsgebiet ermöglichte.

Mein besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Walter, Institut für Elektronik-Technologie der Technischen Universität Dresden, für die engagierte Übernahme des Korrekturens und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Götzig, Institut für Fertigungstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg, dem Vorstehenden meines Promotionsverfahrens.

Hervorheben möchte ich meine Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, mit denen ich die Arbeit aus verschiedenen Blickwinkeln diskutieren konnte und die mir wertvolle Ratschläge und Anregungen für das Gelingen der Arbeit gaben. Den Diplomanden, Studienassistenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern, die sich mit zugehörigem Engagement an den Forschungsarbeiten beteiligt haben, danke ich für ihre Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. S. Sander, Herrn Dipl.-Ing. R. Feuerstein, Herrn Dipl.-Ing. M. Reichenberger, Herrn Dipl.-Ing. C. Feldinger, Frau cand.-Ing. M. Lieb, Frau A. Hatzner, Herrn cand.-Ing. E. Ujumu und Herrn cand.-Ing. D. Eisenhöfer für ihre intensive Mithilfe bei der Konzeption der Arbeit. Ein besonderer Dank geht an alle Mitarbeiter des Nachdruckwerks, die mich von früher Jugend ermunterten und auf meinem Weg unterstützt haben.

Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) auch nicht für Zwecke der Unterrichtsvermittlung, -verbreitung oder -ausbreitung, mit Ausnahme der in den §§ 45, 46 URG genannten Fälle, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Mittel vervielfältigt, verbreitet oder sonstwie veröffentlicht werden.

© Nürnberg Verlag Hansberg 1998
Herstellung: Bayerischer Druck-Verlag, Erlangen-Elterndorf
Nürnberg, Juli 1998

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	
	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	
1	Einleitung	1
2	Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion - Ausgangssituation und Defizite	6
2.1	Industrielles Umfeld	6
2.2	Stand der Technik und Defizite der Methoden	10
2.3	Abgrenzung und Ziel	12
2.4	Leitthesen und Vorgehensweise	13
3	Exemplarische Modellbildung	16
3.1	Situation in Forschung und Industrie	19
3.1.1	Schädigungsmodell	19
3.1.2	Gefährdete Bauelemente	20
3.1.3	Praktizierte Möglichkeiten zum Schutz der Bauelemente	21
3.1.4	Eingesetzte Testverfahren	23
3.1.5	Problemkreis des Diaphragma-Modells	28
3.2	Versuche und Modellverfeinerung	29
3.2.1	Belastung der Gehäusestruktur durch die thermische Fehlpassung der Komponenten eines Bauelementes	30
3.2.2	Einflußfaktoren auf die Crackingrate	34
3.2.3	Experimentelle Simulation des Lötprozesses und Modellbildung	38
3.3	Verbessertes Schädigungsmodell	42
3.4	Ausblick auf künftige Forschungen und Lösungsansätze	44
4	Informationssysteme in der Elektronikproduktion	46
4.1	Informationssysteme und CAQ	46
4.2	Integration des Informationssystems in die bestehende CAD/CAM/CIM-Umgebung	49
4.3	Aspekte für die Auslegung eines Informationssystems	50

4.4	Anforderungen an Informationssysteme der Elektronikproduktion	51
4.4.1	Produktionsanlage und Fertigungssystem	52
4.4.2	Informationssystem und Fertigungsumgebung	55
4.5	Kernkomponenten des Informationssystems	57
4.6	Ableitung des Anforderungsprofils	59
4.6.1	Basisanforderungen aus DIN ISO 9000ff	61
4.6.2	Weitere Basisforderungen	63
4.7	Bewertungskriterien für Informationssysteme	67
4.7.1	Quantifizierbare Kriterien	67
4.7.2	Qualitative Kriterien	76
4.8	Bewertung marktverfügbarer Informationssysteme	82
5	Einsatzorientierte Realisierung des Informationssystems	84
5.1	Realisierung des Kernsystems	84
5.1.1	Konzept des Begleitenden Fertigungsprotokolls	84
5.1.2	Schnittstellen des Kernsystems	87
5.2	Funktionen der Arbeitsvorbereitung	88
5.2.1	Stammdatengenerierung	88
5.2.2	Intranet-Erweiterung für Materialdatenbanken	90
5.2.3	Auftragsgenerierung	91
5.3	Statische und dynamische Prozeß- und Qualitätslenkung	92
5.3.1	Verteilung von Steuerprogrammen und Arbeitsanweisungen	92
5.3.2	Prozeßregelung und -koordination	94
5.4	Archivierung und Off-line-Analyse	98
6	Ausgewählte Methoden des Qualitätmanagements und deren anwendungs-spezifischen Defizite	100
6.1	Quality Function Deployment (QFD)	101
6.1.1	Theorie des Quality Funktion Deployment	101
6.1.2	Anwendung in der Elektronikproduktion	104
6.1.3	Bewertung der Methode	106
6.2	Fehler-Möglichkeit- und Einfluß-Analyse (FMEA)	107
6.2.1	Beschreibung der FMEA - Methode	108

6.2.2	Anwendung in der Elektronikproduktion	109
6.2.3	Bewertung der Methode	109
6.3	DoE - Design of Experiments	111
6.3.1	Klassische Verfahren	111
6.3.2	Versuchsmethodik nach Taguchi	116
6.3.3	Versuchsmethodik nach Shainin	119
6.4	Statistische Prozeßregelung	123
6.4.1	Verfahren der statistischen Prozeßregelung	124
6.4.2	Anwendung in der Elektronikproduktion	127
6.4.3	Bewertung der Methode	128
6.5	Fazit für die Prozeßforschung in der Elektronikproduktion	128
7	Methodik zur hochdimensionalen, parallelen Analyse verrauschter Qualitätsdaten	129
7.1	Wahl der Analysemethode	129
7.1.1	Anforderungen an eine zielorientierte Analysemethode	129
7.1.2	Defizite heutiger Analysemethoden	131
7.1.3	Alternative Analyseansätze	132
7.2	Funktionsweise Neuronaler Netze	133
7.2.1	Aufbau und Funktion eines Neurons	133
7.2.2	Elemente Neuronaler Netze	135
7.2.3	Lernverfahren und Lernvorgang	137
7.3	Modellbildung und Prozeßsimulation auf Basis verrauschter Qualitätsdaten	139
7.3.1	Vorgehensweise zur problemorientierten Netzsynthese	140
7.3.2	Erweiterte Validierung eines Netzmodells	140
7.3.3	Nutzung genetischer Algorithmen	145
7.3.4	Anwendungsmöglichkeiten der Methode	145
8	Anwendungsbeispiele Neuronaler Modelle in der Elektronikproduktion	147
8.1	Prozeßstabilisierung am Beispiel des Dispensprozesses	147
8.2	Interprozeßanalyse mit Neuronalen Netzen	149
8.2.1	Neurales Prozeßmodell des Lotpastenauftrags	151

8.2.2	Neuronales Bestückmodell	155
8.2.3	Neuronales Interprozeßmodell	158
8.3	Prozeßfenster und Prozeßausbeute	159
8.3.1	Definition von Prozeßfenstern	159
8.3.2	Prognose der Prozeßausbeute im Arbeitspunkt	160
8.4	Prozeßkoordination mittels Neuronaler Netze	161
8.4.1	Entwurf eines Neuronalen Streckenmodells	162
8.4.2	Aufbau des Neuronalen Koordinators	163
8.5	Texturbasierte Fehlerklassifikationssysteme in der Röntgenbildauswertung	165
8.5.1	Merkmalsauswahl und Bestimmung der Korrelation zu den Fehlerklassen	165
8.5.2	Entwurf, Validierung und Einsatz des Klassifikators	167
8.6	Röntgenbildbasierte Prozeßdiagnose	168
8.6.1	Diagnose mit invertierten Netzmodellen	170
8.6.2	Bewertung der Methode	171
9	Zusammenfassung	172
10	Literaturverzeichnis (alphabetisch geordnet)	174

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Bei mehrfacher Verwendung eines Formelzeichens steht der jeweilige Zusammenhang in Klammern.

A, B, C, D ... H	Parameterplatzhalter (Versuchsplanung, -durchführung)
A	Auftretenswahrscheinlichkeit (FMEA)
a_j	Aktivierung des Neurons j
BGA	Ball Grid Array
CECC	CENELEC-Komitees für Bauelemente der Elektronik
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
C_m, C_{mk}	Maschinenfähigkeit
C_{gm}, C_{gmk}	Meßmittelfähigkeit
C_p, C_{pk}	Prozeßfähigkeit
D_p	Datenpaket
d	Verschiebungsvektor (FEM) Anzahl Datenpakete (Informationssystem)
E	Fehler, <i>Error</i> (Neuronale Netze) Entdeckungswahrscheinlichkeit (FMEA) Effekt (DoE)
e^k	Fehlerwert zum Eingabemuster o^k
F	Kraft, Kraftvektor
$f_N()$	Dichtefunktion der Normalverteilung
$F_N()$	Verteilungsfunktion der Normalverteilung
H, r. H., r. F.	Feuchte (Humidity), relative Feuchte
HAST	Highly Accelerated Stress Test
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IPC	The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits
J-STD	Joint Industry Standard
i, j	Laufvariablen
l	Länge

\bar{M}	Steifigkeitsmatrix
MIL	Military Standard
o_i	Eingabe i
o^k	Eingabemuster
P, p	Wasserdruck
PCT	Pressure Cooker Test
\mathcal{P}	Prozeßfenster, Menge aller Parametervektoren, die zur gewünschten Qualität(-szahl) führen
Q	Qualität(-szahl)
S	Schwere der Fehlerauswirkung
SOP	Small Outline Package
SOT	Small Outline Transistor
s	Standardabweichung einer Stichprobe
T	Temperatur
t	Zeit
t_{\max}	maximale Übertragungszeit
V	Volumen
V_p, V_1, V_3	Datenvolumen, Datenpaketvolumen
w_{ij}	Gewicht von i nach j
\bar{W}	Konnektionsmatrix
\mathcal{W}	wirtschaftlich sinnvoller, effizienter Teilbereich von Prozeßfenster \mathcal{P}
\bar{x}_i	Mittelwert einer Stichprobe
α	Wärmeausdehnungskoeffizient
ε	Fehlerkriterium
σ	Standardabweichung einer Grundgesamtheit
μ	Erwartungswert einer Grundgesamtheit
$\varphi(Z)$	Dichtefunktion der standardisierten Normalverteilung
$\Phi(Z)$	Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung

1 Einleitung

Die Elektronik und damit ihre Produktion stellen heute eine wesentliche Schlüsseltechnologie für die Volkswirtschaft mit Ausstrahlung auf nahezu alle Produktbereiche dar (Bild 1 und 2) [142]. Die sich rasch ändernden Anforderungen des Marktes, die Forderung nach einer weiteren Miniaturisierung der Baugruppen und der Trend hin zu einer Integration der elektronischen und mechanischen Funktionen des Produktes beeinflussen die Prozesse und daher die Produktionssysteme der Elektronikfertigung in hohem Maße [35].

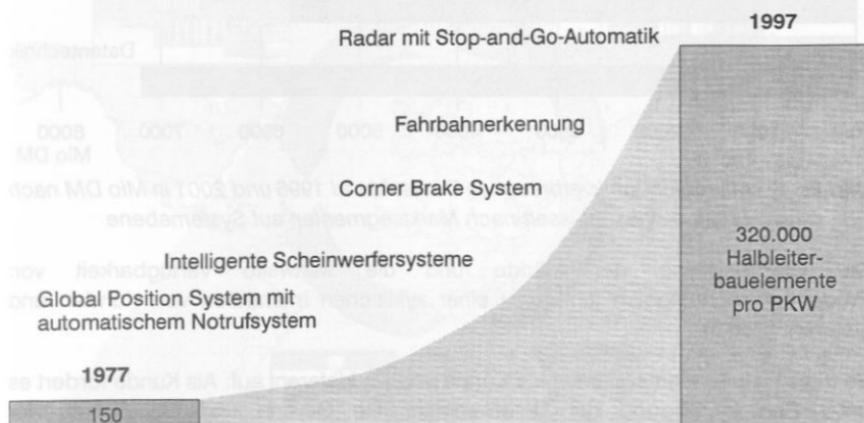


Bild 1: Die Elektronikproduktion als Schlüsseltechnologie am Beispiel des Automobils: Von 1977 bis 1997 stieg die Zahl der Halbleiterbauelemente im PKW von ca. 150 auf 320 000. [61]

In diesem Umfeld nimmt das Qualitätsmanagement¹ als Instrument zur Einnahme und Sicherung von Marktanteilen und zur Kostensenkung eine entscheidende Rolle ein [71]. Es ist daher sowohl für kurz- und mittelfristige Unternehmensziele, als auch für die langfristige Sicherung des Unternehmenserfolges von strategisch hoher Bedeutung [157]. Die Informationsgewinnung über die qualitätsrelevanten Aspekte des Betriebes und der Prozesse, der Transport und die Verarbeitung dieser Informationen sowie die Ableitung und Bewertung qualitätsverbessernder Maßnahmen und deren Umsetzung im Unternehmen stellen einen immerwährenden Zyklus des zielgerichteten, unternehmerischen Handelns dar [34][137].

1: Qualitätsmanagement: Derjenige Aspekt der Gesamtführungsaufgabe, welcher die Qualitätspolitik festlegt und verwirklicht.

Qualitätspolitik: Die umfassenden Absichten und Zielsetzungen einer Organisation betreffend die Qualität, wie sie durch die oberste Leitung formell ausgedrückt werden. [113]

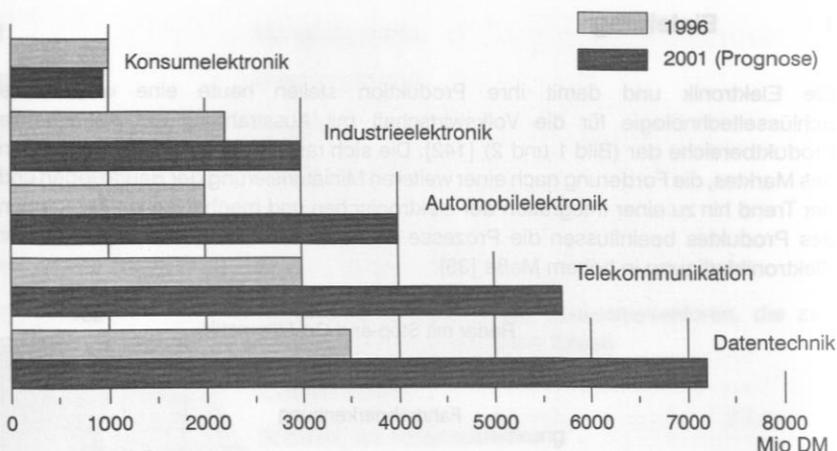


Bild 2: Mikroelektronikverbrauch in Deutschland 1996 und 2001 in Mio DM nach [142], aufgeschlüsselt nach Marktsegmenten auf Systemebene

Die Globalisierung der Märkte und die weltweite Verfügbarkeit von Produktionstechnologien führen zu einer zyklischen Interaktion von Kunden und Lieferant (Bild 3).

So tritt ein Unternehmen immer als Kunde und als Lieferant auf: Als Kunde fordert es unter Berücksichtigung der Unternehmensziele Gewinn und Marktanteil, der Konkurrenzsituation, der Beschaffungsmarktsituation und der Gestaltung des Absatzmarktes von seinen Lieferanten die termingerechte, mengengerechte und kostengerechte Bereitstellung geeignet beschaffender, qualifizierter Komponenten.

Als Lieferant muß das Unternehmen seinem Kunden gegenüber Produkte anbieten, die dessen Erwartungen in Eigenschaften und Preis entsprechen. Eine verspätete Einführung des Produktes oder Lieferung an den Kunden genügt bereits, um Marktanteile zu verlieren.

Der Begriff Qualität umfaßt daher sinnvollerweise immer die technischen, einsatzorientierten Eigenschaften eines Produktes sowie die termingetreue und kostenminimierte Herstellung und Prüfung.

Diese Situation der Elektronikproduktion wird durch die immer raschere Innovation verschärft. Besonders die dynamischen Marktsegmente Telekommunikation und Datentechnik (Bild 2) [121] bewirken derzeit, daß die Integration von Halbleiterbauelementen vorangetrieben wird. Diese Entwicklung bei Bauelementen und elektromechanischen Komponenten strahlt über die Produktionstechnologien auf die Qualitätssicherung aus. Die Dynamik des Marktes hat somit bedeutende Auswirkungen auf die Einführung und Rentabilität von Fertigungstechnologien, Prüfverfahren und Qualitätsmanagementsystemen.

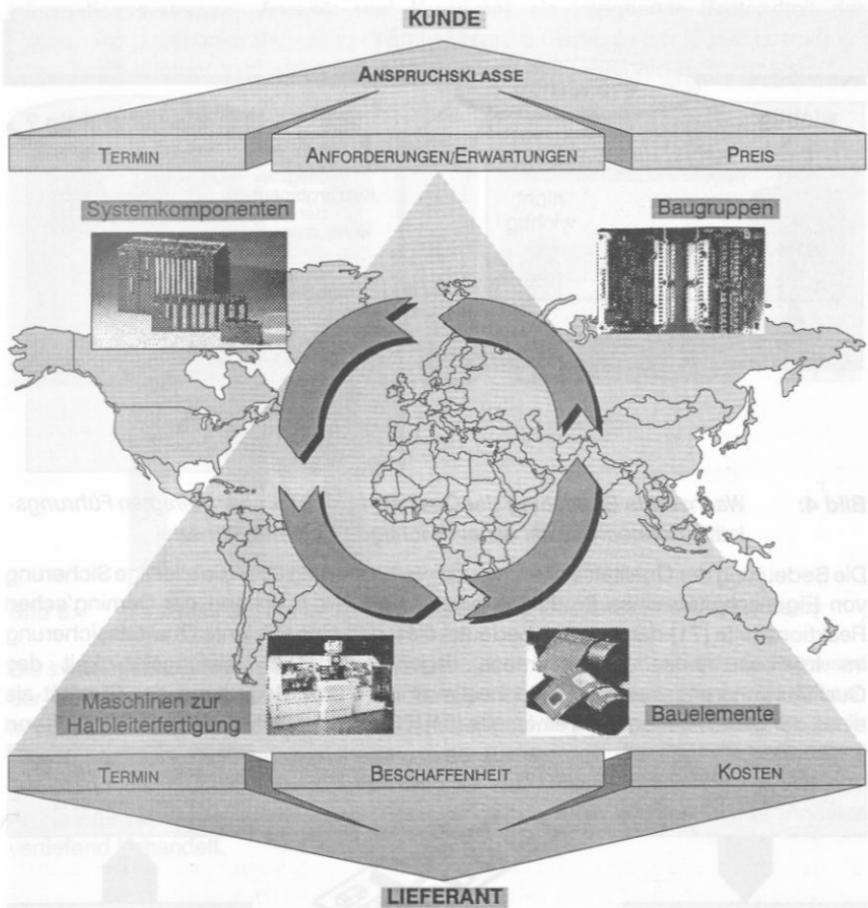


Bild 3: Herausforderung an das Qualitätsmanagement der Elektronikproduktion durch die weltweite, zyklische Interaktion Lieferant-Kunde

Diesen Herausforderungen muß ein Qualitätsmanagementsystem durch seine Leistungsmerkmale und -fähigkeit ebenso nachkommen wie dem wachsenden Qualitätsbewußtsein auf allen Ebenen eines Unternehmens (Bild 4).

So muß ein Qualitätsmanagementsystem einerseits transparent alle Vorgänge und Zustände der gleichen und der untergeordneten Unternehmensebenen erfassen und darstellen. Zum anderen werden von ihm ebenen- und problemspezifisch Datenverdichtungen und -aufbereitungen verlangt, um die jeweiligen Ebenen und übergeordneten Instanzen vor einem blockierenden Überangebot von Informationen zu schützen.

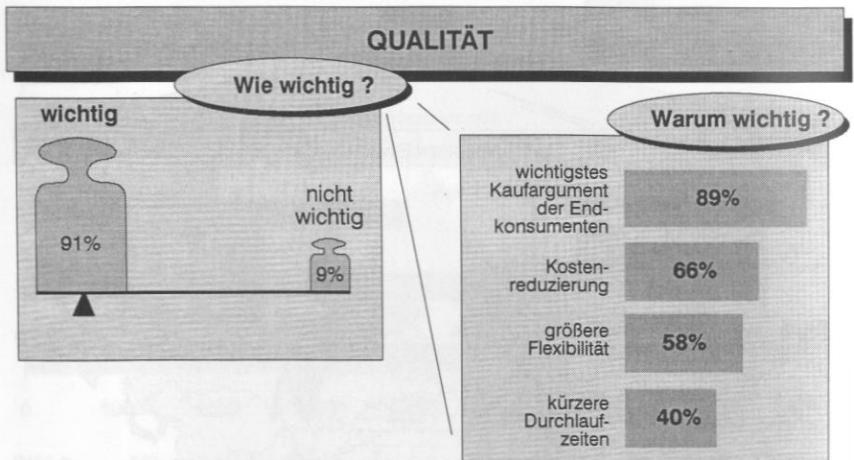


Bild 4: Wachsende Bedeutung der Qualität [148]: 91% aller befragten Führungskräfte nennen Qualität als ein wichtiges Unternehmensziel

Die Bedeutung der Qualitätssicherung und -verbesserung über die alleinige Sicherung von Eigenschaften eines Produktes hinaus stellt Bild 5 anhand der Deming'schen Reaktionskette [71] dar. Letztlich bedeutet dies, daß eine effiziente Qualitätssicherung im Interesse jedes Unternehmens liegen muß. Die Leistungsfähigkeit des Qualitätssicherungssystems² wird bestimmt durch die Bedeutung der Qualität als eines der Unternehmensziele einerseits [34][60] und durch die Leistungsfähigkeit von

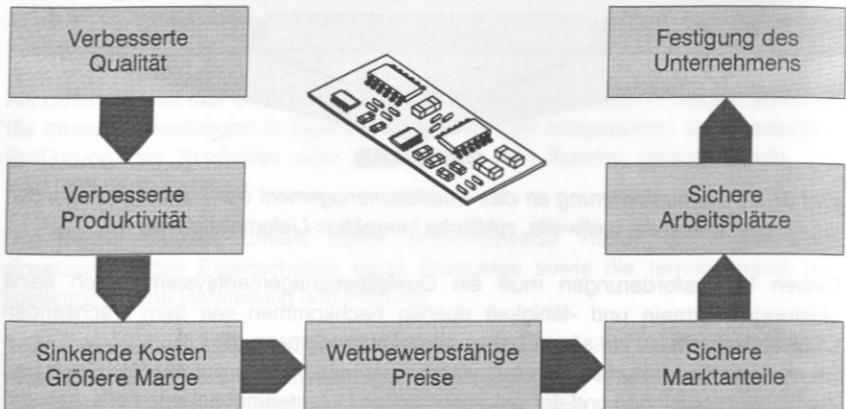


Bild 5: Bedeutung der Qualität für Unternehmen und Mitarbeiter, dargestellt in der Deming'schen Reaktionskette [71]

2: Qualitätssicherungssystem: Die Aufbauorganisation, Verantwortlichkeiten, Abläufe, Verfahren und Mittel zur Verwirklichung des Qualitätsmanagements [113]

Informationssystemen, Analytik und Kreativität als integrierter Bestandteil der Elektronikproduktion andererseits (Bild 6). Über die Elemente der Qualitätslenkung³ bzw. Qualitätssicherung⁴ wirken sie sich direkt auf das Geschäftsergebnis aus.

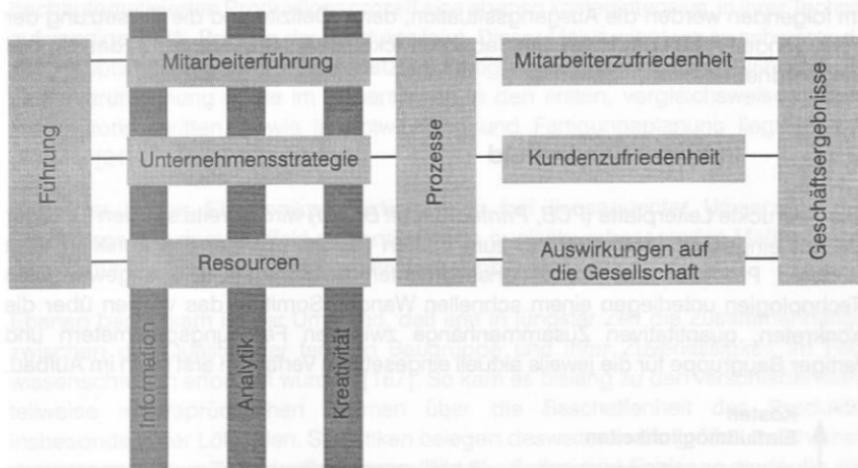


Bild 6: Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit des Qualitätssicherungssystems

Die systematische Sammlung und Auswertung von Informationen über die Prozesse der Elektronikproduktion sowie die lösungsorientierte Modellbildung aus diesen Informationen stehen daher im Mittelpunkt der nachfolgenden Betrachtungen. Nach einer Ist-Analyse der Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion werden Ansätze gezeigt, die heutigen Defizite auf dem Weg zur Null-Fehler-Produktion zu beseitigen. An ausgewählten Industrie- und Forschungsbeispielen werden diese Ansätze vertiefend behandelt.

3: Qualitätslenkung: Die operationellen Techniken und Tätigkeiten, welche angewendet werden, um die Qualitätsanforderungen zu erfüllen.

4: Qualitätssicherung: Alle geplanten und systematischen Tätigkeiten, die notwendig sind, um ein angemessenes Vertrauen zu schaffen, daß ein Produkt oder eine Dienstleistung die gegebene Qualitätsforderungen erfüllen wird. [113]

2 Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion - Ausgangssituation und Defizite

Im folgenden werden die Ausgangssituation, deren Defizite und die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit umrissen. Die dabei entwickelten Ansätze werden in das Umfeld eingeordnet.

2.1 Industrielles Umfeld

Die gedruckte Leiterplatte (PCB, *Printed Circuit Board*) wird bereits seit den fünfziger Jahren eingesetzt [175] und hat zum breiten Durchbruch der Elektronik in allen anderen Produkt- und Produktionssegmenten beigetragen. Die angewendeten Technologien unterliegen einem schnellen Wandel. Somit ist das Wissen über die konkreten, quantitativen Zusammenhänge zwischen Fertigungsparametern und fertiger Baugruppe für die jeweils aktuell eingesetzten Verfahren erst noch im Aufbau.

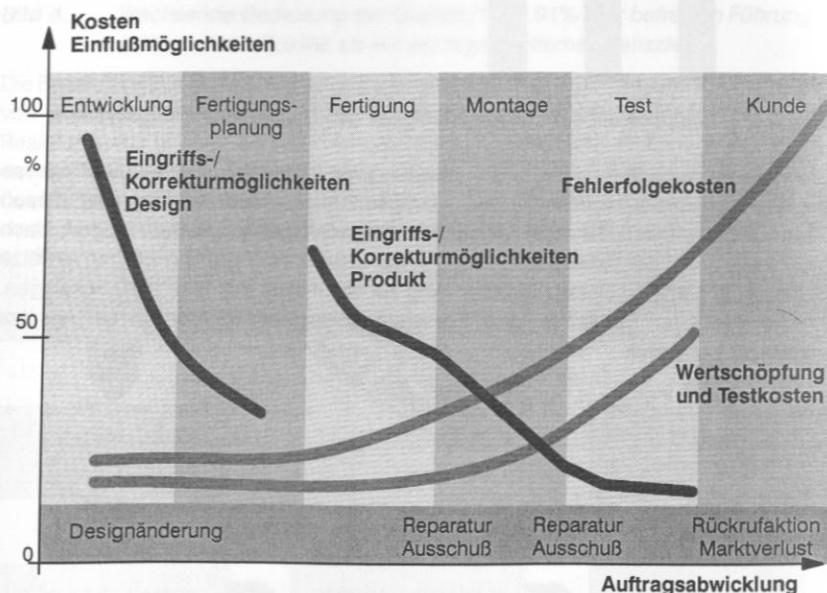


Bild 7: Relative Kostenauswirkungen von Qualitätsmängeln in der Elektronikproduktion entlang der Auftragsabwicklung [46]

Aufgrund der Komplexität der Fertigungsoperationen und hohen Zahl an Verbindungsstellen und Fügepartnern in der Elektronikproduktion ist derzeit ein Qualitätsniveau von maximal etwa 80% möglich: Ausgehend von einer Fehlerrate von

typischerweise 200 dpm im Lotpastenauftrag /89/ und 1000 (2000) Lotdepots je Baugruppe wird allein für diesen Schritt nur ein Qualitätsniveau von 82% (67%) erreicht. Dies führt dazu, daß in der Mehrheit einem kostenintensiven und hochautomatisierten Produktionsprozeß eine ebenso kostenintensive, in ihrer Technik aufwendige 100%-Prüfung der Produkte folgt. Dieser Malus wiegt um so schwerer, da die Hauptwertschöpfung in den letzten Fertigungsschritten erfolgt, während die Fehlerverursachung heute im wesentlichen in den ersten, vergleichsweise billigen Produktionschritten, sowie in Entwicklung und Fertigungsplanung liegt (Bild 7) [89][46][21].

Dabei ist in der Elektronikproduktion, auch bei konsequenter Umsetzung der Ergebnisse aus dem Prüffeld zu kontinuierlich qualitätsverbessernden Maßnahmen, derzeit nur ein Qualitätsniveau von 85% erreichbar [51].

Ebenso bedeutsam ist der Umstand, daß erst in jüngster Zeit die Zusammenhänge zwischen der Qualität der fertigen Baugruppe und ihrer Zuverlässigkeit im Feld wissenschaftlich erforscht wurden [167]. So kam es bislang zu den verschiedensten, teilweise widersprüchlichen Normen über die Beschaffenheit des Produkts, insbesondere der Lötstellen. Statistiken belegen desweiteren die große Unsicherheit eines wesentlichen Teils der Prüfungen (Bild 8). Selten sind Fehler so eindeutig wie in Bild 8 oben abgebildet. Selbst erfahrene Prüfer haben eine Trefferquote nur knapp oberhalb der Laplace-Wahrscheinlichkeit, manchmal sogar darunter [143][29].

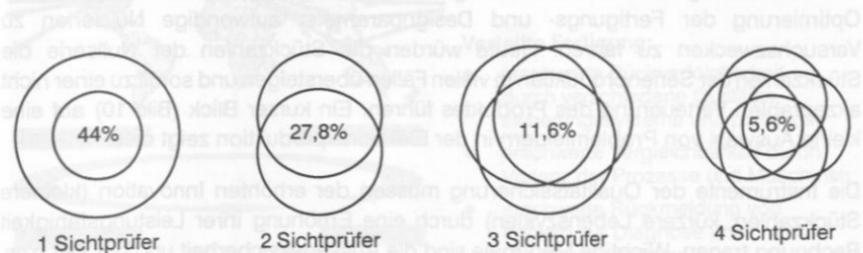
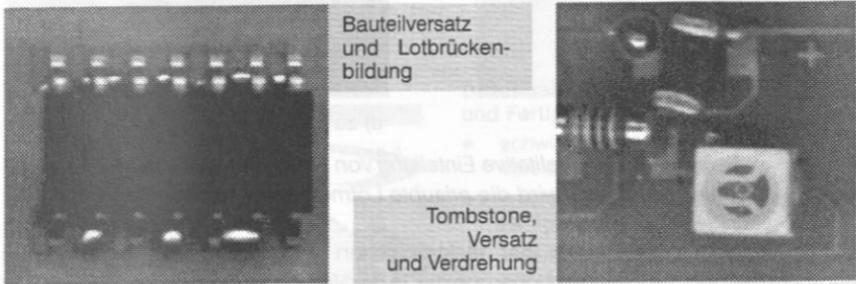
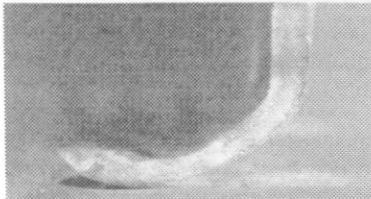


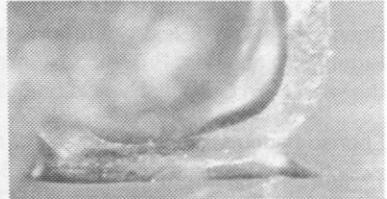
Bild 8: AT&T-Studie zur Zuverlässigkeit der visuellen Sichtprüfung [12]

Auch führte die derzeit akzeptierte Normung zur Beurteilung von Lötstellen dazu, daß die Lötverbindung rein visuell und auf sekundäre Merkmale hin bewertet wurde

(Bild 9). Das eigentliche Ziel, die Sicherstellung von Qualität und Zuverlässigkeit des Produktes im Einsatz, verschwand immer mehr aus dem Fokus der Qualitätssicherer. Die Baugruppenprüfung tendierte somit immer mehr zu Freigabe nach einem optischen *Eindruck* [159][150]. Erst 1995 wurden die entsprechenden Normen der IPC und MIL, an der sich letztlich alle anderen nationalen und internationalen Normungsgremien orientieren, ersatzlos gestrichen, um dieser Fehlentwicklung ein Ende zu bereiten. In der Praxis der Produkt- und damit der Prüfspezifikation lebt diese ehemalige Norm aber immer noch weiter.



a) zu wenig Lot



b) akzeptables Minimum



c) akzeptables Maximum



d) zu viel Lot

Bild 9: *Beispiel für die qualitative Einteilung von Lötstellen nach optischen Merkmalen [140]; hier wird die erlaubte Lotmenge für J-Leads bestimmt.*

Immer kürzere Lebenszyklen der elektronischen Produkte stellen eine weitere Herausforderung der Qualitätssicherung dar. In der Vergangenheit war es möglich, zur Optimierung der Fertigungs- und Designparameter aufwendige Nullserien zu Versuchszwecken zu fahren. Heute würden die Stückzahlen der Nullserie die Stückzahlen der Serienproduktion in vielen Fällen übersteigen und somit zu einer nicht akzeptablen Verteuerung des Produktes führen. Ein kurzer Blick (Bild 10) auf eine kleine Auswahl von Problemfeldern in der Elektronikproduktion zeigt dies.

Die Instrumente der Qualitätssicherung müssen der erhöhten Innovation (kleinere Stückzahlen, kürzere Lebenszyklen) durch eine Erhöhung ihrer Leistungsfähigkeit Rechnung tragen. Wichtige Merkmale sind die Aussagesicherheit und die Zeit bzw. der Aufwand, um die qualitäts- und entscheidungsrelevanten Informationen über Produkt und Produktion bereitzustellen.



Bild 10: Beispiele für Problemfelder in der industriellen Umgebung einer Elektronikproduktion

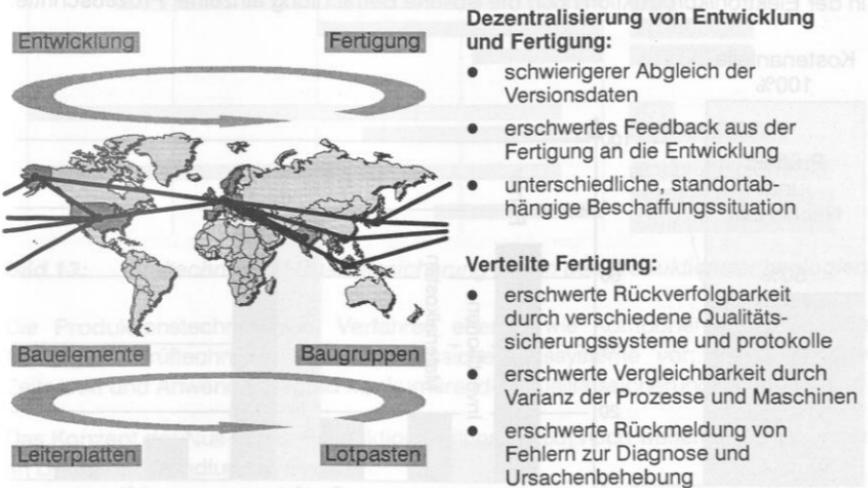


Bild 11: Hohe Anforderungen an ein Qualitätssicherungssystem durch weltweite, vernetzte Fertigung von Komponenten und Baugruppen

Das heutige Wissen über die Prozeßparameter und deren Optimierung in Hinblick auf ein gleichbleibend hohes Qualitätsniveau der Baugruppenproduktion ist nur zu einem vergleichsweise geringen Anteil wissenschaftlich strukturiert. Der weitaus größere, produktionstechnisch bedeutendere Anteil ist implizit-holonisch auf die Maschineneinsteller und -bediener der Anlagen verteilt.

Dies hat zur Folge, daß das Wissen um optimale Parameter nicht oder nur in langen Anlernphasen weitergegeben werden kann. Die langen Anlernphasen wiederum sind ein Hemmschuh bei der notwendigen Expansion und Verflechtung im Sinne der globalen Produktion der Unternehmen, aber auch ein Gefahrenpotential für das Qualitätsniveau der Produktion vor dem Hintergrund hoher Personalfuktuation. Die weltweite, vernetzte Fertigung von Komponenten und Baugruppen (Bild 11) stellt durch schwierige Verfolgbarkeit (traceability) hohe Anforderungen an ein Qualitätssicherungssystem. Weitere Anforderungen entstehen durch die Produkthaftung und durch Übergang von Eingangsprüfung zu Ship-to-Stock-Konzepten.

2.2 Stand der Technik und Defizite der Methoden

Nicht nur in der Elektronikproduktion wurde die Vision der Null-Fehler-Produktion zum Ziel des Qualitätsmanagements [60]. Während jedoch in anderen Branchen der Schritt von einem lediglich fehlerfreien Produkt nach jedem Prozeß - was allein schon durch geeignetes Aussortieren mangelhafter Teile innerhalb der Systemgrenzen erfolgen kann - hin zu einem fehlerfreien, sicheren Prozeß bereits vollzogen wurde, überwiegt in der Elektronikproduktion noch die isolierte Betrachtung einzelner Prozeßschritte.

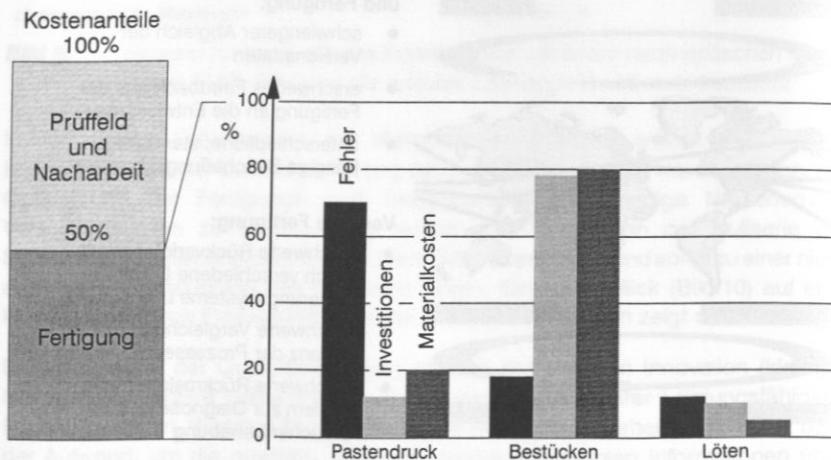


Bild 12: Verhältnis zwischen Fehlern, Investitionen und Materialkosten bei den Produktionsprozessen der Baugruppenfertigung

Dabei ist gerade dieser Übergang in der Betrachtungsweise ein entscheidender Schlüssel zur Null-Fehler-Produktion in der Elektronikindustrie: Bei der Baugruppenproduktion, die im allgemeinen die drei Prozesse Lotpastenauftrag, Bestücken und Löten beinhaltet, werden 60-70% aller Fehler bereits im ersten Schritt, dem Lotpastenauftrag, verursacht [70]. Demgegenüber steht die relative geringe Wertschöpfung bis zu diesem Zeitpunkt (Bild 12). Das sich heute in der Regel anschließende Prüffeld verursacht Kosten in der gleichen Größenordnung wie die gezeigten drei Prozessschritte zusammen. [45]

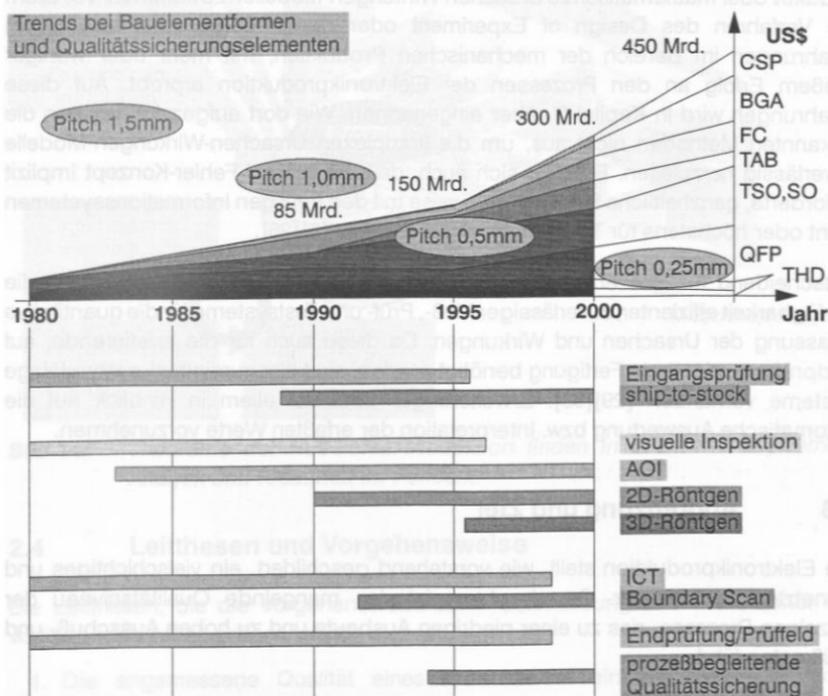


Bild 13: Prüftechnik und Qualitätssicherung folgen den Produktionstechnologien.

Die Produktionstechnologien, Verfahren ebenso wie Komponenten, geben die benötigten Prüftechniken und Qualitätssicherungssysteme vor; sie bestimmen Zeitpunkt und Anwendungsgrad konkurrierender Qualitätssicherungselemente.

Das Konzept der Null-Fehler-Produktion stellt nach [60] noch weitere Anforderungen an Denk- und Handlungsweise:

- Betrachten von Ursachen-Wirkungen-Folgen statt von Fehlern, Störungen oder Schäden (Kausalkette).
- Abweichungsursachen sind zu vermeiden,

- *Abweichungswirkungen zu entdecken und*
- *Abweichungsfolgen zu vermeiden.*

Gerade jedoch die grundlegende Kenntnis der Kausalketten fehlt in der Elektronikproduktion, nicht zuletzt aufgrund der Verschiedenartigkeit und Varianz der eingesetzten Materialien, Prozesse und Produkte.

So werden heute verschiedenste Methoden eingesetzt, um heuristisch, empirisch, deduktiv oder mathematisch zu Ursachen-Wirkungen-Modellen zu kommen. Vor allem die Verfahren des Design of Experiment oder der SPC werden, nach guten Erfahrungen im Bereich der mechanischen Produktion, mit mehr oder weniger großem Erfolg an den Prozessen der Elektronikproduktion erprobt. Auf diese Erfahrungen wird in Kapitel 6 näher eingegangen. Wie dort aufgezeigt, reichen die bekannten Methoden nicht aus, um die komplexen Ursachen-Wirkungen-Modelle zuverlässig herzuleiten. Es zeigt sich auch, daß die im Null-Fehler-Konzept implizit geforderte, ganzheitliche Betrachtungsweise mit den heutigen Informationssystemen nicht oder höchstens für Teilbereiche realisierbar ist [5][28].

Entscheidend für eine erfolgreiche Applizierung des Null-Fehler-Konzeptes ist die Verfügbarkeit effizienter, zuverlässiger Meß-, Prüf- und Testsysteme für die quantitative Erfassung der Ursachen und Wirkungen. Da diese auch für die existierende, auf Endprüfung orientierte Fertigung benötigt wurden, sind hier zumindest ausbaufähige Systeme vorhanden [29][83]. Erweiterungen sind vor allem in Hinblick auf die automatische Auswertung bzw. Interpretation der erfaßten Werte vorzunehmen.

2.3 Abgrenzung und Ziel

Die Elektronikproduktion stellt, wie vorstehend geschildert, ein vielschichtiges und vernetztes System dar. Grundproblem ist das mangelnde Qualitätsniveau der einzelnen Prozesse, das zu einer niedrigen Ausbeute und zu hohen Ausschuß- und Prüfkosten führt.

Durchlaufzeiten, Kapitalbindung etc. werden ebenfalls negativ beeinflusst. Ziel ist die prozeßübergreifende Sicherung der Qualität der elektronischen Baugruppe, mit Hauptaugenmerk auf der Sicherung der Lötverbindung.

Im weiteren werden die Betrachtungen auf den Produktionsbereich konzentriert (Bild 14); die Prozesse Lotpastenauftrag, Bestücken und Löten sowie der Aspekt der Lagerung werden exemplarisch untersucht. Übergeordnete Aspekte des Qualitätsmanagements finden nur Eingang, wo eine enge Koppelung, vor allem zum Informationsaustausch, besteht.

Für diesen wohldefinierten Bereich wird in dieser Arbeit die Vision der Null-Fehler-Produktion aufgegriffen. Dieses Ziel kann mit heutigem Wissensstand, Technologien und Einrichtungen nicht direkt gelöst werden. Es wird daher

nachfolgend eine Strategie entwickelt, um sich diesem Ziel sukzessiv anzunähern. Die angedeuteten Defizite werden detailliert, Verbesserungen entworfen und evaluiert. Die Theoreme der Null-Fehler-Produktion - Fehlerursachen vermeiden, Fehlerwirkungen entdecken und Fehlerfolgen vermeiden - finden letztlich in Informationssystemen, Analytik und Kreativität ihr Pendant.

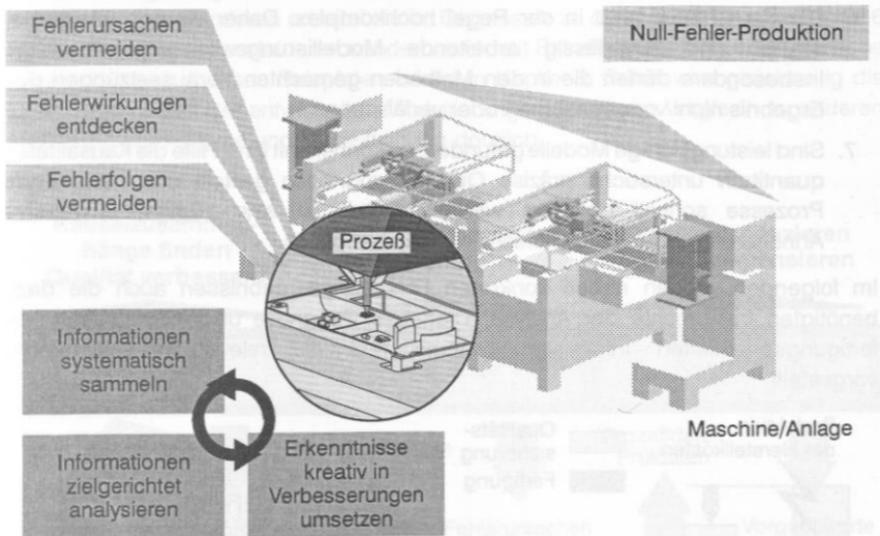


Bild 14: Theoreme der Null-Fehler-Produktion finden in Informationssystemen, Analytik und Kreativität ihr Pendant.

2.4 Leitthesen und Vorgehensweise

Die Leitthesen, die die Vorgehensweise zur Problemlösung und die Struktur der vorliegenden Arbeit prägen, sind:

1. Die angemessene Qualität eines Produkts ist ein wichtiges Ziel jedes Unternehmens. Aspekte der Qualität sind vor allem Funktionserfüllung, Zuverlässigkeit und Kosten.
2. Das Qualitätsniveau und damit die Ausbeute ist heute mit 80% zu niedrig. Gleichzeitig sind die Kosten für Prüffeld und Nacharbeit mit anteilig 50% zu hoch.
3. Um das Qualitätsniveau anzuheben ist eine detaillierte, aber nicht unbedingt explizite Kenntnis der Zusammenhänge nötig. Implizite, aber zu Optimierung führende, quantitative Beschreibungsformen sind ausreichend.
4. Diese Kausalzusammenhänge sind weitgehend unbekannt. Daher muß - in der Regel - prozeßübergreifend nach ihnen geforscht werden. So wird die Gesamtkette Wareneingang, Lotpastenauftrag, Bestücken und Löten betrachtet.

Einen kurzen Abriss über Methoden, die in der Prozeßforschung und -modellierung eingesetzt werden, gibt Kapitel 6. In Anwendungsbeispielen werden Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden für die Prozesse der Elektronikproduktion skizziert. In Kapitel 7 werden die Grundlagen für eine neue Modellierungsmethode dargelegt. Diese leistungsfähige Methode stellt zum einen keine Postulate, die das Ergebnis verfälschen, zum anderen arbeitet sie im Gegensatz zu den Methoden aus Kapitel 6 nicht nur mit Experimentaldaten sondern auch mit Betriebsdaten. Die exemplarische Anwendung an diversen Beispielen erfolgt in Kapitel 8. Dabei wird gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der entwickelten Modellierungsmethode im Vergleich zu anderen Methoden der Analyse und Modellbildung deutlich.

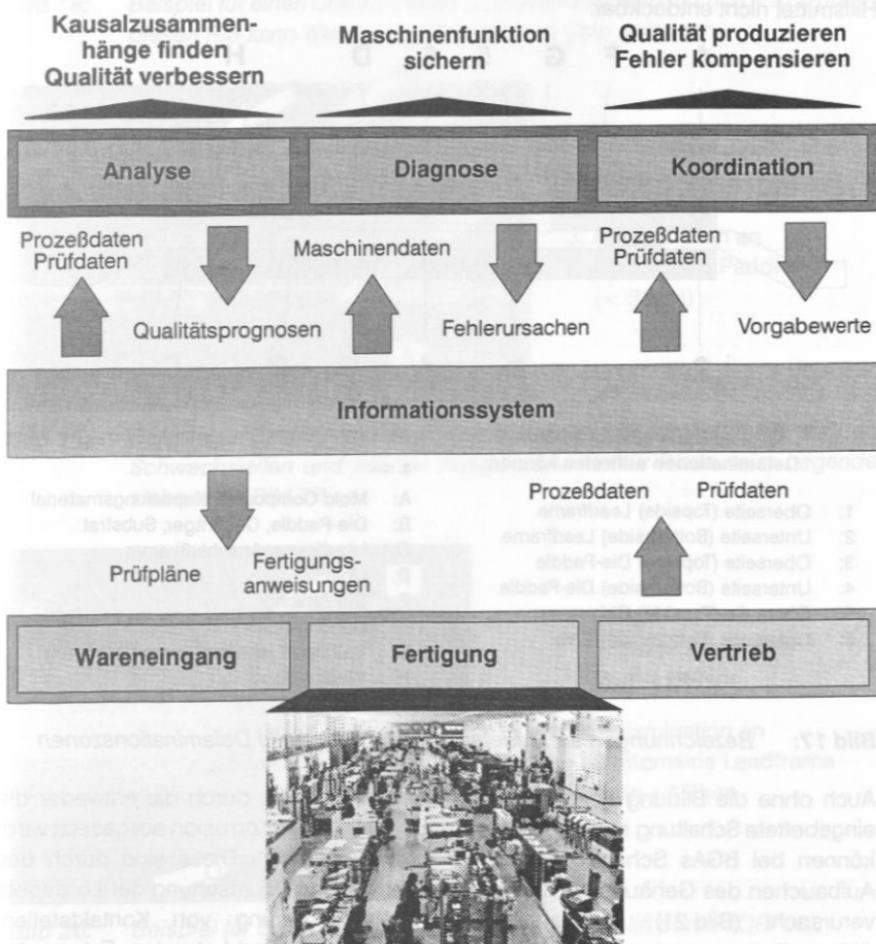
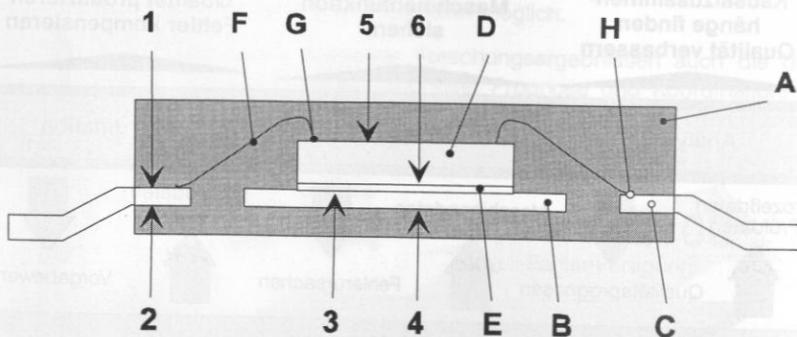


Bild 16: Vision des gesamten, zu entwickelnden Qualitätssicherungssystems

3 Exemplarische Modellbildung

Nachfolgend werden an einem Beispiel mittlerer Komplexität Möglichkeiten und Grenzen ausgewählter Modellbildungstechniken überblicksartig gezeigt.

Der Popcorn-Effekt (*package cracking*) bezeichnet das Aufplatzen von meist größeren SMD-Bauelementen im Infrarot(IR)-Lötöfen. Seine Ausprägungen reichen von Delamination von Die-Paddle und Mold Compound (Bild 17) über Risse in Compound und Die-Paddle bis hin zur völligen Zerstörung des Bauelements durch Zerplatzen. Die Risse treten im allgemeinen nur auf der Bauteilunterseite aus und sind somit für einen Betrachter verdeckt. Zudem sind sie wegen ihrer Feinheit (z.T. kleiner $10\ \mu\text{m}$) ohne Hilfsmittel nicht entdeckbar.

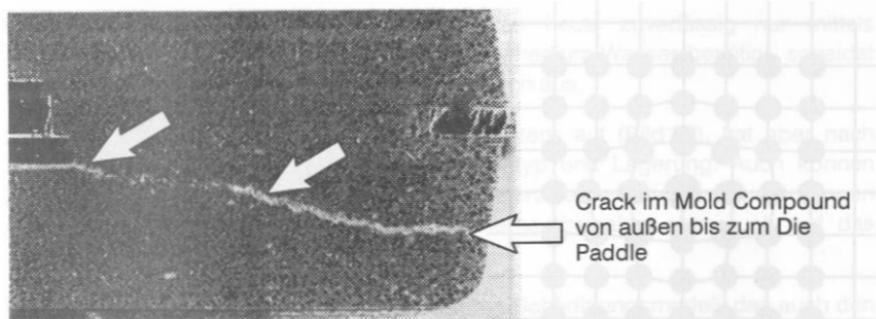


Orte im Bauelement, an denen Delaminationen auftreten können:

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1: Oberseite (Topside) Leadframe | A: Mold Compound, Kapselungsmaterial |
| 2: Unterseite (Bottomside) Leadframe | B: Die-Paddle, Chipträger, Substrat |
| 3: Oberseite (Topside) Die-Paddle | C: Leadframe, Anschlußkamm |
| 4: Unterseite (Bottomside) Die-Paddle | D: Chip |
| 5: Oberseite (Topside) Chip | E: Die-Attach |
| 6: Unterseite (Bottomside) Chip | F: Bond Wire |
| | G: Ball Bond (abhängig vom Verfahren) |
| | H: Wedge Bond |

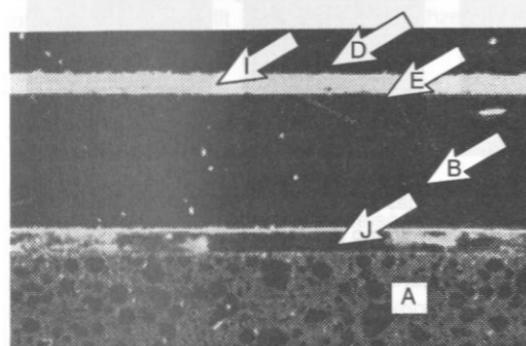
Bild 17: Bezeichnungen am Bauelement und potentielle Delaminationszonen

Auch ohne die Bildung von Rissen oder Delaminationen, durch die entweder die eingebettete Schaltung sofort zerstört oder einer stärkeren Korrosion ausgesetzt wird, können bei BGAs Schäden an den Lötstellen entstehen. Diese sind durch das Aufbauchen des Gehäuses und der damit verbundenen Quetschung der Lotdepots verursacht (Bild 21). Wie zu sehen, sind Entnetzung von Kontaktstellen, Akkumulierung von Lot an anderen Stellen, Lotbrücken und Lotperlen, Folgen des Popcorn-Effekts.



Crack im Mold Compound
von außen bis zum Die
Paddle

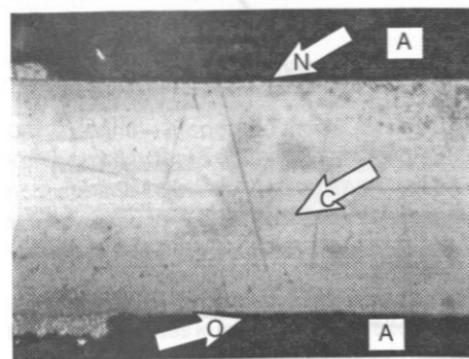
Bild 18: Beispiel für einen Crack im Mold Compound (Schliff durch SOP32); durch diesen RiB kann Wasser ungehindert zum Chip gelangen.



I: Delamination an
Topside Paddle (<math>< 1\mu\text{m}</math>)

J: Delamination an
Bottomside Paddle
(<math>< 30\mu\text{m}</math>)

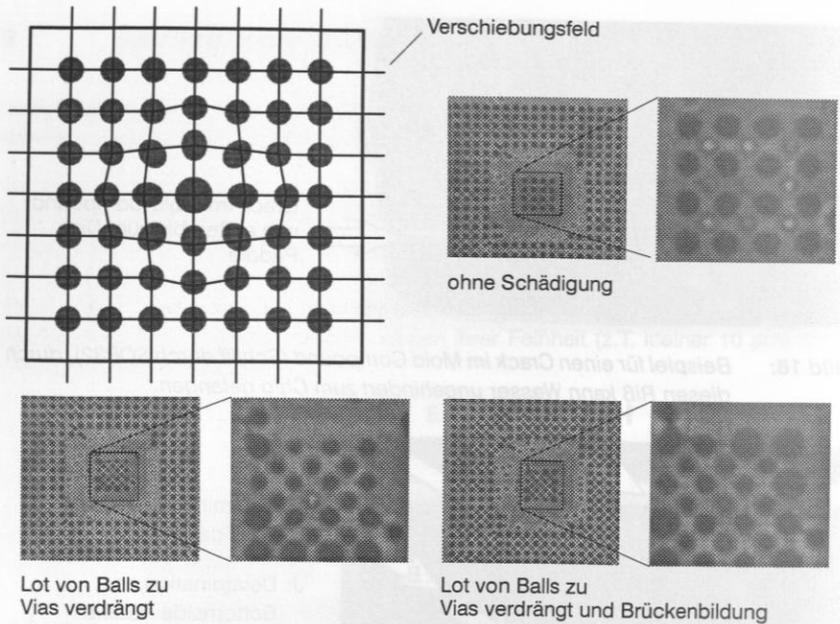
Bild 19: Beispiel für Delaminationen am Die Paddle (Schliff durch SOP32); sie sind Schwachstellen und können Ausgangspunkte für Risse sein; Legende siehe auch Bild 17



N: Delamination an
Topside Leadframe
 $2\mu\text{m} \times 240\mu\text{m}$

O: Delamination an
Bottomside Leadframe
 $2\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$

Bild 20: Beispiel für Delaminationen am Leadframe (Schliff durch TQFP80); Legende siehe auch Bild 17



links oben: Schematische Darstellung der Verwölbung des Gehäuses und der Auswirkungen auf die Lotdepots; rechts oben und unten: Röntgenbilder von BGAs mit und ohne Schädigung durch den Popcorn-Effekt

Bild 21: Auswirkungen des Popcorn-Effekts bei BGA-Bauelementen

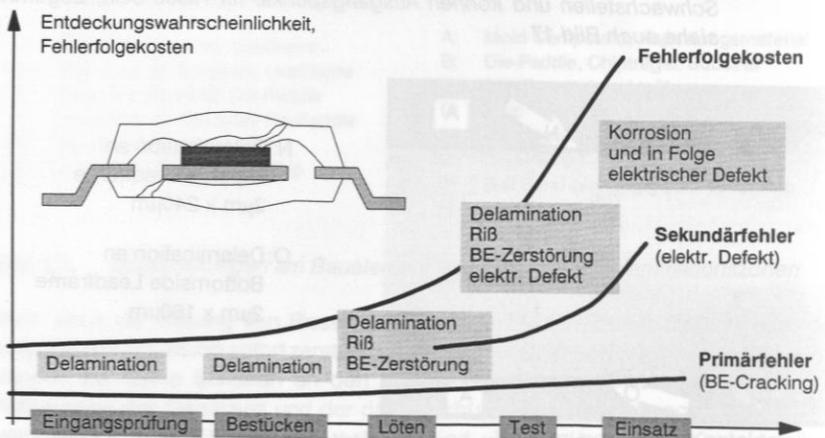


Bild 22: Schadensverlauf und Folgekosten aufgrund von Bauelement-Cracking

Detektiert werden können die Delaminationen heute zuverlässig nur mittels Ultraschallmikroskopie. Da diese als Kopplungsmedium Wasser benötigt, scheidet diese Methode als Prüfung in der Fertigung jedoch aus.

Der Popcorn-Effekt tritt erst während des IR-Lötens auf (Bild 22), hat aber nach bisheriger Ansicht seine Ursachen in Gehäusetyp und Lagerung. Auch können Bauelemente bereits mit Delaminationen angeliefert werden. Dies hat Auswirkungen auf die Eingangsprüfung, speziell die Bauelementfreigabe, aber auch auf das Bauelementhandling bis zum Löten.

Das bisher international akzeptierte Diaphragma-Schädigungsmodell, das auch den einschlägigen Normen zugrunde liegt, erweist sich in der Praxis jedoch immer wieder als unzureichend. Daher wurden Untersuchungen durchgeführt, um das Modell zu verfeinern oder durch ein neues Schädigungsmodell zu ersetzen. Diese werden im folgenden vorgestellt und dienen gleichzeitig als Positivbeispiel für den Einsatz klassischer Methoden der Modellbildung.

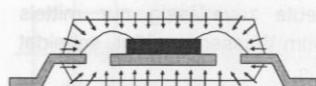
3.1 Situation in Forschung und Industrie

Kennzeichnend für die Unsicherheit über die tatsächlichen Schädigungsmechanismen ist die Handlungsweise in der Industrie. Zum einen verlassen sich die Produzenten und Anwender elektronischer Bauelemente auf die Aussagefähigkeit der in Normen festgelegten Tests. Seitens der Produzenten werden alle Anstrengungen unternommen, um Bauelemente zu konstruieren, die diesem Test standhalten und somit als unbedenklich gelten. Die Anwender ihrerseits machen zum anderen immer wieder die Erfahrung, daß selbst als unbedenklich eingestufte Bauelemente im IR-Ofen cracken. Durch diese Beobachtung angeregt, werden nach einer Zeit geringer Forschungsaktivität heute wieder vermehrt Anstrengungen unternommen, den Effekt zu verstehen und präventiv zu eliminieren [119][191].

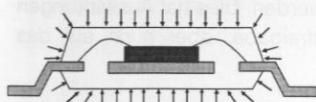
3.1.1 Schädigungsmodell

Der Begriff "Popcorn-Effekt" wurde durch das hörbare Aufplatzen des Kunststoffgehäuses während des Lötvorganges geprägt. Dies stellt allerdings nur die höchste Stufe der Schädigung eines kunststoffgekapselten Gehäuses dar, denn auch Mikrorisse und Delaminationen können die Folge sein und zu einem früheren Versagen des Bauelementes führen.

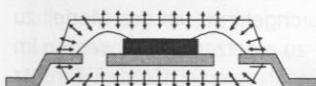
Als einer der zentralen Einflußfaktoren gilt die Feuchteaufnahme durch die Umhüllmasse des kunststoffgekapselten Bauelementes. Erreicht diese einen Wert von ca. 0,1% bezogen auf das Gewicht des Bauelementes, so kann beim Löten die verdampfende Feuchte so hohe Dampfdrücke erzeugen, daß der Popcorn-Effekt auftreten kann (Bild 23) [1].



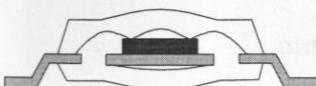
Feuchtaufnahme während der Lagerung; als kritisch wird bereits 0,1% Feuchtigkeit bezogen auf das Bauteilgewicht angesehen.



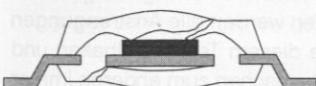
Löten mit temporären Spitzentemperaturen von über 230°C auf der Bauteiloberseite



Verdampfen des Wassers während des Erhitzens.



Eine dampfgefüllte Kavität entsteht und dehnt sich aus, so daß eine charakteristische Aufbauchung an der Gehäuseoberfläche auftritt.



Mechanische Spannungen führen zu Rissen im Gehäuse (Popcorn-Effekt)

Bild 23: *Der Popcorn-Effekt: Das aus Literatur und Normen bekannte Schädigungsmodell basiert allein auf der Annahme, daß aufgenommenes Wasser während des Lötens verdampft und das Bauteil zerstört.*

3.1.2 Gefährdete Bauelemente

Als gefährdet gelten folgende Gehäuse nach der Aufnahme einer kritischen Grenze von 0,1 Gewichtsprozent Feuchte:

- SO-Gehäuse mit einer Pinzahl ≥ 28
- SOJ-Gehäuse mit einer Pinzahl $\geq 26/20$
- PLCC-Gehäuse mit einer Pinzahl ≥ 44
- PQFP- und QFP-Gehäuse mit einer Pinzahl ≥ 44
- BGA-Gehäuse aufgrund der temporären Verwölbung
- Zusätzlich gelten auch die besonders dünnen TSOP- und TQFP-Gehäuse als gefährdet, unabhängig von ihrer Pinzahl.

Beispiele zu einigen genannten Gehäusetypen zeigt Bild 24. Vor dem Hintergrund steigender Anschlußzahlen und abnehmender Gehäusedicken bedeutet das bestehende Schädigungsmodell, daß immer mehr Bauelemente als cracking-gefährdet eingestuft werden müßten.

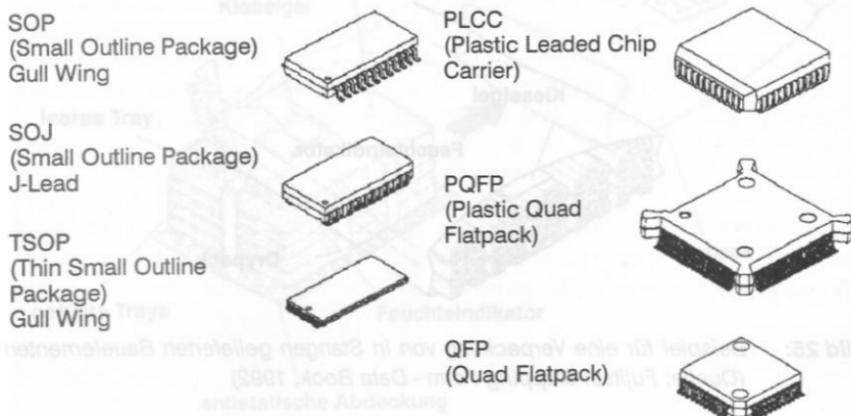


Bild 24: Beispiele von Gehäusetypen kunststoffgekapselter Bauelemente (Quelle: Intel: Packaging Databook, 1995)

3.1.3 Praktizierte Möglichkeiten zum Schutz der Bauelemente

Prinzipiell bestehen folgende Möglichkeiten, durch eine Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauelement den Popcorn-Effekt zu vermeiden:

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Anlieferung in luftdichten Containern, sog. Drypacks	Für Serienfertigung geeignet Bauelemente gut lötfähig geringe Logistikprobleme kein Pre-baking	Bauelemente müssen nach Öffnen der Verpackung innerhalb kurzer Zeit gelötet werden
Niedertemperatur Pre-Baking (40°C, 5%RH, 192h)	Bauelemente können in Magazinen bleiben (offene Magazine) Bauelemente können mehrmals getrocknet werden	Spezialöfen erforderlich für Serienfertigung kaum geeignet lange Trocknungszeit
Hochtemperatur Pre-Baking (125°C, 24h)	relativ kurze Trocknungszeit	Bauelemente nur einmal trocknenbar; Hochtemperaturcontainer für Serienfertigung kaum geeignet

Tabelle 1: Praktizierte Möglichkeiten zum Schutz der Bauelemente vor Feuchtigkeit

Übliche Praxis der Hersteller ist es, Bauelemente, die als cracking-gefährdet eingestuft sind, trocken verpackt in luftdichten Containern, den sogenannten Drypacks (Bild 25 - Bild 27), zu liefern.

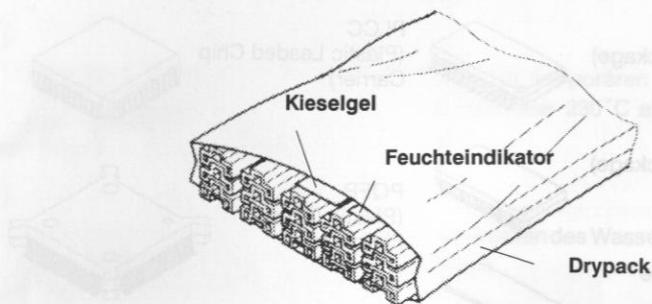


Bild 25: Beispiel für eine Verpackung von in Stangen gelieferten Bauelementen (Quelle: Fujitsu: Shipping Form - Data Book, 1992)

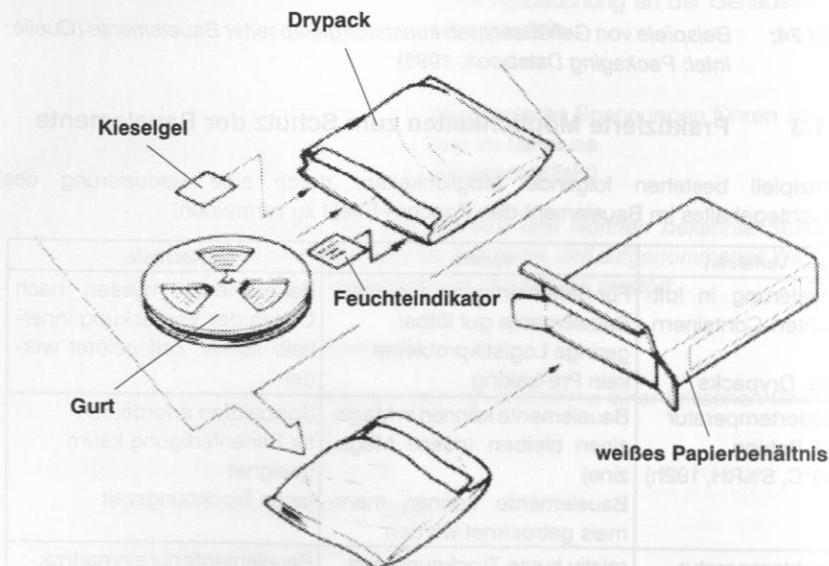


Bild 26: Beispiel für eine Verpackung von in Gurten gelieferten Bauelementen (Quelle: Fujitsu: Shipping Form - Data Book, 1992)

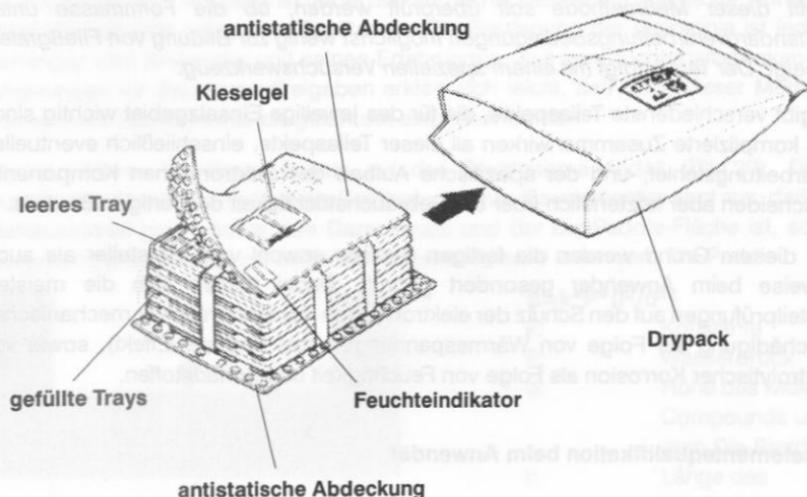


Bild 27: Beispiel für eine Verpackung von in Trays gelieferten Bauelementen
(Quelle: Fujitsu: Shipping Form - Data Book, 1992)

3.1.4 Eingesetzte Testverfahren

Prüfung elektronischer Bauelemente beim Hersteller

Es existieren zahlreiche Prüfungen von Formmassen, die weltweit verbreitet, aber nicht genormt sind. Kennzeichnend ist, daß jeder Formmassenhersteller seine spezifische Arbeitsweise hat, und die Resultate nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Folgende Prüfprinzipien werden von den Bauelementeherstellern angewendet:

- **Messungen im wäßrigen Auszug:**
Diese Meßmethode dient zur Bestimmung des Gehaltes an Natrium-, Chlorid- und Eisenionen im wäßrigen Auszug.
- **Bestimmung des hydrolysierbaren Chloranteils:**
Mit diesem Verfahren soll bestimmt werden, wieviel des chemisch gebundenen Chlors unter Betriebsbedingungen in schädliche Chloridionen übergehen, d.h. hydrolysieren kann. Hierzu wird ein Kurzzeittest verwendet, der unter verschärften Bedingungen prüft.
- **Formfüllverhalten:**
Überprüfung der Fähigkeit einer Formmasse unter Standardbedingungen, die Kavitäten eines repräsentativen Versuchswerkzeuges einwandfrei füllen zu können.

- **Fließgradbildung:**
Mit dieser Meßmethode soll überprüft werden, ob die Formmasse unter Standardverarbeitungsbedingungen möglichst wenig zur Bildung von Fließgraten neigt. Der Test erfolgt mit einem speziellen Versuchswerkzeug.

Es gibt verschiedenste Teilaspekte, die für das jeweilige Einsatzgebiet wichtig sind. Das komplizierte Zusammenwirken all dieser Teilaspekte, einschließlich eventueller Verarbeitungsfehler, und der spezifische Aufbau der elektronischen Komponente entscheiden aber letztendlich über die Gebrauchstüchtigkeit des fertigen Bauteils.

Aus diesem Grund werden die fertigen Bauteile sowohl vom Hersteller als auch teilweise beim Anwender gesondert geprüft. Dabei richten sich die meisten Bauteilprüfungen auf den Schutz der elektronischen Komponenten vor mechanischer Beschädigung als Folge von Wärmespannungen (bei Popcorn-Effekt), sowie vor elektrolytischer Korrosion als Folge von Feuchtigkeit und Schadstoffen.

Bauelementequalifikation beim Anwender

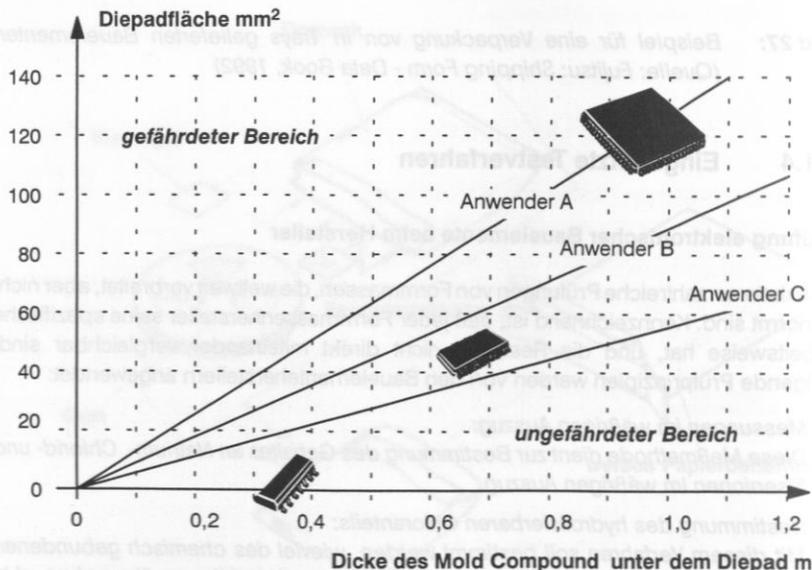
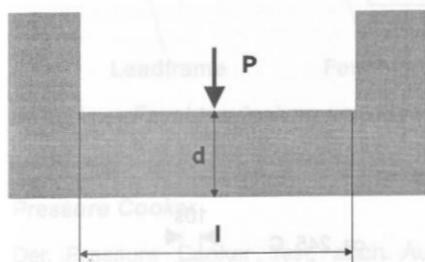


Bild 28: Cracking-gefährdete SM-IC's: Großflächige (hochpolige) und dünne (Thin-Technologie) Bauelemente sind besonders gefährdet

Bevor die Qualifikation eines Gehäuses bezüglich Package Cracking angestoßen wird, ist es übliche Praxis, in einem ersten Schritt zu prüfen, ob das Gehäuse cracking-gefährdet ist oder nicht. Wie Bild 28 zeigt, ist die praktizierte Festlegung des

cracking-gefährdeten bzw. cracking-ungefährdeten Bereiches nicht eindeutig. Grundlage für eine Aussage ist dabei das Verhältnis Die-Paddle Fläche zur Höhe des Mold Compounds unter dem Die-Paddle. Die Festlegung der Grenzlinie ist jedoch abhängig vom Anwender und seinen Erfahrungen. Aus dem Sicherheitsdenken der Abteilungen für Bauelementfreigaben erklärt sich leicht, daß nach dieser Methode immer mehr Bauelemente als gefährdet eingestuft werden.

Zurückzuführen ist dieser Ansatz auf das Diaphragma-Modell (Bild 29). Diese quantitative Abschätzung über die Gefährdung eines Bauelementes sagt aus, daß der Gehäusestreß proportional zum Dampfdruck und der Die-Paddle-Fläche ist, sowie umgekehrt proportional zur Dicke der Kunststoffmasse unter dem Die-Paddle.



$$S = k \cdot P \cdot (l^2 / d^2)$$

k:	Konstante
P:	Wasserdruck
d:	Höhe des Mold Compounds unter dem Die-Paddle
l:	Länge des Die-Paddles

Bild 29: Das Diaphragma-Modell sagt aus, daß der Gehäusestreß proportional zum Dampfdruck und der Die-Paddle-Fläche ist, sowie umgekehrt proportional zur Dicke der Kunststoffmasse unter dem Die-Paddle.

Simulation der Lagerungsbedingungen

Bild 30 zeigt den Standardablaufplan wie er im allgemeinen in der Industrie für eine Qualifizierung verwendet wird. Wie hier aufgezeigt, gibt es verschiedene Feuchte-Wärme-Prüfungen. Eine grobe Unterscheidung läßt sich zwischen Tests, bei denen an das zu prüfende Bauelement Spannung angelegt wird (z.B. HAST), und Tests, die ohne Spannungen auskommen (z.B. PCT) ziehen. Druck in der Prüfkammer herrscht bei HAST und PCT, dagegen nicht bei statischen und zyklischen Temperature-Humidity-Bias-Tests (THB-Tests), die zum Beispiel bei 85°C/85% relativer Feuchte 500, 2000 Stunden oder länger durchgeführt werden.

Der wichtigste Aspekt beim Einsatz von HAST und PCT ist der zeitraffende Faktor. Normalerweise wird nur ein Bruchteil der Prüfdauer konventioneller THB-Tests benötigt, um die entsprechenden Testergebnisse zu erhalten.

Durch mangelhaft verkapselte Gehäuse können Fehler wie z.B. Korrosion ausgelöst werden. Diese Schwachstellen im Gehäuse werden mittels Temperatur, Feuchte und Druck aufgedeckt. Auf Grund des beim HAST und PCT herrschenden Drucks findet die Feuchteaufnahme außer durch Diffusion auch über die Grenzflächen zwischen Mold Compound und Leadframe statt (Bild 31).

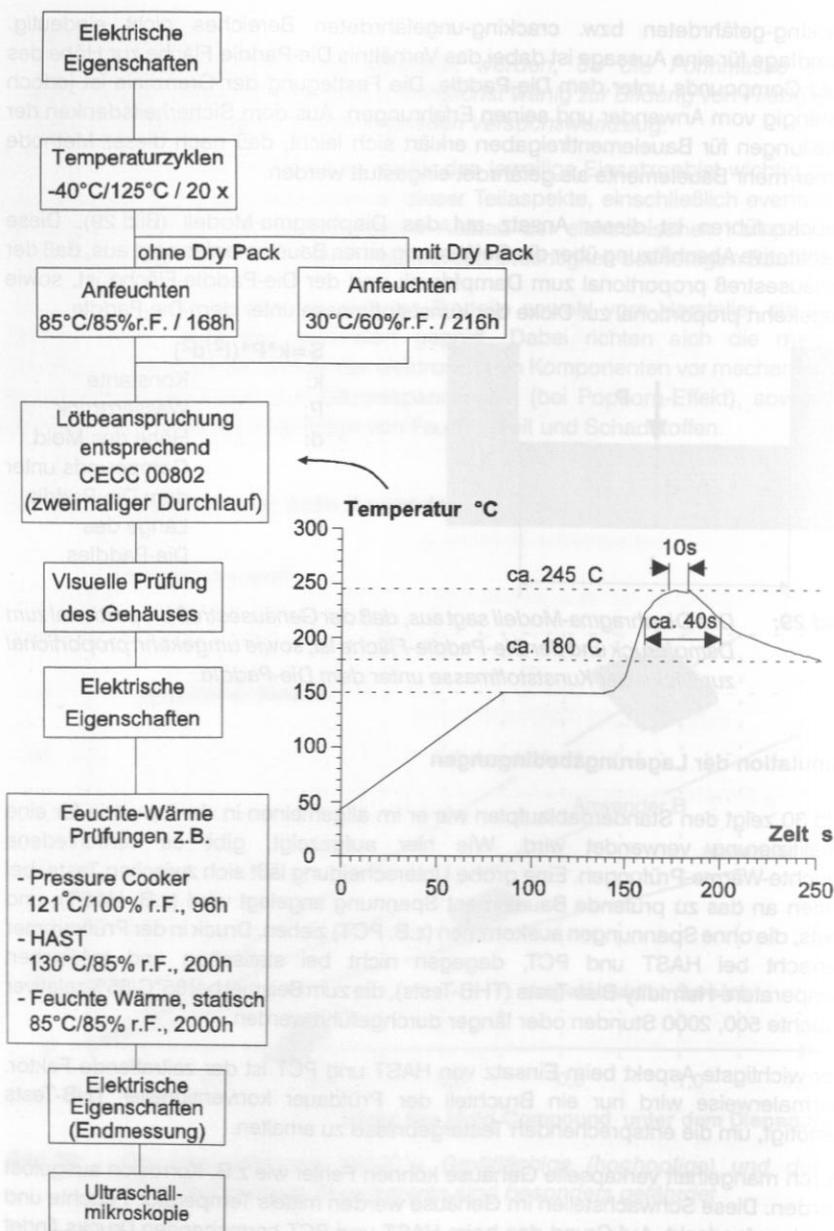


Bild 30: Ablaufplan für die Qualifizierung beim Anwender

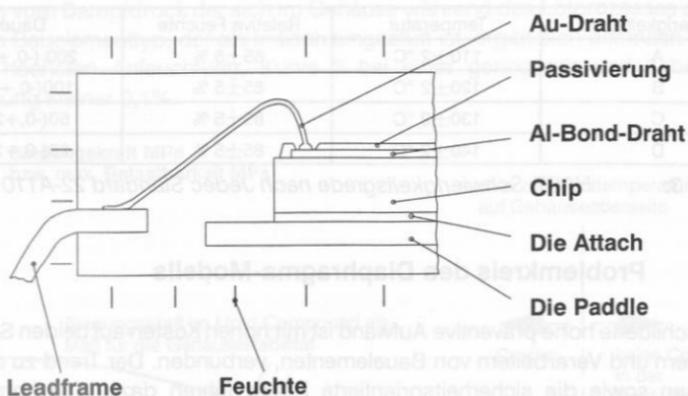


Bild 31: Feuchteaufnahme von kunststoffgekapselten Bauelementen bei HAST und PCT

Pressure Cooker

Der Pressure Cooker Test, auch Autoclave Test genannt, ist in der Norm JESD22-A102-A spezifiziert [130]. Der Test beschleunigt die Feuchteaufnahme durch Diffusion über die Gehäuseoberfläche und entlang der Grenzflächen zwischen Mold Compound und den an die Oberfläche tretenden Leads des Bauelementes. In der genannten Norm sind drei Varianten vorgesehen:

Variante	Testdauer	Testbedingung
A	24h	121°C, 100% r.F.
B	48h	121°C, 100% r.F.
C	96h	121°C, 100% r.F.

Tabelle 2: Pressure Cooker: Schwierigkeitsgrade nach JESD22-A102-A [130]

HAST

Der Highly Accelerated Stress Test (HAST) ist ein beschleunigter Feuchtetest, der auf Prüfung der Korrosionsbeständigkeit innerhalb des Bauelementgehäuses abzielt.

Die Bauelemente liegen während der Testzeit unter Betriebsspannung. Dabei ist es nötig, Sicherheitsgrenzen einzuhalten. Daher ist eine geringstmögliche Leistungsaufnahme, höchstmögliche Spannung und größtmöglicher Spannungskontrast zwischen den Metallisierungsbahnen anzustreben.

Der große Vorteil dieses Tests besteht in der Fähigkeit, schon früh über die Korrosionsanfälligkeit von Bauelementen eine Aussage treffen zu können. Die Konditionen für HASTs sind in der JEDEC Standard 22-A110 spezifiziert [131]. Die nachstehende Tabelle zeigt die Schwierigkeitsgrade, die unterschieden werden.

Schwierigkeitsgrad	Temperatur	Relative Feuchte	Dauer
A	110±2 °C	85±5 %	200 (-0, +2) h
B	120±2 °C	85±5 %	100(-0, +2) h
C	130±2 °C	85±5 %	50(-0, +2) h
D	140±2 °C	85±5 %	25(-0, +2) h

Tabelle 3: HAST: Schwierigkeitsgrade nach Jedec Standard 22-A110

3.1.5 Problemkreis des Diaphragma-Modells

Der geschilderte hohe präventive Aufwand ist mit hohen Kosten auf beiden Seiten, bei Herstellern und Verarbeitern von Bauelementen, verbunden. Der Trend zu dünneren Gehäusen sowie die sicherheitsorientierte Praxis führen dazu, daß immer mehr Bauelementtypen als gefährdet eingestuft werden. Die zunehmende Integration in der Elektronikproduktion führt zu einer Zunahme der Anschlüsse pro Bauelement. Diese hochpoligen Bauelemente sind erfahrungsgemäß ebenfalls besonders Cracking-gefährdet (vgl. Bild 28).

Der Trend dazu, immer mehr Bauelementtypen als Cracking-gefährdet einzustufen und im Dry-Pack anzuliefern, führt zu hohen Folgekosten für den Anwender. Nicht nur, daß Dry-Packs die Einkaufskosten für Bauelemente um ca. 10% steigern, die Lagerungskosten steigen ebenfalls durch die Investitionskosten für Stickstoffschränke und den Stickstoff selbst (lt. Industrieauskunft ebenfalls mindestens 10% der Nebenkosten).

Die Stickstofflagerung bzw. die Anlieferung in Dry-Packs führt desweiteren dadurch zu Problemen, daß im wesentlichen nur noch Trays als Transport- und Zuführeinrichtungen benutzt werden können. In der Praxis erweisen sich die Trays jedoch weniger zuverlässig als Gurte, die sich als besonders störungsfrei im Produktionseinsatz erwiesen haben. Dadurch wird die technische Verfügbarkeit der Fertigungsanlagen wesentlich erniedrigt und somit eine weitere Kostenerhöhung bewirkt.

Diese Kosten sind den Kosten gegenzurechnen, die durch gecrackte Bauelemente verursacht werden (siehe auch Bild 22). Doch gerade hier erweisen sich die Prognosen des klassischen Schädigungsmodells als unzuverlässig: Als ungefährdet eingestufte Bauelemente cracken und umgekehrt, das in den Normen empfohlene Vortrocknen verfehlte seine Wirkung oder führte direkt zur Bauteilschädigung.

Allgemein läßt sich sagen, daß Cracks dann in der Gehäusestruktur entstehen, wenn die Kräfte im Inneren des Bauelementes die Bindungskraft des Kunststoffes übersteigen. Bild 32 zeigt am Beispiel, daß im Fall 1 und 2 Cracks entstehen werden, während bei 3 keine Schädigung zu erwarten ist. Diese Vorstellung läßt sich auch mit dem gängigen Modell erklären. Denn danach sind die Kräfte im Inneren des Gehäuses

abhängig vom Dampfdruck der sich im Gehäuse während des Lötprozesses aufbaut. Für einen Bauelementtyp, der als kritisch eingestuft ist, ergibt sich demnach Kurve 1 bei der höchsten Anfeuchtung, Kurve 2 bei einer geringeren und 3 bei einer Anfeuchtung kleiner 0,1%.

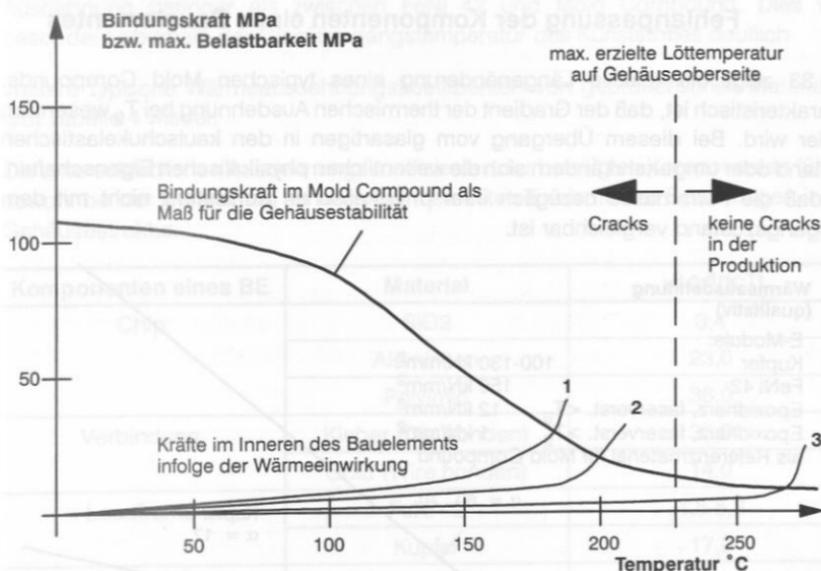


Bild 32: Kräfteverhältnis beim Löten (vgl. auch [135] und [73])

In der Praxis wird jedoch immer wieder beobachtet, daß Bauelemente, die trocken gelagert oder vorgetrocknet wurden, cracken. Dies wird auch bei Bauelementen beobachtet, deren Typ nicht als gefährdet eingestuft wird. Das klassische Schädigungsmodell ist daher unzureichend.

3.2 Versuche und Modellverfeinerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zusammen mit Industriepartnern eine Reihe von Versuchen durchgeführt, die den Mechanismus des Popcorn-Effekt aufklären sollten. Dabei ergab sich ein neues, verbessertes Schädigungsmodell. Insbesondere wurde nachgewiesen, daß es Bauelemente mit inversem Crackingverhalten gibt, d.h. Bauelemente, die im feuchten Zustand weniger gefährdet sind als im trockenem, was dem klassischen Modell widerspricht.

Im folgenden werden zunächst die aus dem klassischen Schädigungsmodell bekannten Einflüsse vorgestellt, ebenso die aktuellen Arbeiten und Ergebnisse anderer Forscher. In Abschnitt 3.2.3 folgen die eigenen Versuche und die Entwicklung

des verbesserten Schädigungsmodells (Abschnitt 3.3). Problemlösungsansätze und einen Ausblick auf Forschungsaktivitäten gibt Abschnitt 3.4.

3.2.1 Belastung der Gehäusestruktur durch die thermische Fehlanpassung der Komponenten eines Bauelementes

Bild 33 zeigt die relative Längenänderung eines typischen Mold Compounds. Charakteristisch ist, daß der Gradient der thermischen Ausdehnung bei T_g wesentlich steiler wird. Bei diesem Übergang vom glasartigen in den kautschukelastischen Zustand oder umgekehrt ändern sich die wesentlichen physikalischen Eigenschaften, so daß die Formmasse bezüglich ihrer physikalischen Konsistenz nicht mit dem Ausgangszustand vergleichbar ist.

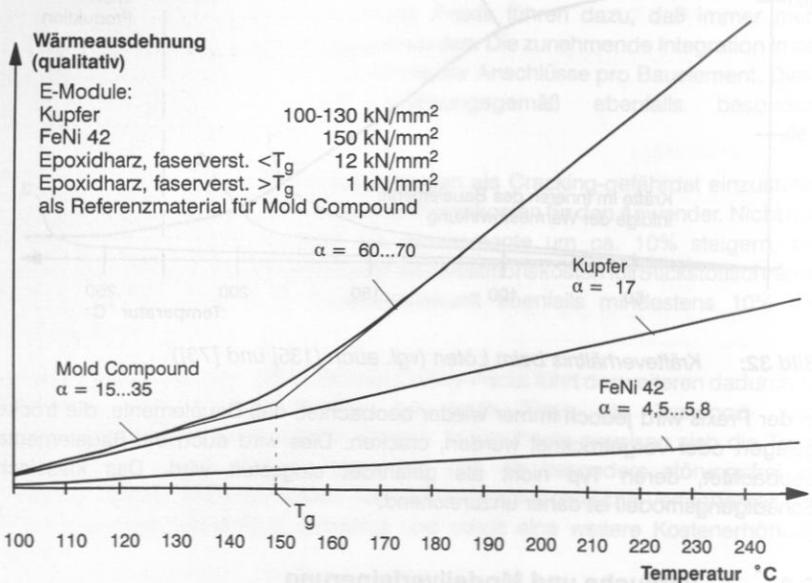


Bild 33: Lineare thermische Ausdehnung von Legierung FeNi 42, Kupfer und einer typischen Preßmasse (nach [13]) und zugehörige E-Module (nach [15],[133] und [134])

Es sind unter anderem folgende Eigenschaften betroffen [91]:

- Ausdehnungskoeffizient
- mechanischer und dielektrischer Verlustfaktor
- Brechungsindex
- Wärmekapazität

Ein Vergleich der linearen Ausdehnungskoeffizienten der Legierung FeNi 42 mit dem von Kupfer und dem eines Mold Compounds für Halbleiter läßt erkennen, daß Kupfer dem Ausdehnungskoeffizienten typischer Kapselungsmassen besser angepaßt ist (Bild 33). Zwischen Kupfer und Kunststoff ist die Fehlanpassung der thermischen Ausdehnung geringer als zwischen FeNi 42 und Mold Compound. Dies wird besonders oberhalb der Glasübergangstemperatur des Kunststoffes deutlich.

Weitere typische Wärmeausdehnungskoeffizienten von gebräuchlichen Materialien gibt Tabelle 4 wieder.

Die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Komponenten führen sowohl bei der Herstellung als auch beim erneuten Erwärmen zu Spannungen in der Gehäusestruktur.

Komponenten eines BE	Material	$\times 10^{-6} [K^{-1}]$
Chip	SiO ₂	3,4
	Aluminium	23,0
	Polyimid	36,0
Verbindung	Kleber (Die bonden)	35,0
	Gold (Wire bonden)	14,0
Leadframe	FeNi 42	4,5-5,8
	Kupfer	17,0
Mold Compound	Epoxidharz	15-35 ($< T_g$)
		60-70 ($> T_g$)

Tabelle 4: Wärmeausdehnungskoeffizienten typischer Materialien von geäußerten Bauelementen [13]

Spannungen in der Gehäusestruktur bei Temperaturänderung

Eine typische Epoxid-Neovalak Vergußmasse wird bei 175 - 180°C verarbeitet (vgl. auch Tabelle 15). Solange das wärmeaushärtende Epoxidmaterial noch flüssig ist, herrscht in der Gehäusestruktur ein spannungsfreier Zustand. Die Aushärtung des Epoxids nach dem Gießen bzw. Spritzgießen findet bei gleichbleibender Temperatur statt. Durch chemische Vernetzung tritt hierbei eine irreversible lineare Schrumpfung von 0,1...0,15% auf. Dies führt zu Druckspannungen in der Gehäusestruktur [9].

Während der darauf folgenden Abkühlungsphase auf Raumtemperatur erfolgt, thermomechanisch bedingt, eine weitere Schrumpfung von 60...67 ppm/°C im Bereich von 180°C bis 160°C und 18...20 ppm/°C unterhalb 160°C.

Können sich die Verbundmaterialien durchbiegen, wie es z. B. für ein freitragendes Die-Paddle der Fall ist, so sind die Gesamtkräfte reduziert. Oberhalb der sich ausbildenden neutralen Ebene herrscht Zugspannung, unterhalb Druck (Bild 36d).

Bild 36e zeigt Auswirkungen dieser Kräfte am Chip. An den Seiten und an der Oberfläche des Chips können demnach Haarrisse entstehen. Die durch die Chipbefestigung verursachten Spannungen im Chip sind von der verfahrensspezifischen Temperatur, die zur Fixierung des Chips auf dem Leadframe benötigt wird, abhängig.

Ist der Verbund zwischen Chip und Die-Paddle nicht optimal, so führen die verursachten hohen Druckspannungen zu einer Aufwölbung des Chips über der inhomogenen Verbindung. Es können vertikale Mikrorisse entstehen (Bild 36f) [69].

3.2.2 Einflußfaktoren auf die Crackingrate

Zu wichtigen Einflußfaktoren auf die Crackingrate gehören (lt. klassischem Schädigungsmodell) die Feuchteaufnahme, die Chipgröße bzw. Größe des Die-Paddles, die Gehäusedicke und die Adhäsion eines Bauelementes.

Feuchteaufnahme

Gleich nach der Temperatur ist die Feuchte eine kritische, lebensdauerbegrenzende Belastungsgröße für elektronische Bauelemente. Es ist allerdings bisher nicht gelungen, für kunststoffgekapselte Bauelemente ideal wasserdichte Kunststoffe zu entwickeln, die bei gleichzeitiger Einhaltung weiterer Forderungen bezüglich Entflammbarkeit, mechanischer Festigkeit usw. zur Umhüllung von Chips geeignet sind.

Im wesentlichen existieren zwei Wege, durch die Feuchte in ein Gehäuse eindringt:

- a) Entlang der Anschlüsse bei Rissen und Undichtigkeiten
- b) Diffusion durch die Umhüllung

Eine Möglichkeit, das Eindringen von Feuchtigkeit über die Leads zu reduzieren, ist das Anbringen von Löchern an den inneren Enden des Leadframes (Bild 37). Beim Umpressen werden diese Löcher mit Kunststoff ausgefüllt, wodurch Unter- und Oberseite dichter miteinander verbunden sind. Die so verbesserte Barriere hindert die Feuchtigkeit entlang der Grenzfläche zwischen Leadframe und Kunststoff vorzudringen [195][197].

Der weitaus effizientere Eindringmechanismus ist allerdings die Diffusion durch die Umhüllung [122].

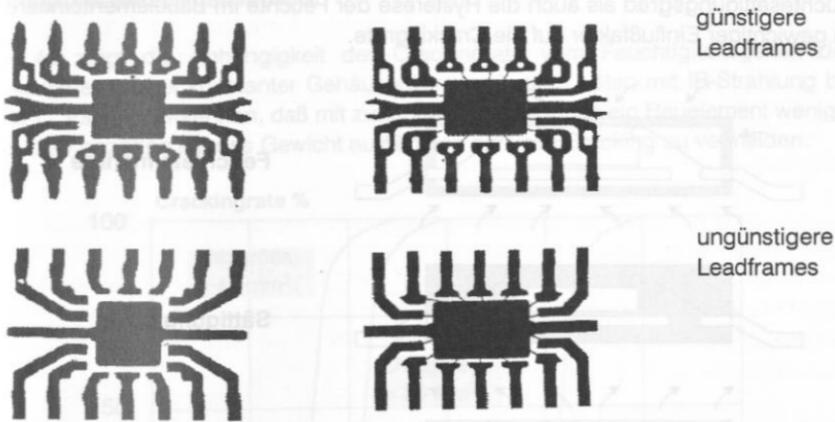


Bild 37: Beispiele für Formen des Leadframes (SO14 IC's)

Die Fähigkeit der Kunststoffe zur Wasseraufnahme ist nach Untersuchungen bei British Telecom abhängig von der relativen Feuchte der Umgebung und dabei unabhängig von deren Temperatur [82]. Die Diffusionsgeschwindigkeit des Wassers im Kunststoff selbst, ist hingegen ausschließlich temperaturabhängig [73]. Die relative Feuchte der Umgebung bestimmt somit, wieviel Wasser aufgenommen wird, die Temperatur, wie schnell das aufgenommene Wasser in das Bauelementinnere gelangt.

Die Feuchtediffusion als Hauptmechanismus der Feuchteaufnahme eines Bauelementes kann in zwei zeitliche Bereiche aufgeteilt werden [92][93]:

- a) "freie Diffusion", zu Beginn
- b) "gesättigte Diffusion", durch Übergang der Mechanismen mit exponentiellem Verlauf in Sättigungsfuchte

Die Diffusion von Feuchte in das Innere der Bauelemente klingt somit nach der Anfangsphase a) zu b) hin ab.

Bild 38 zeigt die Feuchteaufnahme, den Zustand der Sättigung und die Feuchteabgabe schematisch.

Bestätigung findet die in Bild 38 aufgezeigte Vorstellung durch ein Experiment von Intel in dem überprüft wurde, ab welchem Feuchtegehalt Bauelemente des untersuchten Typs cracken. Hierzu wurde ein Teil der Bauelemente jeweils verschieden angefeuchtet und überprüft, wann die Bauelemente Cracks aufweisen. Ein anderer Teil wurde zunächst bis zur Sättigung angefeuchtet und dann getempert.

Bild 39 zeigt deutlich, daß die getemperten Bauelemente noch mit einem geringeren Feuchtegehalt als die angefeuchteten cracken [1]. Somit ist sowohl der

Feuchtesättigungsgrad als auch die Hysterese der Feuchte im Bauelementinneren ein gewichtiger Einflußfaktor auf die Crackingrate.

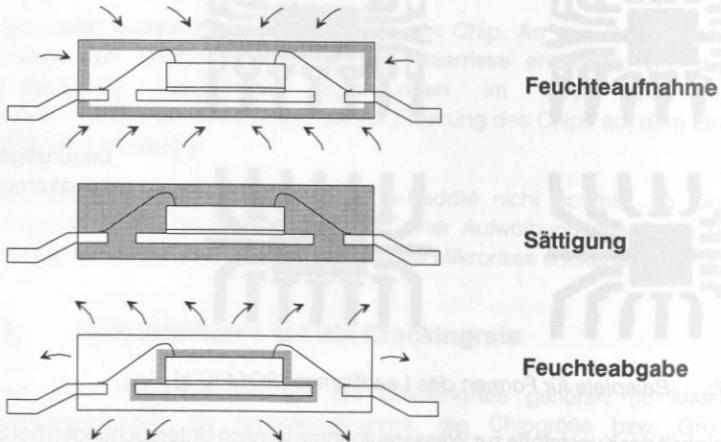


Bild 38: Feuchteaufnahme, Sättigung und Feuchteabgabe des Mold Compounds eines kunststoffgekapselten Bauelementes

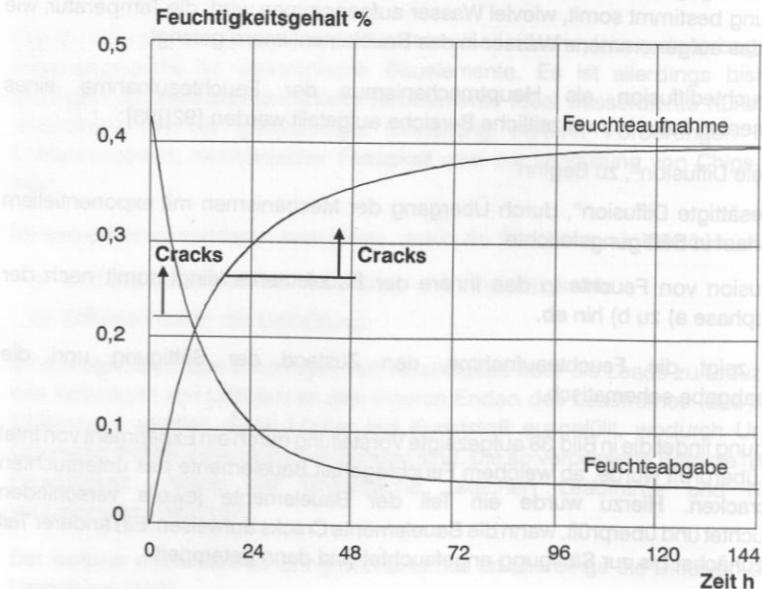


Bild 39: Feuchteaufnahme und -abgabe eines kunststoffgekapselten Gehäuses (nach [1])

Chipgröße und Gehäusedicke

Bild 40 zeigt die Abhängigkeit der Crackingrate vom Feuchtigkeitsgehalt des Bauelementes bei konstanter Gehäusedicke nach dem Löten mit IR-Strahlung bei 240°C. Es ist zu erkennen, daß mit zunehmender Chipgröße ein Bauelement weniger Feuchte bezogen auf das Gewicht aufnehmen darf, um Cracking zu vermeiden.

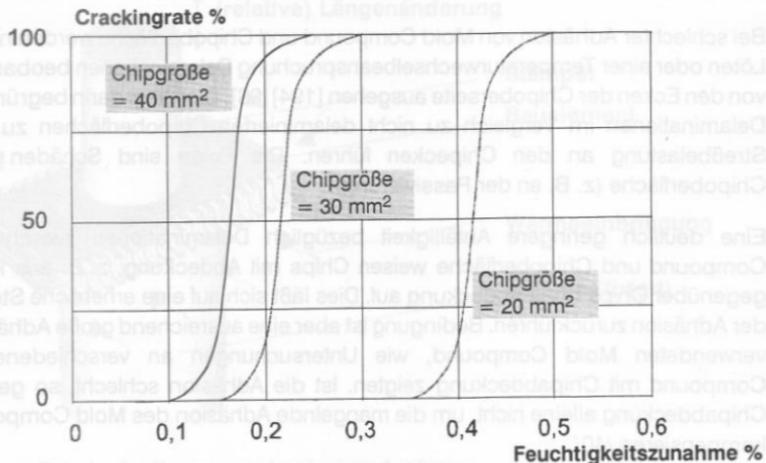


Bild 40: Der Einfluß der Chipgröße und der Feuchtigkeitszunahme auf die Crackingrate [136]

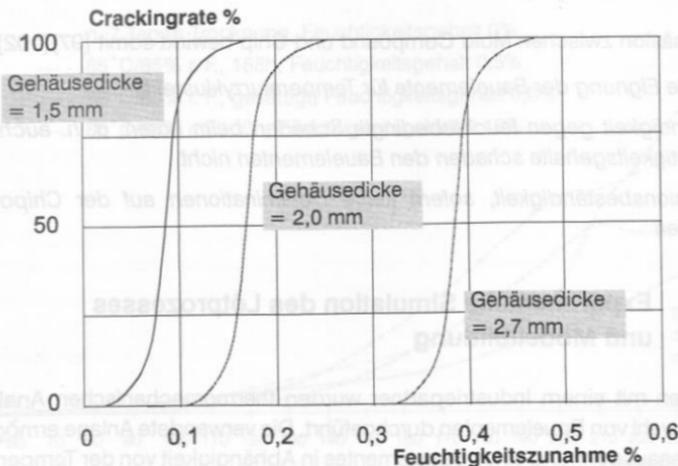


Bild 41: Der Einfluß der Gehäusedicke und der Feuchtigkeitszunahme auf die Crackingrate [136]

Bild 41 gibt über die Abhängigkeit der Crackingrate von dem Feuchtigkeitsgehalt bei verschiedenen Gehäusedicken des Bauelementes Auskunft. Die Chipgröße ist jeweils identisch. Mit abnehmender Gehäusedicke zeigt sich eine erhöhte Crackingempfindlichkeit.

Adhäsion

Bei schlechter Adhäsion von Mold Compound und Chipoberfläche werden nach dem Löten oder einer Temperaturwechselbeanspruchung Delaminationen beobachtet, die von den Ecken der Chipoberseite ausgehen [194][96]. Dies liegt darin begründet, daß Delaminationen im Vergleich zu nicht delaminierten Chipoberflächen zu höherer Streßbelastung an den Chipecken führen. Die Folge sind Schäden auf der Chipoberfläche (z. B. an der Passivierung).

Eine deutlich geringere Anfälligkeit bezüglich Delaminationen zwischen Mold Compound und Chipoberfläche weisen Chips mit Abdeckung, z. B. aus Polyimid, gegenüber Chips ohne Abdeckung auf. Dies läßt sich auf eine erhebliche Steigerung der Adhäsion zurückführen. Bedingung ist aber eine ausreichend große Adhäsion des verwendeten Mold Compound, wie Untersuchungen an verschiedenen Mold Compound mit Chipabdeckung zeigten. Ist die Adhäsion schlecht, so genügt die Chipabdeckung alleine nicht, um die mangelnde Adhäsion des Mold Compounds zu kompensieren [40].

Delaminationen zwischen Mold Compound und Die-Paddle treten bei Leadframes mit Kupferleadfinish mit wesentlich höherer Wahrscheinlichkeit als bei denen mit Nickelleadfinish auf [97].

Gute Adhäsion zwischen Mold Compound und Chip bewirkt somit [97][102]:

- *Höhere Eignung der Bauelemente für Temperaturzyklustests*
- *Beständigkeit gegen feuchtebedingte Schäden beim Löten, d. h. auch höhere Feuchtigkeitsgehalte schaden den Bauelementen nicht*
- *Korrosionsbeständigkeit, sofern keine Delaminationen auf der Chipoberseite auftreten*

3.2.3 Experimentelle Simulation des Lötprozesses und Modellbildung

Zusammen mit einem Industriepartner wurden thermomechanischen Analysen an einer Auswahl von Bauelementen durchgeführt. Die verwendete Anlage ermöglicht es, die Längenausdehnung eines Bauelementes in Abhängigkeit von der Temperatur und der Heizrate zu ermitteln (Bild 42).

Bild 43 zeigt die relative Längenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur für ein SOP32-Gehäuse von NEC für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte. Auffällig ist das Verhalten des Bauelementes bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 0,13%. Hier treten für die erreichte Spitzentemperatur größere Ausdehnungen und damit Spannungen im Gehäuse auf, als nach dem Anfeuchten über 168 Stunden bzw. bis zur Sättigung.

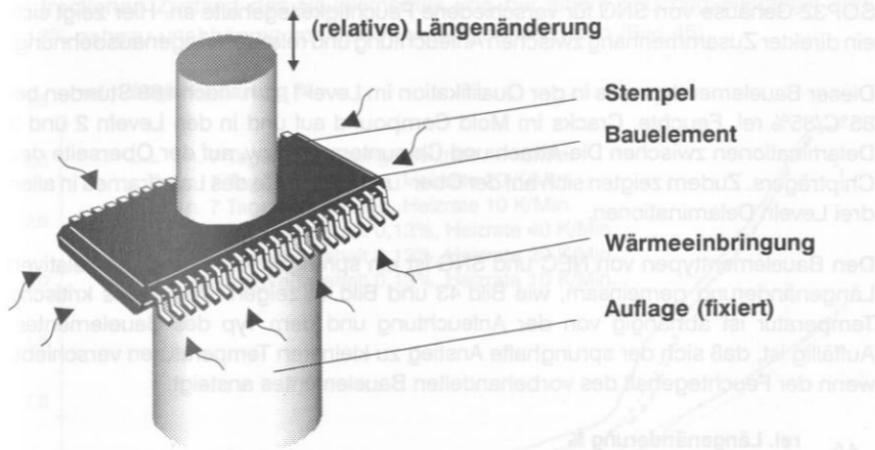


Bild 42: Prinzip der thermomechanischen Analyse

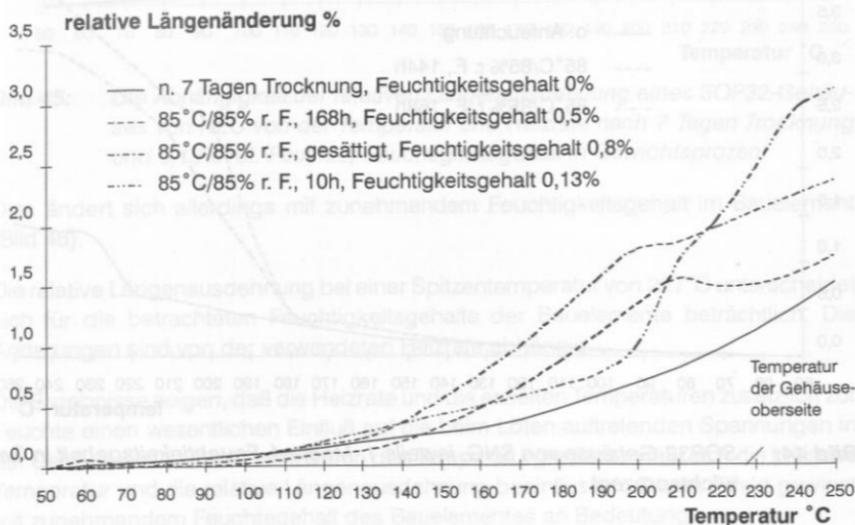


Bild 43: SOP32-Gehäuse von NEC, jeweils 1. Meßlauf, Feuchtigkeitsgehalt in Gewichtsprozent

Dieses Phänomen ist mit dem herkömmlichen Schädigungsmodell nicht mehr erklärbar. Es existieren demnach Bauelementtypen, die bei einem geringen Feuchtigkeitsgehalt durch das Löten höhere Kräfte erfahren als bei einem hohen Feuchtigkeitsgehalt.

Bild 44 gibt die relative Längenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur für ein SOP32-Gehäuse von SNG für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte an. Hier zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Anfeuchtung und relativer Längenausdehnung.

Dieser Bauelementtyp wies in der Qualifikation im Level 1, d.h. nach 168 Stunden bei 85°C/85% rel. Feuchte, Cracks im Mold Compound auf und in den Leveln 2 und 3 Delaminationen zwischen Die-Attach und Chipunterseite bzw. auf der Oberseite des Chipträgers. Zudem zeigten sich auf der Ober- und Unterseite des Leadframes in allen drei Leveln Delaminationen.

Den Bauelementtypen von NEC und SNG ist ein sprunghafter Anstieg der relativen Längenänderung gemeinsam, wie Bild 43 und Bild 44 zeigen. Die jeweils kritische Temperatur ist abhängig von der Anfeuchtung und dem Typ des Bauelementes. Auffällig ist, daß sich der sprunghafte Anstieg zu kleineren Temperaturen verschiebt, wenn der Feuchtegehalt des vorbehandelten Bauelementes ansteigt.

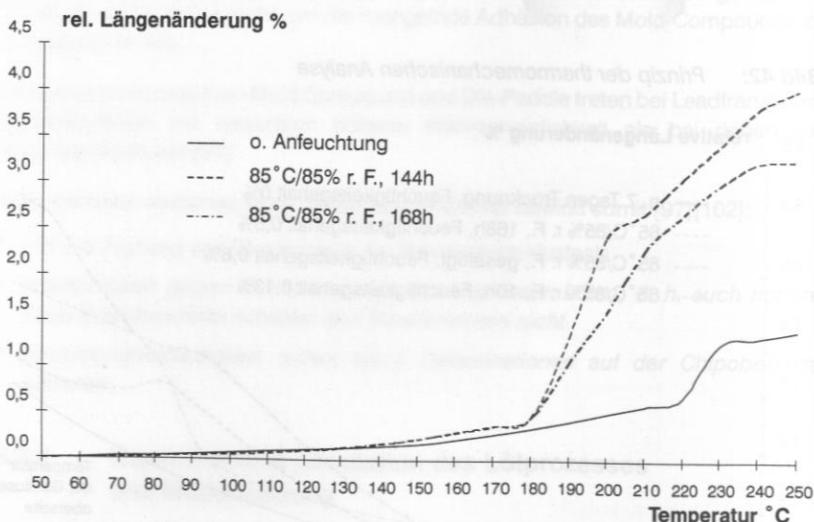


Bild 44: SOP32-Gehäuse von SNG, jeweils 1. Meßlauf, Feuchtigkeitsgehalt in Gewichtsprozent

Eine erste Erklärung für dieses Verhalten war, die Volumenvergrößerung des Mold Compounds auf Grund von Ausgasungen des Kunststoffes verantwortlich zu machen. Dies konnte eine thermogravimetrische Analyse nicht verifizieren. Die Erfassung des

Gewichtes einer Probe aus dem Mold Compound eines Bauelementes, wie dies mit der thermogravimetrischen Analyse möglich ist, ließ keine Abhängigkeit des Gewichtes der Probe von der Temperatur erkennen.

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der relativen Längenausdehnung von der Aufheizrate wurden Gehäuse von NEC untersucht. Die SOP32-Gehäuse zeigten sich im trockenen Zustand des Bauelementes und bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 0,13% nahezu unabhängig von den verwendeten Heizraten (Bild 45).

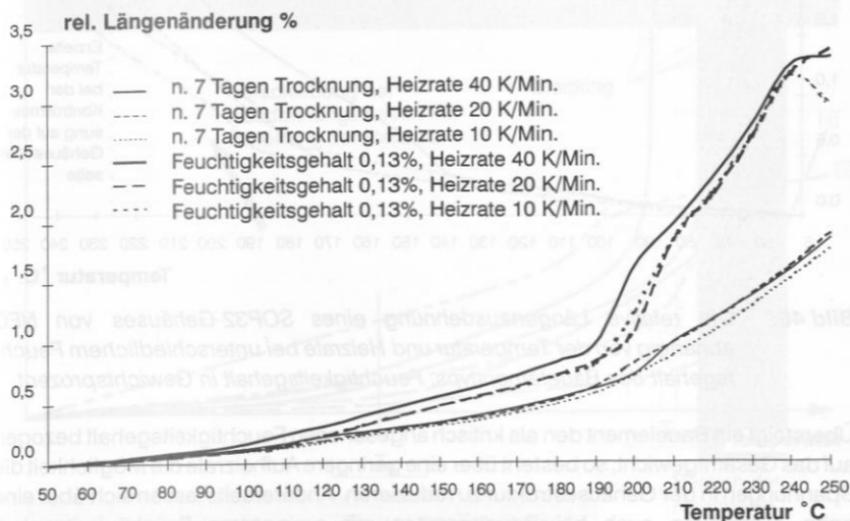


Bild 45: Die Abhängigkeit der relativen Längenausdehnung eines SOP32-Gehäuses von NEC von der Temperatur und Heizrate nach 7 Tagen Trocknung und 0,13% rel. Feuchte, Feuchtigkeitsgehalt in Gewichtsprozent

Dies ändert sich allerdings mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt im Bauelement (Bild 46).

Die relative Längenausdehnung bei einer Spitzentemperatur von 227°C unterscheidet sich für die betrachteten Feuchtigkeitsgehalte der Bauelemente beträchtlich. Die Änderungen sind von der verwendeten Heizrate abhängig.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Heizrate und die erzielten Temperaturen zusätzlich zur Feuchte einen wesentlichen Einfluß auf die beim Löten auftretenden Spannungen in der Gehäusestruktur besitzen. Durch den Temperaturgradienten läßt sich die kritische Temperatur und die relative Längenausdehnung beeinflussen. Dieser Effekt gewinnt mit zunehmendem Feuchtegehalt des Bauelementes an Bedeutung.

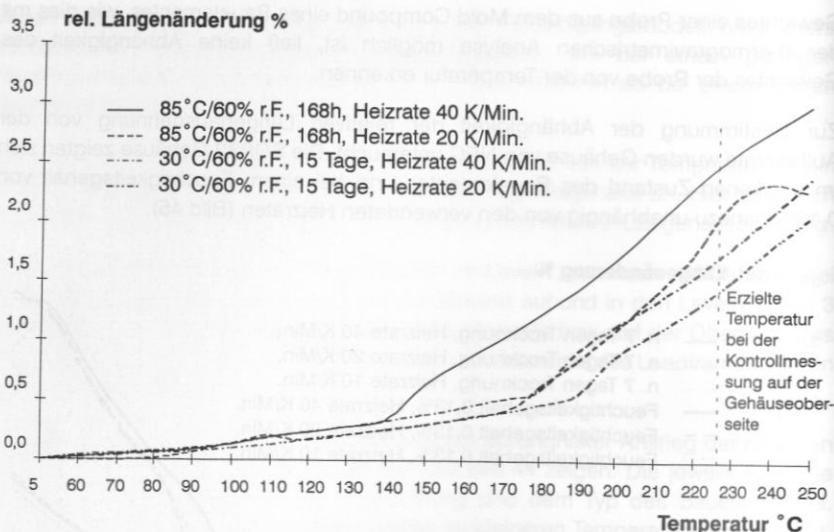


Bild 46: Die relative Längenausdehnung eines SOP32-Gehäuses von NEC abhängig von der Temperatur und Heizrate bei unterschiedlichem Feuchtegehalt des Bauelementtyps, Feuchtigkeitsgehalt in Gewichtsprozent

Übersteigt ein Bauelement den als kritisch angesehenen Feuchtigkeitsgehalt bezogen auf das Gesamtgewicht, so besteht über eine geringere Aufheizrate die Möglichkeit die Spannungen in der Gehäusestruktur zu reduzieren. Andererseits lassen sich über eine hohe Aufheizrate auch bei Bauelementen mit geringerem Feuchtigkeitsgehalt Spannungen im Inneren des Gehäuses erzielen, die denen von stärker angefeuchteten Bauelementen gleichkommen bzw. diese sogar übertreffen.

3.3 Verbessertes Schädigungsmodell

Aus diesen und weiteren Versuchen wurde ein verbessertes Schädigungsmodell entwickelt, das in Bild 47 dargestellt ist. Es setzt Bauelementeigenschaften (Versagensgrenzen, Spannungs-Dehnungs-Verhalten) in Zusammenhang mit Lagereinflüssen (Feuchteaufnahme) und Lötparametern (Löttemperatur, Heizrate).

Oberhalb einer bauelementabhängigen relativen Längenänderung (ca. 3%) tritt Cracking auf. Ob diese Grenze überschritten wird, hängt sowohl vom Dehnungs-Temperatur-Verlauf des Bauelements als auch von der auftretenden maximalen Löttemperatur ab. Der Dehnungs-Temperatur-Verlauf ist abhängig von der Feuchte des Bauelements, dessen generellen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens und der Heizrate.

In Bild 47 sind die beiden beobachteten Dehnungs-Temperatur-Verläufe dargestellt. Dabei stehen die Kurven 1 und 3 für einen Verlaufstyp, der als *weich* bezeichnet werden soll. Die Kurven 2/2* und 4/4* gehören zum anderen Verlaufstyp, der als *hart* bezeichnet werden soll.

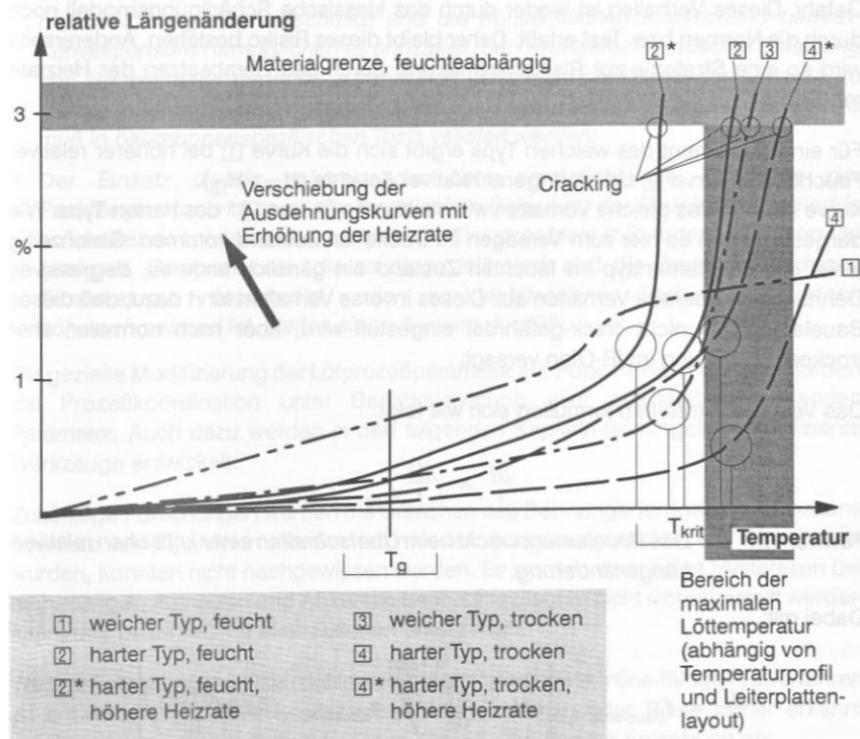


Bild 47: Schematischer Zusammenhang zwischen Bauelementeigenschaften, Lagerinflüssen und Lötparametern; T_g liegt bei ca. 100-150 °C, T_{krit} zwischen 140 °C und 200 °C, die maximale Löttemperatur liegt bei 200-260 °C.

Für ein Bauelement des harten Typs ergibt sich die Kurve 2 bei höherer relativer Feuchte, die Kurve 4 bei niedrigerer relativer Feuchte ($H_2 > H_4$).

Beide Kurven weisen drei Bereiche unterschiedlichen Ausdehnungsverhaltens auf (siehe Bild 43 und Bild 44). Der Dehnungs-Temperatur-Verlauf ist stets progressiv. Entscheidend für das Entstehen von Cracks sind die Lage der dritten Zone, die bei T_{krit} beginnt, und das Ausdehnungsverhalten in dieser Zone.

Mit zunehmender Feuchte verschiebt sich T_{krit} (in Bild 47 durch Kreise an den Sprungstellen markiert) zu niedrigeren Werten. Somit erhöht sich die Cracking-Gefahr für diesen Typ mit steigendem Wassergehalt. Dieses Verhalten wird durch die

vorgestellten Tests erfaßt; das Risiko kann minimiert werden. Es entspricht den Aussagen des klassischen Modells.

Durch eine höhere Heizrate kommt es zu einer vertikalen Dehnung der Kurven sowie niedrigeren Werten für T_g und T_{krit} ($2 \Rightarrow 2^*$; $4 \Rightarrow 4^*$). Damit steigt die Cracking-Gefahr. Dieses Verhalten ist weder durch das klassische Schädigungsmodell noch durch die Normen bzw. Test erfaßt. Daher bleibt dieses Risiko bestehen. Andererseits wird so eine Strategie zur Risikominimierung durch das Herabsetzen der Heizrate möglich.

Für ein Bauelement des weichen Typs ergibt sich die Kurve 1 bei höherer relativer Feuchte, die Kurve 3 bei niedrigerer relativer Feuchte ($H_1 > H_3$).

Kurve 3 zeigt das gleiche Verhalten wie die Kurven 4 und 4* des harten Typs. Wie dargestellt kann es hier zum Versagen im trockenen Zustand kommen. Gleichzeitig weist der Bauelementtyp im feuchten Zustand ein gänzlich anderes, degressives Dehnungs-Temperatur-Verhalten auf. Dieses inverse Verhalten führt dazu, daß dieses Bauelement als nicht crack-gefährdet eingestuft wird, aber nach normaler, eher trockener Lagerung im IR-Ofen versagt.

Das Versagenskriterium formuliert sich wie folgt:

$$\frac{\Delta l}{l} \geq \left(\frac{\Delta l}{l} \right)_{krit}$$

Formel 1: Das Bauelement crackt beim Überschreiten einer kritischen relativen Längenänderung.

Dabei gilt:

$$\frac{\Delta l}{l} = f_{\text{Bauelementtyp}} \left(r, H, T, \frac{dT}{dt}, \int_0^{t=\text{jetzt}} g_{\text{Bauelement}}(T, H) \left(\frac{dTdH}{dt^2} \right) \right)$$

Formel 2: Funktionsparameter der relativen Längenänderung

Die relative Längenänderung (Formel 2) ist eine bislang nur experimentell bestimmbare Funktion. Sie ist bauelementtypspezifisch und abhängig von der relativen Feuchte, der Temperatur, der Heizrate und der Lagerungsgeschichte des Bauelements.

3.4 Ausblick auf künftige Forschungen und Lösungsansätze

Die in Abschnitt 3.3 geschilderte Modellverfeinerung ist ein Schritt zu einem tieferen Verständnis der Zusammenhänge, die zum Cracken eines Bauelementes führen. Aus diesem Verständnis heraus können erste Ansätze für eine risikominimierende Prozeßführung beim Löten gewonnen werden:

- Die Heizraten sind generell möglichst niedrig zu halten. In wieweit sich dies mit den vorgegebenen Temperaturkurven vereinbaren läßt, muß in gesonderten Untersuchungen noch geprüft werden.
- Die maximale Löttemperatur ist in Hinblick auf den Popcorn-Effekt niedrig zu halten. Dies hat seine Grenzen dadurch, daß sich damit die Gefahr erhöht, daß das Lot nicht sicher genug aufschmilzt und die Kontaktflächen ausreichend benetzt. Konvektionsöfen ermöglichen es prinzipiell, bei niedrigerer thermischer Belastung des Bauelements dennoch zuverlässige Temperaturprofile an der Lötstelle zu erzeugen. Dies ist jedoch in hohem Maße vom Layout der Baugruppe abhängig und muß in baugruppenspezifischen Tests validiert werden.
- Der Einsatz niedrig schmelzender Lote ermöglicht die Reduktion der Peaktemperatur und damit der thermischen Belastung der Bauelemente. Niedrig schmelzende Lote sind aber nicht für alle Einsatzgebiete (z.B. Automobilelektronik) geeignet. Composit-Lote, die so eingestellt sind, daß die Paste bei niedrigen Temperaturen aufschmilzt, die so entstandene Verbindung jedoch höherschmelzend ist, stellen einen Ausweg dar [98].

Die gezielte Modifizierung der Lötprozeßparameter zur Popcorn-Vermeidung erfordert die Prozeßkoordination unter Berücksichtigung aller qualitätsbeeinflussenden Parameter. Auch dazu werden in den folgenden Kapiteln leistungsfähige, effiziente Werkzeuge entwickelt.

Zukünftige Forschungen werden die Ursachen des Dehnungs-Temperatur-Verhaltens oberhalb von T_{krit} näher untersuchen müssen. Ausgasungseffekte, wie sie vermutet wurden, konnten nicht nachgewiesen werden. Es wurden auch keine Hysteresen bei mehrmaligen Aufheizen und Abkühlen beobachtet, wobei nicht sichergestellt werden kann, daß diese evtl. im Meßrauschen untergehen.

Weitere Forschungen sollten dahin zielen, zerstörungsfreie, inline-fähige Prüfverfahren zu entwickeln, mit denen auftretende Delaminationen oder Risse sicher erkannt werden können. Dabei stehen folgende Grundprinzipien zur Erprobung an:

- Röntgen Computer-Tomographie
- Compton-Backscattering
- Thermische Analyse
- Optische und akustische Schwingungsanalyse

So ist es beispielsweise zu erwarten, daß eine Delamination oder ein Riß eine Veränderung der Eigenfrequenzen, Eigenformen und/oder des Zeit-Antwortverhaltens nach sich zieht.

Somit stehen - zumindest in absehbarer Zeit - wirtschaftlich akzeptable Möglichkeiten zur Verfügung, nicht nur die Gefahr des Popcorn-Effekts auszuschließen sondern auch mit ihm heute verbundene Kosten zu reduzieren, evtl. sogar zu eliminieren.

4 Informationssysteme in der Elektronikproduktion

Grundlage jeglicher Forschung, Analytik und Diagnostik sind zuverlässige, aussagekräftige, objektbezogene Daten geeigneten Detaillierungsgrades.

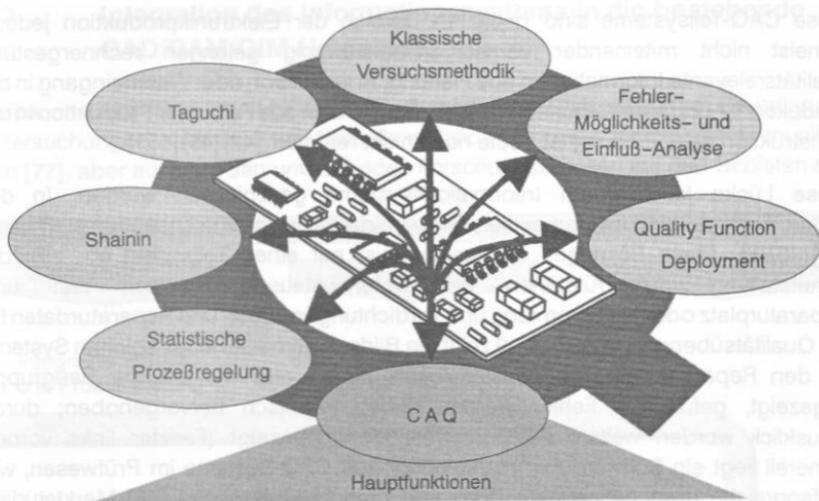
Während bei der in Kapitel 3 geschilderten Modellbildung die Datenlogistik, also die Sammlung, der Transport und die Bereitstellung von Daten, noch keine Bedeutung hatte, wird ein entsprechendes Qualitätsdateninformationssystem zum zentralen Element der prozeßbegleitenden Qualitätssicherung. Da es, wie noch gezeigt wird, nötig ist, auch Daten, die nicht typische Qualitätsdaten sind, über dieses System zu übertragen, soll im weiteren generell der Begriff *Informationssystem* verwendet werden.

4.1 Informationssysteme und CAQ

Der Begriff CAQ bedeutet Rechnerunterstützung in der Qualitätssicherung und ist ein wesentliches CA-Mitglied der CIM-Familie. Der Umfang des Rechnereinsatzes ist je nach betrieblichen Strukturen und Anforderungen sehr unterschiedlich. Der Rechner ermöglicht eine schnelle und variable Anwendung im Bereich von Erfassung, Verarbeitung und Auswertung. Er integriert verschiedenste Qualitätsfunktionen in der jeweiligen Unternehmensstruktur.

CAQ-Systeme unterstützen die Qualitätssicherung mit den Mitteln der modernen Informationstechnik. So können alle vorgestellten Methoden der Qualitätssicherung von QFD bis zur Design of Experiments durch Rechner unterstützt, geplant und durchgeführt werden. Dabei bieten moderne CAQ-Systeme die in Bild 48 dargestellten Hauptfunktionen zur Unterstützung der Qualitätssicherung an.

Auf Grund der sehr komplexen Prozesse in der Elektronikproduktion und der steigenden Anforderungen an die Qualität der Produkte ist es nötig, daß die Methoden der Qualitätssicherung an den integrierten Ablauf im Unternehmen angepaßt werden. Computergestützte Systeme für Planung, Produktion und Prüfung werden damit zu Trägern von Qualitätsfunktionen. Hierbei gewinnt auch die Datenstruktur zunehmende Bedeutung, besonders wenn ein Produkt verschiedene Fertigungsschritte durchlaufen muß. Letztlich bedeutet das, daß der Erfahrungsrückfluß bzw. der Transfer von Wissen und Erfahrung vom eingesetzten CAQ System unterstützt werden muß [174]. Somit überschneiden und ergänzen sich CAQ-Systeme nach [165] und Informationssysteme, wie sie hier betrachtet werden sollen. CAQ-Systeme wirken bereits in der Planungsphase eines Produktes, in der Vorbereitung der Produktion oder im Einkauf mit, während Informationssysteme, wie sie hier verstanden werden sollen, nur auf der Produktionsebene selbst eingesetzt werden.



- Verwaltung, Pflege und Zuordnung von Dokumenten und Informationen
 - > Normen
 - > Liefervorschriften
 - > Prüfpläne
 - > Stamm- und Grunddaten

- Unterstützung bei der Ermittlung der gesamten Qualitätskosten

- Unterstützung des Prüfmittel- und Garantiewesens
 - > Pflege von Prüfmittelstammdaten, Kalibrier- und Justierdaten
 - > Reklamationsbehandlung

- Umfangreiche und flexible Informationsaufbereitungs-möglichkeiten
 - > Design of Experiments
 - > Taguchi, Shainin
 - > FMEA
 - > SPC

- Bewertung der Unternehmensfaktoren
 - > Produkte
 - > Prüfungsverfahren
 - > Lieferanten

- Datenorganisation, -sicherung und -archivierung

Bild 48: Wichtigste Funktionen des CAQ - Systems [165] zur Unterstützung der Qualitätssicherung

Diese CAQ-Teilsysteme sind heute im Bereich der Elektronikproduktion jedoch zumeist nicht miteinander vernetzt. Ebenso wenig gelangen rechnergestützt qualitätsrelevante Informationen aus Planung, Konstruktion oder Wareneingang in die Produktion. Auch ein strukturierter Rückfluß von Daten aus Feld oder Produktion in die Konstruktion oder Planung ist heute noch nicht realisiert. [42][45][151]

Diese Lücke kann durch Informationssysteme geschlossen werden. In der Elektronikproduktion werden mittlerweile vereinzelt hausinterne Lösungen eingesetzt [42][45][5]. Diese Lösungen decken zumeist nur einen Teilaspekt ab, z.B. die Bereitstellung von Prüfplänen, den Datenaustausch zwischen Test- und Reparaturplatz oder die Sammlung und Verdichtung von Test- und Reparaturdaten für die Qualitätsüberwachung. Bild 49 zeigt die Bildschirmmaske eines solchen Systems für den Reparaturplatz: Im Fenster rechts hinten wird die aktuelle Baugruppe angezeigt, gefundene Fehler werden dabei graphisch hervorgehoben; durch Mausclick werden weitere Fehlerinformationen angezeigt (Fenster links vorne). Generell liegt ein Schwerpunkt marktverfügbarer CAQ-Systeme im Prüfwesen, wie umfangreiche branchenneutrale [151] und branchenspezifische [44] Marktstudien belegen. Eine Prozedatenerfassung unterbleibt hingegen völlig.

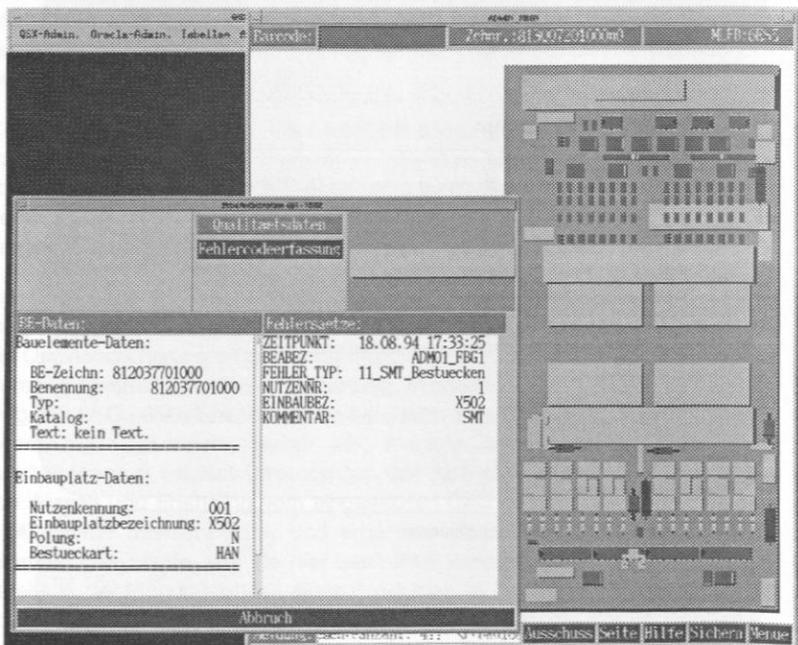


Bild 49: Bildschirmmaske eines Informationssystems für Test- und Reparaturplätze

4.2 Integration des Informationssystems in die bestehende CAD/CAM/CIM-Umgebung

Aufbauend auf den am Lehrstuhl durchgeführten, umfangreichen Grundlagenuntersuchungen zur Ablauf- und Prozesssimulation [7], sowie zur Prozesskommunikation [77], aber auch auf den umfassenden Forschungsarbeiten auf den Gebieten der

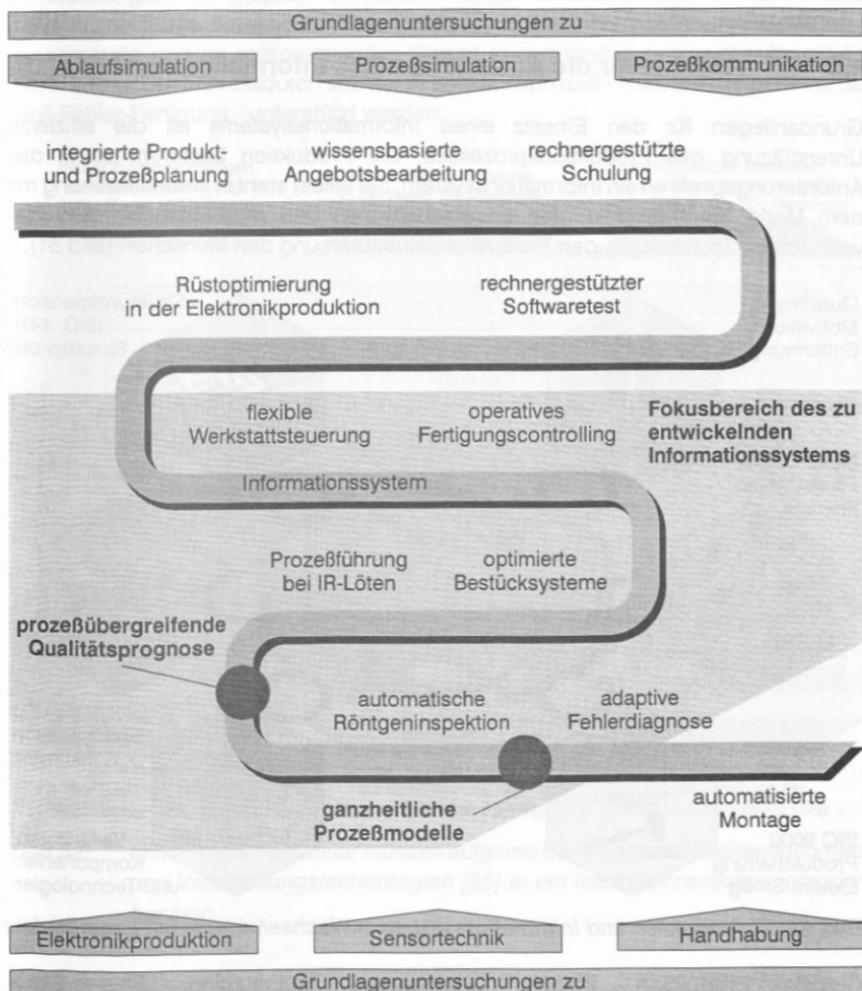


Bild 50: Endvision und Teilziel für die Integration des Informationssystems in die bestehende CAD/CAM/CIM-Umgebung entlang der Auftragsabwicklung (Ausschnitt)

Elektronikproduktion [32][39][154], der Sensor- und Systemtechnik, sowie der Handhabung und Montage wurden bereits früher leistungsfähige Softwaresysteme [162][202] zur Lösung von Teilaufgaben entlang der Auftragsabwicklung entwickelt (Bild 50). Ein Informationssystem muß die prinzipielle Fähigkeit haben, alle vorhandenen Teillösungen daten(strom)technisch zu integrieren. Für einen ersten Ansatz wird dabei der Fokus auf die produktions- und prüftechnischen Aufgabenfelder beschränkt, wobei die Ausbaufähigkeit des Systems gewährleistet bleiben soll.

4.3 Aspekte für die Auslegung eines Informationssystems

Grundanliegen für den Einsatz eines Informationssystems ist die effiziente Unterstützung des Produktionsprozesses. Die Produktion bestimmt somit das Anforderungsprofil an ein Informationssystem. Sie selbst steht in Wechselwirkung mit dem Markt, dem Produkt, den gesellschaftlichen und rechtlichen Normen, der verfügbaren Technologie, den Produktionsstrukturen und den Menschen (Bild 51).

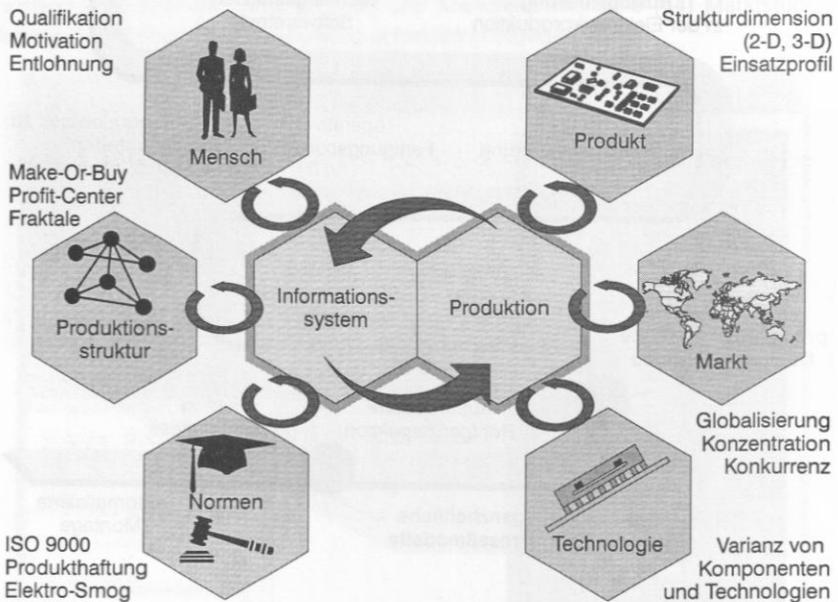


Bild 51: Produktion und Informationssystem in Wechselwirkung mit ihrem Umfeld

Globale Produktion, fraktale Organisation, Outsourcing, Ship-to-Stock, Öko-Bilanzierung, ISO9000-Zertifizierung sind nur einige der Schlagworte bzw. Konzepte, die aktuell in diesem Umfeld von Produktions- und Informationssystemen

diskutiert werden. Ein Beispiel für den zu berücksichtigenden Technologiewandel gibt Bild 52.

Daher wird in diesem Kapitel branchenorientiert das Anforderungsprofil an ein Qualitätsdateninformationssystem entwickelt, das die o.g. Aufgaben erfüllen kann. In Abschnitt 4.4 erfolgt die informationstheoretisch orientierte Herleitung dieser Anforderungen. In Kapitel 5 werden diese Anforderungen in ein reales, rechnergestütztes, dezentrales System umgesetzt. Ziel ist es, qualitätsrelevante Daten zu sammeln und an entsprechenden Stellen in geordneter, geeignet aufbereiteter Form bereitzustellen. Dadurch soll der Produktionsprozeß - nicht zuletzt im Sinne der Null-Fehler-Fertigung - unterstützt werden.

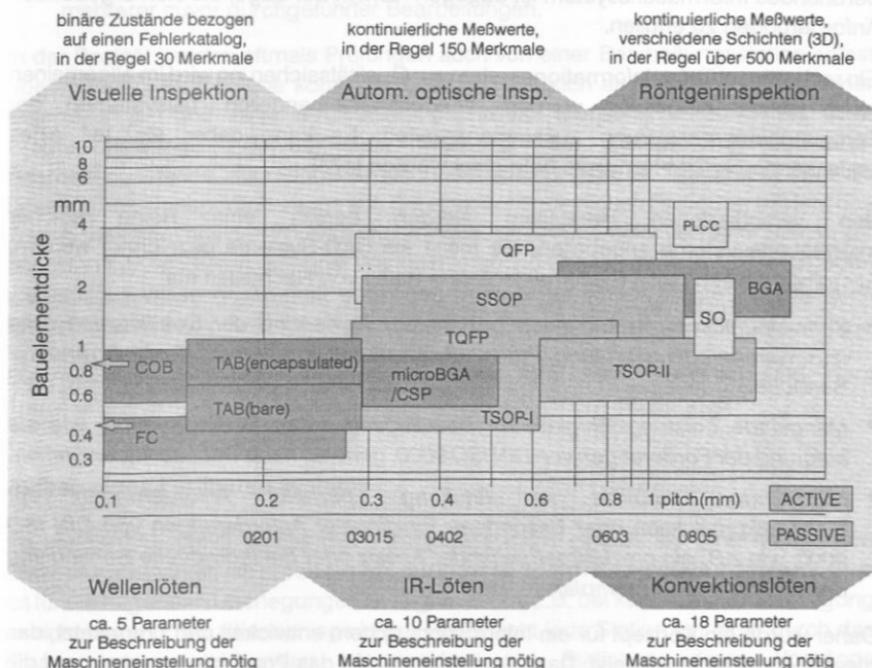


Bild 52: Immer mehr Parameter müssen aufgrund der Trends in Bauelementformen und Verarbeitungstechnologien [35] in ein Informationssystem integrierbar sein.

4.4 Anforderungen an Informationssysteme der Elektronikproduktion

Die prozeßbegleitende Kontrolle erfordert die Erfassung, Verarbeitung und Weitergabe einer Vielzahl von Informationen über die Zustände der Fertigungsanlage,

vor allem aber über die Produkte, die diese Anlage durchlaufen. Eine im allgemeinen sowohl aus Menschen, als auch aus Computern bestehende Organisation, die diese Aufgaben der Informationsverarbeitung wahrnimmt, wird hier als Informationssystem bezeichnet.

Die Menge an Informationen, die von einem solchen Informationssystem pro Zeiteinheit zu bewältigen ist, wird wegen der zunehmenden Komplexität der Produkte und der Beschleunigung ihres Durchlaufs durch die Fertigungsanlage immer größer. Eine Übernahme dieser Aufgaben der Informationsverarbeitung durch einen Rechner, zumindest aber eine weitgehende Unterstützung der zuständigen Mitarbeiter erscheint unumgänglich. Ein im wesentlichen auf der Arbeit von Menschen beruhendes Informationssystem ist dagegen nicht in der Lage, die sich ergebenden Anforderungen zu erfüllen.

Ein rechnergestütztes Informationssystem zur Qualitätssicherung wird im allgemeinen nicht isoliert eingesetzt werden, sondern mit anderen Teilsystemen der Fertigungsautomatisierung zusammenarbeiten. Es kann daher als Teil eines umfassenderen CIM-Konzepts betrachtet werden [173].

Von verschiedenen Herstellern werden bereits eine Reihe solcher Informationssysteme angeboten, die meist als CAQ-Systeme bezeichnet werden. Allerdings weisen diese Systeme noch eine Reihe von Nachteilen auf:

- *Schwerpunktsetzung auf einen bestimmten Teilbereich der Qualitätssicherung (z.B. Wareneingangsprüfung, Prüfmittelverwaltung) und Vernachlässigung anderer Bereiche.*
- *Mangelnde Leistungsfähigkeit zur Bewältigung hoher Datenvolumina, wie sie aufgrund der Forderungen von DIN ISO 9000, generell nach Traceability, entstehen.*
- *Mangelnde Flexibilität zur Erfüllung spezieller Anforderungen der Elektronikproduktion oder besonderer funktionaler Anforderungen von DIN ISO 9000, wie z.B. ein prozeübergreifender Ansatz oder die individuelle Behandlung der zu fertigenden Exemplare.*

Daher wurde ein Konzept für ein Informationssystem entwickelt und umgesetzt, das diese Mängel nicht aufweist. Dazu wurden zunächst das Produktionssystem und die Produktionsvorgänge informationstechnisch analysiert, abstrahiert und modelliert.

4.4.1 Produktionsanlage und Fertigungssystem

Bestandteile der Produktionsanlage

In erster Näherung betrachtet, besteht eine Produktionsanlage aus einer Menge von Stationen - Automaten oder Robotern, aber auch Menschen - die jeweils ganz

bestimmte Aufgaben in Zusammenhang mit der Herstellung eines Produktes wahrnehmen, und einem Transportsystem, das die in einer Station bearbeiteten oder geprüften Produkte oder Teile zur nächsten Station befördert.

Es lassen sich grundsätzlich zwei Arten von Stationen unterscheiden:

1. *Bearbeitungsstationen* verändern das Produkt indem sie es entweder mechanisch, physikalisch oder auf irgendeine andere Art "bearbeiten" (z.B. Löten) oder indem sie dem Produkt bestimmte Teile hinzufügen (z.B. Bestücken). Diese Stationen führen also die (Teil-)Prozesse aus.
2. *Prüfstationen* nehmen keine Veränderungen am Produkt vor, sondern prüfen es lediglich. Damit liefern sie Informationen über die Ergebnisse einer oder mehrerer zuvor durchgeführter Bearbeitungen.

In der Realität werden oftmals Prüfungen auch von einer Bearbeitungsstation selbst übernommen. Eine solche kombinierte Station läßt sich aber auch als Folge einer Bearbeitungs- und einer Prüfstation darstellen. Menschen tauchen in einer Produktionsanlage z.B. bei einer Prüfstation zur Sichtprüfung, bei einer Bearbeitungsstation zur manuellen Nachbearbeitung oder im Transportsystem als Lenker eines Transportfahrzeugs auf. Bei einer kontinuierlichen Fertigung besteht das Transportsystem aus den Fördereinrichtungen, die ein Exemplar von einer Station zur nächsten transportieren. Bei einer Werkstattfertigung werden die Exemplare dagegen z.B. auftragsweise gesammelt und dann in einer größeren Menge zur nächsten Werkstatt oder in ein Zwischenlager befördert.

Die gesamte Produktionsanlage, bestehend aus den Stationen und dem Transportsystem, wird im folgenden als Fertigungssystem bezeichnet.

Aufbau eines Fertigungssystems

Im vorigen Abschnitt wurde das Fertigungssystem einfach als eine Menge von Stationen betrachtet, die durch ein Transportsystem miteinander verbunden sind. Dies ist für die folgenden Überlegungen zu allgemein, da z.B. bei kontinuierlicher Fertigung in einer realen Produktionsanlage in der Regel nicht jede Station mit jeder durch das Transportsystem verbunden ist, sondern nur Stationen, deren Vorgänge hintereinander ausgeführt werden.

Eine solches Fertigungssystem wird zwar von einem Exemplar (in diesem Fall eine spezifische Baugruppe) im allgemeinen weitgehend linear durchlaufen, besteht aber aus einer Vielzahl von Maschinen und Verzweigungen, sodaß für die Herstellung eines bestimmten Exemplars verschiedene Weg durch ein solches System denkbar sind. So gibt es meist mehrere verschiedene oder auch gleichartige Maschinen auf denen eine bestimmte Bearbeitung oder Prüfung ausgeführt werden kann. Auch können in einem Fertigungssystem sehr verschiedene Exemplartypen gefertigt werden, sodaß schon

daher für ein bestimmtes Exemplar sehr unterschiedliche Wege durch das Fertigungssystem möglich sind.

Ein Fertigungssystem läßt sich abstrakt als gerichteter Graph darstellen. Die Knoten sind die Stationen, die Kanten sind Teile des Transportsystems zwischen den Stationen. Ein Weg in einem solchen Graphen von einem Eingangsknoten zu einem Ausgangsknoten wird als Pfad bezeichnet. Bild 53 zeigt einen solchen Graphen beispielhaft für die Elektronikproduktion. Jedes individuelle Exemplar muß nun weitgehend sequentiell einen Pfad in einem solchen Graphen durchlaufen.

Für ein Exemplar gibt es im allgemeinen mehrere Pfade, bei deren Durchlaufen es korrekt gefertigt werden würde. Es ist daher notwendig, für einen bestimmten Schaltungsträger einen Pfad auszuwählen, und damit festzulegen, wie an den Knoten verzweigt werden soll. Die Entscheidung über den Einsatz bestimmter Stationen oder ganzer Werkstätten für die Fertigung eines Auftrags wird in der Regel durch das PPS-System vorgenommen. Bei Prüfungen dagegen, die meist nicht unter die Zuständigkeit des PPS-Systems fallen, ist das Informationssystem für die Zuordnung von Prüfaufträgen zu Prüfstationen zuständig.

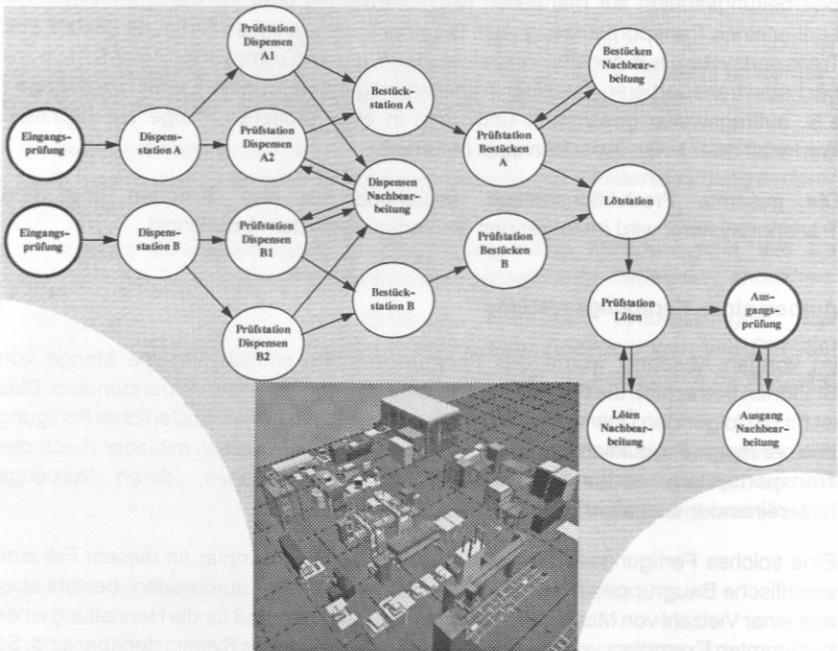


Bild 53: Darstellung des Fertigungssystems der FAPS-Modellfabrik für den Bereich der Elektronikproduktion als Graph

4.4.2 Informationssystem und Fertigungsumgebung

Die meisten Stationen haben intern zumindest einen einfachen Rechner eingebaut, der für die Steuerung der Maschine zuständig ist (z.B. SPS) [80]. In diesem Kontext geht es aber weniger um die Informationsverarbeitung innerhalb einer Station, als vielmehr um die Informationsverarbeitung auf der Ebene der gesamten Produktionsanlage, also zum Beispiel um die Koordinierung der Tätigkeiten zweier aufeinanderfolgender Stationen oder um die Ermittlung verdichteter Werte über die Ergebnisse einer bestimmten Prüfung.

Modellhaft wird zunächst angenommen, daß alle Aufgaben, die mit der Informationsverarbeitung auf stationsübergreifender Ebene zu tun haben, von einem zentralen Informationssystem übernommen werden. Dieses Informationssystem wird zunächst als "black box" betrachtet. Die Stationen des Fertigungssystems, andere beteiligte Automatisierungssysteme und die verschiedenen Anwender sind auf eine bestimmte Art an das Informationssystem angeschlossen und kommunizieren mit ihm. Alle diese Kommunikationspartner des Informationssystems werden im folgenden als Fertigungsumgebung bezeichnet.

Andere Systeme, im folgenden Fremdsysteme genannt, sind z.B.:

- *CAD-Systeme, die Konstruktionsdaten über die zu fertigenden Exemplare liefern, z.B. für die Erstellung von Prüfplänen, oder beispielsweise verdichtete Qualitätsinformationen über einen bestimmten Exemplartyp entgegennehmen, um die Konstruktion zu optimieren.*
- *PPS-Systeme, die Informationen über die zu fertigenden und damit auch zu prüfenden Aufträge liefern und Informationen darüber zurücknehmen, welche Mengen in welcher Qualität tatsächlich gefertigt wurden.*
- *CAM-Systeme, die für die kurzfristige Fertigungssteuerung zuständig sind, tauschen mit dem Informationssystem, das für die Prüfungssteuerung zuständig ist, z.B. Informationen über die Bearbeitung bzw. Prüfung einzelner Exemplare aus. Maschinen- und Betriebsdatenerfassungssysteme (MDE/BDE) sollen hier als Bestandteile eines CAM-Systems aufgefaßt werden.*
- *Parallele Systeme, die Aufgaben des Informationssystems übernehmen können. Während von den oberen drei Systemen nur zu bestimmten Zeitpunkten Informationen entgegengenommen werden oder an sie Informationen übergeben werden, ist die Zusammenarbeit hier im allgemeinen enger, d.h. es müssen nahezu kontinuierlich Informationen ausgetauscht werden. Beispiele hierfür sind Diagnose- oder Regelungssysteme. [202][42]*

Anwender sind das Bedienungs- und Kontrollpersonal der Produktionsanlage, das

- *Informationen über den Zustand der Anlage und der gefertigten Produkte auf den verschiedenen Ebenen und in unterschiedlicher Detaillierung benötigt. (Derartige*

Anfragen an das Informationssystem werden im folgenden als Auswertungen bezeichnet.)

- neue Informationen über Veränderungen an der Produktionsanlage, am Transportsystem, den eingesetzten Materialien (z.B. Lotpaste), usw., eingibt, also den Datenbestand pflegt.
- die Strukturen des Informationssystems selbst (also z.B. die Struktur der Datenbank oder bestimmte Strategien bei der Prüfplanung) veränderten Anforderungen anpaßt (Systemadministration).

Datenquellen und Datensenzen

Aufgabe eines Informationssystems ist es nun, mit den angeschlossenen Systemen zu kommunizieren. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist dabei der Informationsfluß zwischen dem zentralen Informationssystem und der Fertigungsumgebung. Ein Teil dieser Fertigungsumgebung, der ganz allgemein als peripheres System bezeichnet wird, kann bezogen auf die Kommunikation prinzipiell zwei Funktionen übernehmen:

- Das periphere System kann als eine Informationsquelle dienen. Dies ist dann der Fall, wenn die Informationen vom peripheren System zum Informationssystem hin fließen.
- Umgekehrt dient ein peripheres System als Informationssenke, wenn der Informationsfluß vom Informationssystem aus zum peripheren System hin geht.

Peripheres System als:	Anstoß durch das Informationssystem	Anstoß durch ein peripheres System
Informationsquelle	Anforderung von Zustandsinformationen über eine Station durch das Informationssystem	Meldung über einen besonderen Vorfall durch eine Station
Informationssenke	Ausgabe einer Warnmeldung an den Maschinenbediener bei einer Abweichung im Prozeß	Anforderung einer Auswertung durch einen Benutzer

Tabelle 5: Typen von Informationsflüssen innerhalb des Informationssystems

Daneben kann man die Informationsflüsse danach unterteilen, ob sie von einem peripheren System oder vom Informationssystem ausgelöst wurden.

Somit ergeben sich vier verschiedene Gruppen von Informationsflüssen. Tabelle 5 zeigt diese Gruppen zusammen mit jeweils einem Beispiel. In Tabelle 6 wird für jedes der angeschlossenen Systeme nochmals ein Beispiel für seine Funktion als Datenquelle und Datensenke angegeben.

Das in diesem Abschnitt entwickelte sehr einfache Modell dient als erster Ausgangspunkt für die weitere Untersuchung der Anforderungen, die aus Sicht der Normen und der Anwender an ein solches System gestellt werden müssen. In Kapitel 4.6 werden dazu - ausgehend von relativ abstrakten Anforderungen - schrittweise immer konkretere Ergebnisse abgeleitet.

System	Funktion als Informationsquelle	Funktion als Informationssenke
Bearbeitungsstation	eigener Status, Ergebnis der Ausführung einer Bearbeitung	Bearbeitungsprogramm
Prüfstation	eigener Status, Ergebnisse einer Prüfung	Prüfauftrag
Auswertungen	Benutzeranfrage an das Informationssystem	Ergebnisse einer Auswertung; Meldung bei einer außergewöhnlichen Situation in der Produktionsanlage
Pflege des Datenbestandes	Eingabe neuer oder geänderter Daten (Stammdaten, Bewegungsdaten, Systembeschreibung)	Anzeige des aktuellen Datenbestandes und Rückmeldung über erfolgte Änderungen
Systemadministration	Eingabe einer Veränderung am Datenbankschema, einer geänderten Aufteilung der Speicherbereiche, usw.	Anzeige des momentanen Zustands oder aufgetretener Fehler des Informationssystems
Vorgelagerte Systeme	Programme (CAD) und Aufträge (PPS) für die Fertigung bestimmter Produkte	Meldung über erfolgte Fertigung, über Probleme mit einem Fertigungsprogramm

Tabelle 6: Beispiele für Datenquellen und Datensenzen in der Elektronikproduktion

4.5 Kernkomponenten des Informationssystems

Die Aufgabe des Informationssystems ist es, einerseits Informationen von den peripheren Systemen entgegenzunehmen und zu verarbeiten, und andererseits die peripheren Systeme mit Informationen zu versorgen. Somit ergeben sich drei grundlegende Aufgabenbereiche für das Informationssystem:

- *Kommunikation mit den peripheren Systemen der Fertigungsumgebung zum Austausch von Informationen*
- *Verarbeitung der entgegengenommenen oder gespeicherten Informationen*
- *geordnete Speicherung und Wiederauffindung der Informationen*

Daraus ergibt sich die Forderung nach geeigneten Komponenten des Systems, die für die Durchführung der einzelnen Aufgabenbereiche zuständig sind. Die entsprechende Untergliederung ist in Bild 54 dargestellt.

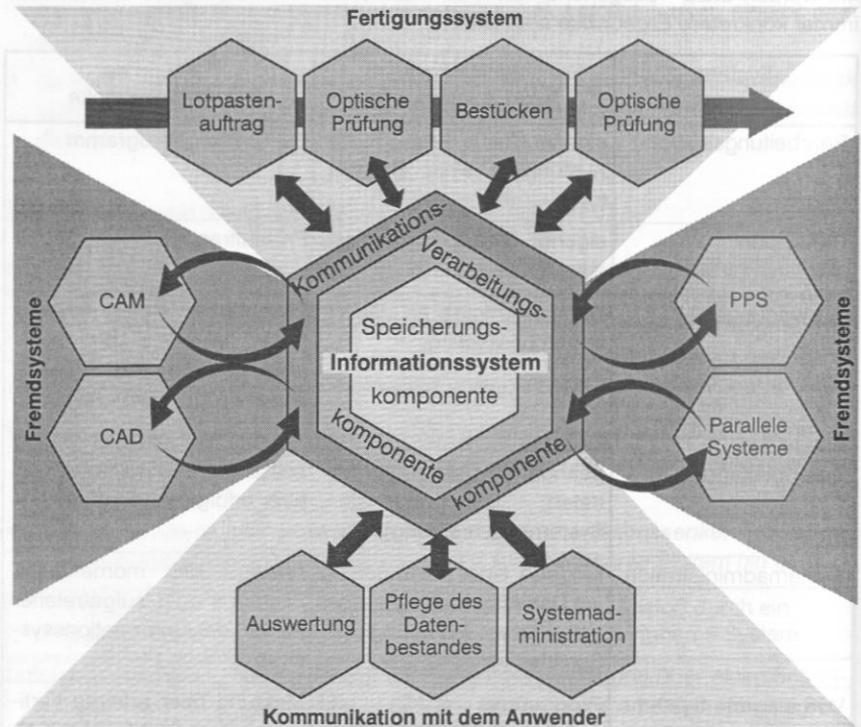


Bild 54: Gliederung des Informationssystems in Komponenten

Die dargestellten Komponenten des Informationssystems haben im einzelnen die folgenden Aufgaben:

- Kommunikationskomponente**
Ihre Aufgabe ist der Transport von Informationen zwischen den angeschlossenen peripheren Systemen und dem Informationssystem. Jeder Kontakt des Informationssystems nach außen wird über diese Kommunikationskomponente abgewickelt. Sie muß sehr flexibel ausgebildet sein, damit eine Kommunikation auch mit sehr unterschiedlichen Stationen und Fremdsystemen möglich ist.
- Speicherungskomponente**
Aufgabe der Speicherungskomponente ist die Speicherung aller für den Betrieb des Fertigungssystems notwendigen und während des Betriebs anfallenden Informationen in einer strukturierten Form, sodaß ein effizienter Zugriff auf diese

Daten möglich ist. Dabei kann unterschieden werden zwischen kurz- und mittelfristigen Speicherungen der Informationen zu Exemplaren, die gerade erst gefertigt wurden, zum Zweck der Steuerung und der Erstellung von Auswertungen, und der langfristigen Speicherung möglichst aller Informationen, z.B. zur Erbringung von Nachweisen im Rahmen von Produkthaftungsansprüchen.

c) Verarbeitungskomponente

Sie ist einerseits dafür zuständig, Informationen, die durch die Kommunikationskomponente entgegengenommen wurden, zu verarbeiten, zu speichern und ggf. auf diese zu reagieren. Andererseits muß sie auch auf die gespeicherten Informationen zugreifen und diese auswerten können, um die peripheren Systeme mit notwendigen Informationen zu versorgen. Zu ihrer Arbeit greift diese Komponente immer wieder auf die anderen beiden Komponenten zurück.

4.6 Ableitung des Anforderungsprofils

Basis dieses Anforderungskatalogs sind aktuelle Qualitätssicherungsnormen wie die Normenreihe DIN ISO 9000ff. Zusätzlich gehen auch grundlegende Forderungen an die Produktionsautomatisierung, die sich aus der Praxis ergeben, sowie für die Elektronikproduktion spezifische Forderungen mit in die Überlegungen ein [120]. Diese Grundlagen für die Anforderungsanalyse werden im folgenden als Basisforderungen bezeichnet.

Die Aussagen der Qualitätssicherungsnormen zum Informationsmanagement sind durchwegs sehr allgemein gehalten. Um zu detaillierteren Anforderungen an ein Informationssystem zu gelangen, werden diese Aussagen zusammen mit den übrigen Basisforderungen schrittweise konkretisiert. Somit ergeben sich zunächst eher allgemeine funktionale Anforderungen aus der Sicht eines Anwenders, der ein solches System in seinem Unternehmen einsetzen will. Daraus lassen sich dann Schritt für Schritt immer konkretere Anforderungen ableiten, bis hin zu Aussagen z.B. über die geforderte Leistungsfähigkeit der Hardware oder über die Organisation des Datenbestandes.

Die Basisforderungen sind in Bild 55 aufgelistet. Die einzelnen Punkte sind selbstverständlich nicht unabhängig von- und parallel zueinander zu sehen, sondern hängen auf vielfältige Weise voneinander ab. So ergeben sich z.B. aus dem allgemeineren Punkt "Anwenderfreundlichkeit" eine Reihe von Folgerungen für den schon etwas konkreteren Punkt "Gestaltung der Benutzeroberfläche". Diese Zusammenhänge zwischen den einzelnen Anforderungen sind im folgenden Abhängigkeitsdiagramm (Bild 56) dargestellt. Die Pfeile zeigen die wechselseitigen Abhängigkeiten der Anforderungen an.

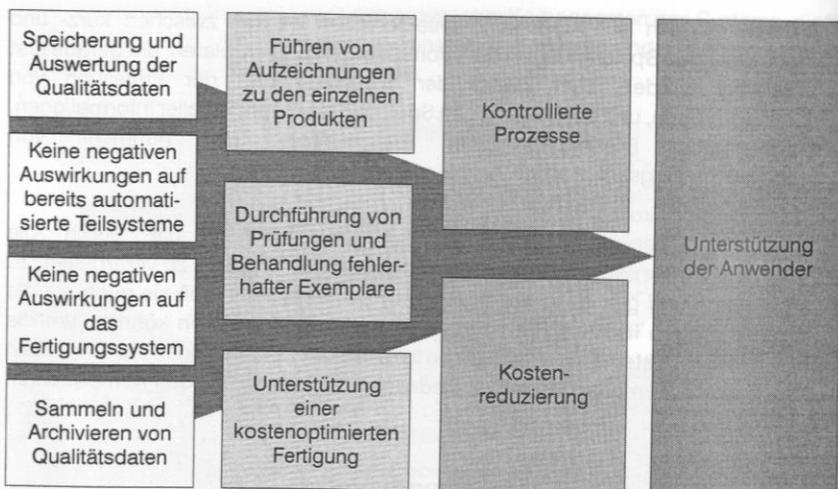


Bild 55: Überblick über den Anforderungskatalog - Ableitung der Basisforderungen, Erläuterungen siehe Kapitel 4.6.1

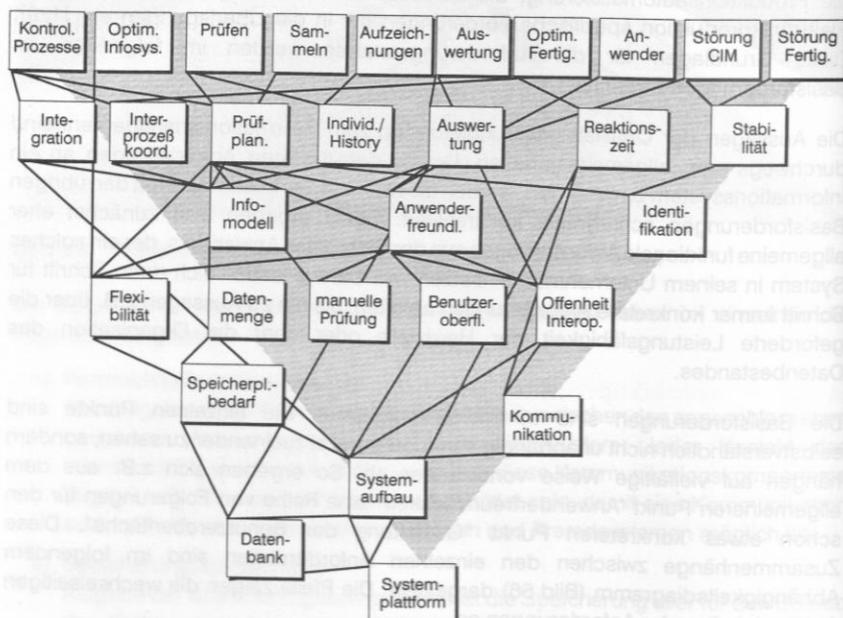


Bild 56: Abhängigkeitsdiagramm der Anforderungen von den Basisanforderungen

4.6.1 Basisanforderungen aus DIN ISO 9000ff

In diesem Abschnitt werden zunächst die Anforderungen, die sich aus der Untersuchung der DIN ISO 9000ff ergeben haben, zusammengefaßt. Sie dienen im folgenden als Ausgangsbasis für eine schrittweise Ableitung weiterer Anforderungen.

Kontrollierte Prozesse

Das Informationssystem muß in der Lage sein, im Fertigungssystem *kontrollierte Prozesse* aufrechtzuerhalten, d.h. die Parameter der einzelnen Prozesse müssen ständig auf ihre Korrektheit hin überwacht werden. Gerät ein solcher Parameter außer Kontrolle, so muß dies aufgezeichnet werden, und das System muß versuchen, Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Gelingt dies dem System allein nicht, so muß es ggf. die Fertigung stoppen und eine Warnmeldung an das Bedienpersonal ausgeben. Diese Kontrolle und Steuerung kann sowohl auf der Ebene der einzelnen Prozesse erfolgen, als auch prozeßübergreifend. Bei letzterem wird versucht, Interprozeßabhängigkeiten zu nutzen um Abweichungen in einem Prozeß durch Eingriffe in einen nachfolgenden auszuregeln.

Daraus ergeben sich Anforderungen sowohl an die Speicherung von Informationen, als auch an einen effizienten Transport von Informationen zwischen dem Informationssystem und dem Fertigungssystem. Je nach Art des Fertigungssystems kann es notwendig sein, auf bestimmte Veränderungen sehr schnell zu reagieren, um einen kontrollierten Prozeß aufrechtzuerhalten. Werden Interprozeßabhängigkeiten berücksichtigt, so ergeben sich je nach Art der Umsetzung z.T. ganz erhebliche zusätzliche Anforderungen an die Performance des Informationssystems. Das System muß weiterhin sehr eng mit einem bereits vorhandenen Fertigungsleitsystem zusammenarbeiten um entsprechend auf die Prozesse Einfluß nehmen zu können.

Führen von Aufzeichnungen zu den einzelnen Produkten

Zu jedem Produkt im Fertigungssystem müssen Aufzeichnungen u.a. zu folgenden Punkten geführt werden:

- a) Zuordnung zu Produkttyp, Variante, Auftrag, Los, usw.
- b) Prüfstatus eines Produktes, d.h. welche Prüfungen hat es wann durchlaufen und welche sind noch offen
- c) Prüfdaten eines Produktes, die beim Durchlaufen verschiedener Prüfstationen entstehen
- d) Fehlerstatus eines Produktes; d.h. ob fehlerfrei oder fehlerhaft, zur Nachbearbeitung, usw.

Durch diese Forderungen wird festgelegt, daß die einzelnen zu fertigenden Exemplare vom Informationssystem als Individuen betrachtet werden müssen. Das bedeutet, daß für jedes Exemplar, das durch das Fertigungssystem geschleust wird, ein Datensatz

geführt werden muß, in dem die relevanten Informationen eingetragen werden. Dieses Vorgehen ist der Hauptunterschied zum bisherigen Vorgehen, der sich aus den Anforderungen von DIN ISO 9000ff ergibt.

Die Datenstruktur kann in Form einer History aufgebaut sein, einer Art Lebenslauf oder Fertigungsprotokoll, in den die oben geforderten und noch eine Reihe weiterer Informationen, die beim Durchlauf des Exemplars durch das Fertigungssystem entstehen, eingetragen werden.

Gleichzeitig muß auf eine bestimmte Art und Weise ein Mechanismus zur Zuordnung von Lebenslauf und Produkt gegeben sein, was bedeutet, daß die einzelnen Produkte identifizierbar sein müssen.

Durchführung von Prüfungen und Behandlung fehlerhafter Exemplare

Das Informationssystem muß sicherstellen, daß alle Produkte zum passenden Zeitpunkt den richtigen Prüfungen unterzogen werden und es muß die Durchführung dieser Prüfungen unterstützen. Bei als fehlerhaft erkannten Produkten muß es dafür Sorge tragen, daß diese nicht zufällig doch ausgeliefert werden, sondern daß eine korrekte Weiterbehandlung erfolgt, also z.B. daß sie nachbearbeitet oder ausgeschieden werden.

Somit ergibt sich die Forderung nach einer entsprechenden Kennzeichnung und Überwachung fehlerhafter Produkte. Weiterhin spricht dies dafür, daß die Produkte vom Informationssystem individuell behandelt werden müssen, damit z.B. zu jedem ein Fehlerstatus geführt werden kann.

Basis für alle Prüfungen sind Prüfpläne. In ihnen ist genau beschrieben, welche Prüfungen an einem Exemplar eines bestimmten Produkttyps vorgenommen werden müssen. Das System muß dem Anwender Werkzeuge zur Verwaltung und Modifikation von Prüfplänen bieten und ihn bei der Anpassung der Prüfpläne an die aktuelle Qualitätssituation, z.B. eine Veränderung des Stichprobenumfanges, unterstützen. Schließlich sollte das Informationssystem auch in der Lage sein, bei Vorgabe geeigneter Strategien diese Anpassungen selbständig dynamisch vorzunehmen. Für die Durchführung von Prüfungen durch einen menschlichen Bearbeiter (manuelle Prüfungen) kann ebenfalls eine umfassende Unterstützung durch das Informationssystem erwartet werden.

Speicherung und Auswertung der Qualitätsdaten

Das Informationssystem muß Informationen, die qualitätsrelevant sind, speichern, auch wenn das zugehörige Produkt das Fertigungssystem bereits verlassen hat. Diese Informationen müssen später ausgewertet werden können. Die Auswertungen können für den Anwender selbst (z.B. Aussagen über die Ursachen bestimmter immer wieder auftretender Abweichungen), für einen Kunden (z.B. Prüfprotokoll für einen Auftrag

zum Nachweis der korrekten Fertigung und Prüfung) oder für ein anderes System (z. B. Rückkopplung mit Konstruktion oder PPS) bestimmt sein.

Zur Durchführung der Auswertungen muß das Informationssystem dem Anwender Hilfestellung geben. Der Zugriff auf die Informationen muß effizient und flexibel möglich sein, um die verschiedensten Auswertungswünsche schnell bedienen zu können.

Sammeln und Archivieren von Qualitätsdaten

Im Falle von später, also z. B. beim Kunden, festgestellten Produktmängeln, muß es möglich sein, die genauen Produktionsumstände nachzuvollziehen. Bei anstehenden Produkthaftungsansprüchen soll das Informationssystem Unterstützung leisten, um den Nachweis erbringen zu können, daß der Lieferant korrekt gehandelt hat. Dazu muß das Informationssystem die relevanten Informationen sammeln und in eine Form bringen, in der sie längerfristig archiviert werden können. Ein besonders effizienter Zugriff ist hier nicht notwendig, da diese archivierten Daten im allgemeinen relativ selten benötigt werden.

Aus den drei letzten Anforderungen ist zwar abzuleiten, welche Informationen gespeichert und verarbeitet werden müssen, und was das Informationssystem prinzipiell können muß. Genauere Aussagen darüber, wie die Verarbeitung zu erfolgen hat, und in welcher Form die Daten zu speichern sind, ergeben sich daraus aber noch nicht. Dafür sind weitere Annahmen notwendig, die nicht explizit in der DIN ISO 9000ff verzeichnet sind (siehe 4.6.2).

4.6.2 Weitere Basisforderungen

Aus dem industriellen Einsatz eines Informationssystems zur Qualitätssicherung in der Fertigung ergeben sich zusätzlich weitere Forderungen an ein solches System [181], die größtenteils auf betriebswirtschaftlichen Überlegungen basieren.

Wichtige Faktoren sind:

- *Keine negativen Auswirkungen auf das Fertigungssystem; also z.B. keine Einschränkung von dessen Kapazität oder Flexibilität durch den Einsatz eines Informationssystems.*
- *Keine negativen Auswirkungen auf bereits vorhandene Automatisierungsteilsysteme (CIM).*
- *Möglichst geringe Kosten für die Implementierung und Wartung des Informationssystems selbst, sowie einer möglichen Erweiterung.*
- *Möglichst umfassende Unterstützung aller Anwender des Systems.*
- *Unterstützung einer kostenoptimierten Fertigung (z.B. durch Reduzierung des Ausschusses oder die Verminderung von Prüfkosten).*

Vermeidung negativer Auswirkungen auf das Fertigungssystem

Durch den Einsatz eines Informationssystems zur Qualitätssicherung soll die Qualität der erzeugten Produkte gesteigert werden, bei möglichst gleichzeitiger Reduktion der Kosten. Es ist daher darauf zu achten, daß aufgrund des Einsatzes eines Informationssystems keine Probleme mit dem Fertigungssystem auftreten. Da es sich sowohl beim Fertigungs- als auch beim Informationssystem um ein relativ komplexes Gebilde handelt und die Interaktionen der beiden System nicht alle im voraus zu überblicken sind, ist während der Installationsphase und im Probebetrieb mit Problemen zu rechnen. Während des späteren Normalbetriebes sollte das Informationssystem aber stabil laufen und keine Probleme oder Stillstandszeiten am Fertigungssystem verursachen.

Ein typisches Problem ist die Einschränkung der theoretisch möglichen Kapazität (Idealkapazität, Verfügbarkeit) des Fertigungssystems, die von den mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Produkte und Anlagen bestimmt wird, durch zu langsame Reaktionen des Informationssystems. Die Kapazität, die das Fertigungssystem ohne Zusammenarbeit mit dem Informationssystem hätte, wird mit dem Informationssystem nicht erreicht, weil z.B. eine bestimmte Station unnötig lange auf Informationen warten muß und deshalb nicht sofort weiterarbeiten kann. Dies könnte möglicherweise an seiner schlechten Performance (Leistungsfähigkeit) liegen. Aus weitergehenden Überlegungen dazu ergeben sich entsprechende Anforderungen an das zeitliche Reaktionsvermögen des Informationssystems und an seine Performance.

Darüber hinaus kann man zusätzlich die Forderung erheben, daß das Informationssystem Unterstützung bei der optimalen Ausnutzung dieser Kapazität leisten sollte (PPS). Dies wird hier aber nicht näher untersucht. Es ist allenfalls wichtig, daß die Möglichkeit zur Zusammenarbeit mit einem ggf. bereits vorhanden PPS gegeben ist. Während aber ein PPS-System die Disposition der Maschinen nur nach Kapazitäts- und Leistungsgesichtspunkten vornimmt, könnte ein umfassendes Informationssystem zur Qualitätssicherung auch Gesichtspunkte wie Prozeßfähigkeit von Maschinen miteinbringen [67].

Ein weiteres typisches Problem sind Stillstandszeiten aufgrund von Ausfällen des Informationssystems, die sowohl in der Hardware als auch in der Software ihre Ursachen haben können. Der dadurch für den Anwender entstehende Schaden kann immens werden, weshalb diesem Gesichtspunkt mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden muß als bisher.

Daraus ergeben sich einerseits Forderungen an die Stabilität, also möglichst seltene Systemausfälle, und andererseits an eine durchdachte, fehlertolerante Systemarchitektur. So soll erreicht werden, daß auch bei Ausfall einzelner Teile des Systems zumindest noch ein "Notbetrieb" möglich ist.

Die Gesamtverfügbarkeit des Systems kann aber durch Integration von Diagnosesystemen in das Informationssystem auch gesteigert werden [202][42], wie Bild 57 auch zeigt:

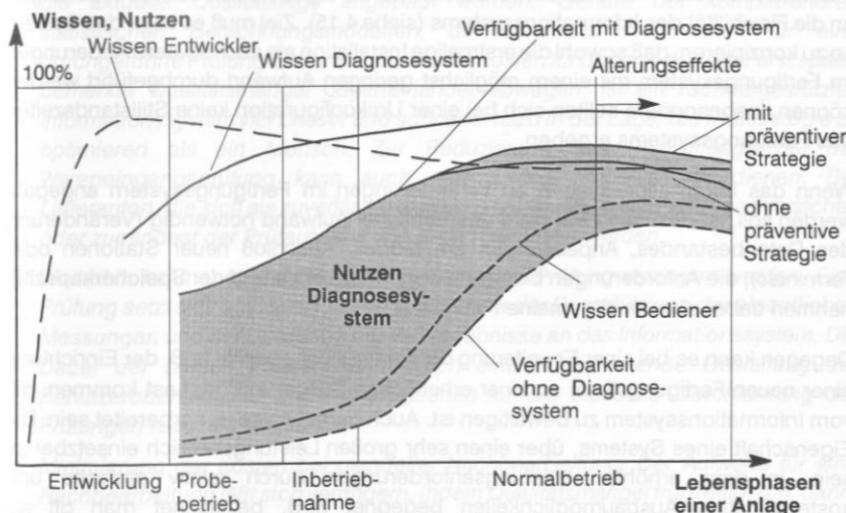


Bild 57: Nutzen und Wissensbildung eines Diagnosesystems in Abhängigkeit der Einsatzphasen einer Anlage [202]

Vermeidung negativer Auswirkungen auf vorhandene Automatisierung(s)systeme

In einem vorhanden Fertigungssystem ist es oftmals so, daß einige Teilbereiche unter dem Dach des CIM bereits automatisiert sind. Es kann sich dabei sowohl um Systeme handeln, die nicht direkt mit der Qualitätssicherung zu tun haben (z.B. PPS), als auch um solche, die nur Teilaufgaben eines umfassenden Informationssystems für die Qualitätssicherung ausführen. Das Informationssystem muß mit solchen Systemen problemlos zusammenarbeiten bzw. die letzteren ablösen können, ohne daß gravierende Probleme bei der Übernahme bereits vorhandener Daten auftreten. Typische Probleme hierbei sind verstümmelte oder inkonsistente Daten aufgrund fehlerhafter Konvertierung der Formate, Performance-Probleme wegen sehr langsamer Kommunikation zwischen den Systemen.

Minimierung der Kosten für die Installation, Wartung und Erweiterung des Informationssystems

Das Informationssystem muß so gestaltet sein, daß die Kosten für seine Installation und Wartung möglichst gering ausfallen. Ein hoher Kostenfaktor bei der Installation könnte möglicherweise in sehr aufwendigen Anpassungsmaßnahmen an die

spezifische Situation im Fertigungssystem bestehen. Bei der Wartung können Anpassungen an Veränderungen im Fertigungssystem in bestimmten Strategien und Produktionsvorgängen ein sehr aufwendiges Unterfangen sein, wenn das Informationssystem nicht darauf vorbereitet ist. Es ergeben sich somit Forderungen an die Flexibilität des Informationssystems (siehe 4.15). Ziel muß es sein, das System so zu konzipieren, daß sowohl die erstmalige Installation als auch spätere Änderungen im Fertigungssystem mit einem möglichst geringen Aufwand durchgeführt werden können. Insbesondere sollten sich bei einer Umkonfiguration keine Stillstandszeiten des Fertigungssystems ergeben.

Wenn das Informationssystem an Veränderungen im Fertigungssystem angepaßt werden soll, ist dazu ein zwar nicht unerheblicher Aufwand notwendig (Veränderung des Datenbestandes, Anpassungen am Modell, Anschluß neuer Stationen oder Terminals), die Anforderungen bezüglich der Performance und der Speicherkapazität nehmen dabei aber im allgemeinen nicht zu.

Dagegen kann es bei einer Erweiterung der Fertigungskapazität (z.B. der Einrichtung einer neuen Fertigungslinie) zu einer erheblichen Steigerung der Last kommen, die vom Informationssystem zu bewältigen ist. Auch darauf sollte es vorbereitet sein. Die Eigenschaft eines Systems, über einen sehr großen Leistungsbereich einsetzbar zu sein, in dem erhöhten Leistungsanforderungen durch relativ einfache und kostengünstige Ausbaumöglichkeiten begegnet wird, bezeichnet man oft als Skalierbarkeit. Diese Ausbaumöglichkeiten sollten sich auf Speicherkapazität, Rechenleistung und die Leistungsfähigkeit der Kommunikationskomponente beziehen.

Unterstützung verschiedener Typen von Anwendern

Das Informationssystem soll auf die Bedürfnisse der Anwender eingehen, und sie in ihrer Arbeit unterstützen und nicht behindern. Hierbei müssen die verschiedenen Anwendergruppen und deren spezifisches Vorwissen berücksichtigt werden. Die Oberfläche, die zur Kommunikation zwischen Anwender und System dient, muß so gestaltet werden, daß eine möglichst einfache und "intuitive" Bedienung gegeben ist.

Unterstützung einer kostenoptimierten Fertigung

Eine Senkung der Fertigungskosten kann z.B. erreicht werden, indem weniger Ausschuß produziert wird. Über den Ansatz der kontrollierten Führung einzelner Prozesse hinaus spielt hierbei die Ausnutzung von Interprozeßabhängigkeiten eine wichtige Rolle. Wie solche Interprozeßabhängigkeiten in einem Informationssystem abgebildet und zur Minimierung von Ausschuß eingesetzt werden können, wird weiter unten untersucht.

Minimierung des Prüfaufwandes: Prüfungen bedeuten immer zeitliche Verzögerungen und Kosten für Prüfmittel und ggf. Arbeitskräfte. Zur Vermeidung dieser Kosten kann ein Informationssystem folgendermaßen beitragen:

- *Durch Reduzierung des Umfangs der Prüfungen, wobei allerdings das Risiko eines möglicherweise unbemerkten Qualitätsverlustes in Grenzen gehalten werden muß. Optimal ist es daher, wenn die Prüfpläne durch das Informationssystem laufend an die aktuelle Qualitätslage angepaßt werden. Gerade bei komplizierteren statistischen Berechnungsmodellen, die einerseits die Kosten für eine durchgeführte Prüfung und andererseits die Kosten für unbemerkte oder erst später bemerkte Qualitätsmängel gegeneinander abwägen, ist ein rechnergestütztes Informationssystem viel besser und schneller dazu in der Lage, die Prüfstrategie zu optimieren als ein Mensch. Zur Reduzierung des Prüfumfags bei der Wareneingangsprüfung kann auch eine Lieferantenbewertung dienen. Bei Lieferanten, die sich als zuverlässig erwiesen haben, kann auf Prüfungen verzichtet oder zumindest der Prüfaufwand wesentlich reduziert werden.*
- *Weiterhin kann auch die Dauer einer manuellen Prüfung verringert werden. Eine Prüfung setzt sich aus zwei Phasen zusammen: der Durchführung der eigentlichen Messungen und der Übergabe der Prüfergebnisse an das Informationssystem. Die Dauer der beiden Phasen kann durch eine entsprechende Gestaltung der Benutzeroberfläche und der Prüfstationen für die manuelle Durchführung der Prüfungen reduziert werden.*
- *Minimierung der Kosten bei manueller Nachbearbeitung: Der Aufwand für eine Nachbearbeitung läßt sich verringern, indem Qualitätsmängel frühzeitig, d.h. dann, wenn sich eine Reparatur noch einfach gestaltet, erkannt werden.*

Die manuelle Nachbearbeitung selbst kann durch verschiedene Unterstützungsmaßnahmen für den Reparateur vereinfacht und beschleunigt werden:

- *Bereitstellung aussagekräftiger Fehlerhinweise und Anweisungen zu den im einzelnen durchzuführenden Reparaturschritten.*
- *Automatische Bereitstellung der für die Reparatur benötigten Materialien (z.B. Bauelemente).*
- *Hilfe bei der Orientierung auf dem zu reparierenden Exemplar durch eine graphische Darstellung oder durch optische Zeigeeinrichtungen am Reparaturplatz.*

4.7 Bewertungskriterien für Informationssysteme

4.7.1 Quantifizierbare Kriterien

Für die Bewertung vorhandener Systeme bzw. Systementwürfe sind quantifizierte Zielgrößen vorteilhaft. Ihre Ermittlung erfolgt zumeist auf Basis von Markov-Ketten, die das Fertigungssystem und seine Wechselwirkung mit dem Werkstück beschreiben.

Speicherplatzbedarf der Datenobjekte und Exemplare

Somit errechnet sich der Speicherplatzbedarf je Datenobjekt wie in Tabelle 7 aufgeführt. Für eine Baugruppe mittlerer Komplexität ergibt sich ein Mindestspeicherbedarf gemäß Tabelle 8, der sich aufgrund eines systemspezifischen Overheads auf das Doppelte erhöhen kann.

Datenobjekt zu Vorgang der Vorgangsgattung	Speicherbedarf in Byte	Datenobjekt zu Vorgang der Vorgangsgattung	Speicherbedarf in Byte
Eintritt in das Fertigungssystem einschl. Eingangsprüfung	4.147	Löten	102.143
Dispensen	142.207	Lötprüfung	166.103
Dispensprüfung	142.099	Nachbearbeitung Löten	758
Nachbearbeitung Dispensen	758	Endprüfung	5.199
Bestücken	38.107	Nachbearbeitung nach Endprüfung	758
Bestückprüfung	25.299	Regulärer Austritt aus dem Fertigungssystem	489
Nachbearbeitung Bestücken	758	Ausschuß aufgrund Fehler	489

Tabelle 7: Speicherplatzbedarf für Datenobjekte zu Vorgängen in Byte

Datenobjekt	Speicherplatzbedarf in Byte
Exemplar bei 100%-Prüfung	627.337
Exemplar bei Stichprobenprüfung	357.915
Exemplartyp	626.771

Tabelle 8: Speicherplatzbedarf von Exemplar und Exemplartyp

Speicherplatzbedarf und Gliederung der Speicherkomponente

Während der Speicherplatzbedarf für Informationen zu Vorgängen und Stationen relativ überschaubar ist, da deren Anzahl natürlichen Beschränkungen unterliegt, ist der Speicherplatzbedarf für Informationen zu Exemplartypen, insbesondere aber zu Exemplaren, sehr groß. Dies liegt daran, daß über einen längeren Zeitraum hinweg eine erhebliche Anzahl von Exemplaren durch ein Fertigungssystem laufen.

Es wird ein mittlerer Durchsatz von 2 Exemplaren/min angenommen. Dies entspricht etwas dem Durchsatz bei einem kleinen bis mittleren Lohnbestücker. Für das Datenaufkommen pro Tag wird von einer Einsatzzeit von 8h ausgegangen. Das sich entsprechend ergebende Datenaufkommen zeigt Tabelle 9.

Prüftyp	Datenvolumen	
	genau in Byte	gerundet in MByte
100%-Prüfung	602.243.520	602
Stichprobenprüfung	343.598.400	344

Tabelle 9: Datenvolumina pro Tag ohne Berücksichtigung eines spezifischen Overheads

Datenmengen dieser Größenordnung führten in der industriellen Praxis bereits zu teilweisen Systemausfällen aufgrund der letztlich begrenzten Speicherkapazitäten. Daher ist eine Gliederung der Daten nach benötigter Zugriffszeit nötig. Die so definierten Datenpartitionen und deren jeweilige Eigenschaften sind für den angenommenen Lohnbestücker in Tabelle 10 zusammengefaßt.

Analog kann auch die Speicherkomponente nach unterschiedlichen Zugriffszeiten in verschiedene Teilkomponenten aufgeteilt werden, wobei sich diese aus den Eigenschaften der verfügbaren Hardware ergeben, die zur Realisierung der jeweiligen Speicherteilkomponente eingesetzt wird.

I.a. gilt die Aussage, daß die Kosten pro Speichereinheit mit größer werdender Zugriffszeit abnehmen. Die Teilkomponenten mit den größeren Zugriffszeiten und niedrigeren Kosten können daher weit größer ausgelegt werden als die Teilkomponenten mit einer sehr kleinen Zugriffszeit und aber hohen Kosten pro Speichereinheit. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht über die denkbare hardwaremäßige Ausprägung der einzelnen Speicherteilkomponenten.

	Funktionen	Betroffene Datenobjekte	Größenordnung der geforderten Zugriffszeiten	Zu berücksichtigender Zeitraum	Größe der Partition in MB
1	Datenaustausch mit den Stationen über z.Zt. bearbeitete Exemplare	Gerade bearbeitete Exemplare und Exemplartypen, Stationen, Transportsystem	μ s	Stunden (hier 1 Stunde)	75 / 43
2	Datenaustausch mit den Stationen über z.Zt. zwischengelagerte Exemplare	Daten zu zwischengelagerten Exemplaren des Loses, Auftrags, usw.	ms	einige Tage (hier 2 Tage)	1.200 / 687
3	Auswertungen über die aktuelle Situation, z.B. für Prüfplanung, Anwender	Daten zu den letzten Losen, Aufträgen, Stationen (ggf. verdichtet)	ms	einige Tage (hier 2 Tage)	1.200 / 687
4	Langfristige Qualitätsauswertung, Lieferantenbewertung, usw.	verdichtete Daten über bearbeitete Exemplare, aufgetretene Fehler, usw.	s	Monate (hier 3 Monate)	5.959 / 3.402
5	Reklamationen, allgemein Rückverfolgung in Einzelfällen	Daten über alle bisher bearbeiteten Exemplare	min	mehrere Jahre (hier 3 Jahre)	476.720 / 272.194

Tabelle 10: Gliederung der Datenpartitionen nach Zugriffszeit

	Speicherteilkomponente	Größenordnung der möglichen Zugriffszeit	Größenordnung der möglichen Speicherkapazität
I	Hauptspeicher (RAM)	μs	16-100 MB
II	Festplatte	ms	100-10000 MB
III	MO-Jukebox oder ähnliches mit direktem Zugriff	s	1000-100000 MB
IV	Archiv (Streamer, usw., mit indirektem Zugriff, d.h. Einlegen des entsprechenden Mediums durch einen Menschen notwendig)	min	praktisch unbegrenzt

Tabelle 11: Speicherteilkomponenten und typische Eigenschaften

Datenpartition	Speicherteilkomponente
1	I
2	II
3	II
4	III
5	IV

Tabelle 12: Zuordnung von Datenpartitionen (Tabelle 10) und Speicherteilkomponenten (Tabelle 11)

Die Aufteilung des vorhandenen Datenbestandes in die fünf Partitionen gemäß Tabelle 12 ist nicht statisch. So gehört ein Datenobjekt zu einem Exemplar nach Beendigung der Produktion des Loses nicht mehr zu Partition 1, sondern zu Partition 3. Dementsprechend muß es vom Informationssystem von Speicherteilkomponente I nach II transportiert werden. Diese Zuordnung von Datenobjekten zu den Speicherteilkomponenten sowie deren dynamische Veränderung muß von einer Funktion des Informationssystems unterstützt werden.

Reaktionszeitverhalten

Unter Reaktionszeit wird dabei der Zeitraum verstanden, der zwischen dem Anstoßen einer Anfrage durch den Absender, z.B. durch eine Station, und der vollständigen Rückübertragung der Antwort auf diese Anfrage an den Absender vergeht. Unter Anfrage soll dabei eine Aktivität des Informationssystems verstanden werden, die dazu dient, Informationen entgegenzunehmen oder auszugeben.

Eine solche Anfrage gliedert sich i.a. in drei Phasen:

1. Entgegennahme der Anfrage und Transport vom Absender zur Verarbeitungskomponente des Informationssystems
2. Verarbeitung der entgegengenommenen Informationen und Ermittlung der vom Absender gewünschten Informationen
3. Rücktransport dieser Informationen zum Absender der Anfrage.

Beim Absender ist zwischen Anfragen durch ein Fremdsystem bzw. einen Anwender, der z.B. eine Datenauswertung wünscht, und einer Anfrage durch das Fertigungssystem, wenn z.B. einer Station die zur Durchführung eines Vorgangs benötigten Daten übergeben werden müssen, zu unterscheiden.

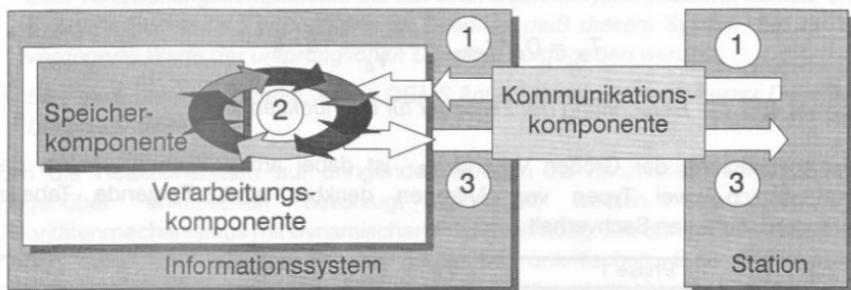


Bild 58: Drei Phasen einer Anfrage: Entgegennahme, Verarbeitung, Rückantwort

Die Gewährleistung entsprechender Reaktionszeiten für die verschiedenen Typen von Anfragen wird dadurch erschwert, daß die Bearbeitung einer Anfrage sich in drei Phasen gliedert, d.h. die zeitlichen Anforderungen müssen über diese Phasen hinweg gewährleistet werden. Daher muß in diese Überlegungen sowohl die Kommunikationskomponente als auch die Verarbeitungskomponente miteinbezogen werden, denn beide sind an der Bearbeitung der Anfrage beteiligt.

Die beteiligte Kommunikationskomponente besteht aus einer Kommunikationsstrecke eines Netzwerks zwischen den beiden Partnern, sowie der Softwareprozesse, die auf den Partner und möglichen Zwischenknoten arbeiten.

Auf den unteren Ebenen des OSI-Referenzmodells sind einige Netzwerkprotokolle in der Lage, eine maximale Übertragungszeit (t_{\max}) für ein Datenpaket zu gewährleisten.

Das hier beschriebene Informationssystem muß jedoch auf einer höheren Ebene von OSI aufsetzen. Dies muß mindestens Ebene IV sein, da dort zum ersten Mal eine direkte Partner-zu-Partner Verbindung sichtbar ist. Ausgehend von der Menge der für die Phase 1 oder 3 einer Anfrage zu übertragenden Daten (V_1, V_3) und der Größe der Pakete V_p , läßt sich ermitteln, auf wie viele Datenpakete (D_p) der unteren OSI Ebene diese Daten verteilt werden müssen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß durch die Weiterleitung über die unteren Ebenen zusätzliche Verwaltungsdaten anfallen, die ebenfalls in den Paketen transportiert werden müssen. Man kann davon ausgehen, daß dadurch die zu übertragende Datenmenge um einen konstanten Faktor (F_v) vergrößert wird.

Mit den folgenden beiden Formeln läßt sich die maximale zeitliche Dauer T_1 bzw. T_3 für die Dauer der Phasen 1 und 3 ermitteln:

$$T_1 = D_p * t_{max} = \frac{V_1 * F_v}{V_p} * d * k$$

Formel 3: Berechnung der Zeitdauer für die Anfrage

$$T_3 = D_p * t_{max} = \frac{V_3 * F_v}{V_p} * d * k$$

Formel 4: Berechnung der Zeitdauer für die Rücksendung

Die Abschätzung der Größen V_1 und V_3 ist dabei am problematischsten, da grundsätzlich zwei Typen von Anfragen denkbar sind. Folgende Tabelle veranschaulicht den Sachverhalt:

Typ	Phase 1	V_1	Phase 3	V_3
Eingabe	hohe Datenmenge, z.B. Vorgangsprotokoll nach Beendigung der Bearbeitung eines Exemplars	$ V_{Pmax} = 166 \text{ kB}$	geringe Datenmenge, z.B. Anforderung der Informationen zur Durchführung eines Vorganges	1kB
Ausgabe	sehr geringe Datenmenge, z.B. Empfangs- quittung	1kB	hohe Datenmenge, z.B. angefordertes Vorgangsprogramm	$ V_{PGmax} = 166 \text{ kB}$

Tabelle 13: Datenvolumina bei Kommunikationen

Um die Einhaltung der zeitlichen Anforderungen auch unter ungünstigen Bedingungen sicherzustellen, mußte für diese Abschätzung jeweils vom schlechtesten Fall, also dem größten Wert, ausgegangen werden.

Die Verarbeitungskomponente basiert auf dem Datenbankverwaltungssystem (DBMS) und dem Betriebssystem des Rechners, auf dem das DBMS läuft.

In der Betriebssystemforschung wurden Strategien entwickelt, die gewährleisten können, daß die Zuteilung der Rechenleistung an die einzelnen Prozesse, die hier den Anfragen entsprechen würden, so erfolgt, daß eine etwaige Deadline weitgehend eingehalten wird (Deadline-Scheduling). Eine Garantie ist jedoch nicht möglich, da die Anzahl der Anfragen mit der gleichen Deadline theoretisch unbegrenzt ist, die bis dahin verfügbare Rechenleistung aber nicht. Weiterhin ist bei einer Anfrage, die zum Beispiel eine aufwendige Datenbankabfrage nötig macht, nicht im voraus abzusehen, wieviel Rechenleistung dafür benötigt wird.

Beim DBMS selbst besteht das Problem darin, daß die Datenobjekte, die zur Beantwortung einer Anfrage benötigt werden, gesperrt sein können. Da aus Gründen der Konsistenz Sperren nicht einfach ignoriert werden können, ist die Garantie einer bestimmten Bearbeitungszeit prinzipiell nicht möglich. Es kann jedoch durch einen Prioritätenmechanismus auf den Sperren erreicht werden, daß kritische Anfragen beschleunigt behandelt werden.

Ein Mechanismus zur Unterstützung kritischer Anfragen benötigt also:

- *Ein Kommunikationssystem mit einer fairen Zugriffsstrategie, das im Normalfall Obergrenzen für die Übertragung garantieren kann.*
- *Eine Verarbeitungskomponente die auf einer Betriebssystemplattform abläuft, die Deadline-Scheduling ermöglicht. Als Deadline muß diesem System der um V_3 verringerte Werte der ursprünglichen Deadline vorgegeben werden.*
- *Eine Speicherkomponente, deren DBMS Anfragen mit nur noch kurzer Deadline bevorzugt behandelt.*

Um die Reaktionszeiten auf dringende Anfragen zu minimieren, sollten diese gegenüber unkritischen bevorzugt behandelt werden. Dazu ist ein Prioritätenmechanismus mit dynamischen Prioritäten nötig. Die dringenden Anfragen haben dabei grundsätzlich Priorität gegenüber unkritischen. Eine dynamische Veränderung der Prioritäten ist notwendig, da auch die unkritischen Anfragen mit der Zeit kritisch werden, d.h. die Priorität einer Anfrage sollte direkt von der noch verfügbaren Zeitspanne abhängen. Vom Kommunikationssystem wird ein solcher expliziter Prioritätsmechanismus im allgemeinen nicht unterstützt.

Bezüglich der Verarbeitungskomponente muß sowohl das Betriebssystem also auch das DBMS betrachtet werden.

- *Das Betriebssystem regelt die Konkurrenz der zu den Anfragen gehörenden Prozesse um die Rechenleistung. Hier wird oft sogar ein dynamischer Prioritätenmechanismus angeboten, sodaß zumindest in Phase 2 einer dringenden Anfrage eine Berücksichtigung der Dringlichkeit möglich ist.*
- *Beim Zugriff auf den Datenbestand kommt es dann zu Problemen, wenn mehrere Anfragen auf die gleichen Objekte zugreifen möchten, und zumindest eine etwas verändern will. Es können dann die aus der Datenbankforschung bekannten Änderungsanomalien auftreten. Heutige DBMS vermeiden solche Konflikte meist durch den Einsatz von Sperren. Es wäre aus Sicht des Informationssystems wünschenswert, wenn dieser Sperrmechanismus unterschiedliche Typen von Anfragen berücksichtigen würde, sodaß wichtige Anfragen nicht durch Sperren unwichtiger gebremst würden.*

Wenn man davon ausgeht, daß unter normalen Lastbedingungen die Übertragungszeit vergleichsweise gering und einheitlich ist, reicht der Prioritätenmechanismus des Betriebssystems und möglicherweise noch des DBMS aus, um die Reaktionszeiten auf dringende Anfragen zu minimieren.

Kommunikation zwischen Informationssystem und Fertigungssystem

Der Informationsaustausch findet durch Kommunikation zwischen den beiden Systemen statt. Nach den dabei übertragenen Datenobjekten und den Ereignissen,

die die Kommunikation auslösen, kann zwischen den in Tabelle 14 aufgelisteten Kommunikationssituationen unterschieden werden.

	Ereignis	Beteiligte Komponenten	Übertragene Daten	Tätigkeiten des Empfängers
I.	Die Bearbeitung eines Exemplars durch eine Station wurde abgeschlossen.	Station Informationssystem	Identifikation des Exemplars, Prozeßgrößen der Station, "Vorgangprotokoll"	Eintragungen in die History, Ermitteln des nächsten Vorgangs und der passenden Station
II.	Nächste Station für einen Vorgang an einem Exemplar wurde ermittelt	Informationssystem Transportsystem	Start- und Zielstation	Durchführung des Transports
III.	Ein Exemplar steht an einer Station zur Durchführung eines Vorgangs an.	Station Informationssystem	Identifikation des Exemplars, relevante Parameter der Station	Berechnung der für die Bearbeitung notwendigen Daten
IV.	Das Informationssystem hat Daten zur Bearbeitung einer Station ermittelt.	Informationssystem Station	"Vorgangsprogramm" und ggf. History	ggf. Aufbereitung der Daten und Durchführung des spezifizierten Vorgangs
V.	Das Informationssystem hat ein Vorgangprotokoll verarbeitet	Informationssystem Informationssystem	Datenobjekt zum Exemplar	Erzeugen des Vorgangprotokolls für den nächsten Vorgang
VI.	Anderung des Zustands einer Station (z.B. Auftreten einer Störung)	Station Informationssystem	Geänderte Stationsparameter	Eintragung in das Datenobjekt zur Station, ggf. Änderung des Fertigungsprogramms
VII.	Übergang des Informationssystems in einen Fehlerzustand	Informationssystem Station	Unterrichtung über Fehlerzustand	Einstellung auf verändertes Verhalten des Informationssystems (z.B. autonomer Weiterbetrieb)
VIII.	Rückkehr des Informationssystems in den Normalbetrieb	Informationssystem Station	Unterrichtung über Normalbetrieb	Rückstellung auf Normalbetrieb

Tabelle 14: Kommunikationssituationen zwischen Informations- und Fertigungssystem

Während die Kommunikationssituationen I bis V im Normalbetrieb auftreten, sind die Situationen VI bis VIII für ein sinnvolles Verhalten im Fehlerfall notwendig. Die Situation V gehört eigentlich nicht hierher, da es sich lediglich um eine Kommunikation zwischen zwei Hardwarekomponenten des Informationssystems handelt. Sie wurde aber aufgenommen, da sie für die folgenden Überlegungen eine wichtige Rolle spielt.

Performance-Anforderungen an das Informationssystem

Für jede in Tabelle 14 betrachtete Kommunikationssituation kann das Transportvolumen, ausgehend von den dabei zu übertragenden Datenobjekten und deren Größe, abgeschätzt werden. Da die Größe und Anzahl der jeweils zu übertragenden Datenobjekte aber sehr stark von der tatsächlichen Implementierung des Systems abhängt, wird in Tabelle 15 nur jeweils eine Größenordnung angegeben.

Kommunikationssituation	Zu übertragendes Datenvolumen in Byte
I.	100.000
II.	1.000
III.	1.000
IV.	100.000
V.	1.000.000
VI.	100
VII.	100
VIII.	100

Tabelle 15: Kommunikationssituationen und Datenvolumina

Im folgenden sollen nun die Situationen I bis V näher untersucht werden. Es geht dabei um den Transport eines Exemplars von einer Station zur nächsten. Bei einer Werkstattfertigung sind alle damit zusammenhängenden Kommunikationen unkritisch, da die Exemplare nach Durchlaufen einer Station z.B. losweise gesammelt und gemeinsam zur nächsten Werkstatt oder in ein Zwischenlager befördert werden. Bei einer kontinuierlichen Fertigung werden dagegen die Exemplare von einem Fördersystem direkt von einer Station zur nächsten transportiert. Parallel zum physischen Transport eines Exemplars muß das zugehörige Datenobjekt weitergereicht werden.

Während die Dauer des Baugruppentransports im Fertigungssystem durch Taktzeiten und Puffer definiert und berechenbar ist, läßt sich die maximale zeitliche Dauer der Transportphasen im Informationssystem erheblich schlechter voraussagen. Je nach Aufbau des Systems können eine erhebliche Anzahl von Zugriffen auf eine Datenbank notwendig sein. Bei einer im ungünstigen Fall zu diesem Zeitpunkt sehr hohen Systemlast kann dies ebenfalls zu Wartezeiten im Sekundenbereich führen. Diese Problematik tritt insbesondere bei einer Datenhaltung auf einem zentralen Datenbank-Server auf. Die Dauer der Phase "Transport Datenobjekt" kann, sofern eine direkte Kommunikationsstrecke zwischen den beiden Stationen vorhanden ist, relativ gut abgeschätzt werden, und liegt für ein Datenobjekt von der Größenordnung 1 MB etwa im Bereich einiger Zehntelsekunden.

Deutlich bessere Antwortzeiten des Informationssystems erhält man in der Regel durch einen dezentralen Aufbau, bei dem lokale Rechner für die Versorgung jeweils einer Station zuständig sind. Dadurch werden Kommunikationen mit einem zentralen

Server weitgehend vermieden und die lokalen Rechner können nahezu 100% ihrer Leistung für die Versorgung der zugehörigen Station einsetzen.

4.7.2 Qualitative Kriterien

Einige der abgeleiteten Anforderungen sind nicht quantifizierbar, weil es keine entsprechende Metrik gibt. So fällt eine direkte Zuordnung eines Punktwertes schwer. Daher werden in diesen Fällen qualitative Kriterien angegeben, anhand derer die Bewertung erfolgen kann. So läßt sich beispielsweise das implementierte Datenbankschema nicht quantitativ bewerten. Es sind daher qualitative Hinweise zu geben, mit denen entschieden werden kann, wie gut ein Datenbankschema die Anforderungen erfüllt.

Integration von Fertigungssteuerung und Qualitätssicherung

- *Das Informationssystem sollte neben den Prüfdaten auch Informationen über die Prozesse selbst erfassen und verarbeiten können.*
- *Ein kurzer Regelkreis zwischen der Prüfung der Exemplare und den vorhergehenden Prozessen muß unterstützt werden.*
- *Letztendlich sollte sowohl die Prüfung als auch die kurzfristige Fertigungssteuerung integriert durch das Informationssystem erfolgen.*

Individuelle Behandlung der zu fertigenden Exemplare und Aufbau der History

- *Das Informationssystem muß in der Lage sein, die Exemplare, die das Fertigungssystem durchlaufen, nicht nur losweise zu betrachten, sondern es muß jedes individuelle Exemplar beim Durchlauf verfolgen und die zugehörigen Informationen speichern können.*
- *Zu jedem einzelnen Exemplar muß eine sogenannte "History" geführt werden, in der alle relevanten Informationen über das Exemplar und die von ihm durchlaufenen Vorgänge festgehalten werden. Sie dient zur Übertragung von Informationen über ein Exemplar zwischen den verschiedenen Prozessen.*
- *Die History muß als Bestandteil des Datenbankschemas implementiert werden.*

Speicherplatzbedarf und Gliederung der Speicherkomponente

- *Hierarchische Gliederung der Speicherkomponente.*
- *Sinnvolle Verteilung des Datenbestands auf die verschiedenen Speicherteilkomponenten je nach benötigter Zugriffszeit. Die dynamische Veränderung dieser Verteilung, also z.B. die Archivierung, muß vom System weitgehend automatisch durchgeführt werden.*
- *Unterstützung des Zugriffs auf das Archiv durch Verwaltung der Archivierungsmedien als Funktion des Systems.*

Prüfungen und Prüfplanung

- Das System muß komfortable Werkzeuge zur Eingabe und Veränderung von Prüfplänen und Prüfstrategien anbieten.
- Das System muß verschiedene Prüfstrategien unterstützen.
- Eine Dynamisierung des Stichprobenumfangs sollte in verschiedenen Varianten möglich sein.

Anwenderfreundlichkeit

- Konzept zur Berücksichtigung der Anforderungen unterschiedlicher Anwenderklassen.
- Kontextsensitives Hilfesysteme bezüglich des Informationssystems und des Fertigungssystems.
- Verwendung verbreiteter Datenformate für die Ergebnisse von Auswertungen, damit sie mit anderen Programmen weiterbearbeitet werden können.
- Veröffentlichung des Datenbankschemas und Verfügbarkeit einer bekannten Datenbankabfragesprachen (z.B. SQL) zur Erstellung spezifischer Auswertungen.
- Graphische Benutzeroberfläche für die Darstellung der Exemplartypen bei Prüfung/Nachbearbeitung.
- Offenheit des Systems zum Import und Export von Daten.
- Verfügbarkeit spezifischer Werkzeuge (Editoren) zur einfachen und schnellen Eingabe/ Veränderung (Pflege) von Daten.

Auswertungen des Datenbestands

- Der Anwender muß mit Hilfe einer universellen standardisierten Abfragesprache auf den Datenbestand zugreifen können. Es sollten Werkzeuge (im System integrierte oder fremde) verfügbar sein, die den Anwender bei Erstellung einer Abfrage in dieser Abfragesprache unterstützen (QBE, Zusammenklicken).
- Unterstützung verschiedener Typen von Anfragen (freie, parametrierbare und Standardabfragen)
- Die Ergebnisse einer Abfrage sollen als Datei in einem Format ausgegeben werden können, das der Anwender mit anderen Werkzeugen kann (Textverarbeitung, Tabellenkalkulation) weiterverarbeiten.
- Das System soll den Anwender bei Erstellung der Musterprüfberichte und der eigentlichen Generierung der Prüfberichte zum Warenausgang flexibel unterstützen.
- Unterstützung von Formaten und Protokollen zum Datenaustausch mit anderen Systemen (z.B. OLE).
- Unterstützung bestimmter Dateiformate zur Weitergabe der Ergebnisse von Auswertungen an Fremdsysteme.

Unterstützung bei manueller Prüfung/Nachbearbeitung

- Graphische Darstellung der zu prüfenden/nachzubearbeitenden Exemplare und Ort der betroffenen Merkmale.
- Zeigergeräte zur Markierung von Teilen auf den graphisch dargestellten Exemplaren.
- Ablaufsteuerung der Prüfung/Nachbearbeitung durch das Informationssystem; möglichst lokal auf einem ggf. am Arbeitsplatz vorhandenen Rechner.
- Lokaler Plausibilitätstest der Eingaben des menschlichen Bearbeiters.
- Anschluß eines elektrischen Meßmittels an den Prüferarbeitsplatz über ein Meßmittel-Interface.
- Hardware- und softwaremäßige Unterstützung von Geräten zur automatischen Zuführung von Materialien, die bei der Nachbearbeitung benötigt werden (z.B. Bauteilepaternoster).
- Unterstützung optischer Zeigergeräte am Arbeitsplatz (Laser).

Zusammenarbeit mit Fremdsystemen und Offenheit des Systems

- Konzepte zur Beherrschung eines heterogenen Systemaufbaus bezüglich
 - Stationen
 - Kommunikationshard- und Software
 - lokaler Arbeitsplätze: Rechner- und Betriebssystemplattform
 - der zentralen Server.
- Import/Export von Daten in Formaten anderer CIM-Systeme und Bürowerkzeuge.
- Veröffentlichung des Datenbankschemas.
- Standard-DBMS mit verbreiteter Abfragesprache.
- Datenbestand als Datenbank in bekanntem Format.
- Unterstützung von Protokollen zum direkten Datenaustausch zwischen Anwendungen lokal und entfernt.
- Offenlegung der Programmierschnittstelle (API) und Mechanismus zum Aufruf anderer API lokal und entfernt (RPC).

Interprozeßabhängigkeiten

- Durchschleusen der Werte oder Berechnung durch das System selbst.
- Abbildung der Interprozeßabhängigkeiten im System muß möglich sein. Ein Werkzeug zur Eingabe und Pflege diese Abhängigkeiten sollte den Anwender unterstützen.
- Implementiertes Datenmodell zu Exemplartyp/Exemplar muß auf entsprechende Zugriffe im Rahmen der Regelung der Interprozeßabhängigkeiten abgestimmt sein.

- *Ausreichende Leistungsfähigkeit der Hardware zur Berechnung der Werte der abhängigen Größen in Realzeit.*

Flexibilität

- *Veränderungen an der Umgebung, d.h. im Fertigungssystem, an Fremdsystemen, an den Informationsbedürfnissen der Anwender und an der Hardwareplattform, müssen im Informationssystem durch Anpassung des Datenbestands mit wenig Aufwand, komfortabel und möglichst während des Betriebs nachführbar sein.*
- *Ein relationales oder objektorientiertes Datenbankschema begünstigt im Gegensatz z.B. zu einem hierarchischen die flexible Anpassung des Datenbestands an eine veränderte Umgebung.*
- *Durchdachtes Datenbankschema, das die Abbildung und Veränderung der i.a. relativ komplex strukturierten Datenobjekte zu den Stationen erleichtert.*
- *DBMS sollte Konzepte zur Vermeidung von Inkonsistenzen und Änderungsanomalien (Sperrungen) anbieten. Auch bei großen Datenbeständen sollte es noch ausreichend leistungsfähig sein.*
- *Der Administrator sollte über Werkzeuge verfügen, um den Anwendern entsprechend ihren Informationsbedürfnissen weitgehend beliebige parametrierbare und Standardauswertungen anbieten zu können, die diese dann nur noch ausfüllen und anstoßen müssen.*
- *Das Betriebssystem und die Verteilungsplattform sollten in unterschiedlichen Leistungsbereichen einsetzbar sein. Aufrüstungen der Speicherkapazität und der Verarbeitungsleistung des Informationssystems sollten einfach durchführbar sein (Skalierbarkeit).*
- *Die Software des Systems sollte sinnvoll auf mehrere Module verteilt sein, so daß eine Konfiguration nach der erforderlichen Funktionalität möglich ist.*

Stabilität und Fehlertoleranz

- *Das System muß möglichst stabil sein. Dazu ist es notwendig, die Software nach einer methodischen Vorgehensweise zu entwickeln. Eine objektorientierte Vorgehensweise ist in diesem Fall empfehlenswert.*
- *Das System sollte robust gegenüber außergewöhnlichen Ereignissen und Störungen in seiner Umgebung (Anwender, Fertigungssystem, Überlastung) sein. Es muß also auf entsprechende Vorkommnisse vorbereitet sein und sie abfangen können, ohne daß es dadurch instabil wird (Gutmütigkeit).*
- *Die Hardwarebasis (Rechner/Kommunikationssystem) sollte eine gewisse Redundanz aufweisen, so daß bei Ausfall oder Absturz einer Komponente immer noch ein eingeschränkter Betrieb möglich ist. Ein Aufbau nach dem Client/Server-Modell bietet durch die Verteilung der Funktionalität zusätzliche Unterstützung.*

- Das DBMS muß dafür sorgen, daß bei Störungen keine Inkonsistenzen im Datenbestand auftreten. Ein besonderer Mechanismus des Informationssystems muß sicherstellen, daß nach einer Störung die Realität und der sie abbildende Datenbestand im System wieder in Übereinstimmung gebracht werden.

Benutzeroberfläche

- Graphische Benutzeroberfläche auf den Arbeitsplätzen, mit denen die Anwender zu tun haben, nicht unbedingt auf den zentralen Komponenten (Server).
- Kontextsensitives Hilfesystem zum Informationssystem; es sollte erweiterbar sein, sodaß auch Hilfsinformationen zum Fertigungssystem aufgenommen werden können.
- Makroprogrammierung des Systems zur Beschleunigung der Ausführung gleicher Befehlssequenzen.
- Einsatz einer bekannten kommerziellen Benutzeroberfläche. Einheitliche Bedienungsphilosophie bei allen Funktionen des Informationssystems.

Identifizierbarkeit von Exemplaren

- Exemplare müssen als Individuen behandelt werden und vom Informationssystem identifiziert werden können (z.B. über Seriennummern). Entsprechende Mechanismen müssen ebenso vorgesehen werden wie die Speicherung eines Identifikationsmerkmals im Datenbankschema.
- Für Stationen, die keine Identifizierung der bearbeiteten Exemplare erlauben, muß das System die Möglichkeit der Verfolgung von Exemplaren bieten.

Systemaufbau

- Bei der Entwicklung des Systems sollte in allen Phasen objektorientiert vorgegangen, d.h. eine entsprechende Methodik eingesetzt werden.
- Das System sollte mit einer objektorientierten Programmiersprache implementiert werden.
- Die Verwaltung des Datenbestands erfolgt am zweckmäßigsten mit einem OODBMS.
- Eine Verteilung der logischen Komponenten des Systems auf lokale Clients und einen oder mehrere zentrale Server ist anzustreben.
- Bestimmte Teile des Systems, so z.B. die Kommunikation mit den Stationen, aber ggf. auch das Gesamtsystem, sollten in einer geschichteten Architektur entwickelt werden.
- Aufteilung der verschiedenen Funktionsgruppen auf einzelne Module.

DBMS und Datenbankschema

- *Es sollte ein OODBMS eingesetzt werden, zumindest aber ein bekanntes relationales DBMS.*
- *SQL-Schnittstelle.*
- *Ansteuerung des DBMS durch das Informationssystem mit ODBC.*
- *Das DBMS muß dafür sorgen, daß bei Störungen keine Inkonsistenzen im Datenbestand auftreten.*
- *Mitverwaltung von Archiv-Speichermedien durch das DBMS.*

Systemplattform

Betriebssystem und Rechner-Hardware:

- *Ausgereiftes Konzept mit preemptivem Multitasking.*
- *Stabilität auch in ungünstigen Situationen (Robustheit, graceful degradation).*
- *Verfügbarkeit graphischer Benutzeroberflächen.*
- *Mechanismen zur Unterstützung besonderer Reaktionszeitanforderungen (Deadline Scheduling, dynamische Prioritätenvergabe).*
- *Mechanismen zur Zusammenarbeit von Anwendungen (RPC, Pipes, usw.).*
- *Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Leistungsbereichen; also z.B. auch Verwaltung sehr großer Speicherkomponenten.*
- *Anpassung der Hardware an unterschiedliche Leistungsanforderungen.*

Kommunikationssystem:

- *Fairneß bei der Datenübertragung, sodaß für bestimmte Umstände eine maximale Übertragungszeit gewährleistet werden kann.*
- *Skalierbarkeit der Übertragungskapazität, z.B. durch Austausch einer Kommunikationsstrecke durch eine leistungsfähigere.*
- *Verfügbarkeit einer passenden Verteilungsplattform zum Kommunikationssystem*
- *Das Kommunikationssystem sollte auch in kurzfristigen Überlastsituation nicht instabil werden und noch eine minimale Leistung aufweisen.*
- *Die verschiedensten Rechner-/Betriebssystemplattformen sollten auf das Kommunikationssystem zugreifen können.*
- *Unterschiedliche Durchführung dreier Typen von Anfragen, die vom Absender der Anfrage spezifiziert werden können:*
 - *kritisch: Deadline wird garantiert*
 - *dringend: so schnell wie möglich*

- *unkritisch: erst nach Ablauf einer bestimmten Zeitspanne ist die Antwort dringend.*
- *Das Kommunikationssystem sollte über faire Übertragungsmechanismen verfügen, damit Obergrenzen für die Übertragungszeit festgelegt werden können.*
- *Das Betriebssystem sollte die Einhaltung von Deadlines und einen dynamischen Prioritätenmechanismus unterstützen.*
- *Das DBMS sollte einen Prioritätenmechanismus in der Sperrverwaltung vorsehen, um wichtigere Anfragen bei Zugriffskonflikten bevorzugen zu können.*

4.8 Bewertung marktverfügbarer Informationssysteme

Auf Basis des Anforderungskatalogs aus Abschnitt 4.7 wurden branchenspezifische Informationssysteme untersucht und vergleichend bewertet. Diese Werte wurden mit der Bedeutung des jeweiligen Kriteriums gewichtet. Die prozentuale Erfüllung der Anforderungen durch heutige, marktverfügbare Informationssysteme ist in Bild 59 graphisch dargestellt.

Aus den Untersuchungen ging auch hervor, daß heute im wesentlichen zwei Konzepte miteinander konkurrieren:

- *Zentrale Datenhaltung mittels Datenbankserver:*
Ein zentraler Datenbankserver sammelt Daten von über die Produktion verteilten Client-Systemen, verdichtet diese und gibt sie auf Anforderung wieder an die Client-Systeme zurück. Wegen der schnell wachsenden Anzahl von Daten und Anfragen, werden solche Systeme in der Regel auf einen Einsatz in Test- und Reparaturfeld beschränkt. Damit wird der sonst drohenden Überlastung des Servers vorgebeugt. Diese Systeme transportieren daher auch ausschließlich Test- und Reparaturdaten. Prozeßdaten werden kaum gesammelt oder weitergegeben, die Strukturierungstiefe der Daten endet spätestens auf Bauelementebene.
- *Lokale Datenhaltung mit SPC-Ankopplung:*
Es werden lokal Daten, zumeist aus maschineneigenen Protokollen, gesammelt. Eine Vernetzung zwischen den Maschinen oder gar produktionsübergreifend fehlt. Entsprechend können auch keine übergreifenden Kausalketten betrachtet werden. Die häufig vorhandene SPC-Ankopplung verfehlt in der Regel ihren Sinn, da nur Mittelwerte eines Boards oder einer ganzen Charge zur Regelung herangezogen werden.

Um die Anforderungen, die sich aus Produktion und ISO9000 ergeben, erfüllen zu können, wurde daher ein eigenes Konzept für ein prozeßbegleitendes Informationssystem entworfen und exemplarisch realisiert. Die Ergebnisse aus der Studie anderer Informationssysteme und die detaillierten und quantifizierten Anforderungen flossen in dieses System ein. In Kapitel 5 werden das Kernsystem und ausgewählte Erweiterungen vorgestellt.

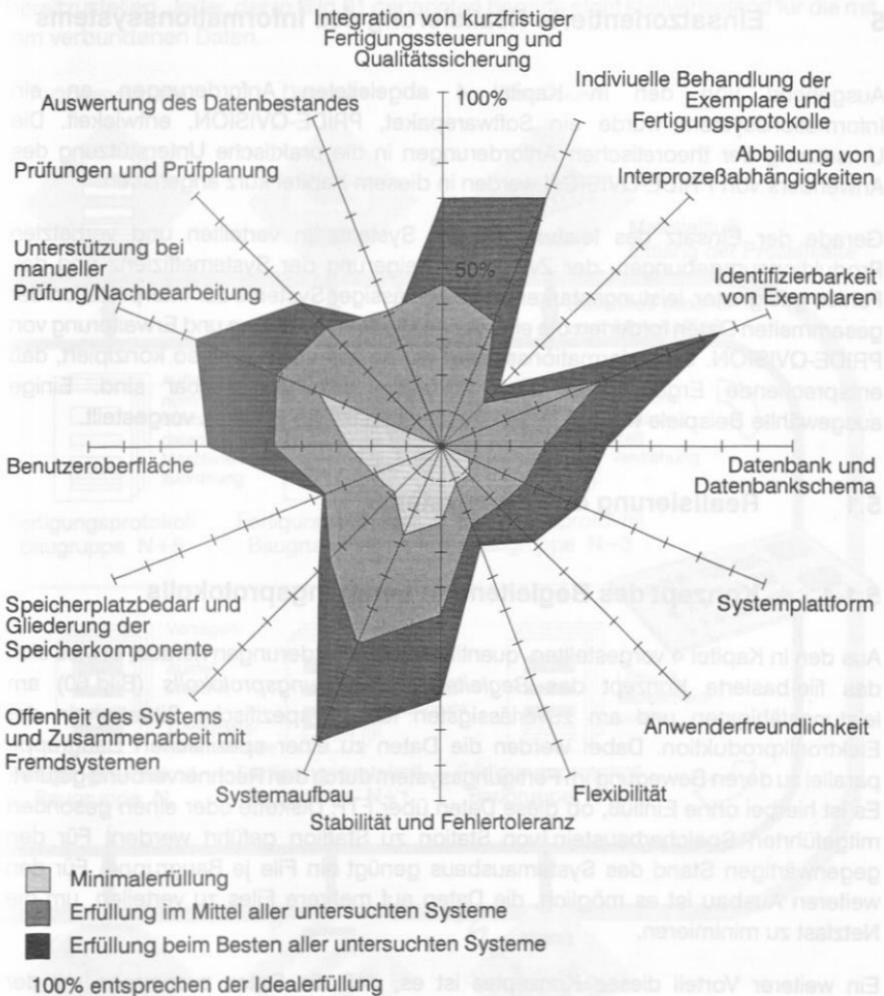


Bild 59: Anforderungsprofile: Prozentuale gewichtete Erfüllung durch heutige Systeme, quantitative Angaben siehe 4.7

5 Einsatzorientierte Realisierung des Informationssystems

Ausgehend von den in Kapitel 4 abgeleiteten Anforderungen an ein Informationssystem wurde ein Softwarepaket, PRIDE-QVISION, entwickelt. Die Umsetzung der theoretischen Anforderungen in die praktische Unterstützung des Anwenders von PRIDE-QVISION werden in diesem Kapitel kurz angerissen.

Gerade der Einsatz des leistungsfähigen Systems in verteilten und vernetzten Produktionsumgebungen, der Zwang zu Steigerung der Systemeffizienz und das Fehlen geeigneter, leistungsstarker und zuverlässiger Systeme zur Interpretation der gesammelten Daten forderten die einsatzorientierte Entwicklung und Erweiterung von PRIDE-QVISION. Das Informationssystem wurde von vornherein so konzipiert, daß entsprechende Ergänzungen auch zukünftig leicht integrierbar sind. Einige ausgewählte Beispiele werden in den Abschnitten 5.2 bis 5.4 kurz vorgestellt.

5.1 Realisierung des Kernsystems

5.1.1 Konzept des Begleitenden Fertigungsprotokolls

Aus den in Kapitel 4 vorgestellten, quantifizierten Anforderungen heraus, erwies sich das file-basierte Konzept des *Begleitenden Fertigungsprotokolls* (Bild 60) am leistungsfähigsten und am zuverlässigsten für die spezifische Situation in der Elektronikproduktion. Dabei werden die Daten zu einer spezifischen Baugruppe parallel zu deren Bewegung im Fertigungssystem durch den Rechnerverbund geführt. Es ist hierbei ohne Einfluß, ob diese Daten über FTP, Diskette oder einen gesondert mitgeführten Speicherbaustein von Station zu Station geführt werden. Für den gegenwärtigen Stand des Systemausbaus genügt ein File je Baugruppe. Für den weiteren Ausbau ist es möglich, die Daten auf mehrere Files zu verteilen, um die Netzlast zu minimieren.

Ein weiterer Vorteil dieses Konzeptes ist es, daß die Daten zusammen mit der Baugruppe das Werk verlassen können. Dadurch werden verteilte Produktionsstrukturen und moderne Qualitätssicherungsphilosophien wie Ship-to-Stock unterstützt.

In der Struktur des *Begleitenden Fertigungsprotokolls* spiegeln sich vor allem die Forderungen nach Skalierbarkeit, Generierbarkeit und Flexibilität an das Informationssystem wider. Die Struktur des Fertigungsprotokolls entspricht der Struktur des Produkts Baugruppe, wobei die Struktur um qualitätsrelevante und auftragsbezogene Daten erweitert wurde. Die Momentaufnahme Bild 61 stellt schematisch die Situation im Fertigungs- und Informationssystem dar. Damit ist es möglich, Stammdaten, Auftrags- bzw. Organisationsdaten und Bewegungsdaten (z.B. Prozeß- und Prüfdaten) bedarfsgerecht an jedem Terminal bzw. an jeder Station

bereitzustellen. Jeder, der in Bild 61 genannten Begriffe steht stellvertretend für die mit ihm verbundenen Daten.

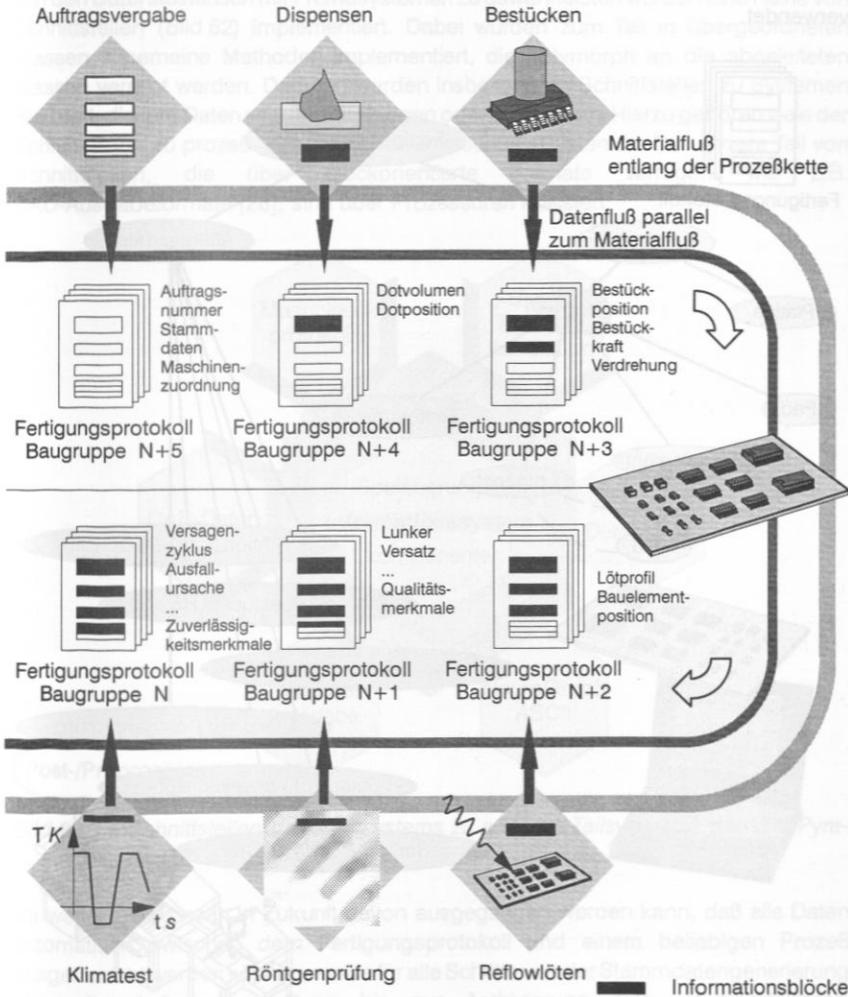


Bild 60: Konzept des Begleitenden Fertigungsprotokolls und seine Integration von PRIDE-QVISION in die Fertigung

Als Datenmodell wurde ein objektorientiertes Datenmodell entworfen. Für die spezifischen Anforderungen bietet es gegenüber relationalen, hierarchischen oder netzwerkartigen Datenmodellen signifikante Vorteile vor allem bzgl. Flexibilität,

Systemverfügbarkeit (während der Laufzeit), Dynamik, Skalierbarkeit und Generierbarkeit. Entsprechend wurden Klassen und Methoden entworfen, die dieses Datenmodell repräsentieren. Dabei wurde die bewährte Fusionmethode [10] verwendet.

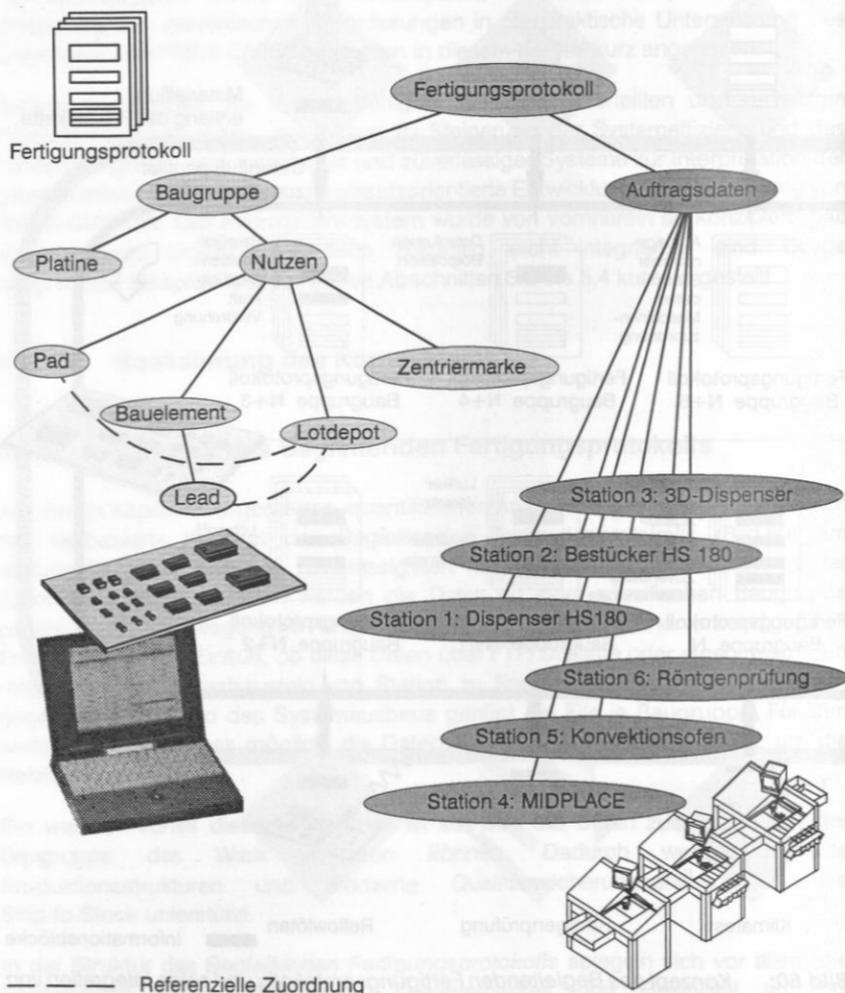


Bild 61: Die File-Struktur des Fertigungsprotokolls entspricht einer Produktstruktur, die um qualitätsrelevante Aspekte erweitert wurde.

5.1.2 Schnittstellen des Kernsystems

Um den Datenaustausch mit Fremdsystemen zu gewährleisten wurden eine Reihe von Schnittstellen (Bild 62) implementiert. Dabei wurden zum Teil in übergeordneten Klassen allgemeine Methoden implementiert, die polymorph an die abgeleiteten Klassen vererbt werden. Dadurch werden insbesondere Schnittstellen zu Systemen realisiert, die ihre Daten sequentiell ablegen oder aufnehmen. Hierzu gehören viele der Schnittstellen zu prozeß- oder prüfdatenerfassenden Systemen. Der andere Teil von Schnittstellen, die über blockorientierte Formate verfügen wie z.B. CAD-Ausgabeformate [26], sind über Prozessoren realisiert.

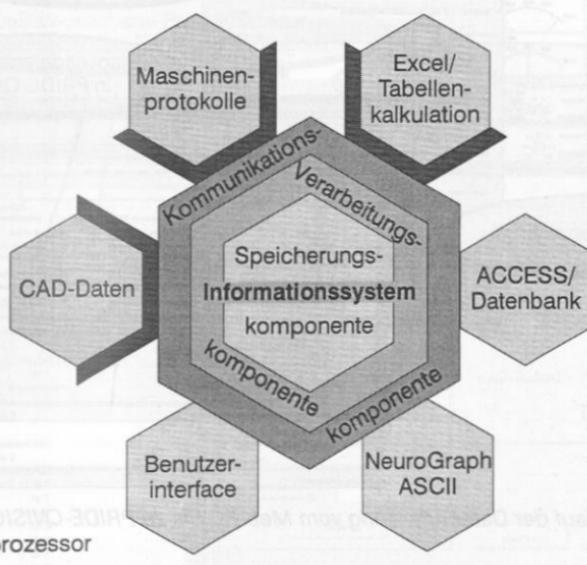


Bild 62: Schnittstellen des Kernsystems zu anderen Teilsystemen der CIM-Pyramide

Da weder heute noch in Zukunft davon ausgegangen werden kann, daß alle Daten automatisch zwischen dem Fertigungsprotokoll und einem beliebigen Prozeß ausgetauscht werden können, wurde für alle Schritte von der Stammdatengenerierung über die Auftragsbearbeitung bis zur Archivierung eine intuitiv-erfaßbare, selbsterklärende, klar strukturierte Benutzeroberfläche geschaffen. Damit ist es dem Anwender möglich sich jederzeit die benötigten Daten schnell zu holen oder sie einzugeben.

Ein Beispiel für den Ablauf der Datenerfassung stellt Bild 63 dar. Die Maschinen- und Prozeßdaten einer Dispensstation werden über einen Meß-PC erfaßt und in einem File zwischengespeichert. Auch die additive Sensorik, wie der eingebaute Drucksensor

oder das Lasertriangulationssystem, legt dort ihre Meßwerte digitalisiert ab. In einem zweiten Schritt werden die Daten dieses Files ausgewertet und für die Erfassung in PRIDE-QVISION aufbereitet. Die Zwischenauswertung erlaubt z.B. erste Aussagen über die Einhaltung der vorgegebenen Lotdepotvolumina.

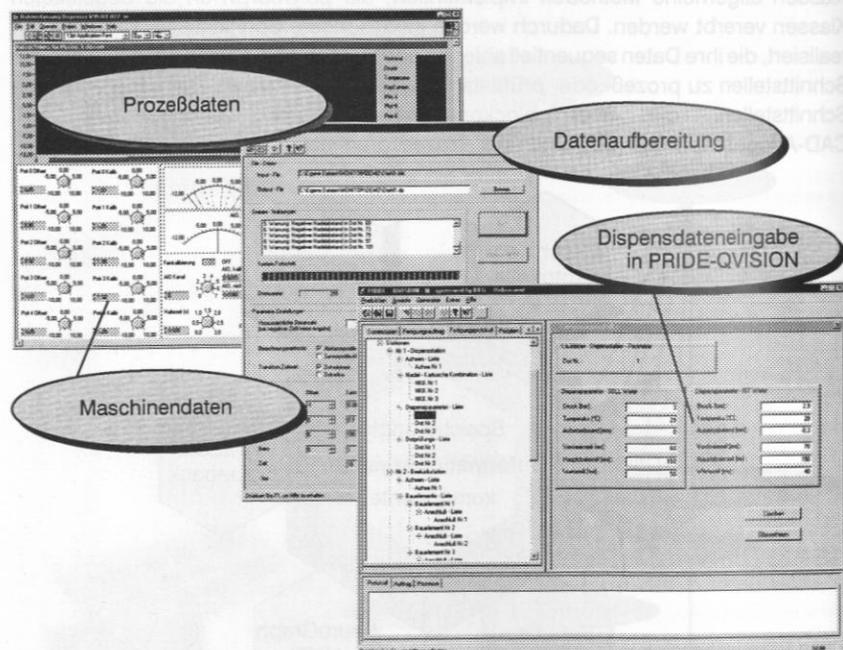


Bild 63: Ablauf der Datenerfassung vom Meß-PC bis zu PRIDE-QVISION

Das System wurde vorbereitet auf die Kommunikation mit Schnittstellen im GEM/SECS II- oder IPC-D-350-Format. Deren Realisierung wird jedoch an anderer Stelle behandelt. [7]

5.2 Funktionen der Arbeitsvorbereitung

5.2.1 Stammdatengenerierung

Wie in [26] geschildert, beinhalten die heutigen CAD-Ausgabeformate nicht alle benötigten Daten zum Aufbau einer qualitätsorientierten Produktstruktur, wie sie von PRIDE-QVISION benötigt wird. Da PRIDE-QVISION auch darauf ausgelegt wurde, die Produktion räumlicher Baugruppen zu begleiten, kann somit ein großer Teil der Daten

heute nur manuell von einem MCAD/ECAD-System auf PRIDE-QVISION portiert werden [32][77].

Entsprechend wurde PRIDE-QVISION ausgelegt (Bild 64). Interaktiv können Schaltungsträger, Bauelemente, Zentriermarken, Pads, Lotdepots und Leads generiert und parametrisiert werden. Zur Unterstützung dieses zeitintensiven Vorgehens wurden z.B. Methoden zur automatischen Generierung von Leads, Pads und Lotdepots sowie der Positionen integriert. Wichtige CAD-Ausgabeformate werden unterstützt und können automatisch importiert werden; damit wird dem Anwender eine erweiter- und editierbare Produktstruktur zur Verfügung gestellt.

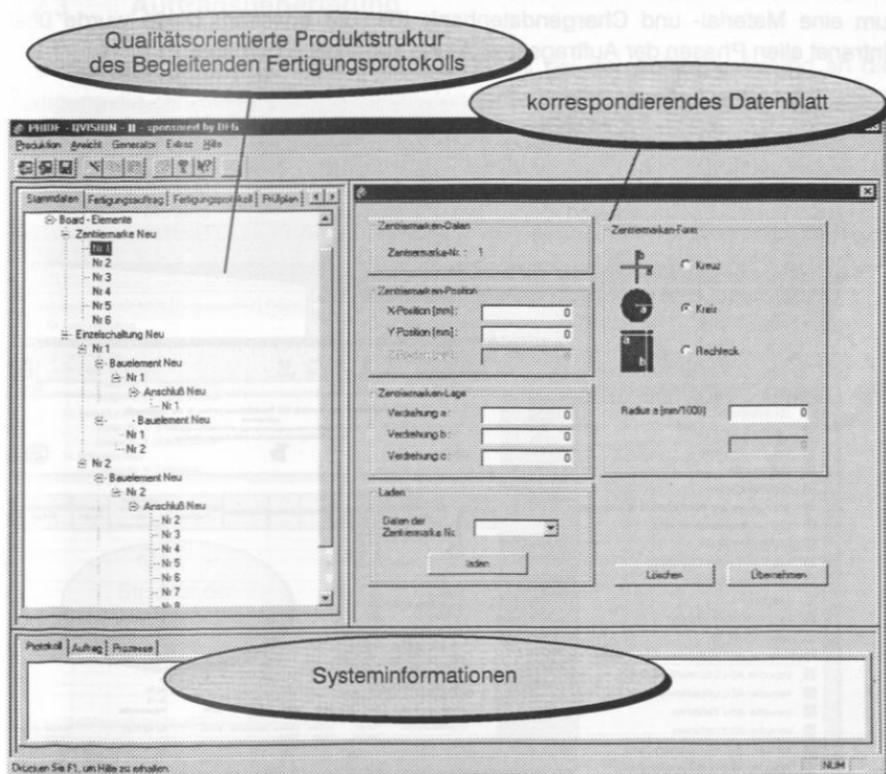


Bild 64: Benutzerschnittstelle bei der Stammdatengenerierung: Jedes Element der qualitätsorientierten Produktstruktur kann interaktiv generiert und editiert werden.

PRIDE-QVISION verfügt auch über einen halbautomatischen Modus zur Stammdatengenerierung. Files unterstützter CAD-Ausgabeformate werden eingelesen und in eine korrespondierende Produktstruktur transferiert. Fehlende

Daten aus dem CAD-System werden durch fertigungsspezifische Defaultwerte aufgefüllt. Der Benutzer editiert und ergänzt anschließend die Produktstruktur.

5.2.2 Intranet-Erweiterung für Materialdatenbanken

Die Anbindung von Material- und Chargendatenbanken an CAD- oder PPS-Systeme der Elektronikproduktion scheint heute selbstverständlich. Zumeist unterscheiden sich die verwendeten Datenbasen von Entwicklung, Produktionsplanung und Fertigung, sodaß gerade in den Anlaufphasen eines neuen Produktes oder bei Lieferantenwechsel erhebliche Zeitverluste entstehen. Daher wurde PRIDE-QVISION um eine Material- und Chargendatenbank (Bild 65) erweitert. Diese wurde über Intranet allen Phasen der Auftragsabwicklung zugänglich gemacht.

<p>Lotpaste: Zusammensetzung Aufschmelzverhalten Thixotropie Benetzungsverhalten Gefüge</p>	<p>Epoxidharze: Zusammensetzung Benetzungsverhalten Härtungsverhalten Schwund</p>	<p>Substrate: Zusammensetzung elektrische, mechanische, chemische Eigenschaften</p>	<p>Microparts: Material- eigenschaften Maschinen- charakteristik Umformgrade</p>
---	---	---	--

The screenshot shows a Microsoft Access window titled "Microsoft Access - [DB für A alle V97 - Datenbank]". The main window displays a table with the following columns: Material-Nr., Hauptverwendung in der EP, Materialname, Stoff, Lieferant, Preis, Teilanforderung, Menge, überliche, Restbestand, überliche, Analyse, and Gesamtbestand. The table contains several rows of data, including materials like "2-Folgende Substrate", "4-10", "5-10", "7-10", "8-10", "9-10", "10-10", "11-10", "12-10", "13-10", "14-10", "15-10", "16-10", "17-10", "18-10", "19-10", "20-10", and "21-10".

Material-Nr.	Hauptverwendung in der EP	Materialname	Stoff	Lieferant	Preis	Teilanforderung	Menge	überliche	Restbestand	überliche	Analyse	Gesamtbestand
2-Folgende Substrate		Wasser	SP4					HD				
4-10		SP4						36, 36				
5-10		SP4						36, 36				
7-10		SP4						36, 36				
8-10		SP4						36, 36				
9-10		SP4						36, 36				
10-10		SP4						36, 36				
11-10		SP4						36, 36				
12-10		SP4						36, 36				
13-10		SP4						36, 36				
14-10		SP4						36, 36				
15-10		SP4						36, 36				
16-10		SP4						36, 36				
17-10		SP4						36, 36				
18-10		SP4						36, 36				
19-10		SP4						36, 36				
20-10		SP4						36, 36				
21-10		SP4						36, 36				

Bild 65: Die Material- und Chargendatenbank und ihre Intranet-Erweiterung: Einheitliche Werte für alle Elemente der PPS

Die Möglichkeit jederzeit und überall auf chargenspezifische Werte zugreifen zu können, ist für die Qualitätssicherung von großem Vorteil. Gerade in der Elektronikproduktion stellen die Schwankungen des angelieferten Materials einen erheblichen, meist negativen Einfluß auf die Verarbeitbarkeit der Komponenten und somit der Qualität der Baugruppe dar. Der Übergang zu Ship-to-stock oder Lieferantenzertifizierung zwingt sogar zu einer immer detaillierten Rückverfolgbarkeit aller Komponenten. Auch die Auswirkungen der diversen Lagerungsbedingungen (siehe Kapitel 3) können so besser abgeschätzt und beherrscht werden.

5.2.3 Auftragsgenerierung

Aus den Stammdaten generiert PRIDE-QVISION bei der Auftragserteilung an die Fertigung die Zahl der für das Los benötigten Fertigungsprotokolle. Der Benutzer wählt dazu die jeweiligen Stammdaten aus und gibt die auftragspezifischen Daten wie Auftragsnummer, Losgröße, geplanter und spätester Endtermin etc. an.

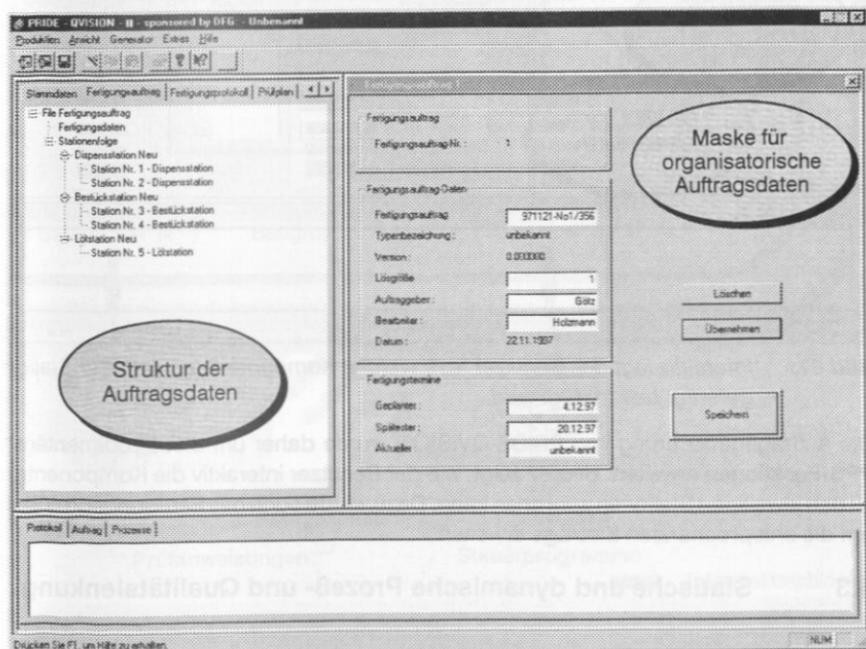


Bild 66: Eingabe der allgemeinen Auftragsdaten wie Auftragsnummer, Losgröße etc.

In der Elektronikproduktion ist es durchaus üblich, daß nicht alle gleichartigen Prozesse auch auf der gleichen Maschine ausgeführt werden. So werden z.B. nicht alle

Bauelemente auf einer Maschine bestückt. Der Bestückprozeß verteilt sich stattdessen auf mehrere in der Regel aufeinander folgende Maschinen. Die Ursachen hierfür sind meist in der Rüstopfimerung [162] begründet, aber auch in den unterschiedlichen Maschinen- bzw. Prozeßfähigkeiten der verfügbaren Maschinen. Auch kann es nötig sein, den Lötprozeß [39][154] aufzuteilen und bestimmte Komponenten selektiv zu löten [26].

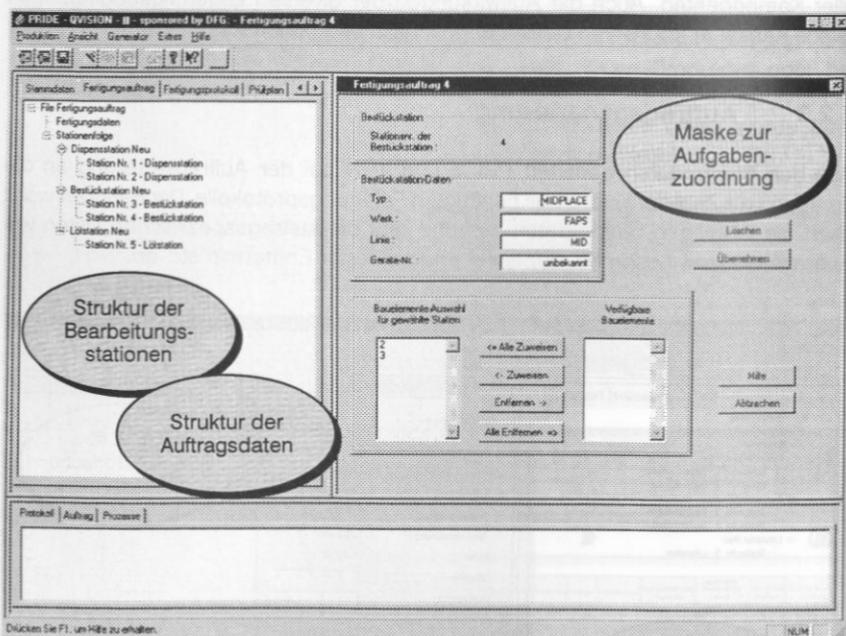


Bild 67: Interaktiv legt der Benutzer fest, welche Komponente an welcher Station gefertigt bzw. gefügt wird.

Die Auftragsgenerierung von PRIDE-QVISION wurde daher um diese rudimentären PPS-Funktionen erweitert. Bild 67 zeigt, wie der Benutzer interaktiv die Komponenten zu den jeweiligen Stationen zuordnen kann. Dazu wurde auch das Fertigungsprotokoll um die entsprechenden Einträge erweitert.

5.3 Statische und dynamische Prozeß- und Qualitätslenkung

5.3.1 Verteilung von Steuerprogrammen und Arbeitsanweisungen

Mit den Stamm- und Auftragsdaten liegen in PRIDE-QVISION bereits alle wesentlichen Grunddaten für die Generierung von Steuerprogrammen, Prüfplänen und Arbeitsanweisungen vor.

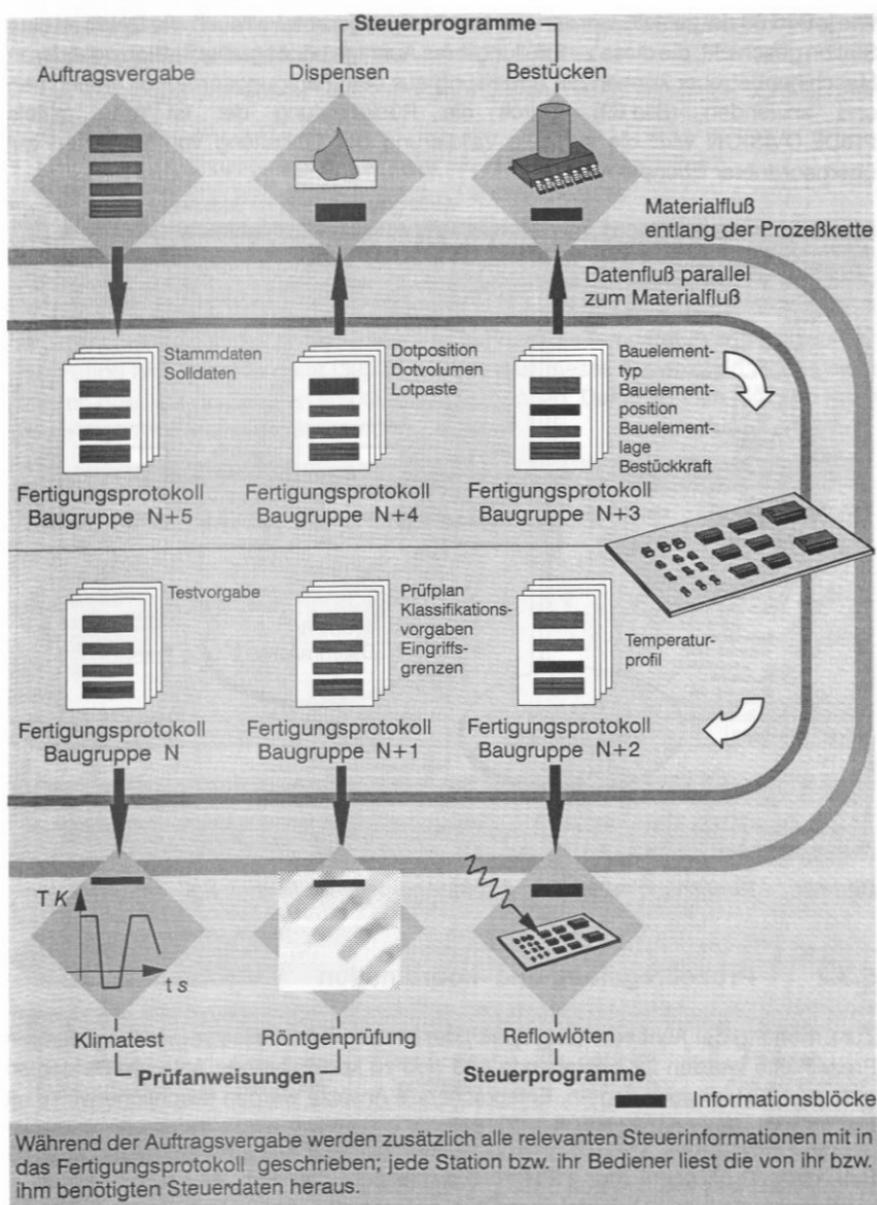


Bild 68: Verteilung von Steuerprogrammen und Arbeitsanweisungen mit dem Begleitenden Fertigungsprotokoll

Wie in Bild 68 dargestellt, werden mit dem Fertigungsprotokoll auch alle Daten an eine Station geschickt, die diese zu Erfüllung ihres Auftrags benötigt. Die Station oder deren Maschinenbetreiber können die Anweisung aus dem Fertigungsprotokoll entnehmen und anwenden (Bild 69). Durch die Rückmeldung der Ist-Werte mittels PRIDE-QVISION wird die schnelle Validierung der Einhaltung von Vorgaben auf übergeordneter Ebene ermöglicht.

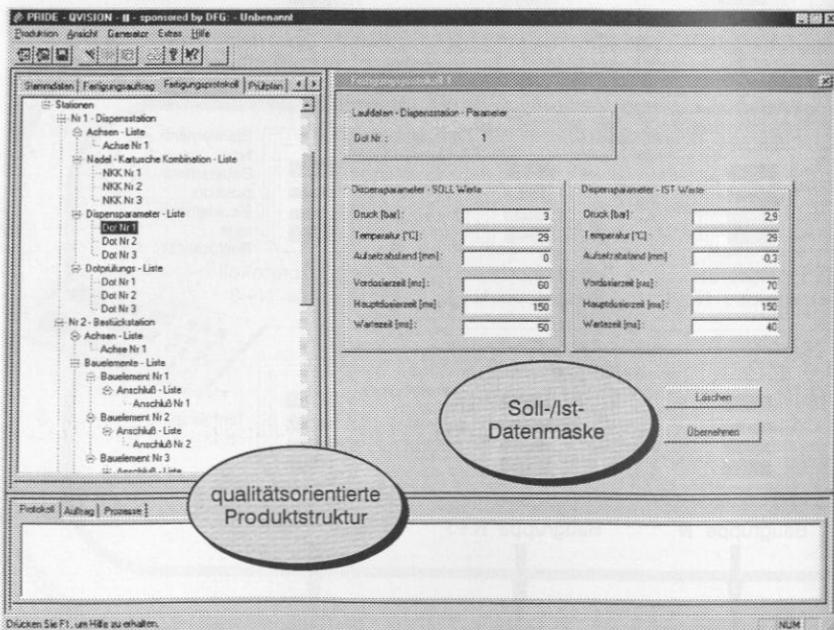


Bild 69: Benutzerschnittstelle mit komponentenspezifischen Soll- und Ist-Daten

5.3.2 Prozeßregelung und -koordination

Zur Erhöhung der Ausbeute (engl. *yield*) der einzelnen Prozesse sowie der gesamten Prozeßkette werden für bestehende und neu zu konzipierende Anlagen Strategien gefordert, Fehler auszuregulieren. Entsprechende Ansätze werden fälschlicherweise oft als SPC-Applikation dargestellt [70][182].

Bei den Prozessen der Elektronikproduktion handelt es sich jedoch - regelungstechnisch betrachtet - um Stückgutprozesse. Stückgutprozesse haben im Vergleich zu Fließprozessen, wie sie meist in der mechanischen Produktion vorliegen, folgende Eigenschaften:

- Es handelt sich um zeitdiskrete, wertkontinuierliche Vorgänge.

- Die Zielgröße wird erst erfaßt, wenn der Fertigungsvorgang am Werkstück (Baugruppe) abgeschlossen ist.
- Die Meßwerte von einem Werkstück zum anderen sind statistisch voneinander unabhängig.
- Beim Stückgutprozeß zeigt die Strecke ein reines Totzeitverhalten.
- Der Stückgutprozeß ist rückwirkungsfrei.

Somit ist es nicht möglich, dynamische Regelkreise für die Zielgrößen aufzubauen. Manche Applikationen behelfen sich mit dem Übergang auf Sekundärzielgrößen. Ein Beispiel stellt die baugruppenspezifische Regelung des Infrarotlötprozesses dar, bei dem nicht das Aufschmelzen des Lotdepots, sondern die Temperaturverteilung auf der Baugruppe als Zielgröße dient [39]. In der Regel ist dieses Ausweichen jedoch nicht möglich oder mit großen Fehlerpotentialen verbunden. Daher können lediglich reine Steuerungssysteme eingesetzt werden.

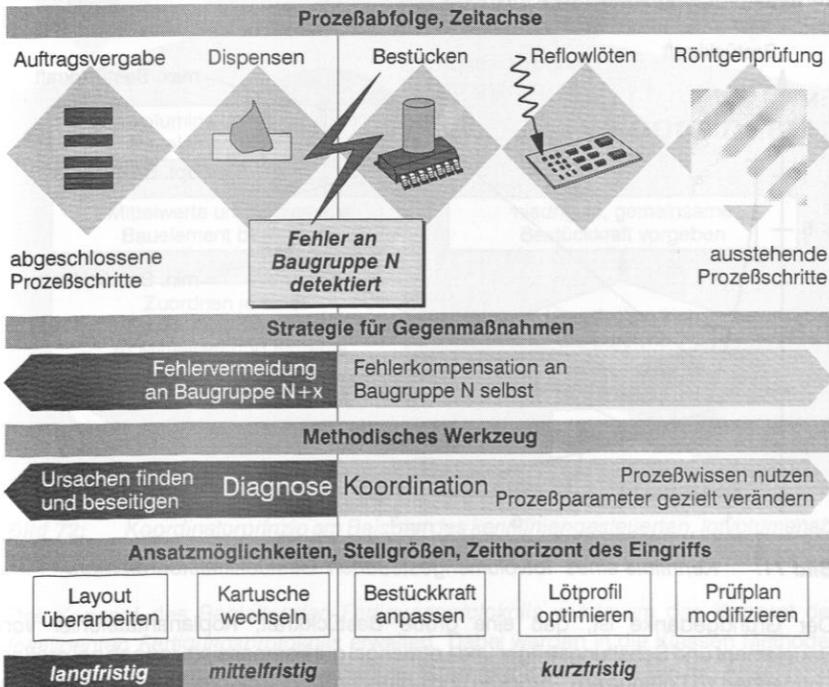


Bild 70: Wirkrichtungen der Prozeßregelung bzw. -koordination in der Elektronikproduktion; Unterscheidung erfolgt nach Zeithorizonten

Entscheidend für die Wahl der Strategie ist der beabsichtigte Zeithorizont der Wirkung. Dadurch definieren sich die beiden Haupttechniken: Diagnose und Koordination. Ist ein Fehler gemacht und detektiert worden (Bild 70), so besteht heute im Prozeß selbst

nicht mehr die Möglichkeit, ihn zu kompensieren. Dies kann nur durch nachfolgende oder zusätzliche Prozesse (Reparatur, Nacharbeit) geschehen. Im Extremfall kann das Ausschleusen einer Baugruppe als Ausschuß ökonomisch sinnvoll sein.

Die Fehlervermeidung ist von mittel- bis langfristiger Wirkung, wirkt sich aber nicht mehr auf die fehlerhafte Baugruppe aus. Um sie zu realisieren sind leistungsfähige Algorithmen zur Fehlerursachendiagnose nötig. Die *adaptive Fehlerdiagnose* auf Basis der FMEA, wie sie von [202] in den Grundzügen entworfen wurde und von [42] weiterentwickelt wird, stellt diese Algorithmen für die Anlagen der Elektronikproduktion bereit.

Für die Fehlerkompensation durch nachfolgende Prozesse wurden Prozeßkoordinatoren entworfen und getestet. Der einfachste Fall ist die lotdepotgesteuerte Bestückkraftkoordination mittels einer Kennlinie wie in Bild 71; für Stützpunkte werden aus der Erfahrung heraus Bereiche für die Bestückkraft vorgegeben, dazwischen wird interpoliert.

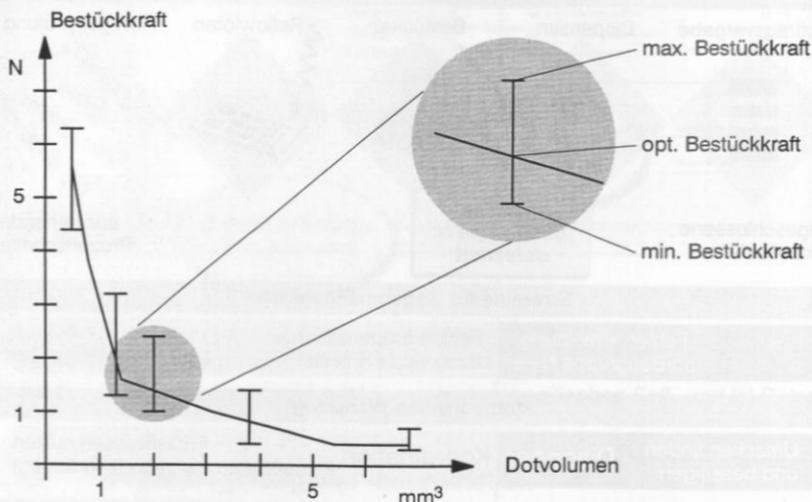


Bild 71: Kennlinie eines lotvolumengesteuerten Bestückkraftkoordinators

Der Grundgedanke ist, daß eine große Bestückkraft, Koplanaritätsfehler von Bauelement und Schaltungsträger und Lotmangel gut kompensiert, jedoch bei großen Lotmengen zu Lotspritzern, -brücken und Lotperlen führt. Entsprechend umgekehrtes gilt für eine kleine Bestückkraft. Der Koordinator (Bild 72) ordnet mittels der Stammdaten die Ist-Daten der Lotdepots dem jeweiligen Bauteil zu und bestimmt nach Mittel- und Extremwertbetrachtungen über die Kennlinie die optimale Bestückkraft für das jeweilige Bauelement. Differieren die Lotdepotvolumina über ein Bauelement hinweg zu stark, oder fehlt ein Lotdepot, wird die Baugruppe ausgeschleust.

Die experimentelle Bewertung des Ansatzes zeigte, daß eine einfache Kennliniensteuerung nicht ausreicht, um das gesamte Spektrum an Bauelementformen abzudecken oder die Wechselwirkung von Lotvolumen, Lotdepotversatz und Bauelementform ausreichend zu berücksichtigen. So konnten Qualitätsverbesserungen nur für wenige Bauelementtypen erreicht werden.

Um die Wechselwirkungen berücksichtigen zu können werden leistungsstärkere Steuerungstechniken benötigt. Diese werden in Kapitel 7 hergeleitet und in Abschnitt 8.4 umgesetzt.

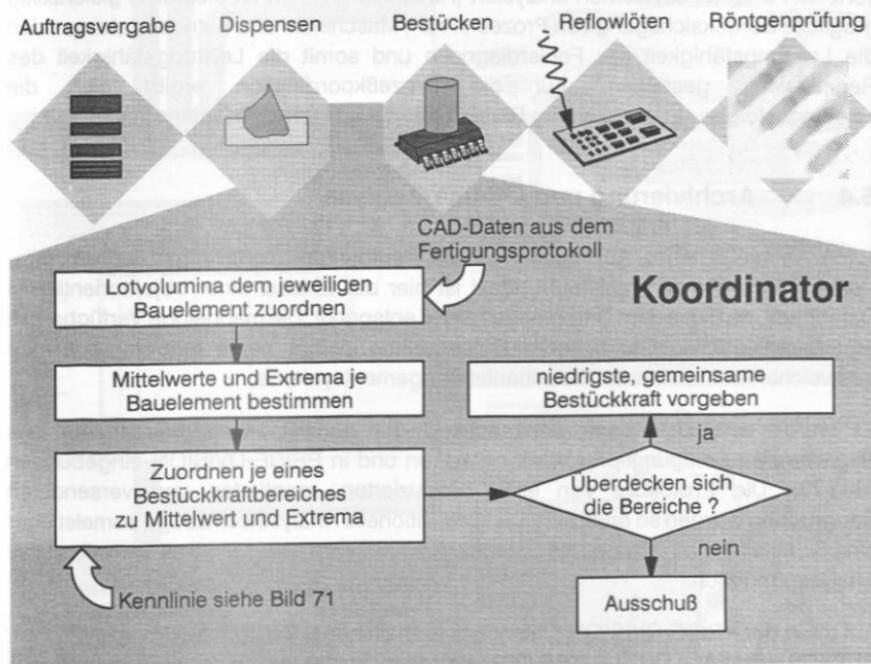


Bild 72: Koordinatorprinzip am Beispiel des kennliniengesteuerten, lotvolumenabhängigen Bestückkraftkoordinators

Das Konzept des *Begleitenden Fertigungsprotokolls* wurde um das Konzept des *Intelligenten Fertigungsprotokolls* erweitert. Dabei werden in die Klassen Methoden integriert, die, beispielsweise, bauelementspezifisch den jeweils besten Algorithmus implementieren, um die optimale Bestückposition und -kraft aus der Lage des Lotdepots, seiner Form und des Lotvolumens zu bestimmen. Die Station befragt das Fertigungsprotokoll einer ankommenden Baugruppe nach den Bestückparametern und erhält zuverlässig, dynamisch die optimalen Werte zurück. Wie in 8.4 ausgeführt, können mit diesem System auch die geplanten Parameter nachfolgender Prozesse, z.B. das Löttemperaturprofil, berücksichtigt werden. Die Komplexität der

Gesamtaufgabe *Prozeßkoordination* wird so durch die Synergie der holonisch verteilten Intelligenz des Fertigungsprotokolls reduziert. Die Leistungsfähigkeit wird gleichzeitig potenziert.

Das Konzept des *Intelligenten Fertigungsprotokolls* und das Konzept der *Adaptiven Fehlerdiagnose* werden in laufenden Arbeiten [42] zusammengeführt. Das Fertigungsprotokoll wird dabei intensiv mit Maschinen- und Betriebsdaten erweitert. Diese sind die Basis für die adaptive Fehlerdiagnose. Die Daten werden mit den Fertigungsprotokollen durch das Netzwerk geleitet und von einem oder mehreren verteilten Diagnosesystemen analysiert (Abschnitt 5.4). Durch die somit gleichzeitig mögliche Berücksichtigung von Prozeß-, Prüf-, Maschinen- und Betriebsdaten werden die Leistungsfähigkeit der Fehlerdiagnose und somit die Leistungsfähigkeit des Regelkreises gesteigert. Für die Prozeßkoordination ergibt sich die Leistungssteigerung vor allem im Bereich der dynamischen Prüfplanoptimierung.

5.4 Archivierung und Off-line-Analyse

Nach Abschluß eines Auftrages sind die Fertigungsprotokolle für Regreß- oder Reklamationsfälle zu archivieren. Ideal ist hier der Einsatz einer objektorientierten Datenbank, da diese dem Datenmodell direkt entspricht. Die mangelnde Verfügbarkeit leistungsfähiger objektorientierter Datenbanken zwingt heute jedoch noch zum Ausweichen auf relationale Datenbankmanagementsysteme.

Es wurde eine Datenbank entsprechend der qualitätsorientierten Struktur des *Begleitenden Fertigungsprotokolls* entworfen und in PRIDE-QVISION eingebunden (Bild 73). Die Protokolle von fertig produzierten, montierten und versendeten Baugruppen werden so archiviert. Da konventionelle Analysewerkzeuge zumeist über eine Schnittstelle zu relationalen Datenbanken verfügen, werden so off-line interaktive Analysen möglich.

Auf die in der PRIDE-QVISION-Datenbank enthaltenen Daten können Programme wie REVERS oder FACTORY-LINKER [202] zugreifen. So dienen die im Fertigungsprotokoll gesammelten Prozeß- und Prüfdaten der Auswertung durch DoE-Verfahren in REVERS.

Die mitgeführten Maschinendaten können extrahiert und an die Datenbank des FACTORY-LINKERS zur Ergänzung der Wissensbasis gesendet werden. Dort werden die detektierten Fehler und Maschinenstörungen statistisch erfaßt und mit den gefundenen Ursachen der Fehler bzw. Störungen korreliert [202]. Fehlerbäume sind dort in FMEA-Strukturen hinterlegt. Die Risikoprioritätszahl, die hier zur Ursachendiagnose herangezogen wird, wird durch die aktualisierte Fehlerverteilung modifiziert. Auf diese Weise adaptiert sich das Diagnosesystem an veränderte Fehlerursachen [42].

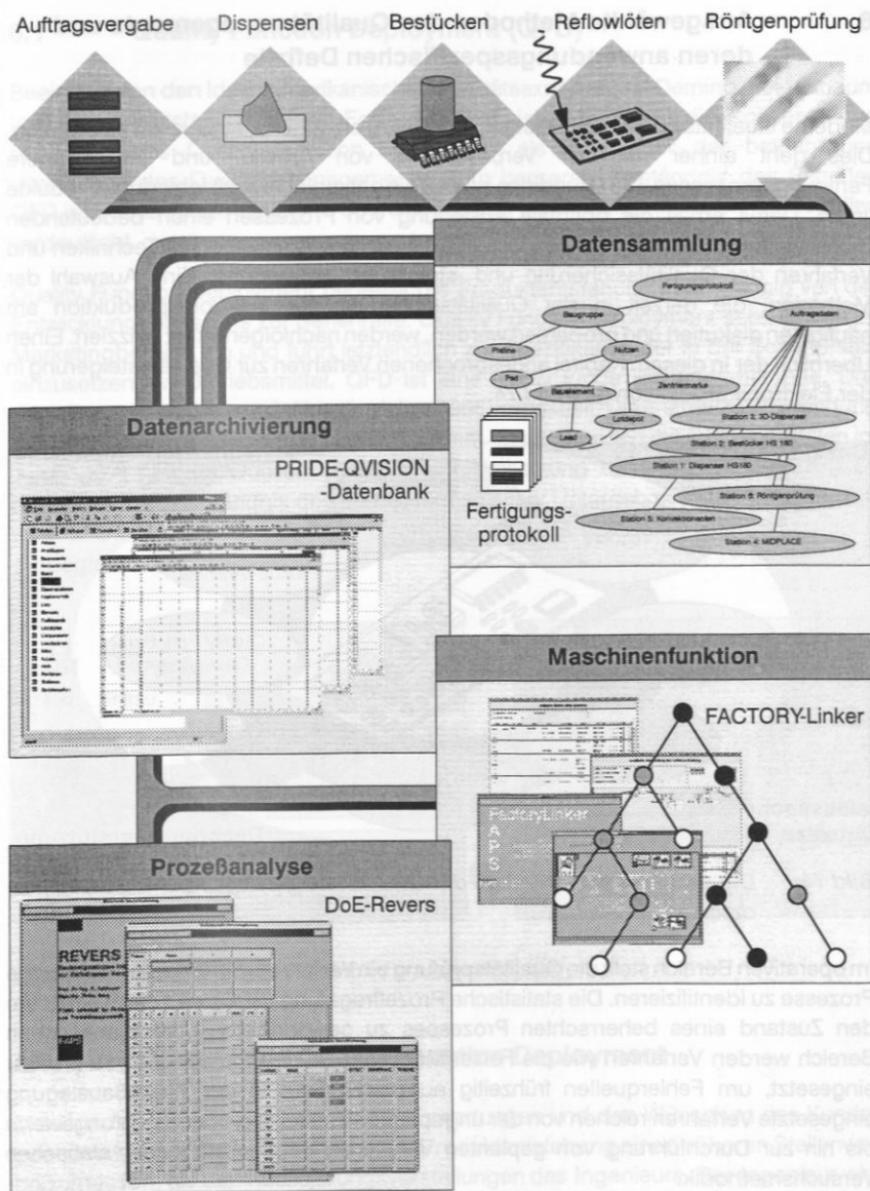


Bild 73: Realisiertes Gesamtsystem mit qualitätsorientierter Produktstruktur des Kernsystems und Anbindung von Off-line-Analysen wie REVERS (DoE) oder FACTORY-LINKER (adaptive Fehlerdiagnose [202])

6 Ausgewählte Methoden des Qualitätsmanagements und deren anwendungsspezifischen Defizite

Moderne Qualitätssicherung bedeutet, Qualität zu erzeugen statt Qualität zu erprüren. Dies geht einher mit der Verbesserung von Arbeits- und insbesondere Fertigungsprozessen. Die Grundidee ist, daß ein optimaler Prozeß fehlerfreie Produkte liefert. Damit erhält die optimale Auslegung von Prozessen einen bedeutenden Stellenwert. Dabei finden in Forschung und Industrie verschiedenste Techniken und Verfahren der Qualitätssicherung und -steigerung Anwendung. Eine Auswahl der Methoden, die derzeit in der Qualitätssicherung der Elektronikproduktion am häufigsten diskutiert und propagiert werden, werden nachfolgend kurz skizziert. Einen Überblick der in diesem Kapitel angesprochenen Verfahren zur Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion gibt Bild 74.

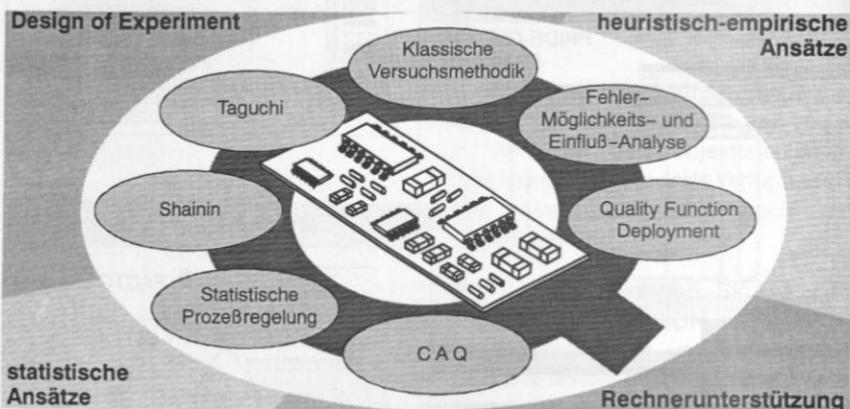


Bild 74: Die wichtigsten Werkzeuge der Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion

Im operativen Bereich stellt die Qualitätsprüfung ein Verfahren dar, um zu optimierende Prozesse zu identifizieren. Die statistische Prozeßregelung (SPC) wird eingesetzt, um den Zustand eines beherrschten Prozesses zu gewährleisten. Im planerischen Bereich werden Verfahren wie die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse (FMEA) eingesetzt, um Fehlerquellen frühzeitig auszuschließen. In der Prozeßauslegung eingesetzte Verfahren reichen von der ungeplanten Einstellung über Erfahrungswerte bis hin zur Durchführung von geplanten Versuchen mit Techniken der statischen Versuchsmethodik.

Der rechnergestützten Qualitätssicherung kommt wie einleitend erwähnt in der Elektronikproduktion aufgrund der Vielzahl der Parameter und Komponenten eine besondere Bedeutung zu. Ihre Behandlung erfolgte daher in Kapitel 4.

6.1 Quality Function Deployment (QFD)

Beeinflusst von den Ideen amerikanischer Qualitätsexperten wie Deming, Feigenbaum und Juran, entstanden gegen Ende der 60er Jahre in Japan die Konzepte und Methoden des Quality Function Deployment als Bestandteil der betrieblichen Umsetzung des Qualitätsmanagements. Zum besseren Verständnis des Begriffes QFD ist in Bild 75 die deutsche Übersetzung des ursprünglich japanischen Begriffes verdeutlicht.

Quality Function Deployment begleitet die Produktentstehung durchgängig von der Entwicklungsphase bis zur Serienreife. Quality Function Deployment setzt bereits im Marketingbereich ein und führt letztendlich zur Spezifikation der in der Serienphase einzusetzenden Betriebsmittel. QFD ist eine relativ junge Planungsmethode. Das Basiskonzept wurde von J. Akao im Jahre 1966 vorgestellt. Die erstmalige Anwendung erfolgte 1972 in der Kobe-Werft von Mitsubishi. Toyota begann mit QFD-Aktivitäten im Jahre 1977. Einige Quellen sehen in der Umsetzung der QFD Philosophie den Schlüssel zum Verständnis des Erfolges japanischer Unternehmen [139]. In den USA wird QFD seit 1985 mit Nachdruck von Ford und ASI (American Supplier Institute) propagiert.

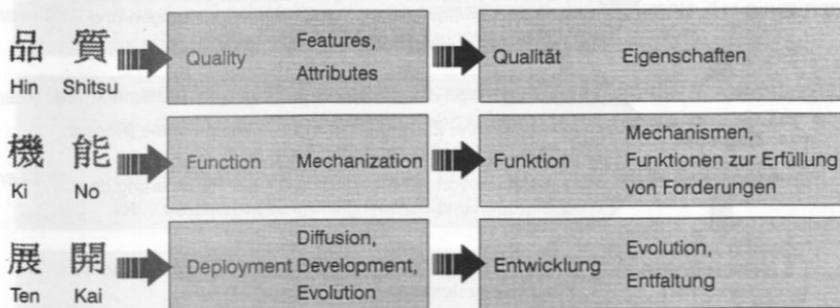


Bild 75: Begriff Quality Funktion Deployment [196]

6.1.1 Theorie des Quality Funktion Deployment

Maxime der QFD-Philosophie ist, den Erwartungen und den Wünschen des Kunden oder des Anwenders in jeder Phase der Produktentstehung einen höheren Stellenwert beizumessen, als den Realisierungsvorstellungen des Ingenieurs. Der Ingenieur wird als Mittler zwischen den Kundenanforderungen und dem technisch Machbaren verstanden. Ziel soll nicht ein Produkt sein, das alle technisch möglichen, sondern nur genau die vom Kunden gewünschten Merkmale aufweist und sich durch höchste Gebrauchstauglichkeit ("Fitness for use") auszeichnet.

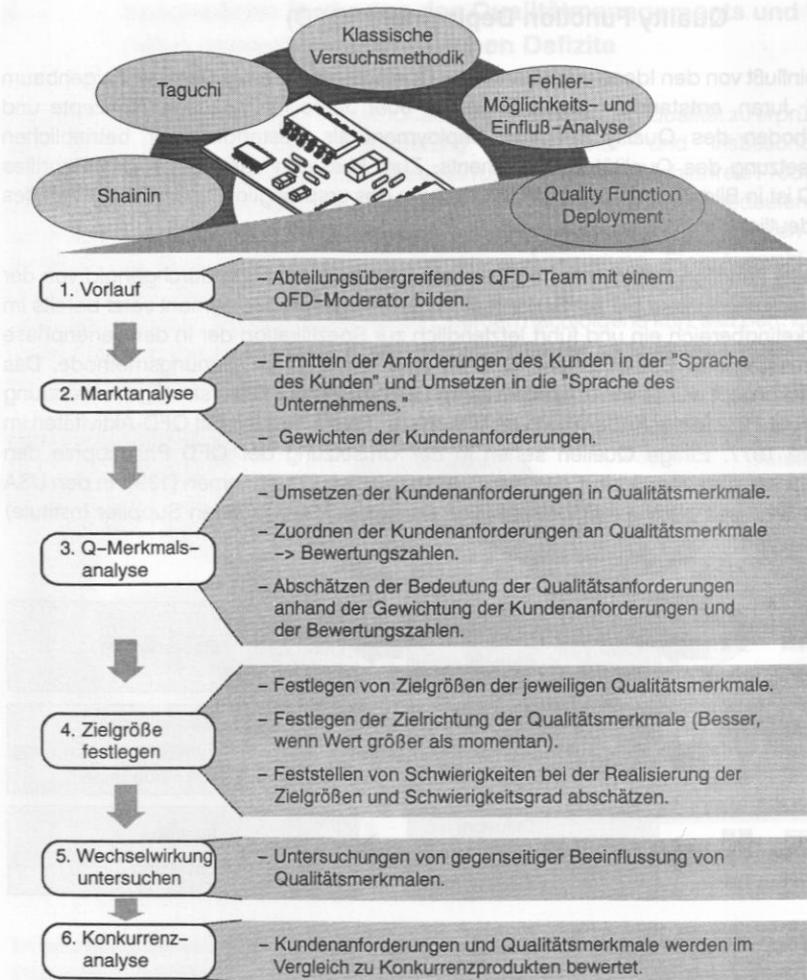


Bild 76: Vorgehen beim Quality Function Deployment

Quality Function Deployment beschreibt eine Vorgehensweise, die die sinngemäße Projektion der Kundenwünsche in alle Produktionsphasen unterstützt. QFD führt systematisch und schrittweise unterschiedliche Unternehmensbereiche, wie z.B. Marketing, Produktentwicklung, Fertigung, Beschaffung und Qualitätssicherung durch ein System aufeinander abgestimmter Planungs- und Kommunikationsschritte zusammen. Das Vorgehen zur Anwendung der Methode ist in Bild 76 schematisch dargestellt.

Zur Darstellung der Vorgehensweise wird ein spezielles Arbeitsformular eingesetzt, das wegen der dachähnlichen Struktur im oberen Bereich auch House of Quality genannt wird [59]. Die Ergebnisse der jeweiligen Vorgehensschritte werden im House of Quality festgehalten. In Bild 78 ist ein beispielhaftes House of Quality abgebildet und die verschiedenen Bereiche mit Zahlen gekennzeichnet. Diese Ziffern geben den jeweiligen Eintragungsort für die Aktionen aus Bild 76 an. Der Idee des Quality Function Deployments liegt dabei die Vorstellung zugrunde, daß die geschilderte Systematik zur Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen allen Forderungen, beginnend beim Kunden und endend in Produktionsplan und Prozeßauslegung, anwendbar ist.

In Bild 77 sind die unterschiedlichen funktionalen Abhängigkeiten der aufeinander folgenden Entwicklungsphasen dargestellt. Die Ausgangsgrößen eines QFD-Diagramms einer Forderungsgruppe sind dabei zugleich Eingangsgrößen eines QFD-Diagramms der nächsten Forderungsgruppe. Von der Kundenforderung bis hin zu den Fertigungsmitteln sieht das Verfahren vier Phasen vor, in denen die funktionalen Abhängigkeiten definiert werden. Dies sind nach [148]:

- Phase 1: Aus den Kundenforderungen gehen die Qualitätsmerkmale des Produktes hervor.
- Phase 2: Aus den Qualitätsmerkmalen ermittelt man die Merkmale der einzelnen Komponenten des Produktes.
- Phase 3: Aus den Spezifikationen der Komponenten werden die Anforderungen an die Bearbeitungsprozesse abgeleitet.
- Phase 4: Die Auslegung der Fertigungs- und Prüfungsmittel geht aus den Bearbeitungsprozessen hervor.

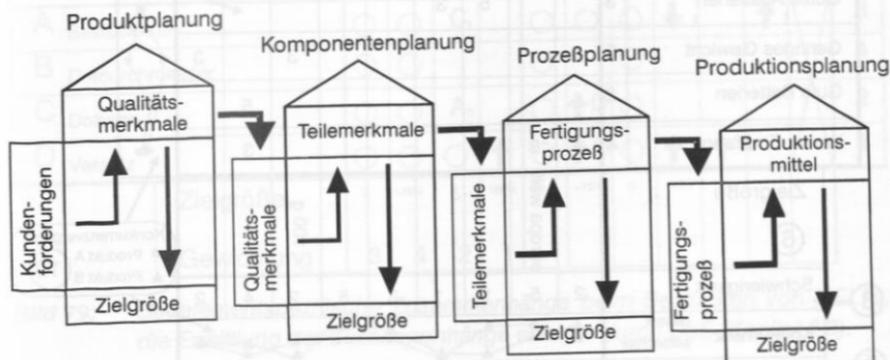


Bild 77: Ablaufphasen eines Quality Function Deployments [148]

6.1.2 Anwendung in der Elektronikproduktion

Quality Function Deployment ist ein das gesamte Produkt umfassendes Verfahren, das vom Gesamterzeugnis bis zu jeder Komponente durchgängig ist. Dabei werden zunächst die Anforderungen an das Endprodukt definiert und bewertet. So wird das House of Quality der Produktplanung anhand von beispielhaften Kundenforderungen aufgebaut, um einen Grundstock für die anschließende Prozeß-, Prüf- und Produktionplanung in der Baugruppenfertigung zu ermitteln (Bild 78).

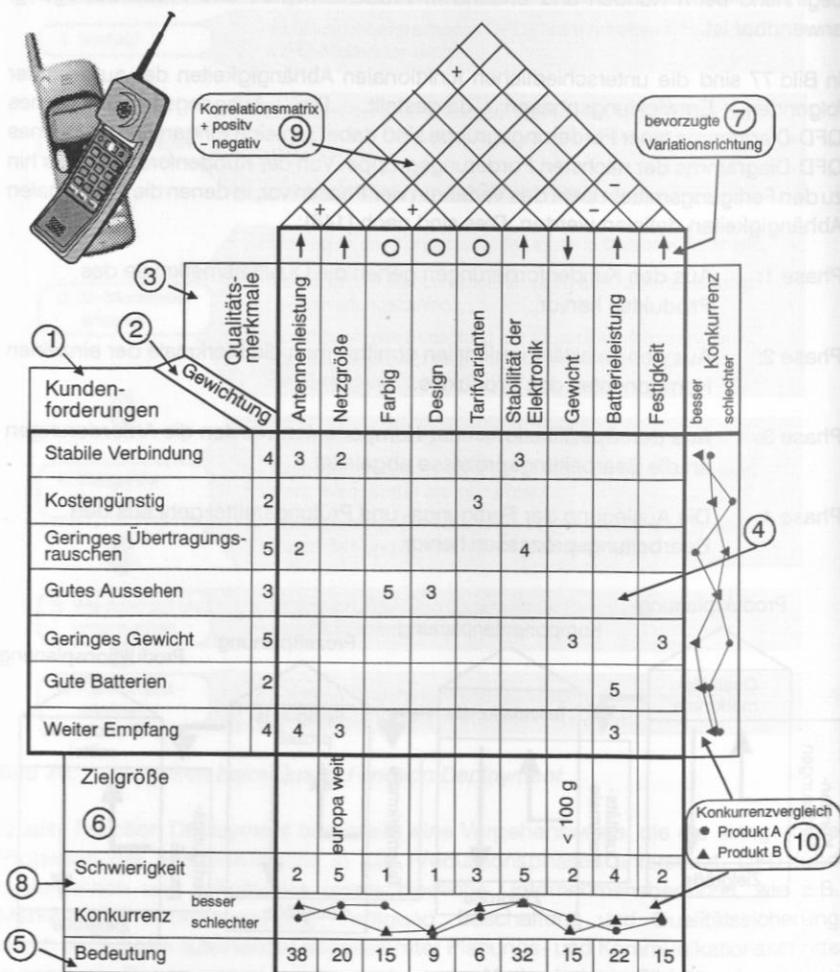


Bild 78: House of Quality bei der Produktplanung (Handy)

In der Prozeßkette rückschreitend werden die Anforderungen aus Bild 78 auf Anforderungen an Prozesse, Prüfungen und Komponenten heruntergebrochen (Bild 79 und Bild 80); der nachfolgende Prozeß wird dabei als Kunde des aktuellen Prozesses verstanden. Somit ist eine Rückverfolgung von Kunden Qualitätsansprüchen bis zur Leiterplattenherstellung möglich.

Auf Prozeßebene liefert QFD in der Elektronikproduktion selbst keine konkreten, quantifizierbaren Vorgaben; es wird hier durch andere Verfahren wie z.B. DoE (engl. *Design of Experiments*, Kapitel 6.3) ergänzt.

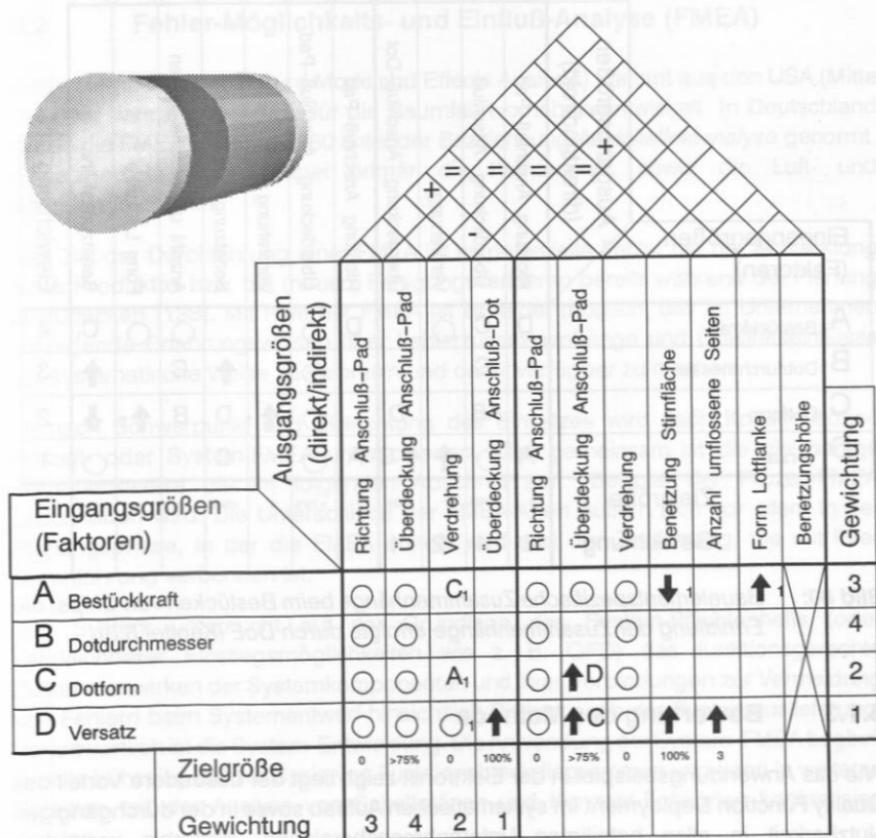


Bild 79: Bauelementspezifische Zusammenhänge beim Bestücken von MELFs, die Ermittlung der Zusammenhänge erfolgte durch DoE (Kapitel 6.3).

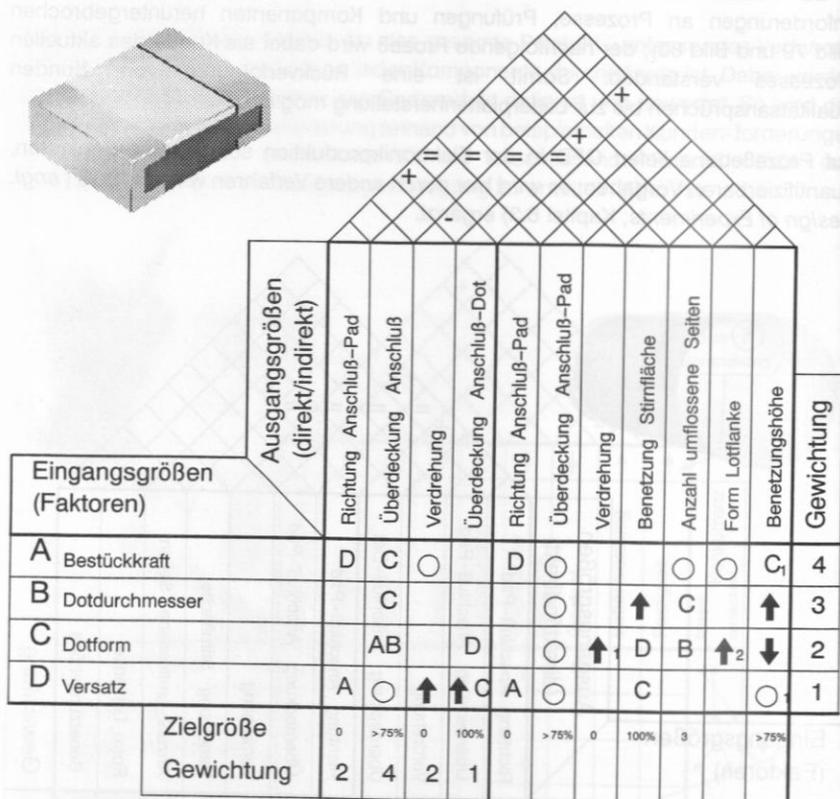


Bild 80: Bauelementspezifische Zusammenhänge beim Bestücken von Chips, die Ermittlung der Zusammenhänge erfolgte durch DoE (Kapitel 6.3).

6.1.3 Bewertung der Methode

Wie das Anwendungsbeispiel in der Elektronik zeigt, liegt der besondere Vorteil des Quality Function Deployment im systematischen Aufbau sowie in der durchgängigen Nutzbarkeit in allen beteiligten Unternehmensbereichen. Weiterhin verstärken Kundenbefragungen das Image des Unternehmens in Bezug auf seine Kundenorientierung und die Kommunikation im Unternehmen selbst verbessert sich.

Nachteilig ist der hohe personelle und planerische Aufwand (QFD-Spezialisten, Moderator, fachübergreifende Zusammenarbeit des Teams). Dieser kann zu einer Lähmung des Unternehmens führen und somit den Erfolg des QFD-Prozesses einschränken [59]. Dieses Verfahren gibt nur einen Hinweis zur

Qualitätsverbesserung, kann aber keine Rückschlüsse auf Prozeßeinstellungen und Parameter geben. Einer der gravierenden Nachteile von QFD ist aber seine Aufbauarchitektur, die schon bei einfachen Produkten im Rahmen des House of Quality unübersichtlich wird [148]. Aus Sicht auf die Prozesse der Leiterplattenfertigung, mit den komplexen Planungsaufgaben, ist es heute nur wirtschaftlich sinnvoll das QFD-Verfahren bis zur Komponentenplanung durchzuführen. Somit können die wirklichen Probleme nur sehr mühsam oder oft gar nicht analysiert werden.

6.2 Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse (FMEA)

Diese Methode (engl. Failure Mode and Effects Analysis) stammt aus den USA (Mitte der 60er Jahre) und wurde für die Raumfahrtvorhaben entwickelt. In Deutschland wurde die FMEA im Jahre 1980 unter der Bezeichnung *Ausfalleffektanalyse* genormt. Einsatzgebiete waren dabei primär die Kerntechnik, sowie die Luft- und Raumfahrttechnik.

Das Ziel der Durchführung einer FMEA ist es potentielle Fehler bei der Entwicklung eines Produktes bzw. bei (neuen) Fertigungsverfahren bereits während der Planung aufzudecken [138]. Mit Hilfe der FMEA ist es ferner möglich, das im Unternehmen vorliegende Erfahrungswissen über Fehlerzusammenhänge und Qualitätseinflüsse auf systematische Weise zu sammeln und damit verfügbar zu machen.

Je nach Schwerpunkt und Zielrichtung des Einsatzes wird nach Konstruktions-, Prozeß- oder System-FMEA unterschieden. Allen gemeinsam ist die gleichartige Vorgehensweise die im folgenden Abschnitt am Beispiel der Prozeß-FMEA beschrieben wird. Die Unterschiede der FMEA-Arten äußern sich vor allem in der Planungsphase, in der die FMEA erstellt wird und der Zielsetzung, die mit ihrer Durchführung verbunden ist.

Das System untersucht auf der Grundlage des System-Pflichtenhefts (oder vergleichbarer Einstiegsmöglichkeiten wie z. B. QFD) das funktionsgerechte Zusammenwirken der Systemkomponenten und ihrer Verbindungen zur Vermeidung von Fehlern beim Systementwurf hinsichtlich Risiken nach der Systemauslieferung. Verantwortlich ist die System-Entwicklung. Die Anwendung der System-FMEA beginnt bereits frühzeitig auf der Basis von Funktionsblockdiagrammen und kann in weiteren Schritten mit der Analyse von Schaltplänen und Konzept-Entwürfen konkretisiert werden.

Die Konstruktions-FMEA schließt sich an die Fertigstellung eines Entwurfes an. Ihre Aufgabe ist es, die potentiellen Fehler des Entwurfes aufzudecken, hinsichtlich ihrer Schwere zu bewerten und gegebenenfalls geeignete Abstellmaßnahmen vorzuschlagen. Das Ziel ist es somit, einen aus konstruktiver Sicht einwandfreien

Entwurf zu erhalten, der möglichst wenige Fehlermöglichkeiten aufweist und somit zu einem fehlerfreien Produkt führt.

Die Prozeß-FMEA setzt die Analyse der Fehlermöglichkeiten aus Sicht der Fertigung fort. Hierzu wird die FMEA nach der Erstellung der Arbeitspläne zur Herstellung des Produktes durchgeführt. Die Zielsetzung lautet hier, die Schwachstellen in den Fertigungsplänen aufzudecken, die möglicherweise zu Fehlern führen werden, ihre Schwere zu bewerten und ebenfalls geeignete Abstellmaßnahmen vorzuschlagen.

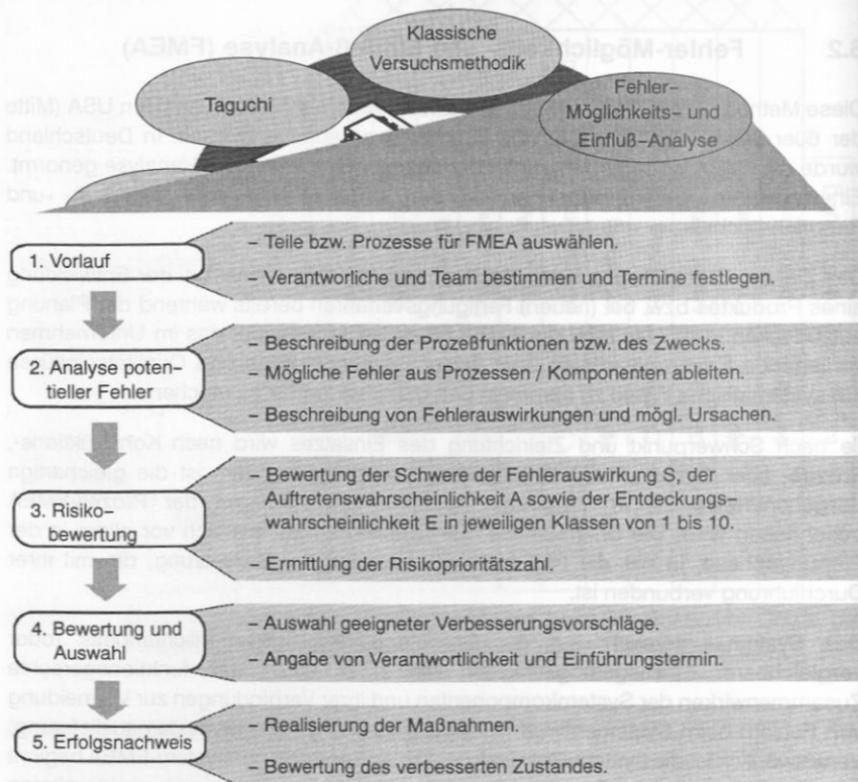


Bild 81: Vorgehensweise bei der FMEA

6.2.1 Beschreibung der FMEA - Methode

Die FMEA ist eine Schlüssel­methode auf dem Weg von der Fehlerkorrektur zur Fehlerprävention. Die Methode ist weitgehend fester Bestandteil der vorbeugenden Qualitätssicherung in Entwicklung und Fertigung [68]. Durch eine qualitative

Bewertung der Schwere der Fehlerauswirkung S , der Auftretenswahrscheinlichkeit A sowie der Entdeckungswahrscheinlichkeit E können mit Hilfe der Risikoprioritätszahl $RZ = S \times A \times E$ Schwachstellen oder Risiken aufgedeckt werden. Nach Ermittlung und Einführung geeigneter Verbesserungsmaßnahmen kann das Auftreten der Fehlerursache erschwert oder gar vermieden werden.

Die Grundvoraussetzungen für das erfolgreiche Anwenden der Methode sind einerseits das Vorgehen nach FMEA Arbeitsplan (Bild 81), andererseits die Verwendung des standardisierten Formulars (Abbildung 4-8) entsprechend DIN 2544. Damit können alle für die Analyse erforderlichen Fakten systematisch abgefragt und logische Zusammenhänge dargestellt werden.

Die FMEA ist ihrem Wesen nach eine bereichsübergreifende Methode, d.h. daß Mitarbeiter aus verschiedenen Abteilungen eines Unternehmens gemeinsam an der Erstellung einer FMEA arbeiten. Die Ursache hierfür liegt darin, daß aufgrund der heute in den Unternehmen üblichen tiefgreifenden Aufgabenteilung das Wissen bezüglich eines Produktes oder Prozesses, im allgemeinen, auf viele Personen verteilt vorliegt. Dieses gilt um so mehr für qualitätsrelevantes Wissen, wie es für die Erstellung einer FMEA benötigt wird, da die Produktqualität von nahezu allen Bereichen eines Unternehmens beeinflusst wird.

6.2.2 Anwendung in der Elektronikproduktion

Bild 82 zeigt (ausschnittsweise) ein FMEA-Formblatt in dem zwei Prozesse anhand von möglichen Fehlereinflüssen untersucht werden. Im ersten Fall wird der Bestückprozeß analysiert, wobei die Fehlerarten Bauteilversatz und Beschädigung der Bauelement-Leads betrachtet werden. Zu den Fehlerarten werden alle denkbaren Auswirkungen auf das System und alle denkbaren Fehlerursachen ermittelt. Anhand der Ursachen werden dann Ideen zur Fehlervermeidung und Fehlerentdeckung aufgelistet und anhand der Schwere der Fehlerauswirkung, der Auftretenswahrscheinlichkeit sowie der Entdeckungswahrscheinlichkeit einer Risikobewertung vollzogen. Anhand der so gewonnenen Risikoprioritätszahl wird die Dringlichkeit verschiedener Maßnahmen koordiniert werden. In der letzten Spalte werden diese zukünftigen Maßnahmen gegen die analysierten Fehlerfälle festgehalten und wenn nötig, Verantwortliche für die Probleme bestimmt. Als zweiter Prozeß wurde mit der FMEA der Lötprozeß untersucht und dabei die Fehlerart *Tombstone Effect* aufgliedert. Eine weitere Anwendung wird in Kapitel 8.6 vorgestellt.

6.2.3 Bewertung der Methode

Die bisher gemachten Erfahrungen mit der FMEA zeigen, daß die Methode grundsätzlich zu einer wesentlichen Reduzierung der Fehler in den Phasen der Produktentstehung beiträgt. Außer dem wirtschaftlichen Nutzen ergeben sich zusätzlich nicht quantifizierbare Vorteile, wie die Förderung des Qualitätsbewußtseins der Mitarbeiter, einem verbesserten Informations- und Erfahrungsaustausch und

Fehler – Möglichkeits- und Einfluß-Analyse												
Nr.	Komponente Prozeß	Funktion Zweck	Fehlerart	Fehler- auswirkung	Fehler- ursache	Fehler- vermeidung	Fehler- entdeckung	S	A	E	RPZ	Maßnahmen
1.	Bestück- pipette Positionier- einrichtung	Bestücken der Leiterplatten	Bauteil- versatz	kein Kontakt	Falsche Position vorgegeben	Positions- kontrolle	Vergleich von Solposition und Positions- vorgabe	8	7	3	168	Justierung der Anlage
					Ungenauigkeit der Zuführ- einrichtung	Zuführ- einrichtung justieren	Statistisch ähnlich ver- teilte Positions- fehler aller Bauteile	5	9	4	180	Justierung der Anlage
			Schädigung der Bauteil - Leads	Bauteil Fehlfunktion oder keine Funktion	zu hohe Bestückkraft	Bestückkraft überwachen	Verbogene Bauteil - Leads	3	4	2	24	Kraftkontrolle
2.	Lötprozeß	Feste Verbindung zwischen Bauteil und Platine	Bauteil löst sich einseitig von der Leiterplatte (Tombstone Effect)	Elektronische Schaltung nicht funktionsfähig	Temperatur- profil nicht abgestimmt	Kontrollierte Temperatur- führung	Bauteile sind aufgerichtet	9	8	1	72	Temperatur einstellung ändern
					Lötverfahren negativ (Dampf - phasenlöten)	Anderes Löt- verfahren wählen		9	8	1	72	Lötverfahren ändern
S =	Schwere des Fehlers											
E =	Entdeckungswahrscheinlichkeit											
	A = Auftretenswahrscheinlichkeit											
	RPZ = Risikoprioritätszahl											

Bild 82: Exemplarisches FMEA-Formblatt in der Elektronikproduktion (Ausschnitt)

einer Förderung der bereichsübergreifenden Zusammenarbeit. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß die Methode konsequent und gezielt eingesetzt wird, wobei vor allem eine ausgereifte Organisation der Abläufe und die Bewältigung des hohen Aufwandes, gerade zu Beginn des Einsatzes, zu beachten sind [185].

Als problematisch an der Anwendung einer Fehler-Möglichkeit und Einfluß-Analyse erweist sich das Abschätzen der Risikoprioritätszahl. Eine einfache Rechnung zeigt dieses sehr deutlich. Nimmt man an, daß aufgrund der Subjektivität die Risikozahlen um ± 1 variieren, so ergibt sich für ein wahres Risiko von 5 für Auftreten, Bedeutung und Entdeckung eine Bandbreite von 64 (= 444) bis 216 (= 666) für die Risikoprioritätszahl. Diese Unschärfe der Risikoprioritätszahl macht nach [157] den Unterschied zwischen "kein Handlungsbedarf" und "unbedingter, akuter Handlungsbedarf" aus.

Für eine fundierte Bewertung eines Fehlers werden umfangreiche Informationen über das Risikopotential benötigt. Beispielsweise erfordert eine Prozeß-FMEA Kenntnisse über die spezifische Prozeßfähigkeit, um das Auftreten von Fehlern abschätzen zu können. Darüber hinaus sollte man von einer FMEA keine Lösung für die Beseitigung von Fehlerursachen erwarten. Sie stellt nur die Fragen offen und präzise und muß durch andere Methoden ergänzt werden.

6.3 DoE - Design of Experiments

Die Versuchsplanung dient zur systematischen und rationellen Informationsgewinnung und zur Qualitätsverbesserung. Sie kann sowohl in der Planungsphase als auch in der Fertigungsphase von Produkten oder Prozessen eingesetzt werden.

Zur Anwendung statistischer Versuchsmethoden sind die drei Vorgehensschritte Planung, Durchführung und Analyse empfohlen. Es ist von grundlegender Bedeutung, daß möglichst viel Fachwissen in die Untersuchung einfließt, um Fehlplanungen und Fehlinterpretationen vorzubeugen. Die Untersuchungen sollten von einem interdisziplinären Team durchgeführt werden, dem neben Fachleuten auf dem Gebiet der Versuchsmethodik und Statistik auch Personen angehören, die mit dem zu untersuchenden Prozeß technologisch vertraut sind. Dabei ist insbesondere zu beachten, daß der Erfolg der Analyse im hohem Maße von der Zusammenarbeit mit dem Maschinenbediener abhängt.

6.3.1 Klassische Verfahren

Die klassischen Versuchsmethoden bieten die Möglichkeit der gleichzeitigen Untersuchung mehrerer Faktoren. Um den Versuchsaufwand in einem vertretbaren Rahmen zu halten, ist die Anzahl der zu untersuchenden Einstellungen je Faktor in der

Regel auf zwei beschränkt. Dies reicht zur Bestimmung der Signifikanz der Faktoren und Ermittlung optimaler Einstellbereiche in den meisten Fällen aus [78].

Zu den Methoden zählen hauptsächlich einfaktorielle Untersuchungen und teil- bzw. vollfaktorielle Versuchspläne.

Einfaktorielle Untersuchung

Einfaktorielle Versuche stellen die einfachste Methode dar und sollen hier nur aus Gründen der Gesamtheit angeführt werden. Beim Einsatz dieses Verfahrens wird jeweils ein Faktor variiert, während alle anderen konstant gehalten werden.

Wie bei allen bereits beschriebenen Verfahren der Qualitätssicherung soll auch bei den verschiedenen Verfahren der Versuchsmethodik die Anwendung dieser in der Elektronikproduktion mittels eines Beispiels kritisch bewertet werden. Im folgenden werden deshalb Einflüsse auf den Dispensprozeß untersucht, der als eine Variante des Lotpastenauftrages 60-70% der Fehler verursacht. Druck, Nadellänge und -durchmesser werden hierbei stellvertretend untersucht. [163][186]

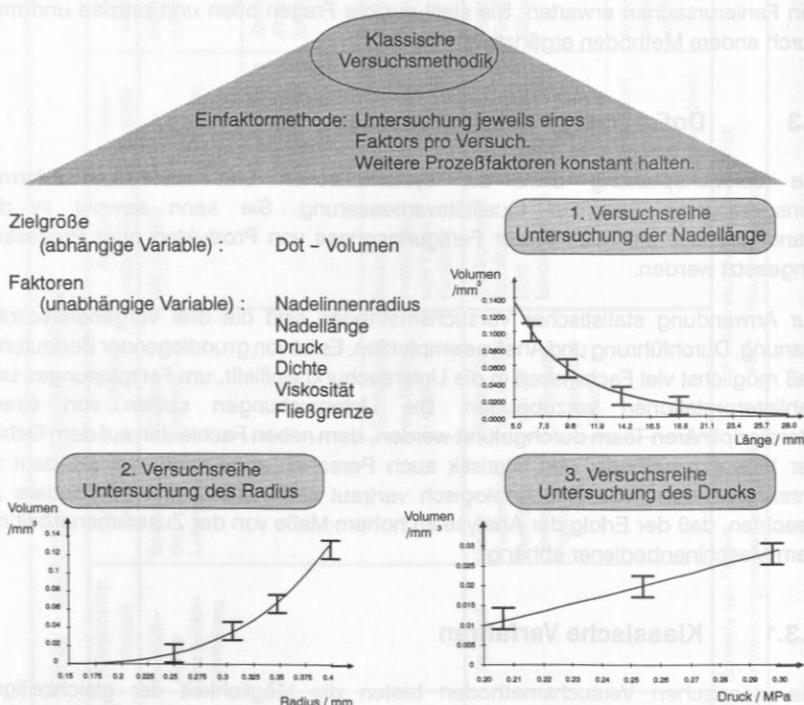


Bild 83: Konventionelle Versuchsdurchführung mit der Einfaktormethode (mehrstufige Versuchspläne)

Das Lotvolumen wird in der Praxis von mehreren Parametern bestimmt, wobei im Einfaktortest jeweils nur ein Parameter variiert wird. Beispielhaft wurden mit dem Einfaktortest die Nadellänge, der Nadelinnenradius und der Druck in der Dispenskartusche analysiert. In Bild 83 sind die Ergebnisse der drei Versuchsreihen dargestellt.

Die Einfaktormethode stellt eine reproduzierbare Vorgehensweise dar und bietet somit, trotz ihrer großen Einfachheit, eine wichtige Verbesserung gegenüber jedem ungeplanten Vorgehen. Im Vergleich zu den anderen Verfahren der Versuchsmethodik besitzt die Einfaktormethode jedoch signifikante Nachteile. Wechselwirkungen zwischen den Faktoren sind schwer zu erkennen, da nur jeweils ein Faktor variiert wird. Somit kann der Versuchsplan als sehr beschränkt aufgefaßt werden, da man auf einen Faktor festlegt ist. Weiterhin können Störeinflüsse nur schwer eliminiert bzw. ausgemittelt werden.

Diese Nachteile sind auch in Bild 83 zu erkennen und gelten so insbesondere für alle Prozesse, die von mehreren Parametern beeinflusst werden und somit auch für die Elektronikproduktion. Anhand dieser Nachteile wurde der im folgenden beschriebene faktorielle Versuchsplan entwickelt.

Vollfaktorielle Untersuchung

Eine wichtige Methode, um neben dem direkten Einfluß von Faktoren auch deren Wechselwirkungen auf die Zielgröße zu untersuchen, ist der (voll-)faktorielle Versuch. Im Gegensatz zur Einfaktormethode werden hier mehrere Faktoren ausgewogen und gleichzeitig gegeneinander variiert. Dadurch wird es möglich, Mittelwerte über die Einstellungen zu bilden und sogenannte Effekte zu berechnen. Man unterscheidet zwischen Haupteffekten, die auf der Verstellung eines Faktors beruhen und Wechselwirkungseffekten, die auf die gleichzeitige Verstellung mehrerer Faktoren zurückgehen. Die Mittlung der Versuchsergebnisse bei der Bildung von Effekten bietet einen wesentlichen Vorteil gegenüber der Einfaktormethode, da sie eine bessere Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf den realen Prozeß ermöglicht [172].

Die Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans, soll wieder am Problemkreis des Lotvolumens beim Dispensprozeß aufgezeigt werden. Dabei werden drei Prozeßparameter als Faktoren im Versuchsplan ausgewertet. Die Faktoren sind wiederum die Nadellänge, der Nadelinnendurchmesser und die Druckdifferenz. Es hätten jetzt auch andere Prozeßparameter untersucht werden können, aber zum besseren Vergleich der beiden Verfahren sollen diese drei Faktoren nochmals analysiert werden. Der Versuchsplan läßt sich in der in Bild 84 dargestellten Form beschreiben, bei der die Ergebnisse der einzelnen Versuchspunkte in der jeweiligen Tabellenzeile eingetragen werden. So ergibt z.B. eine Nadellänge von 5 mm, ein Nadelinnenradius von 0,4 mm und eine Druckdifferenz von 0,2 MPa ein Lotvolumen von 0,5 mm³. Es gibt auch die Möglichkeit den Versuchsplan in einem Quadrat darzustellen, dies ist aber nur bei Versuchen mit nur zwei Faktoren sinnvoll.

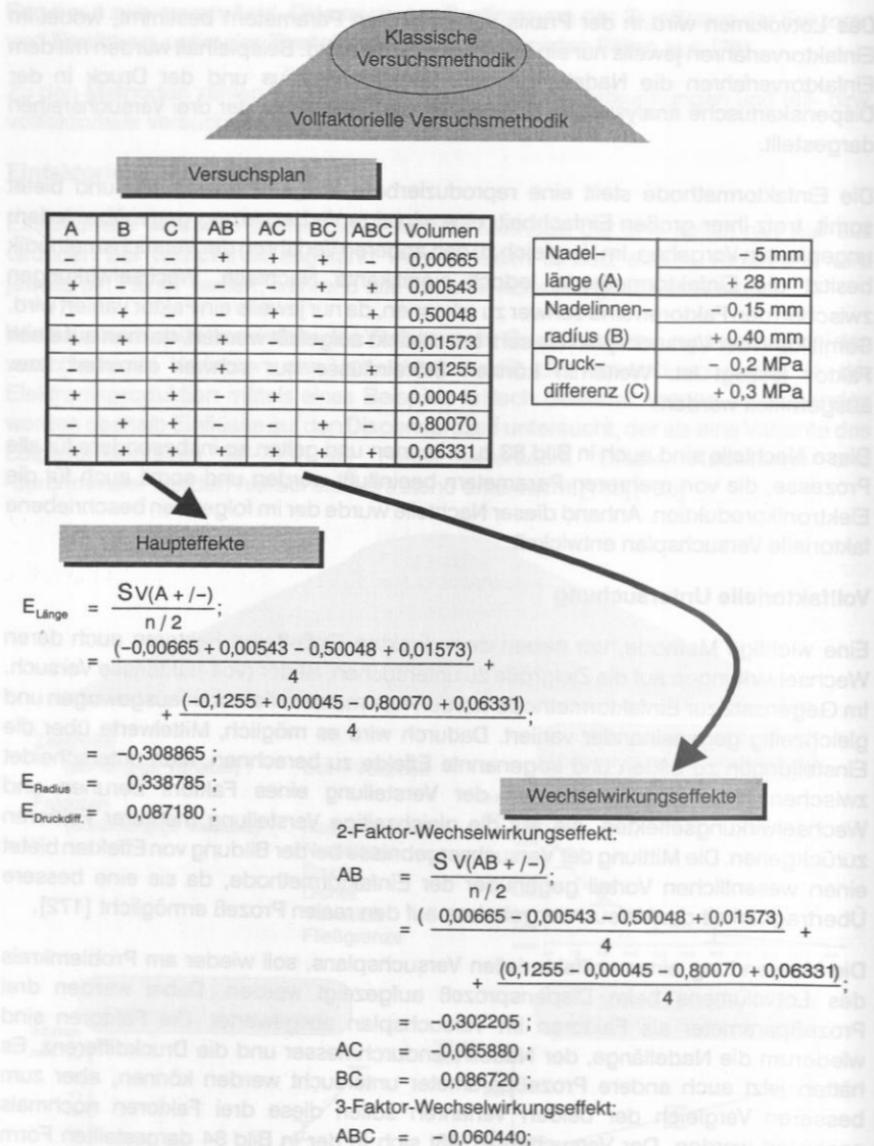


Bild 84: Versuchsplan und Effekte bei vollfaktorieller Versuchsmethodik

Um den Schreibaufwand zu reduzieren, wird die codierte Nomenklatur verwendet, um Faktoren und ihre Einstellungen zu bezeichnen. Dabei werden die Faktoren üblicherweise mit A, B, C, D,... benannt, ihre Einstellungen mit (+) und (-). Die Auswertung ist in Bild 84 dargestellt.

Neben der Ermittlung der bereits geschilderten Haupteffekte liegt die Stärke faktorieller Versuchspläne in der Ermittlung der Effekte von Wechselwirkungen. Im statistischen Sinn ist die Wechselwirkung zwischen zwei Faktoren als das Maß der gegenseitigen Beeinflussung der Zielgröße durch zwei oder mehr Faktoren definiert.

Wie in der Abbildung zu sehen, sind die Effekte von Radius und Länge stärker wie der des Drucks, wodurch zu erkennen ist, daß der Radius und die Länge für das Dotvolumen die ausschlaggebenden Größen darstellen. Die Länge beeinflusst das Volumen negativ, d.h. bei größeren Nadellängen wird das Dotvolumen kleiner. Der Effekt des Nadelinnenradius ist positiv, d.h. das Dotvolumen wächst mit einem Anstieg beim Radius.

Bei der zweiten Ergebnisgruppe, den Wechselwirkungen, ist nur die Wechselwirkung zwischen Nadellänge und Nadelinnenradius stark ausgeprägt. Die anderen Wechselwirkungen sind nur sehr schwach, was aber nicht bedeutet, daß sie unwichtig sind.

Die Ergebnisse in Bild 84 zeigen die prinzipiell hohe Aussagefähigkeit der vollfaktoriellen Versuchspläne. Nachteile entstehen jedoch durch die Begrenzung auf zwei Einstellungen, wie sie bei industriellen Versuchsdurchführungen stattfindet. Dies geschieht, um die Zahl der durchzuführenden Versuche gering zu halten. Es führt aber gleichzeitig dazu, daß eine Linearität des Prozesses postuliert wird. Diese ist für die Prozesse der Elektronikproduktion in der Regel aber nicht gegeben, wie Beispiele zeigen [28]. Die Möglichkeit, mehr als zwei Einstellungen je Parameter zu testen, besteht zwar, aber es sind heute nur wenige rechnergestützte Werkzeuge zur Durchführung der wesentlich komplexeren Versuchsplanungen und Effektberechnungen vorhanden.

Ein weiterer Grund für die Selbstbeschränkung auf zwei Einstellungen je Parameter in der industriellen Praxis liegt wohl darin, daß die bei mehr Einstellungen gewonnenen Prozeßmodelle nur sehr schwierig zu interpretieren und noch schwieriger in bestehende Regelstrategien zu integrieren sind.

Teilfaktorielle Untersuchung

Um den Versuchsaufwand besonders bei mehreren Einflußfaktoren zu reduzieren, wurde die teilfaktorielle Versuchsmethodik entwickelt. Bei diesen Versuchsplänen werden die Spalten der Wechselwirkungen noch zusätzlich mit Faktoren belegt. Somit können nahezu doppelt so viele Faktoren bewertet werden, wie bei der vollfaktoriellen Versuchsmethodik (Tabelle 16). Der Aufbau eines teilfaktoriellen Versuchsplans folgt ansonsten dem Konzept der vollfaktoriellen Versuchsmethodik. Dabei werden aber keine Wechselwirkungen zwischen den Faktoren berücksichtigt. Aus diesem Grund wird hier nicht nochmals eine Problemstellung der Elektronikproduktion untersucht. Vorteile und Probleme dieses Verfahrens sind auch so klar erkennbar.

Die Restriktion (keine Wechselwirkungen) darf aber nur dann gemacht werden, wenn feststeht, daß die Wechselwirkungen nur sehr geringen Einfluß auf den zu untersuchenden Prozeß haben. Eine solche Belegung des Versuchsplans sollte also ohne vorherige Kenntnis der Auswirkungen der Einflußfaktoren nicht durchgeführt werden. Da die Wechselwirkungen und die Auswirkungen der Einflußfaktoren vor der Durchführung des Versuchs bei den meisten Aufgabenstellungen nur schwer abzuschätzen sind, können diese Versuchspläne meist zu falschen Ergebnissen führen.

Anzahl der Versuche	Anzahl der Faktoren	
	vollfaktoriell	teilkfaktoriell
4	2	3
8	4	7
16	8	15
32	16	31
64	32	63

Tabelle 16: Vergleich des Versuchsaufwandes bei voll- und teilkfaktoriellen Versuchsplänen; dabei wird angenommen, daß jeweils nur zwei Parametereinstellungen benötigt werden.

6.3.2 Versuchsmethodik nach Taguchi

Neben der klassischen Versuchsmethodik werden Verfahren eingesetzt, die eine drastische Reduzierung der Versuchszahlen versprechen. Der wohl bekannteste Ansatz sind die Verfahren von Taguchi. Es handelt sich hierbei um vorgegebene teilkfaktorielle orthogonale Versuchspläne, bei denen durch Vorauswahlverfahren nur starke Einflußfaktoren eingesetzt werden sollen. Werden solche eingesetzt, die mit anderen keine Wechselwirkung bilden, dann können alle Spalten mit Faktoren belegt werden. Sollen sie jedoch mit ausgewertet werden, dann sind für sie die vorgegebenen Spalten zu reservieren. Als Unterschied gegenüber der traditionellen Versuchsmethodik besitzen Taguchi's Versuchspläne *innere und äußere Felder*, um bestimmbare Störparameter von bestimmbaren Einflußparametern zu trennen.

Das Vorgehen zu Taguchi's Versuchsmethodik zeigt Bild 85. Wesentlicher Punkt ist die Planung der Versuche. Am Beispiel des Dotvolumens beim Dispensprozeß wird im folgenden das Verfahren erläutert und bewertet.

Nach Festlegung der zu untersuchenden Prozeßparameter wird zwischen beeinflussbaren (den Einflußgrößen) und nicht beeinflussbaren (den Störgrößen) unterschieden (Tabelle 17). So kann beispielsweise die Nadellänge beeinflusst werden, indem man verschiedene Dispensnadeln verwendet. Dagegen kann die Fließgrenze

des Lotmaterials nur bedingt vorgeschrieben werden, da weitere Faktoren wiederum diesen Parameter beeinflussen.



Bild 85: Vorgehen bei der Taguchi Versuchsmethodik

	Parameter	Bezeichnung	Stufe 1	Stufe 2
Steuerparameter	A	Nadellänge / mm	9,00	28,00
	B	Nadelinnenradius / mm	0,15	0,38
	C	Wechselwirkung AxB		
	D	Druckdifferenz / MPa	0,20	0,30
	E	Wechselwirkung AxD		
	F	Wechselwirkung BxD		
Störparameter	G	Dispenszeit / s	0,09	0,13
	H	Fließgrenze der Lotpaste /kPa	0,80	1,20

Tabelle 17: Einfluß- und Störgrößen beim Dispensprozeß

In der orthogonalen Matrix werden die Stufen der Einfluß- und Störfaktoren für jedes Experiment festgelegt (Tabelle 18). Zur Verringerung des Versuchsaufwandes werden nicht alle denkbaren Kombinationen von Einfluß- und Störfaktoren in die Matrix

aufgenommen, sondern nur ausgewählte. Taguchi schlägt bestimmte Matrizen vor, deren Herkunft er jedoch verschweigt [147]. Für jedes Feld der Matrix werden mit den zugehörigen Faktorwerten die Daten für das Qualitätsmerkmal Dotvolumen bestimmt. Zeilenweise berechnet man daraus anhand der Versuchsergebnisse für die jeweilige Kombination der Einflußfaktoren das von Taguchi entwickelte Signal-Rausch(S/N)-Verhältnis (Tabelle 18).

Exp. Nr.	A	B	C	D	E	F	2	2	1	1	G
							2	1	2	1	H
							1	2	2	1	GH/S/N
1	1	1	1	1	1	1	0,001010	0,002945	0,000699	0,002039	-1,176500
2	1	1	1	2	2	2	0,004417	0,006746	0,003058	0,004671	-1,042008
3	1	2	2	1	1	2	0,200144	0,240149	0,138561	0,166257	12,645805
4	1	2	2	2	2	1	0,360222	0,400621	0,249385	0,277353	2,079456
5	2	1	2	1	2	1	0,016053	0,001671	0,011113	0,001157	-0,922167
6	2	1	2	2	1	2	0,002506	0,000001	0,001735	0,000002	-1,203350
7	2	2	1	1	2	2	0,002561	0,026249	0,001773	0,018172	-0,716579
8	2	2	1	2	1	1	0,039973	0,074937	0,027258	0,051879	1,096655
T = 1,345164											

Tabelle 18: Versuchsplan nach Taguchi mit S/N - Verhältnis

Anhand des ausgewerteten Versuchsplans wird die Reaktionstabelle (Tabelle 19) ermittelt. Effekte und Wechselwirkungen werden dort anhand des S/N-Verhältnisses angegeben.

	A	B	C	D	E	F
Einstellung1	3,126688	-1,08601	-0,45961	2,457640	2,840653	0,269361
Einstellung2	-0,43636	3,776335	3,149936	0,232688	-0,15032	2,420967
Abweichung	-3,56305	4,862341	3,609544	-2,22495	-2,99098	2,151606

Tabelle 19: Reaktionstabelle nach Taguchi

$$\mu = T + (A_1 - T) + (B_2 - T) + (C_1 - T) + [(A_1 B_2 - T) - (A_1 - T) - B_2] + [(A_1 C_1 - T) - (A_1 - T) - C_1] + [(B_2 C_1 - T) - (B_2 - T) - C_1]$$

Formel 5: Berechnung des Erwartungswertes aus den Parametern, T und andere Werte siehe Tabelle 18

Anhand der ermittelten statistischen Werte stellt Taguchi eine Vorhersage auf. Diese Vorhersage gibt ein S/N-Rauschverhältnis an, wonach die untersuchte Prozeßgröße den Anforderungen gerecht wird. Die Vorhersage wird nach Formel 5 berechnet, wobei die Wechselwirkungsterme nur bei vorhandener Wechselwirkung einbezogen werden müssen. Wie aus der Reaktionstabelle zu erkennen ist, sind die drei Wechselwirkungen AxB, AxC und BxC nicht zu vernachlässigen und müssen somit bei

der Berechnung berücksichtigt werden. Zunächst müssen aber die Wechselwirkungen untersucht werden, um festzustellen, welche Einstellungskombination das höchste S/N-Verhältnis hat. Dabei ergeben sich die Wechselwirkungen $A_1 \times B_2$, $A_1 \times C_1$ und $B_2 \times C_1$ als beste Kombinationen.

Nun muß die optimale Einstellung gefunden werden, die der Vorhersage eines S/N-Verhältnisses von 7,138 entspricht. Anhand der Größenordnung des S/N-Verhältnisses wird die optimale Einstellung zwischen der S/N - Werten von 2,08 und 12,65 festgelegt (Tabelle 20).

Nadellänge / mm	9,00
Nadelinnenradius/mm	0,38
Differenzdruck / MPa	0,256

Tabelle 20: Optimale Einstellung zur Erzielung eines Dots von $0,2 \text{ mm}^3$ nach Taguchi

Der Bestätigungsversuch zeigt ein S/N-Verhältnis von 6,683 und somit ist die Vorhersage erfüllt. Es kann bei dieser Einstellung mit einem Lotvolumen von $0,2 \text{ mm}^3$ gerechnet werden.

Auch bei Taguchi entstehen die Probleme erst bei der praktischen Anwendung. Taguchi verwendet eine Zweiteilung in Steuer- und Störfaktoren, wodurch der Versuchsaufwand vergrößert wird, denn es müssen sowohl Einfluß- als auch Störgrößen bei der Messung festgehalten und ermittelt werden. Da eine Unterscheidung zwischen Steuer- und Störgrößen in realen Prozessen oft nicht exakt getroffen werden kann, führt auch die Verteilung der Prozeßparameter auf beiden Faktorgruppen zu Schwierigkeiten [148]. Zeigen dazu die Prozeßparameter noch Wechselwirkungen, so können keine weiteren Faktoren aufgenommen werden. Damit muß auch bei Taguchi zuerst geklärt werden, ob der Prozeß Wechselwirkungen aufweist, was in der Praxis sehr problematisch ist. Weiterhin ist die Bestimmung des optimalen Versuchspunktes problematisch, da Taguchi nur eine Vorhersage des S/N-Verhältnisses, aber keine Informationen über die tatsächlichen Faktoreinstellungen angibt.

6.3.3 Versuchsmethodik nach Shainin

Shainins Versuchsmethodik dient, wie Taguchis Methode, zur experimentellen Optimierung von Produkten und Prozessen. Die Versuchsplanung nach Shainin stellt ein schrittweises Vorgehen dar, bei der starke Einflußfaktoren in mehreren Schritten und verschiedenen Verfahrensmöglichkeiten gefunden werden können. Dieses Verfahren läßt sich sehr gut bei der Optimierung von Fertigungsprozessen anwenden. Durch das schrittweise Eingrenzen können mit diesem Verfahren deutlich mehr Faktoren (bis zu 1000) untersucht werden.

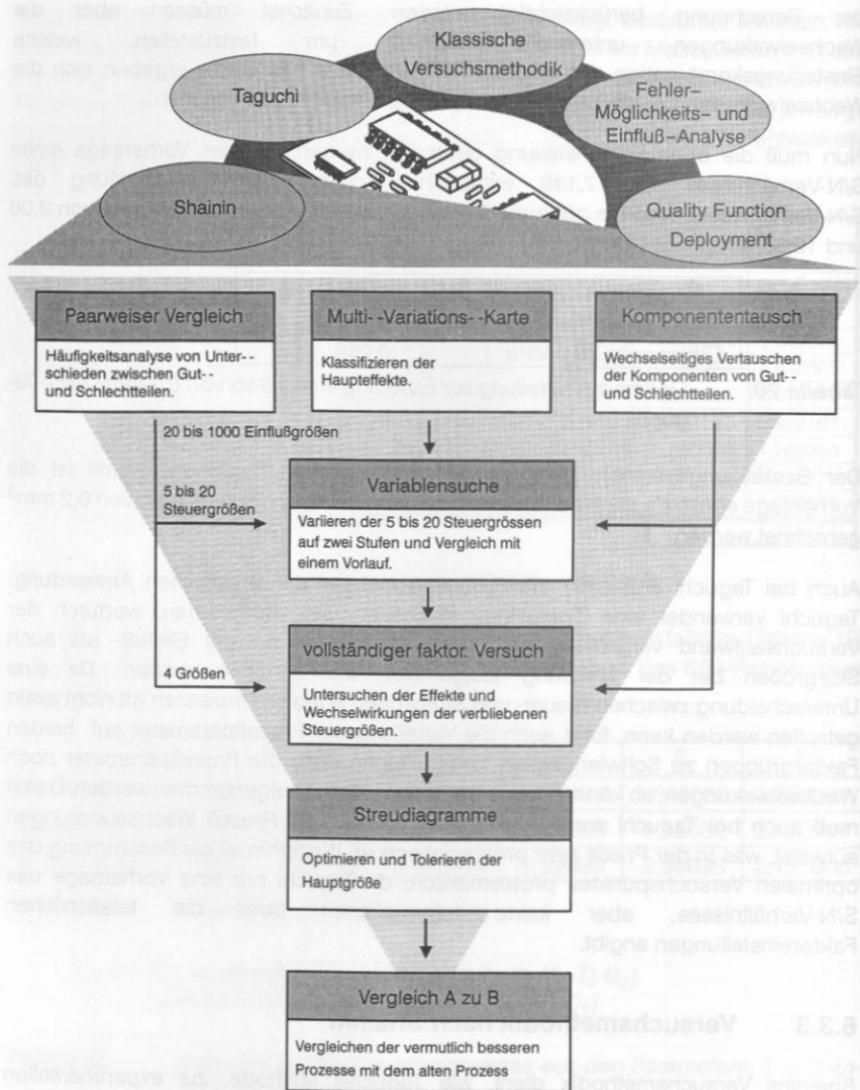


Bild 86: Versuchsmethodik nach Shainin [170]

Für die Durchführung der Versuche müssen dabei Versuchsteile vorliegen. Während der Planung der Produktion sind hierzu Prototypenserien erforderlich. Zum Zeitpunkt der Fertigung können die Einheiten der laufenden Fertigung entnommen werden. Das grundsätzliche Vorgehen zur Durchführung der Methode zeigt Bild 86 [170].

Je nach den Gegebenheiten kommen zur Ermittlung der relevanten Einflußgrößen im ersten Schritt unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz. Ist eine Zerlegung des Produktes unmöglich oder unerwünscht, so kann der paarweise Vergleich genutzt werden. Paarweiser Vergleich bedeutet, daß aus einer hinreichenden Anzahl an Bauteilen so viele gute und schlechte Bauteile verglichen werden, bis sich beobachtbare Unterschiede anhand eines Wiederholmusters ergeben. Daraus werden Schwachstellen von Prozeßparametern ermittelt.

Den Komponententausch setzt man bei zerlegbaren, komplexen Bauteilen ein, wobei die Komponenten eines schlechten und eines guten Produktes paarweise vertauscht werden. Aus dem Einfluß der verschiedenen Komponenten ergeben sich Hinweise, welche Teile die Qualität des Bauteils beeinflussen.

Die Multi-Variations-Karten werden auch im ersten Schritt angewendet. Im Prinzip entsprechen sie Regelkarten, da sie die zeitliche Reihenfolge der Meßwerte darstellen. Die weiteren Vorgehensschritte folgen der Bild 86 und werden anhand des Anwendungsbeispiels aus der Elektronikproduktion näher erklärt.

Als Anwendungsbeispiel, um Shainin's Versuchsmethode bewerten zu können, dient wiederum die Dotvolumenuntersuchung. Als Grundlage der Anwendung dienen 20 Faktoren, die im ersten Schritt als wichtige Einflußgrößen erkannt wurden. Diese 20 Prozeßparameter werden in der Variablensuche, ähnlich dem Komponententausch, anhand eines schlechten und guten Prozesses jeweils paarweise vertauscht. Das Ergebnis des Tausches wird bewertet, und die Steuergrößen, die eine signifikante Veränderung im Ergebnis aufzeigen, werden als Red oder Pink X in den nächsten Analyseschritt übernommen.

Der Anwendungsfall Lotvolumenoptimierung verfügt somit über die geforderten vier essentiellen Steuerparameter, die in Tabelle 21 zusammengefaßt sind.

Nr.	Benennung	Einstellung -	Einstellung +
A	Nadellänge / mm	5,00	28,00
B	Nadelinnendurchmesser / mm	0,15	0,40
C	Druckdifferenz / MPa	0,20	0,30
D	Fließgrenze / kPa	0,60	1,40

Tabelle 21: Untersuchte Einflußfaktoren und gewählte Einstellungen

Im dritten Schritt der Shainin-Versuchsmethodik wird ein vollfaktorieller Versuchsplan aufgestellt. Da in der Praxis 3-Faktor- und 4-Faktorwechselwirkungen meistens nur sehr geringe Bedeutung aufweisen, werden diese nicht mit ausgewertet.

Für jede Faktorkombination werden drei Messungen durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt (y_m) (Tabelle 22). Anhand der y_m -Werte errechnet man die durchschnittliche

Wirkung beider Einstellungen eines jeden Faktors wie bei Taguchi und trägt sie in die Reaktionstabelle ein (Tabelle 23).

	Faktoren				2 - Faktor Wechselwirkung						Meßwerte			
	A	B	C	D	AB	AC	BC	AD	BD	CD	y ₁	y ₂	y ₃	y _m
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0.006536	0.010301	0.009308	0.008715
2	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	0.000047	0.000064	0.000087	0.000066
3	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	0.548073	0.577360	0.495971	0.540468
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	0.049835	0.056560	0.038493	0.048296
5	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	0.017294	0.019216	0.007434	0.014648
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	0.000421	0.000357	0.000254	0.000344
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0.656491	1.045693	0.819973	0.840719
8	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	0.088758	0.124390	0.090245	0.101131
9	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	0.004658	0.005123	0.004241	0.004674
10	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	0.022404	0.033261	0.027438	0.027701
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	0.494972	0.469162	0.417608	0.460581
12	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	0.000098	0.000081	0.000076	0.000085
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	0.007251	0.012440	0.011749	0.010480
14	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	0.005314	0.006206	0.005164	0.005561
15	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	0.985590	0.664613	0.631912	0.760705
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0.041227	0.026815	0.023462	0.030501

Tabelle 22: Vollfaktorieller Versuchsplan nach Shainin für die Werte aus Tabelle 21

	A	B	C	D		
+	0,213685	2,782486	1,764089	1.300288		
-	2,640990	0,072189	1,090586	1,554387		
	-2,42730	2,710297	0,673503	-0,25409		
	AB	AC	BC	AD	BC	CD
+	0.218530	1.151975	1.774212	1.473317	1.275645	1.404792
-	2.636145	1.702700	1.080463	1.386277	1.579030	1.449883
	-2.41761	-0.55072	0.693749	0.087040	-0.30338	-0.04509

Tabelle 23: Reaktionstabelle aus dem vollfaktoriellen Versuchsplan (Tabelle 23)

Aus der Höhe der Meßwertdifferenz (unterste Zeile; Tabelle 23) der beiden Indizes eines jeden Faktors wird erkannt, wie stark der Einfluß dieses Faktors ist. Die höchsten Werte bei den Indizes eines jeden Faktors geben die beste Einstellung dieses Faktors an. Anhand dieser Werte ermittelt man die beste Einstellungskombination. Im Anwendungsproblem der Lotvolumenoptimierung sind der Faktor A: Nadellänge und der Faktor B: Nadelinnerradius als Haupteinflußgrößen (RED und PINK X) erkennbar, da sie die größten Differenzwerte besitzen. Der Optimierungsvorschlag lautet gemäß Tabelle 23 A-, B+, C+ und D-. Da aber nur jeweils zwei Einstellungen untersucht

wurden, fordert Shainin für die Haupteinflußgrößen noch eine weitere Optimierung im Streudiagramm. Deshalb wurden nochmals mehrere Meßwerte über beide Faktoren ermittelt. In Bild 87 sind die Ergebnisse aufgetragen, wobei ein klares Optimum bei einer Nadellänge von 5,0 mm und einem Nadelinnendurchmesser von 0,4 mm gefunden wurde.

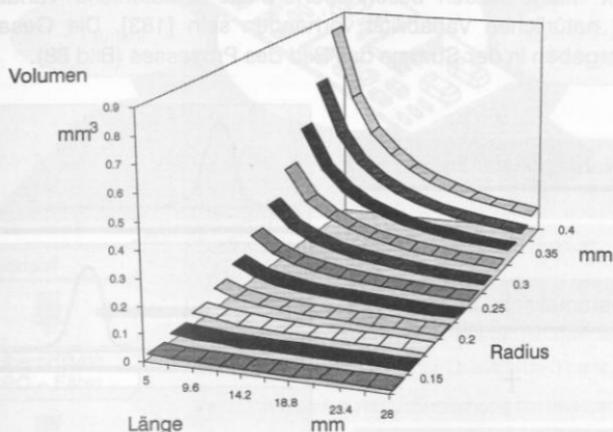


Bild 87: Streudiagramm zum Optimieren und Tolerieren der Hauptgröße

Einschränkend bzgl. einer breiten Anwendung ist bei Shainin die Fixierung auf ein Optimum, wodurch Probleme mit Nominalwertcharakter nur schwer oder überhaupt nicht analysiert werden können. Weiterhin ist für Shainin's Versuchsmethodik viel Zeit für Vor- und Hauptversuche nötig, wobei natürlich weit aus mehr Einflußfaktoren gegenüber den anderen Verfahren der Versuchsmethodik bewertet und analysiert werden können. In der Bewertung einer derart großen Zahl von Einflußparametern, bis zu 1000 können durch Shainin analysiert werden, liegt die Gefahr von fehlerhaften Vorklassifikationen der Parameter, wodurch manche Versuchsreihen unnütz durchgeführt werden und es auch zu falschen Schlußfolgerungen kommt [4].

6.4 Statistische Prozeßregelung

Die statistische Prozeßregelung (SPC) ist eine der bekanntesten Qualitätstechniken. Über sogenannte Qualitätsregelkarten wird das statistische Verhalten eines Prozesses beschrieben. Diese Karten geben Hinweise auf Prozeßstörungen und ermöglichen den Aufbau von Regelkreisen zur optimalen Prozeßführung. Die SPC wurde in den 30er Jahren von Walter Shewhard und seitdem auf breiter Basis mit unterschiedlichem Erfolg eingesetzt [75].

Die grundlegende Idee der statistischen Prozeßregelung war die Erkenntnis, daß alle Prozesse Variabilität aufweisen. Es gibt keinen Prozeß ohne einen gewissen

Variabilitätsfaktor. Diese Variabilität kann in zwei Gruppen eingeteilt werden, in den natürlichen und den unnatürlichen Anteil. Der natürliche Anteil der Variabilität ist bei jedem Prozeß vorhanden. Dieser Anteil kann sehr groß oder auch sehr klein sein, ist Bestandteil des Prozesses und kann mathematisch beschrieben werden. Der unnatürliche Anteil der Variabilität dagegen ist nicht Bestandteil des Prozesses und läßt sich nicht mathematisch beschreiben. Diese unnatürliche Variabilität kann zusätzlich zur natürlichen Variabilität vorhanden sein [183]. Die Gesamtheit der Variabilitäten ergeben in der Summe das Bild des Prozesses (Bild 88).

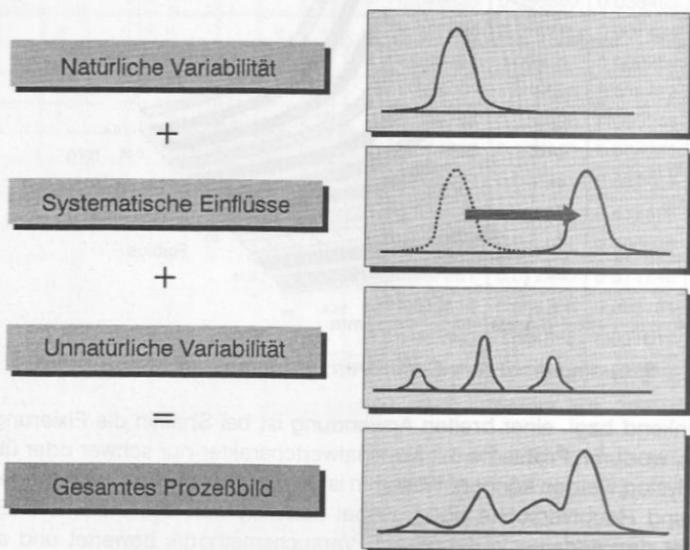


Bild 88: Zerlegung der Streueinflüsse eines Prozesses

Ziel der statistischen Prozeßregelung ist es, die natürlichen Variabilitäten (Abweichungen) des Prozesses zu kompensieren und spezielle Einflüsse von unnatürlichen Variabilitäten frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen. Um diese zu entdecken ist die Kenntnis der natürlichen Streuung des Prozesses erforderlich.

6.4.1 Verfahren der statistischen Prozeßregelung

Die statistische Prozeßregelung ist durch die Untersuchung von Stichproben aus dem Materialfluß des Prozesses gekennzeichnet. Ausgewertet werden die Meßergebnisse mit Hilfe von Regelkarten. Von den Ergebnissen der Stichprobenprüfung wird auf die Qualitätslage der laufende Fertigung geschlossen. Je nach Lage und Ausprägung der Stichprobenergebnisse wird in den Prozeß regelnd eingegriffen. Ziel hierbei ist es, den Prozeß so zu regeln, daß kein Ausschuß und keine Nacharbeit entsteht.

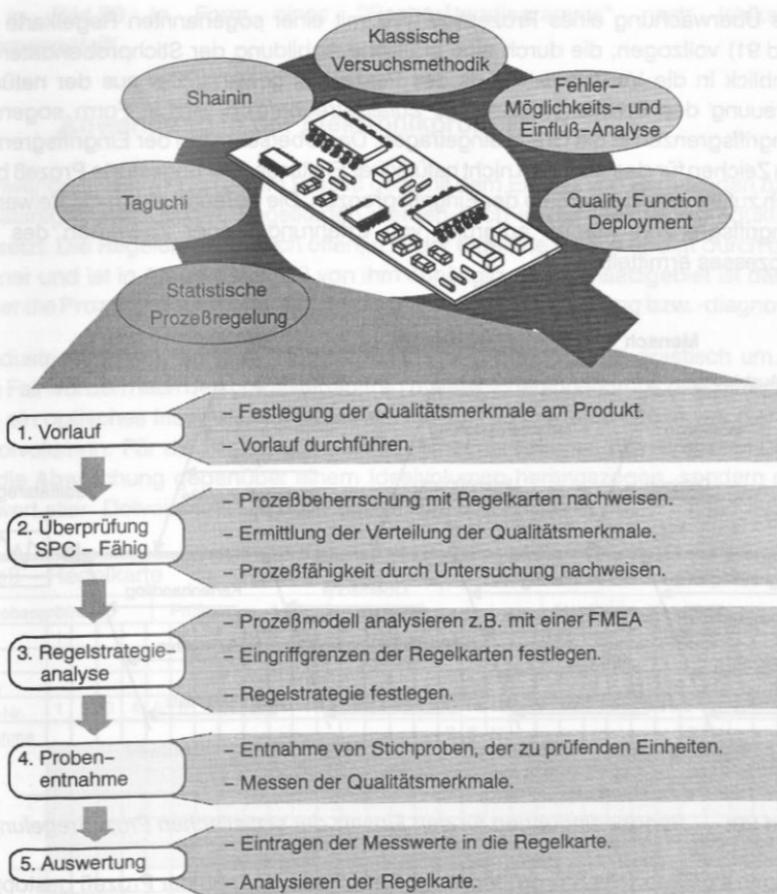


Bild 89: Vorgehen zur statistischen Prozesslenkung

Zur Anwendung von SPCs müssen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein:

- beherrschter und fähiger Prozeß,
- Serierfertigung (mittel bis groß),
- bekanntes Prozeßmodell mit meß- und regelbaren Parametern,
- kurze Totzeiten zwischen Auswertung des Meßergebnisses und Regelung des Prozesses

Informationen über die Prozeßfähigkeit und Analysetools bilden dabei die Verfahren aus Kapitel 6.3. Die Vorgehensweise der statistischen Prozeßregelung ist in Bild 89 dargestellt.

Die Überwachung eines Prozesses wird mit einer sogenannten Regelkarte (siehe Bild 91) vollzogen, die durch eine grafische Abbildung der Stichprobendaten einen Einblick in die Verhaltenshistorie des Prozesses gewährt. Der aus der natürlichen Streuung des Prozesses ermittelte Zufallsstrebereich wird in Form sogenannter Eingriffsgrenzen in die Grafik eingetragen. Das Überschreiten der Eingriffsgrenzen ist ein Zeichen für das Auftreten nicht natürlicher Einflüsse. Der ungestörte Prozeß bewegt sich zufallsverteilt innerhalb der Eingriffsgrenzen. Die Berechnung der Mittelwerte und Eingriffsgrenzen werden aufgrund von Erfahrungs- oder Zielwerten des realen Prozesses ermittelt.

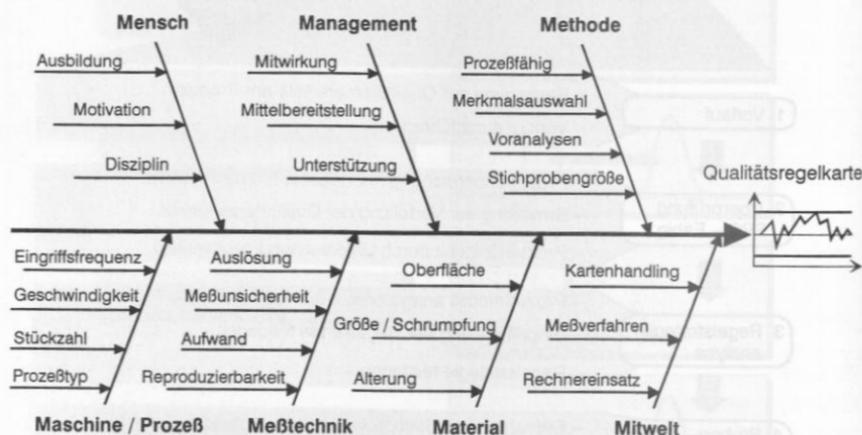


Bild 90: Randbedingungen für den Einsatz der statistischen Prozeßregelung

Zeigen sich spezielle Störgrößen in der Regelkarte, so muß der Prozeß gestoppt und untersucht werden. Um "Ausreißer" zu erkennen, die z.B. durch Fehlmessungen entstehen können, sollte bei Überschreiten der Eingriffsgrenzen unmittelbar eine zusätzliche Stichprobe entnommen werden, bevor der Prozeß gestoppt wird. Nach Beseitigung der Störeinflüsse werden die Eingriffsgrenzen neu berechnet. Punkte, die unter Störeinfluß standen, werden von der Berechnung ausgeschlossen. Diese würden die Lage der Eingriffsgrenzen verfälschen, da die spezielle Streuung als Bestandteil der natürlichen Streuung interpretiert würde. Die neuen Eingriffsgrenzen werden in die Karte eingetragen. Die Punkte "außer Kontrolle" werden in der Karte gekennzeichnet. Die Ursachen und Abstellmaßnahmen werden vermerkt. Auf diese Art und Weise wird ein Qualitätsregelkreis aufgebaut, der zu einer fortlaufenden Eliminierung spezieller und systematischer Einflüsse aus dem Prozeß führt [182].

Den perfekten Prozeß für die SPC-Anwendung gibt es nicht. Somit muß man sich immer mit Randbedingungen auseinandersetzen. Die wesentlichen Randbedingungen für den erfolgreichen Einsatz der statistischen Prozeßregelung

sind in Bild 90 in Form eines "Fischgrätendiagramms" nach Ishikawa zusammengefaßt.

6.4.2 Anwendung in der Elektronikproduktion

Die Anwendung der SPC in einem Prozeß geht mit dem Einsatz von Regelkarten bzw. Qualitätsregelkarten einher. Regelkarten werden auch in der Elektronikproduktion eingesetzt. Die Regelung ist jedoch offen, d.h. der regelnde Eingriff erfolgt durch den Bediener und ist in Art und Ausmaß von ihm abhängig. Haupteinsatzgebiet ist daher weniger die Prozeßregelung als vielmehr die Maschinenüberwachung bzw. -diagnose.

Die industrielle Praxis wandelt die geschilderte SPC-Methodik oft drastisch um. In einem Fall wurden nach den Lotpastenauftrag mittels Schablonendruck die Lotdepots durch ein optisches Inspektionssystem vermessen. Die relevante Größe war hierbei das Lotvolumen. Für die SPC wurde jedoch nicht das Volumen des einzelnen Dots oder die Abweichung gegenüber einem Idealvolumen herangezogen, sondern der Mittelwert aller Dotvolumina - je nach Baugruppe 500 - 3000 (!).

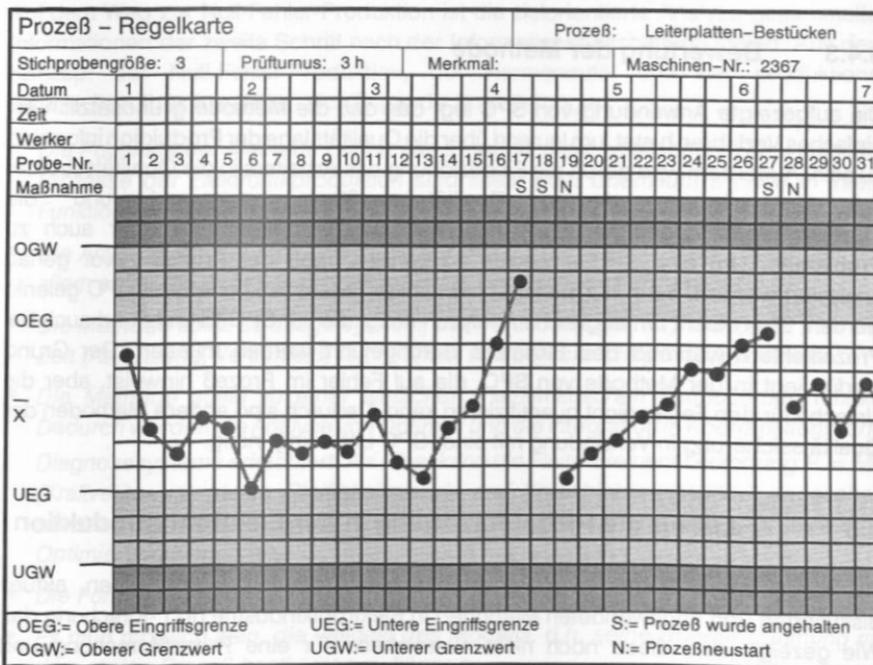


Bild 91: Qualitätsregelkarte

Trotz dieser relativ willkürlichen Anwendung der SPC-Methodik konnte der Industriepartner seine Fehler beim Schablonendruck von 175 dpm auf 19 dpm reduzieren [70]. In Bild 91 ist eine Regelkarte für den Bestückprozeß beispielhaft aufgezeigt. Problem hierbei ist, daß die Bauteile beim Bestücken nicht positionsgenau abgesetzt werden und es somit zu Kontaktschwierigkeiten oder zu Fehlfunktionen der Leiterplatte kommen könnte.

In Bild 91 sind verschiedene Informationen einer Regelkarte ersichtlich, die im folgenden kurz angesprochen werden. Bei den Prozeßproben 1 bis 19 sind zwei charakteristische Beobachtungen zu nennen. Zum einen bleiben 12 Werte der Meßgröße unterhalb der Toleranzmitte. Dies wird als *Run* bezeichnet. Maßnahme dabei könnte eine Überprüfung von Zustelleinrichtungen sein, da die Verschiebung des Prozeßmittelwertes auf Verschleiß zurückgeführt werden kann. Zum anderen überschreitet der Wert bei Probe 19 die Eingriffsgrenzen, was zur Prozeßunterbrechung führen muß. Fehlerhafte Teile werden markiert und aus dem Prozeßlauf genommen. Weitere Prozeßinformationen bringt Probe 20 bis 27, da dort ein sogenannter Prozeß-Trend festgestellt werden kann. Der Prozeß muß dabei auch unterbrochen werden, um Stellgrößen zu überprüfen und neu einzustellen.

6.4.3 Bewertung der Methode

Die aufgezeigte Anwendung von SPC legt dar, daß die Methode grundsätzlich ein einfaches Verfahren bietet, um laufend über die Qualitätslage der Produktion informiert zu sein. Außerdem wird durch die Einbeziehung des Arbeiters in die Qualitätsstruktur der Unternehmens dessen Qualitätsbewußtsein verbessert und die Qualitätsanforderungen für ihn transparent. Das Verfahren führt aber auch zu Problemen. Um eine SPC einsetzen zu können, muß der Prozeß zuvor genau analysiert werden, denn nur beherrschte, fähige Prozesse können mit SPC gelenkt werden. Dies macht umfangreiche Analysen nötig, die vor SPC-Einsatz und auch bei Prozeßfehlern während des Einsatzes durchgeführt werden müssen. Der Grund hierfür liegt in der Methode von SPC, die auf Fehler im Prozeß hinweist, aber die Ursache für den Fehler nicht quantifizieren kann. Dadurch sind andere Methoden der Qualitätssicherung in Verbindung mit einer SPC unbedingt nötig.

6.5 Fazit für die Prozeßforschung in der Elektronikproduktion

Die dargestellten Methoden stellen eine Auswahl der leistungsfähigsten, aktuell diskutierten und angewendeten Methoden in Elektronikindustrie und -forschung dar. Wie gezeigt, sind diese noch nicht ausreichend für eine Prozeßforschung und -modellierung im Sinne der Null-Fehler-Produktion. Bessere Methoden sind zu finden oder zu entwickeln. In Kapitel 7 wird eine solche Methode vorgestellt.

7 Methodik zur hochdimensionalen, parallelen Analyse verrauschter Qualitätsdaten

Die Prozesse der Elektronikproduktion werden von einer vergleichsweise hohen Zahl von Parametern und Störgrößen beeinflusst. Gleichzeitig beinhaltet die Zielgröße Qualität sehr viele unterschiedliche Merkmale und Ausprägungen. Daher ist die Analyse der Zusammenhänge erschwert.

Im folgenden werden die Anforderungen an eine geeignete Analysemethode definiert und eine geeignete Methode hergeleitet. Die problemspezifischen Eigenschaften der Methode, die auch für den praktischen Einsatz von Bedeutung sind, werden kurz dargestellt.

7.1 Wahl der Analysemethode

7.1.1 Anforderungen an eine zielorientierte Analysemethode

Auf dem Weg zur Null-Fehler-Produktion ist die zielorientierte Analyse gesammelter Informationen der zweite Schritt nach der Informationsbeschaffung selbst. Aus dem Konzept der Null-Fehler-Produktion, der Hermeneutik und der produktionstechnischen Praxis ergeben sich folgende Anforderungen:

- *Die Postulate der Methode dürfen das Ergebnis nicht verfälschen. Die wenigsten Prozesse der Elektronikproduktion sind linear oder überhaupt a priori in ihrem Funktionstyp bekannt.*
- *Die Anwendung der Methode sollte nur einen minimalen Aufwand bedeuten, vor allem sollte die laufende Produktion nicht negativ beeinflusst werden.*
- *Die Methode sollte so ausgelegt sein, daß Veränderungen im Prozeß z.B. über die Zeit (Abnutzung, Verschleiß) leicht erfaßt und berücksichtigt werden können.*
- *Die Methode sollte zu einer einfachen mathematischen Formulierung führen. Dadurch werden die Analyse von Optimas und die Integration in Koordinations- und Diagnosesysteme erleichtert. Als Ideal kann die Finite-Element-Gleichung $F = \bar{M}d$ (Kraftvektor ist gleich Steifigkeitsmatrix mal Verschiebungsvektor) angesehen werden. Für diesen Typus von Problemformulierungen existieren bewährte Optimierungsverfahren.*
- *Die Formulierung des Modells muß nicht explizit sein.*
- *Es muß möglich sein, die Validität des Modells, d.h. seine Übereinstimmung mit dem realen Prozeß bestimmen zu können.*
- *Formulierungen vernetzter Teilmodelle sollten verknüpft werden können. Dadurch kann aus Kenntnissen über Teile des Systems ein Modell des Gesamtsystems synthetisiert werden.*

7.1.2 Defizite heutiger Analysemethoden

Die heutige Versuchsmethodik bietet eine breite Palette von Verfahren, um Prozesse gezielt und systematisch zu untersuchen. Die größte Bedeutung kommt dabei den faktoriellen Versuchen zu, die z.B. in den USA seit Jahren mit Erfolg eingesetzt werden.

Die Verfahren bieten fundierte Ergebnisse, setzen allerdings einen erheblichen Aufwand voraus. Diesen Aufwand versuchen Taguchi oder Shainin durch ihre Verfahren zu reduzieren. Diese Verfahren führen aber dadurch zu einer höheren Gefahr von Fehlinterpretationen. Somit sind sie nur unter gewissen Randbedingungen effizient. Die derzeit in der Qualitätssicherung der Elektronikproduktion diskutierten Verfahren sind in Kapitel 6 untersucht und bewertet worden. Die Defizite der heutigen Methoden werden am Beispiel folgender Aufwand-Nutzen-Abschätzungen deutlich:

- *Modellierung des Lötprozesses zur Lötprofilprognose:*

Das Lötprofil eines Reflowofens wird heute indirekt durch die prinzipispezifischen Stellgrößen (für IR-Öfen sind dies die Strahlertemperaturen und die Durchlaufgeschwindigkeit) und die thermischen Eigenschaften der Baugruppe in Versuchsreihen vor dem Serienanlauf bestimmt. So sind in einer ersten Näherung für einen IR-Lötprozeß acht Strahlertemperaturen, die Transportgeschwindigkeit, die thermische Masse und deren Verteilung relevante Einflußgrößen. Unterschiedliche Wärmeübergänge o.ä. sollen vernachlässigt werden.

Diese elf Parameter sind in Versuchen zu variieren und zu der Zielgröße, dem Lötprofil, zu korrelieren. Da nicht davon ausgegangen werden kann, daß die Zusammenhänge linear sind, sind mindestens drei Einstellungen je Parameter nötig. Für einen vollfaktoriellen Versuchsplan wären somit $3^{11}=177147$ Versuchspunkte zu testen. Taguchi reduziert mit seiner Technik die Anzahl der Versuchspunkte im günstigsten Fall auf die Hälfte. Für jeden Versuchspunkt sind mindestens 30 Experimente nötig. Somit wären selbst für diese schlechte Näherung 2,5 Mio. Versuche notwendig.

- *Modellierung der gesamten Prozeßkette Dispensen-Bestücken-Löten:*

Aus der Vielzahl der möglichen Einflußgrößen auf die Prozeßkette (Bild 92 zeigt einen Ausschnitt) wurden zunächst in Vorversuchen gemäß Shainin die wichtigsten 15 Einflußgrößen isoliert. In den Vorversuchen wurden bereits hochgradige Nichtlinearitäten beobachtet.

Ausgehend von vier Einstellungen je Einflußgröße sind nach den gleichen Überlegungen wie zuvor über 16 Mrd. (!) Versuche für eine Modellierung nötig.

Eine Reduktion der Anzahl von Einstellungen je Einflußgröße auf zwei Werte, senkt den Versuchsaufwand erheblich. Die Gefahr von Fehlinterpretationen steigt jedoch im entsprechenden Maße an, da zum einen eine grobe Vereinfachung der Zusammenhänge erzwungen wird, und zum anderen die Wahl der Einstellwerte sich immer stärker auf die Aussage auswirkt. So wird es beispielsweise möglich, daß mit den gleichen Versuchsmethoden aber leicht modifizierten Einstellwerten sich beim einen Experimentator die Nadellänge als der Haupteinflußfaktor des

Dispensprozesses ergibt, beim anderen jedoch der Nadelinnendurchmesser. Dabei schließen beide Experimentatoren wechselseitig den Haupteinflußfaktor des anderen aus [163][186].

Der Wechsel zu anderen Versuchsplänen reduziert die Zahl der Versuche nicht signifikant. Der Aufwand für eine Prozeßanalyse oder -modellierung nach dieser Methode ist im Bereich der Baugruppenproduktion nicht vertretbar. Hinzu kommt, daß für die Gewinnung der Daten die Produktionsanlagen aus dem Produktivbetrieb in einen Experimentalbetrieb überführt werden müssen. Nur so können die erforderlichen Parametereinstellungen vorgenommen werden.

7.1.3 Alternative Analyseansätze

Die in Abschnitt 7.1.1 aufgeführten Anforderungen stimmen mit den Zielsetzungen überein, die Mathematiker veranlaßt haben, sogenannte *Automaten* [158] zu entwickeln. Automaten haben die Aufgabe, aus einer Abfolge von Daten selbständig und zuverlässig die mathematischen Zusammenhänge herauszufinden.

Heute sind folgende Automaten bekannt:

- *Zellularautomaten*
- *Mathematische Automaten*
- *Logisch-operationelle Automaten (Turing-Maschinen)*
- *Computer-Automaten*
- *Neuronale Netze*

Gemäß dem *Paradigma der Berechenbarkeit* [158] kann ein Zusammenhang, der mit einem Automaten berechnet wurde, auch mit jedem anderen Automaten berechnet werden. Die Verfügbarkeit geeigneter Softwarepakete und die vergleichsweise einfache Erlernbarkeit der Neuronalen Netze [200] legen deren Anwendung für die geschilderten Aufgaben nahe.

Es liegen in vielen Bereichen reichhaltige Erfahrungen zum Einsatz Neuronaler Netze vor. Diese reichen von Lawin prognose [171] über Aktienkursprognose [38], Motordiagnose [88], Leckortung und Leckratenabschätzung [57], Bildverarbeitung [100] bis hin zur Systemsteuerung von Robotern [64] oder autonomer Fahrzeuge [33][36]. Die Beispiele befinden sich zum großen Teil in der industriellen Anwendung, einige sogar in Sicherheitsbereichen kerntechnischer Anlagen.

In der chemischen Industrie werden Neuronale Netze bereits zur Qualitätssicherung und Prozeßoptimierung erfolgreich eingesetzt [37]. Dort werden Aufwandsreduzierungen um 90% für eine Prozeßmodellierung- bzw. optimierung angegeben. In der Elektronikproduktion sind Neuronale Netze diesbezüglich bislang noch unbekannt. Die Fließprozesse der chemischen Industrie unterscheiden sich

signifikant von den Stückgutprozessen der Elektronikproduktion. Daher ist eine grundlegende Untersuchung ihrer anwendungsspezifischen Eigenschaften notwendig. Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt.

Bild 93 zeigt die Vorteile der Modellierung und der Simulation mit Neuronalen Netzen gegenüber den Techniken der Versuchsmethodik vor dem Hintergrund der Elektronikproduktion.

Versuchsmethodik	Neuronale Netze
<ul style="list-style-type: none"> + Vielzahl von normierten Versuchsplänen - Meist nur eine Zielgröße auf einmal betrachtbar - Hoher Versuchsaufwand - Unsicherheit durch Postulate der Zielgrößenfunktionen - Versuchsbetrieb der Anlage mit evtl. kritischen Systemzuständen 	<ul style="list-style-type: none"> + Keine Postulate bzgl. der Zusammenhänge + Beliebige Zahl von Eingangs- und Zielgrößen + Parallele Bewertung von Einflüssen und Zusammenhängen + Unempfindlich gegenüber verrauschten Daten - Keine normierte Vorgehensweise
<ul style="list-style-type: none"> - Gefahr von Fehlinterpretationen bei reduziertem Versuchsaufwand - Produktionsausfall oder gar Gefährdung der Anlage 	<ul style="list-style-type: none"> + Bessere Abbildung der realen Zusammenhänge + Nutzung von Betriebsdaten aus dem abgesicherten, wirtschaftlichen Produktionsbereich + Reduktion des Modellierungsaufwandes

Bild 93: Vergleich Versuchsmethodik und Neuronale Netze

7.2 Funktionsweise Neuronaler Netze

7.2.1 Aufbau und Funktion eines Neurons

Die Erforschung künstlicher Neuronaler Netze begann bereits um 1940 und war durch das Interesse an den neurophysiologischen Grundlagen des menschlichen Gehirns motiviert. Das Gehirn besteht aus Nervenzellen, den Neuronen, die untereinander verbunden sind und sich gegenseitig über elektrische Signale beeinflussen. Ein Neuron leitet seine Signale über sein Axon weiter und empfängt Signale von anderen

Neuronen über die Kopplungsstellen zwischen deren Axonen und seinen Dendriten. Diese Kopplungsstellen werden Synapsen oder synaptische Spalten genannt.

Warren S. McCulloch und Walter Pitts stellten 1943 ein Modell für die Funktionsweise eines solchen Neurons vor und legten fünf Grundsätze fest [94]:

1. Ein Neuron ist ein binäres Schaltelement, das entweder aktiv oder inaktiv ist.
2. Jedes Neuron besitzt einen festen Schwellenwert.
3. Ein Neuron empfängt Eingaben von excitatorischen (erregenden) Synapsen gleichen Gewichts.
4. Ein Neuron empfängt außerdem Eingaben von inhibitorischen (hemmenden) Synapsen, deren Effekte absolut sind. So verhindert eine aktive inhibitorische Synapse die Aktivierung des Neurons.
5. Es gibt ein Zeitquantum für die Integration der synaptischen Eingaben. Wenn keine inhibitorische Synapse aktiv ist, werden die excitatorischen Eingaben addiert und das Neuron wird aktiv, wenn sein Schwellenwert dadurch überschritten wird.

Diese Modellvorstellung wurde als das McCulloch-Pitts Neuron bekannt. Die Autoren zeigten, wie sich Neuronen bilden lassen, und wie logische Ausdrücke durch Netze aus derartigen Neuronen gebildet werden (Bild 94). Das Pseudo-Netz lernte, indem die Gewichte nach vorgegebenen Mustern modifiziert und durch eine nicht lineare Funktion aktiviert wurden. Somit war das Lernverhalten stark eingeschränkt und nur ein kleiner Netzaufbau möglich.

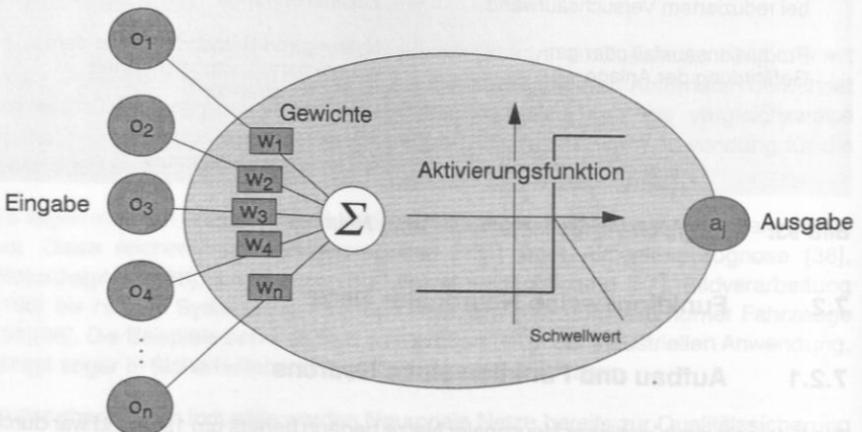


Bild 94: Schematische Darstellung eines McCulloch-Pitts-Neurons

Das von McCulloch und Pitts vorgeschlagene Modellneuron entspricht nur sehr eingeschränkt einem biologischen Neuron. Das Gehirn setzt sich aus etwa 15-20 Mrd.

Zellen zusammen; die Leistungsfähigkeit eines einzigen Bio-Neurons entspricht etwa der Leistungsfähigkeit einer SPARC 2. Diese Idee ist dennoch die Grundlage für jegliche Weiterentwicklung auf dem Gebiet Neuronaler Netze. So zeigen die meisten modernen Netztypen zwar ein komplexeres, aber im Grundschemata gleiches Aufbaukonzept.

7.2.2 Elemente Neuronaler Netze

Grundgrößen für die Modellierung Neuronaler Netze sind die Aktivität mit der zugehörigen Erregungsdynamik, die Übertragungsgewichte mit ihrer Gewichtsentwicklung und die Netzstruktur.

Unter der Aktivierungsfunktion eines künstlichen Neurons wird die Funktion verstanden, die abhängig von den Aktivationswerten der anderen Neuronen eines Netzes den Wert der Aktivierung des gerade betrachteten Neurons berechnet. Meist besteht diese Funktion aus einem Skalarprodukt, auf das eine nichtlineare Funktion angewendet wird. Dazu gibt es eine Vielzahl verschiedenster Funktionsansätze, um für differente Problemfälle jeweils die optimale Übertragung sicherstellen zu können. So ist es auch möglich, daß die Neuronen zur Berechnung des neuen Aktivierungszustands den alten Wert der Aktivierung heranziehen und auch logische Entwicklungen abbilden können. Auf diese Weise erhält das Netz ein Gedächtnis.

$$a_j(t) = f_{act}(net_j(t))$$

Formel 6: Aktivierungsfunktion ohne Gedächtnis

$$a_j(t) = f_{act}(a_j(t-1), net_j(t))$$

Formel 7: Aktivierungsfunktion mit Gedächtnis

mit $net_j = \sum_i w_{ij} p_i$, Zeitpunkt t , Neuron j , Eingang i und Gewichtungsfaktor w_{ij} von Eingang i auf Neuron j .

Die Netzstruktur kann als bewerteter gerichteter Graph dargestellt werden, dessen Neuronen die Verarbeitungseinheiten sind und dessen bewertete Verbindungen (Kanten) gewichtete Kommunikationsverbindungen repräsentieren. Häufig wird die Struktur des Netzes auch in Form einer Konnektionsmatrix \bar{W} angegeben. Dabei wird jeder Verbindung von einem Sendeneuron n_i zu seinem Zielneuron n_j der Gewichtungsfaktor w_{ij} zugeordnet. Das Zusammenspiel aller Übertragungsgewichte wird als Gewichtungsdynamik bezeichnet. Die Netzwerkstruktur bildet die Grundlage für die Kommunikation der Verarbeitungseinheiten untereinander. Die Ausgabe einer Einheit wird zur Eingabe für die anderen Einheiten. Durch die Übertragungsgewichtung ist es für eine Einheit möglich, die Ausgaben der anderen Einheiten unterschiedlich stark zu

berücksichtigen oder auch ganz zu vernachlässigen. Für den Fall, daß $w_{UV} = 0$ gilt, existieren zwischen den Neuronen u und v keine Verbindungen. Gilt $w_{UV} > 0$, wird die Verbindung zwischen u und v als excitatorisch oder anregend bezeichnet, im Fall $w_{UV} < 0$ inhibitorisch oder hemmend genannt. Bei einem vollständig verbundenen Netz gilt $w_{UV} \neq 0$ für alle Neuronen u und v des Netzes, $w_{UV} = w_{VU}$ kennzeichnet symmetrische Verbindungen, wie sie z.B. bei Hopfield-Netzen zur Anwendung kommen und für Netze, in denen Einheiten nicht mit sich selbst verbunden sind, gilt $w_{UU} = 0$. Durch das Nullsetzen bestimmter Verbindungen kann ein geschichtetes Netz erzeugt werden, bei dem Einheiten der gleichen oder direkt benachbarter Schichten nicht miteinander verbunden sind.

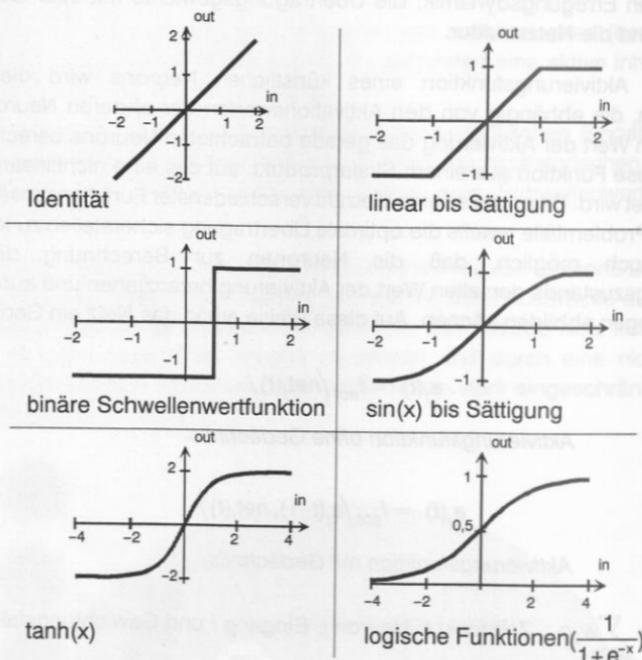


Bild 95: Die häufigsten zur Anwendung kommenden Ausgabe- und Aktivierungsfunktionen sind hier dargestellt. Die Abszisse repräsentiert die Netzeingabe, die Ordinate die Ausgabe.

Die Übertragungsgewichte w_{ij} sind während der Lern- oder Konditionierungsphase veränderbar. In dieser Phase wird mit Hilfe einer Lernregel versucht, die Gewichte derart zu bestimmen, daß das Neuronale Netz auf bestimmte Anfangszustände oder Eingaben mit bestimmten Endzuständen oder Ausgaben reagiert. Somit sind Neuronale Netze nach Abschluß der Lernphase in eine relativ einfache mathematische Formulierung überführbar.

7.2.3 Lernverfahren und Lernvorgang

Ein wesentlicher Bestandteil des Modells Neuronaler Netze sind Algorithmen, die eine adaptive Veränderung der Netzabbildung ermöglichen. Das Ziel dieses sogenannten Lernvorgangs ist es, daß das Netz eine Korrelation zwischen Eingaben und Ausgaben aufbauen kann. Um dies zu erreichen, werden verfügbare Eingabemuster durch das Netz propagiert. Die erzeugten Ausgaben werden daraufhin mit den erwünschten Ausgabemustern verglichen. Anschließend werden die Netzgewichte so verändert, daß das Netz bei nochmaliger Eingabe derselben Muster den gewünschten Ausgaben näher kommt (Bild 96).

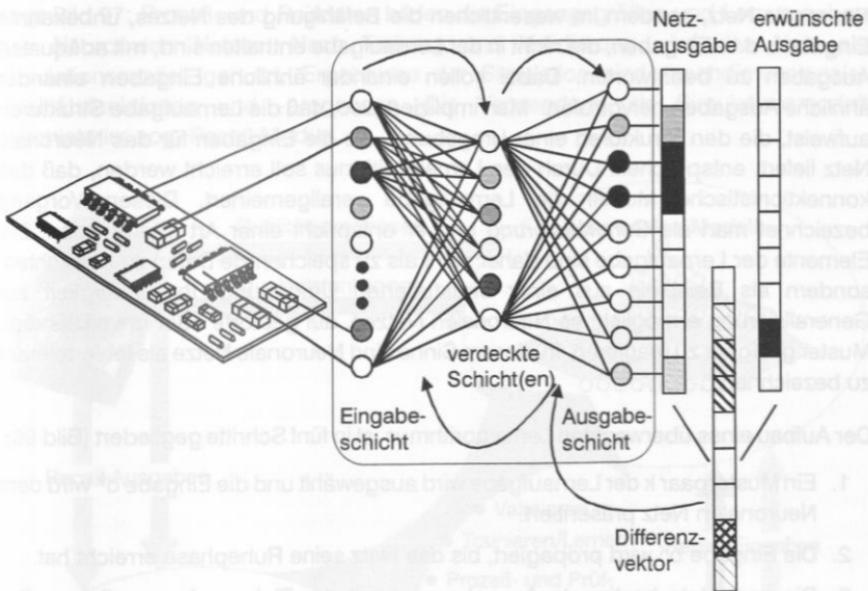


Bild 96: Lernprinzip überwachter Lernverfahren [158]

Diese Veränderung der Gewichte erfolgt anhand von Lerngesetzen. Das erste Lerngesetz wurde bereits 1949 von Hebb für das biologische Modell formuliert [53]. Es besagt, daß Verbindungen zwischen Neuronen dann verstärkt werden, wenn die Neuronen gleichzeitig aktiv sind. Weitere Lernregeln sind die Delta-Regel, die einen Abgleich zwischen Soll- und Istwert berücksichtigt, und die Regel der Fehlerrückführung (Back Propagation Rule), welche eine Verallgemeinerung der Delta-Regel für beliebig große Netze darstellt.

Um ausdrücken zu können, wann zwei Ausgaben oder Eingaben einander ähnlich sind, ist ein Ähnlichkeits- oder Fehlermaß zu definieren. Dieses Maß hängt vom Netztyp und Lernvorgang ab.

Grundlegend für die Durchführung des Lernvorgangs ist neben der Vorgabe einer Lernaufgabe auch die Wahl eines geeigneten Lernalgorithmus zu treffen. Ein Lernalgorithmus ist ein Verfahren, das anhand einer Lernaufgabe die Netzstruktur eines Neuronalen Netzes verändert. Erfüllt das Netz diese Lernaufgabe nach Anwendung des Verfahrens, bzw. wird eine vorher festgelegte Fehlerschranke unterschritten, so war der Lernalgorithmus erfolgreich, andernfalls erfolglos. Ein Lernalgorithmus, der eine freie Lernaufgabe verwendet, heißt nicht überwachter Lernalgorithmus. Verwendet er eine feste Lernaufgabe, so heißt er überwachter Lernalgorithmus [99].

Das Ziel des Lernvorgangs ist nicht allein die Bewältigung der Lernaufgabe durch das Neuronale Netz, sondern im wesentlichen die Befähigung des Netzes, unbekannte Eingaben, d.h. Eingaben, die nicht in der Lernaufgabe enthalten sind, mit adäquaten Ausgaben zu beantworten. Dabei sollen einander ähnliche Eingaben einander ähnliche Ausgaben hervorrufen. Man impliziert also, daß die Lernaufgabe Strukturen aufweist, die den Strukturen einer Umgebung, die die Eingaben für das Neuronale Netz liefert, entsprechen. Durch den Lernalgorithmus soll erreicht werden, daß das konnektionistische Modell die Lernaufgabe verallgemeinert. Diesen Vorgang bezeichnet man als *Generalisierung* und er entspricht einer Art Interpolation. Die Elemente der Lernaufgabe sind daher nicht als zu speichernde Daten zu betrachten, sondern als Beispiele aus einer strukturierten Umgebung. Ihre Fähigkeit zur Generalisierung ermöglicht es Neuronalen Netzen, auf gestörte oder unvollständige Muster geeignet zu reagieren. In diesem Sinne sind Neuronale Netze als fehlertolerant zu bezeichnen.

Der Aufbau eines überwachten Lernalgorithmus ist in fünf Schritte gegliedert (Bild 96):

1. Ein Musterpaar k der Lernaufgabe wird ausgewählt und die Eingabe o^k wird dem Neuronalen Netz präsentiert.
2. Die Eingabe o^k wird propagiert, bis das Netz seine Ruhephase erreicht hat.
3. Die vom Netz bestimmte Ausgabe wird mit der Zielvorgabe verglichen. Der Fehlerwert e^k wird bestimmt und zum Gesamtfehler E hinzugefügt.
4. Ist $e^k \neq 0$, so werden die Gewichte derart geändert, daß eine Verringerung des Betrags von e^k zu erwarten ist.
5. Wenn eine Epoche abgelaufen ist, ist zu prüfen, ob $E \leq \varepsilon$ gilt, wobei ε ein reeller Wert nahe Null ist. Ist dies der Fall, so ist der Lernvorgang erfolgreich beendet. Ist $E > \varepsilon$ und ein anderes Kriterium z.B. die maximale Epochenzahl erfüllt, so wird der Lernvorgang abgebrochen. Andernfalls wird mit Schritt 1 fortgefahren und der Gesamtfehler E neu berechnet.

Der wesentliche Schritt eines überwachten Lernalgorithmus ist Schritt 4. Um eine Verringerung des Fehlers durch die Änderung der Gewichtsmatrix zu erreichen, ist es notwendig, das Fehlermaß in Abhängigkeit der Übertragungsgewichte zu definieren. Die gängigen Lernalgorithmen nähern die Gewichte durch ein

Gradientenabstiegsverfahren an und versuchen auf diese Weise den globalen Fehler E Null werden zu lassen. Die Konvergenz eines derartigen Lernverfahrens ist jedoch keineswegs für jeden Fall garantiert, da es einem lokalen heuristischen Suchverfahren entspricht.

7.3 Modellbildung und Prozeßsimulation auf Basis verrauschter Qualitätsdaten

Grundgedanke der Modellbildung mit Neuronalen Netzen ist es, Neuronale Modelle als Beobachter parallel zum Prozeß bzw. zur Prozeßkette zu integrieren. Das Prinzip zeigt Bild 97: Prozeß- und Prüfdaten bilden die Eingangsgrößen und Lernvorgaben des Neuronalen Netzes. Nach Training und Validierung wird das Netz als Simulationsmodell genutzt. Ergebnisse der Simulation sind (hochdimensionale) Qualitätsfunktionen und -prognosen. Die Verwendung als Simulationsmodell geschieht im sog. Recall-Modus.

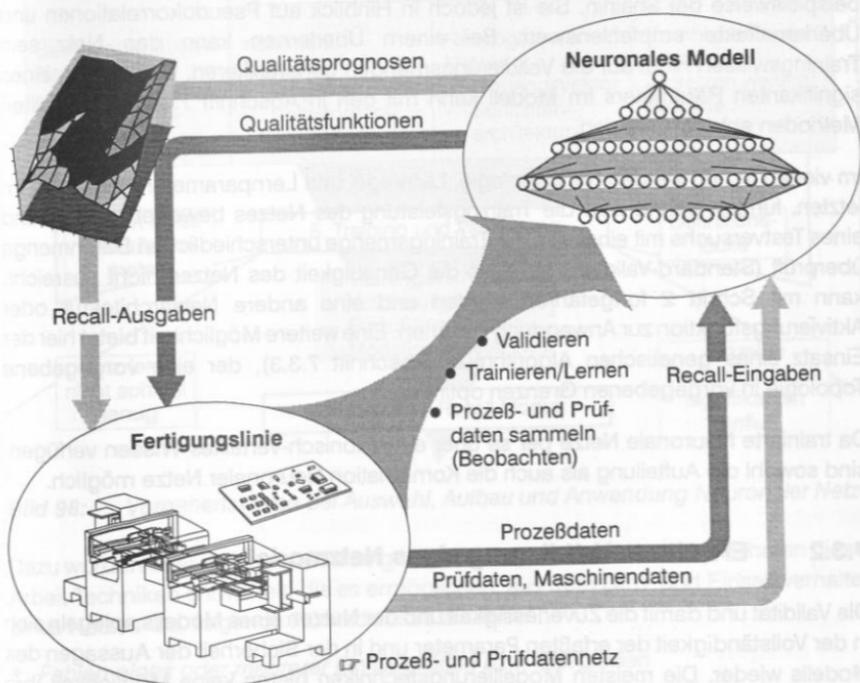


Bild 97: Prinzip der Modellbildung und Prozeßsimulation mit Neuronalen Netzen

So erfassen beispielsweise Backpropagation-Netze (überwachtes Lernen) die eingestellten Parameter des Prozesses und die Qualität des Entproduktes. Im Trainingsvorgang erlernen die Netze die entsprechenden Zusammenhänge. Nach

dem Trainingsabschluß kann das implizite Neuronale Modell ebenso analysiert oder eingesetzt werden wie Simulationsmodelle aus anderen Bereichen der Technik.

Dazu wurden Techniken entwickelt, um zuverlässige Neuronale Modelle zu erhalten und zu analysieren. Diese sind im folgenden kurz skizziert.

7.3.1 Vorgehensweise zur problemorientierten Netzsynthese

Es wurde eine Systematik zum Entwurf problemorientierter Neuronaler Netze entwickelt. Diese Systematik ist in Bild 98 dargestellt.

In Anlehnung an bewährte Systematiken der Versuchsmethodik werden nach dem Formulieren der Aufgabenstellung und Festlegung der Datenermittlung die zu untersuchenden Parameter festgelegt. Neuronale Netze können zum einen sehr viele Parameter gleichzeitig bewerten und auch stark verrauschte Trainingsdaten nutzen, daher kommt der Reduktion der Parameter eine geringere Bedeutung zu als beispielsweise bei Shainin. Sie ist jedoch in Hinblick auf Pseudokorrelationen und Überlernerneffekte empfehlenswert. Bei einem Überlernen kann das Netz sein Trainingswissen nicht auf die Validierungsmengen generalisieren. Das Fehlen eines signifikanten Parameters im Modell kann mit den in Abschnitt 7.3.2 vorgestellten Methoden entdeckt werden.

Im vierten Schritt werden Netztopologie, Lernregel und Lernparameter festgelegt. Im letzten, fünften Schritt wird die Trainingsleistung des Netzes bewertet und anhand eines Testversuchs mit einer von der Trainingsmenge unterschiedlichen Datenmenge überprüft (Standard-Validierung). Falls die Genauigkeit des Netzes nicht ausreicht, kann mit Schritt 2 fortgefahren werden und eine andere Netzarchitektur oder Aktivierungsfunktion zur Anwendung kommen. Eine weitere Möglichkeit bietet hier der Einsatz eines genetischen Algorithmus (Abschnitt 7.3.3), der eine vorgegebene Topologie in vorgegebenen Grenzen optimiert.

Da trainierte Neuronale Netze per se über ein holonisch-verteiltes Wissen verfügen, sind sowohl die Aufteilung als auch die Kombination Neuronaler Netze möglich.

7.3.2 Erweiterte Validierung eines Netzmodells

Die Validität und damit die Zuverlässigkeit und der Nutzen eines Modells spiegeln sich in der Vollständigkeit der erfaßten Parameter und in der Sicherheit der Aussagen des Modells wieder. Die meisten Modellierungstechniken bieten keine Möglichkeit ihre Validität aus sich selbst heraus zu bestimmen. Bei Neuronalen Netzen ist dies jedoch zumindest in Grenzen möglich.

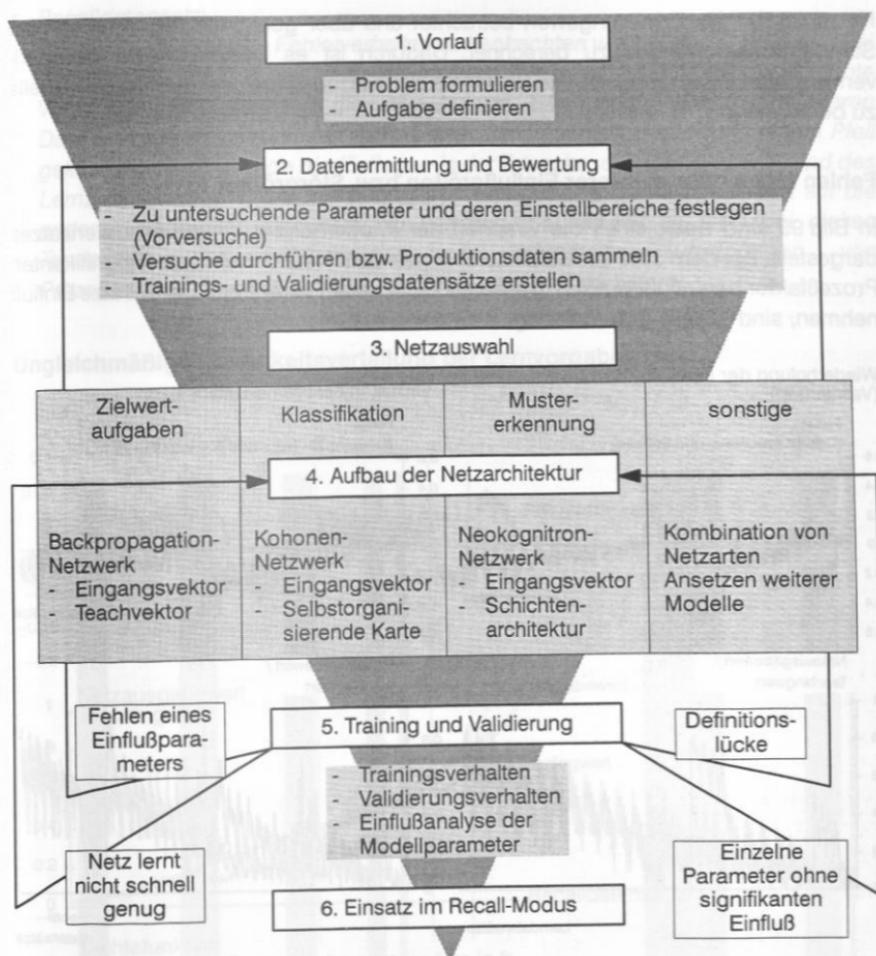


Bild 98: Vorgehensweise bei Auswahl, Aufbau und Anwendung Neuronaler Netze

Dazu wurden über die standardmäßige Validierungsroutine hinaus im Rahmen dieser Arbeit Techniken entwickelt, die es ermöglichen, aus dem Lern- und Einsatzverhalten eines Netzes u.a. folgende Rückschlüsse zu ziehen:

- Fehlen eines oder mehrerer Einflußgrößen bzw. Störgrößen
- Ungleichmäßige Häufigkeitsverteilung der Lernvorgabewerte

Desweiteren wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, die Sicherheit einer konkreten Netzausgabe anzugeben. Im Gegensatz zu dem patentierten Security-Net-Verfahren [37] werden nicht die Aussageunterschiede verschiedener Netze sondern die Unsicherheit eines spezifischen Netzes bewertet. Dabei werden die

Netzausgabe als Erwartungswert betrachtet und über geeignete Algorithmen eine Standardabweichung dazu berechnet. Dadurch ist es beispielsweise bei stark verrauschten Daten möglich, die Sicherheit der Netzaussage und damit des Modells zu berechnen.

Fehlen eines oder mehrerer Einflußgrößen bzw. Störgrößen

In Bild 99 sind beispielhaft die Graphen der Wiederholung eines Lerndatensatzes dargestellt, bei dem 30% der Sätze durch einen dem Netz unbekanntem signifikanten Prozeßfaktor beeinflusst wurden. Die Bereiche, in denen veränderte Datensätze Einfluß nehmen, sind jeweils grau unterlegt.

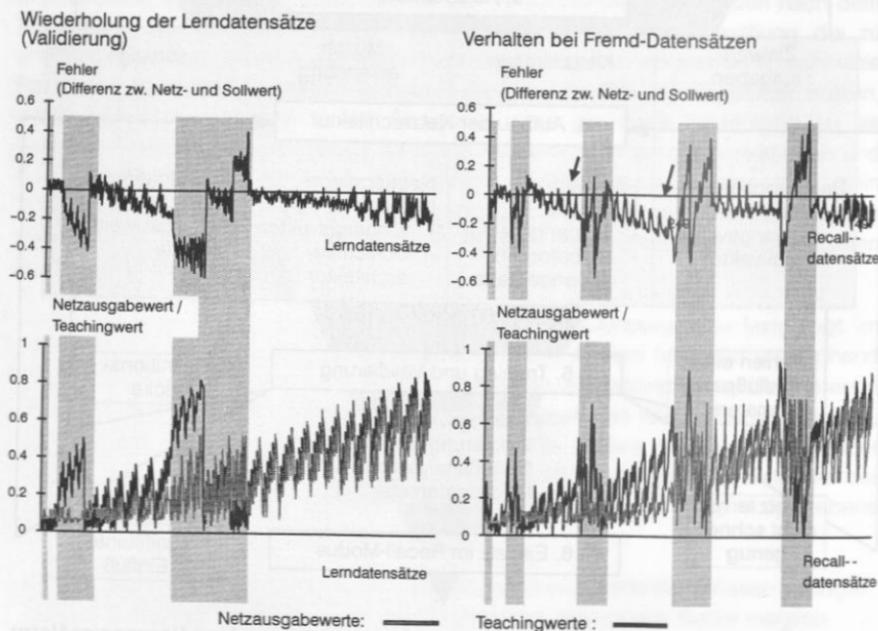


Bild 99: Netzverhalten mit 30 % veränderten Datensätzen

Als Charakteristika lassen sich somit folgende Punkte festlegen:

- **Validierung (Wiederholung der Lerndatensätze):**
Im Bereich der durch den unbekanntem Faktor beeinflussten Datensätze ist ein starker Ausschlag der Fehlerfunktion zu erkennen, wobei sich ein positiver bzw. negativer maximaler Fehler einstellt. Dieser Fehlerwert kann bei unterschiedlichen Netzen bis zum Zehnfachen des mittleren Fehlers betragen. Im Vergleich der Netzausgabe mit den realen Vorgabe- oder Teaching-Werten zeigt sich, daß das Netz den unsicheren Bereich durch stärkere Netzwertamplituden in der Größenordnung eines Mittelwertes abzubilden versucht.

- **Recalldatensatz:**

Dabei ist ein ähnliches Fehlerverhalten zu beobachten wie bei der Validierung. Bei den Fehlerfunktionen des Recalldatensatzes zeigen sich zusätzlich noch leichte Verschiebungstendenzen, die jeweils vor bzw. nach einem unsicheren Datenbereich zu beobachten sind. Diese Stellen sind in Bild 99 mit einem Pfeil gekennzeichnet. Gründe hierfür liegen in der Tatsache, daß das Netz während des Lernzyklus versucht, die Einflüsse durch den unbekanntem Eingabewert auf die anderen bekannten Parameter zu verteilen. So handelt es sich bei diesen Tendenzen der Fehlerfunktion um fehlerhafte Zuordnungen von Prozeßkennzeichen auf die dem Netz vorgegeben Parametern.

Ungleichmäßige Häufigkeitsverteilung der Lernvorgabewerte

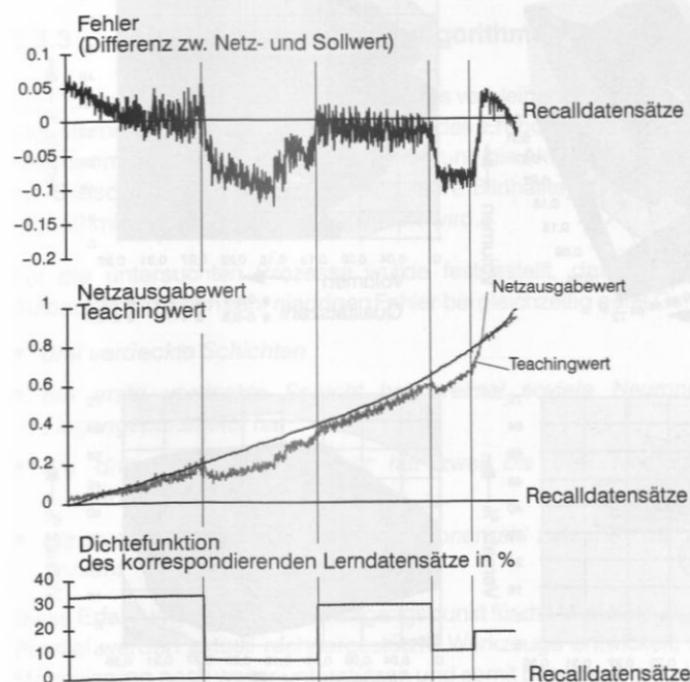


Bild 100: Einfluß der Häufigkeitsverteilung der Datensätze auf den Lernerfolg des Netzes

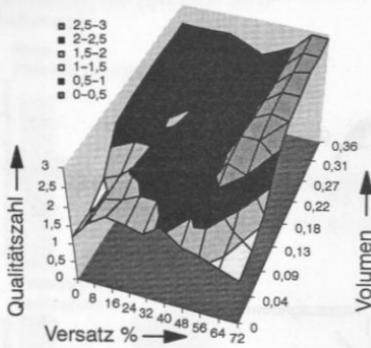
Eine Fehlerquelle beim Einsatz Neuronaler Netze zur Systemsimulation ist die ungleichmäßige Verteilung des Datensatzes über den Definitionsbereich. Ziel ist es, den Definitions- und Werteraum eines Prozesses möglichst gleichmäßig abzudecken, zumindest in der Umgebung des ökonomisch-technisch sinnvollen Prozeßfensters. Bereiche des Systemmodells, die dem Netz während des Lernens seltener präsentiert

werden, haben eine schlechtere Lerngrundlage und führen so zu höheren Fehlerwerten. Dies gilt insbesondere für Sonderfälle eines Abbildungsproblems, die bei Unterrepräsentation vom Lernalgorithmus unterdrückt werden und zu geringe oder keine Bedeutung zugewiesen bekommen.

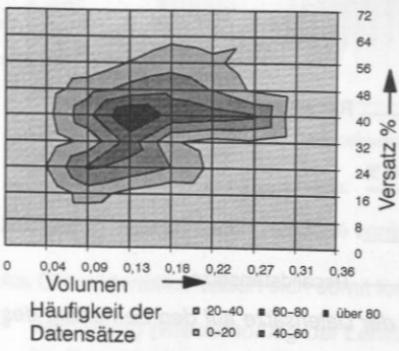
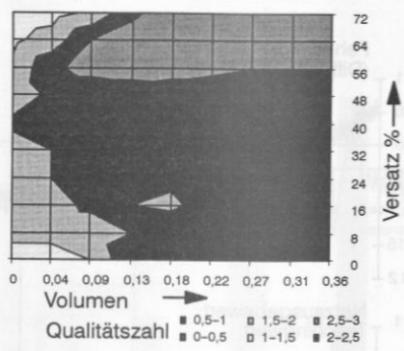
Validität eines Neuronales Modells unter Berücksichtigung verrauschter Daten

Als mathematisch-numerische Verfahren führen Neuronale Netze bei gleichen Recall-Eingaben zu gleichen Recall-Ausgaben. Diese Ausgaben entsprechen einem interpolierten Mittelwert.

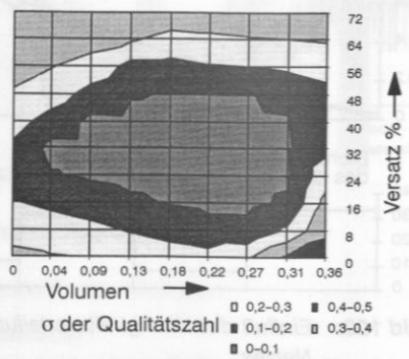
3D-Ansicht der Qualitätsfunktion



Nomogramm der Qualitätsfunktion



Häufigkeitsverteilung der Datensätze



Standardabweichung des Netzmodells

Bild 101: Qualitätsfunktion (s. Abschnitt 8.2) einer Lötverbindung in Abhängigkeit von Dotvolumen und Dotversatz in verschiedenen Darstellungen sowie die dazugehörige Standardabweichung und Verteilung der Datensätze

Durch eine geeignete Modifikation der Lernvorgaben und entsprechende Datenaufbereitung wurden die verwendeten Netze so erweitert, daß aus ihren Ausgaben sowohl der Zielwert (Mittelwert) als auch die zugehörige Standardabweichung berechnet werden können. Dadurch kann für jede Aussage des Neuronalen Modells auch die Zuverlässigkeit angegeben werden. Ein Beispiel gibt Bild 101. Dargestellt ist die Qualitätsfunktion einer Lötverbindung in Abhängigkeit von Dotvolumen und Dotversatz, im Bild links oben in 3D-Projektion, recht oben als Nomogramm. Die Standardabweichung (Bild 101, rechts unten) ist auf die Qualitätszahl bezogen; typischerweise korrespondieren niedrige Standardabweichungen mit vielen Lerndatensätzen (Bild 101, links unten). Der Betrag Standardabweichung integriert in sich Fehler durch eine falsche Modellwahl ebenso wie Fehler aufgrund verrauschter Daten z.B. aus einer realen Produktion.

7.3.3 Nutzung genetischer Algorithmen

Zur Optimierung der Netze hinsichtlich des verbleibenden Fehlers wurden genetische Algorithmen eingesetzt. Die Codierung des Erbgutes umfaßte neben der Zahl der Neuronen pro Schicht das Lernverfahren und die Aktivierungsfunktion. Bild 102 zeigt die Bildschirmmaske eines Netzes (untere Bildhälfte), das von einem genetischen Algorithmus (obere Bildhälfte) optimiert wird.

Für die untersuchten Prozesse wurde festgestellt, daß ein Netz mit folgendem Aufbauprinzip einen sehr niedrigen Fehler bei gleichzeitig guter Generalisierung liefert:

- *drei verdeckte Schichten*
- *die erste verdeckte Schicht hat dreimal so viele Neuronen wie das Netz Eingangsparameter hat*
- *die dritte verdeckte Schicht hat zwei bis drei Neuronen mehr als die Ausgabeschicht*
- *die zweite Schicht liegt mit der Neuronenzahl zwischen der ersten und zweiten Schicht*

Diese Erfahrungen dienen als Ausgangspunkt für die Modellierung weiterer Prozesse. Parallel werden aktuell rechnergestützte Werkzeuge entwickelt, die den Ablauf der Modellierung noch weiter unterstützen und somit beschleunigen. In die Wissensbasis dieser Werkzeuge fließen die bislang gewonnen Erkenntnisse über Topologien etc. ein.

7.3.4 Anwendungsmöglichkeiten der Methode

Mit der Prozeßmodellierung durch Neuronale Netze und die entwickelten Zusatztechniken steht ein leistungsfähiges Werkzeug für eine Reihe von Aufgaben in der Qualitätssicherung der Elektronikproduktion zur Verfügung.

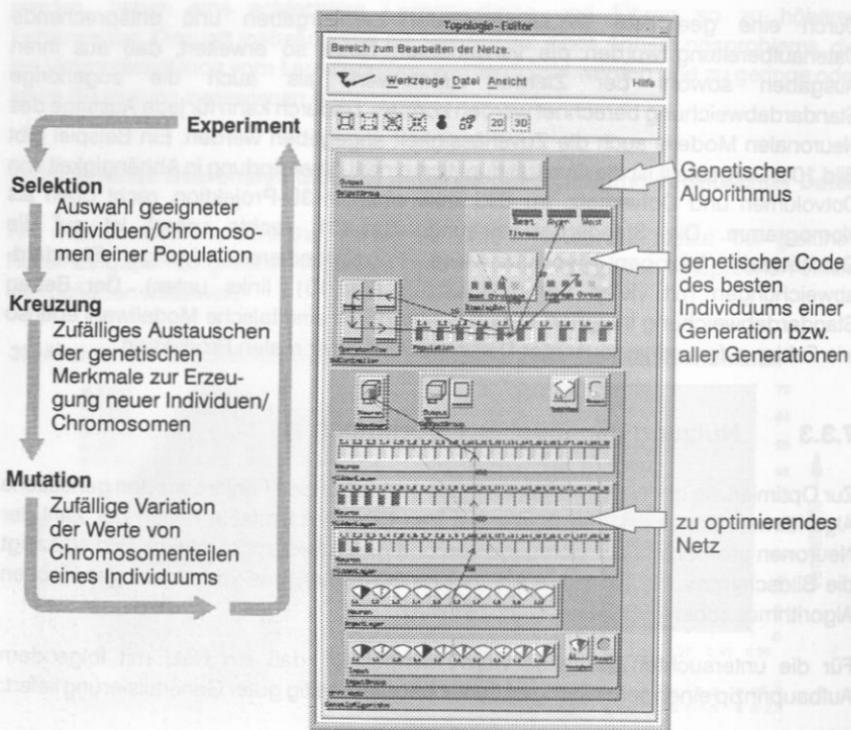


Bild 102: Netzoptimierung mittels eines genetischen Algorithmus: Das Schema des genetischen Algorithmus ist links dargestellt.

So ist es damit möglich, ohne einschränkende Postulate, auf einfache Weise Zusammenhänge zwischen Parametern, erfaßten Störgrößen und der Zielgröße Qualität quantitativ zu modellieren. Die Qualitätsfunktion wird genutzt, um die optimalen Einstellungen für einen Prozeß vorzugeben.

Durch die erweiterte Validierung werden Berechnungen des Qualitätsniveaus und der Prozeßausbeute möglich. Dies kann sowohl grafisch geschehen als auch durch die Übernahme der Werte in stochastische Modelle.

Das Neuronale Modell selbst kann direkt für Qualitätsprognosen eingesetzt oder als Streckenmodell in einen Koordinator integriert werden.

In Kapitel 8 wird die Leistungsfähigkeit der Methode an ausgewählten Beispielen erprobt.

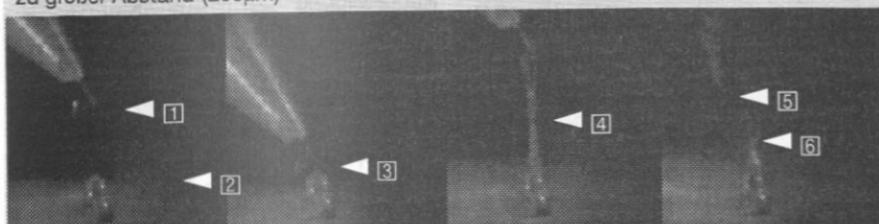
8 Anwendungsbeispiele Neuronaler Modelle in der Elektronikproduktion

Im nachfolgenden werden einige Anwendungsbeispiele der in Kapitel 7 entwickelten Methode vorgestellt. Schon zu Beginn wurde es möglich, den Dispensprozess zu stabilisieren. Die Erforschung der Interprozessabhängigkeiten führte zur Definition von Prozeßfenstern und ermöglichte die Abschätzung von Prozeßausbeuten. Prozeßkoordination auf Basis Neuronaler Modelle, texturbasierte Fehlerklassifikation und röntgenbildbasierte Prozeßdiagnose bilden den Abschluß dieses Kapitels.

8.1 Prozeßstabilisierung am Beispiel des Dispensprozesses

Der Lotpastenauftrag verursacht heute 60-70% der Baugruppenfehler, unabhängig vom verwendeten Auftragsverfahren. Qualitätssicherung und Prozeßstabilisierung haben hier somit das größte Rationalisierungspotential in der Prozeßkette.

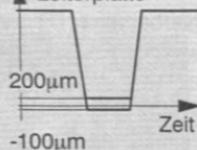
zu großer Abstand ($200\mu\text{m}$)



optimaler Abstand (leichtes Eindringen in PCB, $-100\mu\text{m}$ Abstand)



Abstand
Nadelspitze -
Leiterplatte



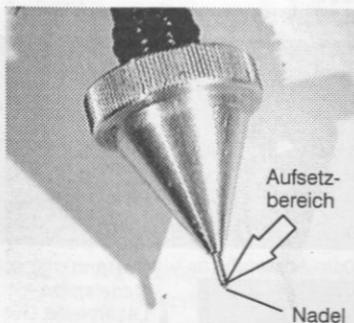
1 Der Dispenser bringt das bei 2 nicht abgesetzte Lot mit, bei 3 wird weiter Lot dispensiert, das vergrößerte Lotvolumen führt zur Fadenbildung 4, nach Reißen des Fadens nimmt der Dispenser 5 erneut Lot zur nächsten Dispensposition mit, ein Zipfel 6 bildet sich. Die Abstandswerte wurden durch Sensoren bzw. durch die verbliebenen Eindrücke der Nadel in das Substrat bestimmt.

Bild 103: Einfluß des Abstandes Nadelspitze-Leiterplatte auf die dispensierte Lotmenge und Form des Lotdepots

Untersucht wurde ein Zeit-Druck-Kartuschendispenser. Ein erstes Modell des Dispensprozesses umfaßte die Parameter Druck, Dispenszeit, Temperatur, Nadellänge und Nadelinnendurchmesser. Die Lotpaste und deren rheologische Eigenschaften wurden nicht variiert. Das Lern-/Recall-Verhalten des Netzes wies auf das Fehlen eines signifikanten Parameters oder eine nicht erfaßte Störgröße hin (Abschnitt 7.3.2). Das dispense Volumen schwankte bei konstanten Parametern um $\pm 30\%$ (entsprechend $\pm 3\sigma$), dies entspricht einem c_p -Wert von 1,1.

Mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera wurde der Prozeß beobachtet (Bild 103) und eine Ursache gefunden: Die pneumatische Zustellung des Dispenskopfes zur Baugruppe führte dazu, daß der Abstand zwischen Nadel und Baugruppe stark schwankte. Es kam zu Kollisionen mit elastischer Verformung der Nadel und des Nadelquerschnitts einerseits und zu zu großen Abständen andererseits. Ersteres führt zum versetzten Dispensen falscher Lotmengen, letzteres zum Nichtabsetzen einer sich akkumulierenden Lotmenge oder zur Brückenbildung.

konventioneller Dispenskopf



verbesserter Dispenskopf

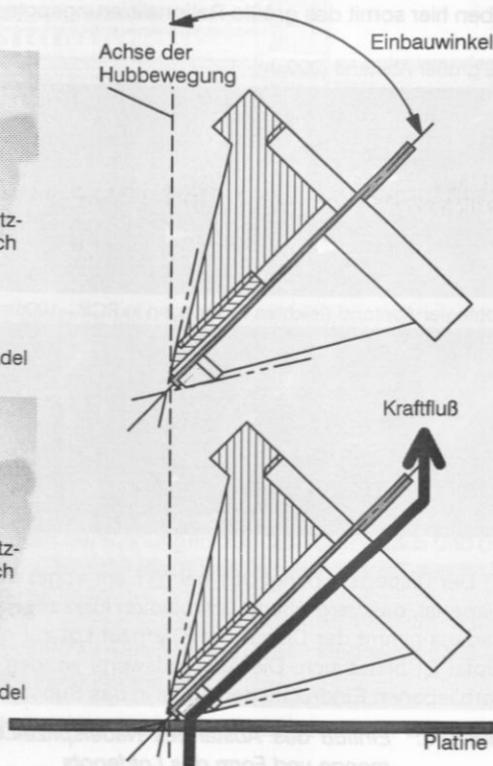
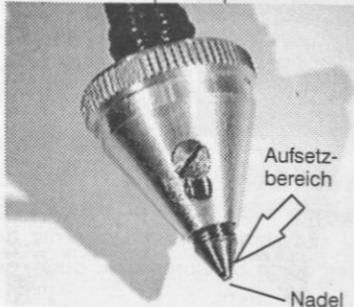


Bild 104: Schema des verbesserten Dispenskopfes [47]: Die Aufsetzkraft wird im wesentlichen vom Kopf und nicht von der Nadel aufgenommen.

Als optimal erwies sich ein leichtes Aufsetzen der Nadel auf der Baugruppe. Dies entspricht einem negativen Abstand von ca. 100-300 μm . Um sicherzustellen, daß der optimale Abstand zuverlässig eingehalten wird, wurde im Rahmen der Arbeit ein Spezialkopf (Bild 104)[47] entwickelt und eingesetzt. Die Volumenschwankungen wurden so auf $\pm 10\%$ (entsprechend $\pm 3\sigma$) reduziert (c_p -Wert=3,6).

8.2 Interprozeßanalyse mit Neuronalen Netzen

Nach der in Abschnitt 8.1 beschriebenen Prozeßstabilisierung wurden mit den in Kapitel 7 dargestellten Methoden die Prozesse Lotpastendispensen, Bestücken und Reflowlötten der Modellfabrik des FAPS modelliert.

Aus der Vielzahl der Prozeßparameter der Elektronikproduktion wurden diejenigen ausgewählt, die auch in der industriellen Praxis variiert werden. Parameter, die in der Industrie nach Möglichkeit nicht variiert werden, wie z.B. die Lotpaste oder die Metallisierung, wurden konstant gehalten. Variiert, bzw. erfaßt wurden u.a. das Lotvolumen, der XY-Versatz von Dot und Bauelement, der Dispensdruck, die Dispenstemperatur, die Bestückkraft, die Bestückverdrehung und das Temperaturprofil des Ofens.

Zu jeder Komponente wurde nach jedem Fertigungsschritt ein Qualitätsvektor aus den verschiedenen Merkmalen ermittelt. Der Qualitätsvektor, der nach dem Lötten ermittelt wurde, ist in den nachfolgenden Diagrammen zu einer Qualitätszahl zusammengefaßt. Deren Wert wurde auf den Bereich zwischen null und fünf normiert. Die Berechnung der Qualitätszahl geschah in Anlehnung an die üblichen Normen [124][123] und an die Ergebnisse des BMBF-Projektes *Zuverlässigkeit von SMT-Weichlötstellen im visuellen Grenzfallbereich* [167].

Für die Teilprozeßbetrachtungen wurden jeweils lötstellen- bzw. bauteilorientierte Qualitätszahlen gebildet, die bei der Gesamtprozeßbetrachtung zu einer kombinierten Qualitätszahl gemittelt wurden. Zur Bewertung herangezogen, wurden die Zahl der umflossenen Seiten, die Benetzungshöhe, die Stirnflächenbenetzung, die Lunker, die Form der Lotflanke, der XY-Versatz nach dem Lötten, die Bauteilverdrehung und die Lotperlen.

Zur Qualitätszahl wurde jeweils eine Standardabweichung berechnet. In den Diagrammen wird eine Standardabweichung bezogen auf eine Grundgesamtheit dargestellt, die für entsprechende Anwendungen auf die Standardabweichung einer Stichprobe umzurechnen ist.

Nachfolgend sind die Zusammenhänge für die Gehäuseformen Chip 1206, SOT 23 und SOT 89 dargestellt und erläutert. Die unvermeidbare Rasterung bei der Datenaufnahme findet sich in den Diagrammen wieder. Es wurden auch die Systembereiche dargestellt, deren Generalisierung den Validierungskriterien nicht

stand hält. Dazu gehören beispielsweise alle Lotvolumina unter $0,09 \text{ mm}^3$. Dadurch sollen die Grenzen der Methode verdeutlicht werden.

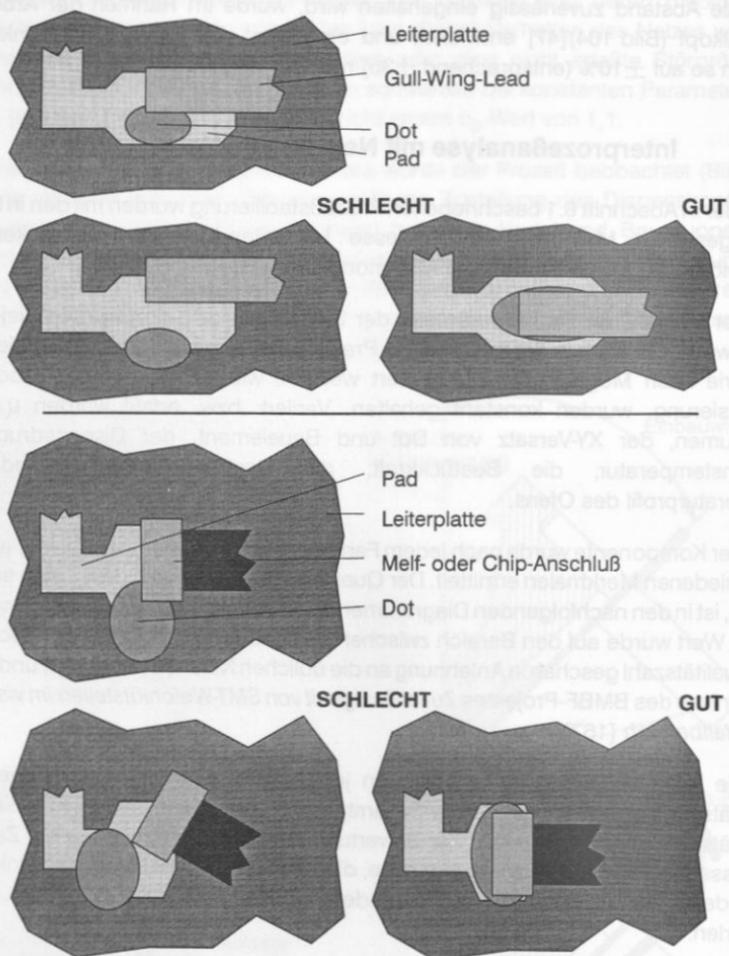


Bild 105: Fugesituation vor dem Lötens für Gull-Wing- bzw. Melf-/Chip-Anschlüsse und Gut-/Schlecht-Bild nach dem Lötens

Von besonderem Interesse ist das Zusammenwirken der Fügepartner und ihre Wechselwirkung während des Lötens (Bild 105), durch das insbesondere Positionierungsfehler kompensiert aber auch verstärkt werden können. Der bekannte Effekt wurde bislang nur in Teilaspekten quantitativ beschrieben. Hier ist eine die meisten Parameter umfassende, präzise, quantitative Beschreibung erreicht worden, wie insbesondere in Abschnitt 8.2.2 dargelegt wird.

8.2.1 Neuronales Prozeßmodell des Lotpastenauftrags

Bild 106 zeigt die Auswirkungen des XY-Versatzes auf die Lötverbindung bei 1206-Bauelementen. Aufgrund der hohen Streuung [1] ist das Modell im Bereich eines X-Versatzes über 48% [2] nicht mehr aussagekräftig. Durch Unterrepräsentation kommt es bei [3] zur Ausbildung von Pseudosymmetrien.

1206-Bauelemente zeigen eine höhere Anfälligkeit bei einem Y-Versatz als bei einem X-Versatz. Ein X-Versatz kompensiert sogar in Grenzen einen Y-Versatz [4].

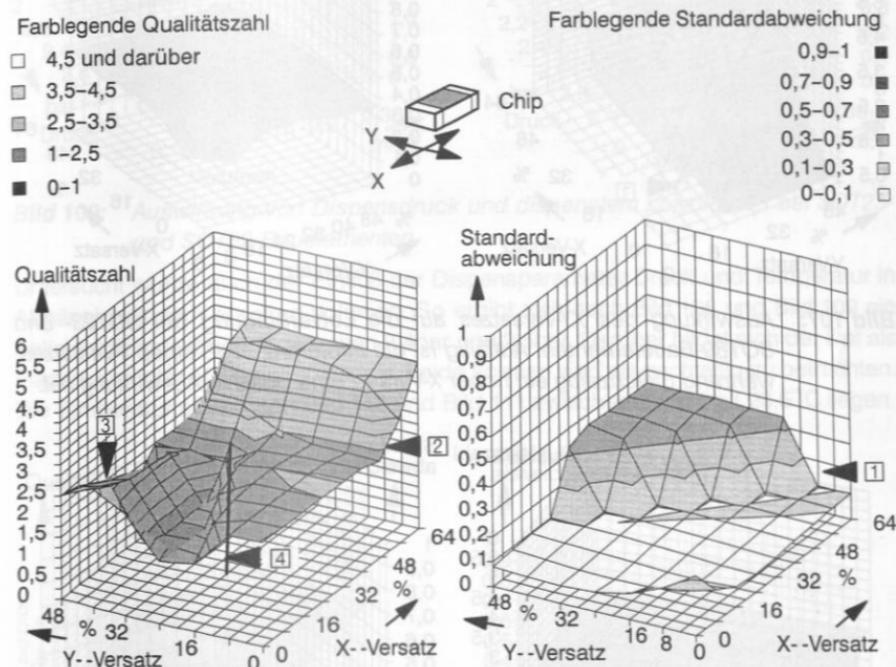


Bild 106: Auswirkung des XY-Versatzes auf die Lötverbindung bei 1206-Bauelementen: Qualitätszahl links, Standardabweichung rechts; oberhalb eines X-Versatzes von 48% sind die Qualitätswerte aufgrund der hohen Streuung der Trainingsdaten nicht mehr abgesichert

Bild 107 zeigt die Auswirkungen des XY-Versatzes auf die Lötverbindung bei SOT23- und SOT89-Bauelementen. Unerwartet ist der positive Einfluß eines X-Versatzes. Die Ursache ist ein Layoutfehler der Platine, bzw. ein Bauelementfehler, da die Footprint-Abmessungen des Bauelements größer sind als die der Platine. Durch den Versatz wurde eine bessere Benetzung erreicht. Auch hier kann ein Y-Versatz durch einen X-Versatz kompensiert werden [1].

1206-Bauelementen, die Montierübiger zeigen die Zunahme der Lötmenge bei Temperatur und dispersen Lotvolumen bei 1206-Bauelementen, die Montierübiger zeigen die Zunahme der Lötmenge mit der Temperatur

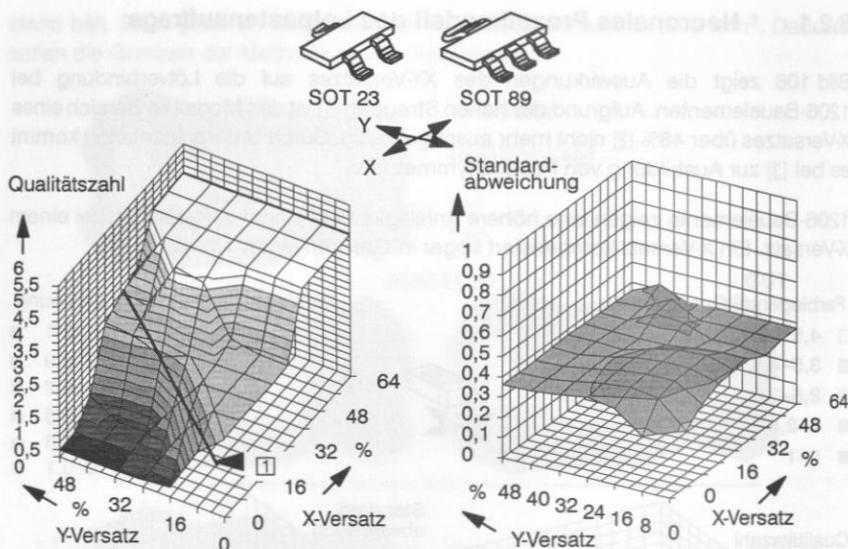


Bild 107: Auswirkung des XY-Versatzes auf die Lötverbindung bei SOT23- und SOT89-Bauelementen: Auffällig ist die Intoleranz bzgl. eines Y-Versatzes, während gleichzeitig ein hoher X-Versatz eine positive Auswirkung hat.

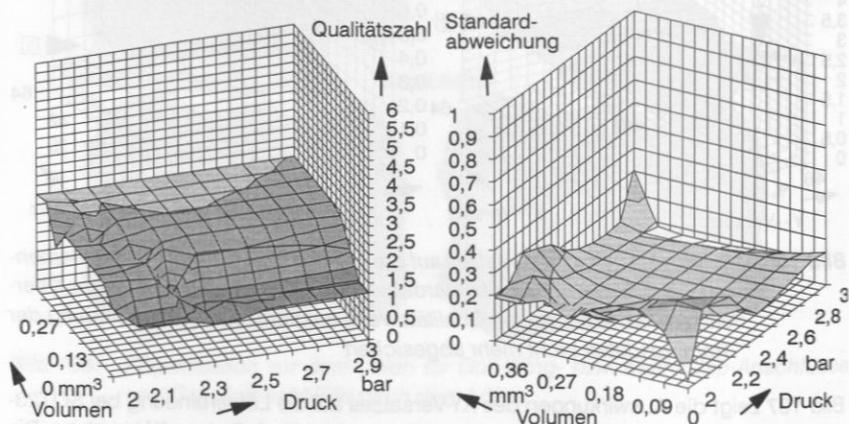


Bild 108: Auswirkung von Dispensdruck und dispenstem Lotvolumen bei 1206-Bauelementen, bei höheren Drücken kommt es zur verstärkten Lunkenbildung.

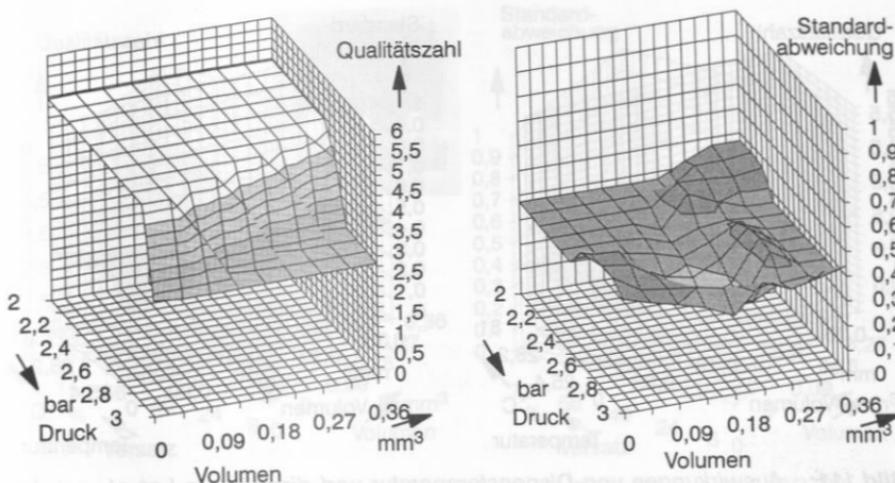


Bild 109: Auswirkung von Dispensdruck und dispensem Lotvolumen bei SOT23- und SOT89-Bauelementen

Untersucht wurde auch der Einfluß der Dispenparameter Druck und Temperatur in Abhängigkeit vom erzielten Volumen. So ergibt sich nach Bild 108 und Bild 109 ein optimaler Einstellbereich zwischen 2,4bar und 2,5bar. Darüber bildet sich der Dot als Fladen, darunter als Zipelmütze aus, beide Formen sind als nachteilig zu betrachten. Die Temperatur sollte nach Bild 110 und Bild 111 zwischen 27°C und 28,5°C liegen.

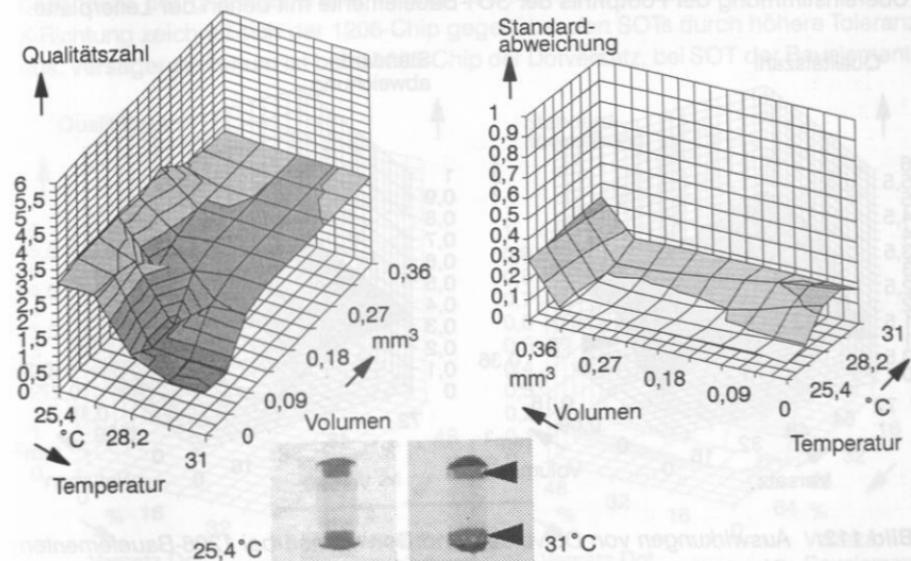


Bild 110: Auswirkung von Dispenstemperatur und dispensem Lotvolumen bei 1206-Bauelementen, die Röntgenbilder zeigen die Zunahme der Lunker mit der Temperatur.

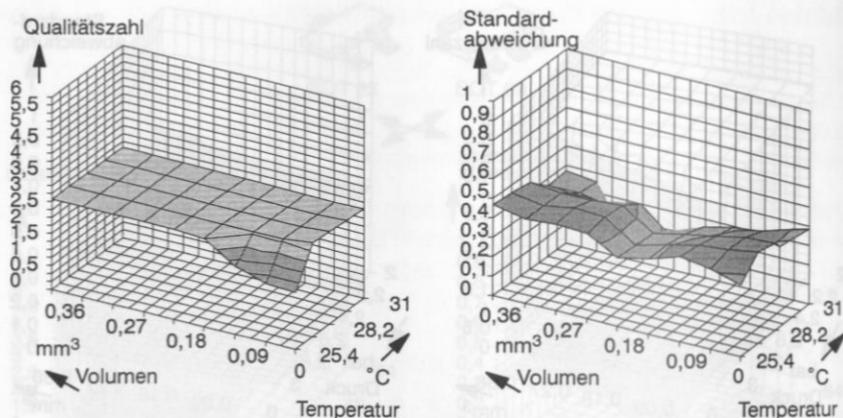


Bild 111: Auswirkungen von Dispenstemperatur und dispenstem Lotvolumen bei SOT23- und SOT89-Bauelementen

Bei höheren Temperaturen steigt die Gefahr der Lunkerbildung. Dadurch erklären sich Beobachtungen aus der industriellen Praxis, wonach das Qualitätsniveau abhängig von der Jahreszeit ist. Wie Bild 112 und Bild 113 erkennbar, wird ein Dotversatz durch ein höheres Dotvolumen zumindest teilweise kompensiert \square . Der überraschend positive Einfluß eines Dotversatzes, erklärt sich wie zuvor aus der schlechten Übereinstimmung der Footprints der SOT-Bauelemente mit denen der Leiterplatte.

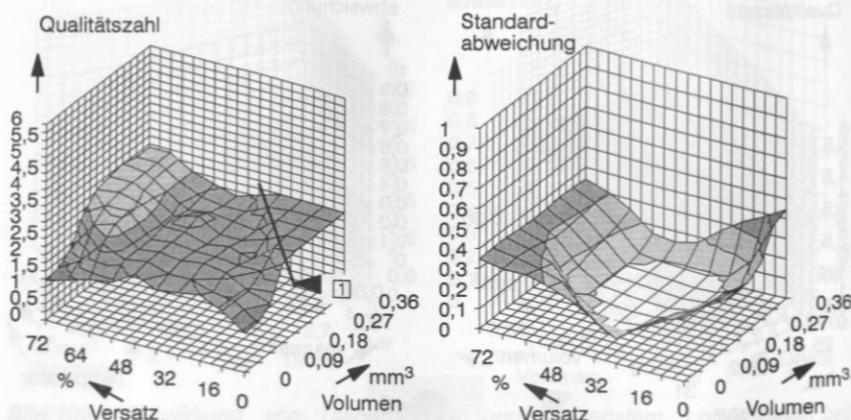


Bild 112: Auswirkungen von Dotversatz und Dotvolumen bei 1206-Bauelementen: Oberhalb von ca. 64% Versatz wird das Validitätskriterium unterschritten, ein Dotversatz kann durch ein höheres Volumen teilweise kompensiert werden \square .

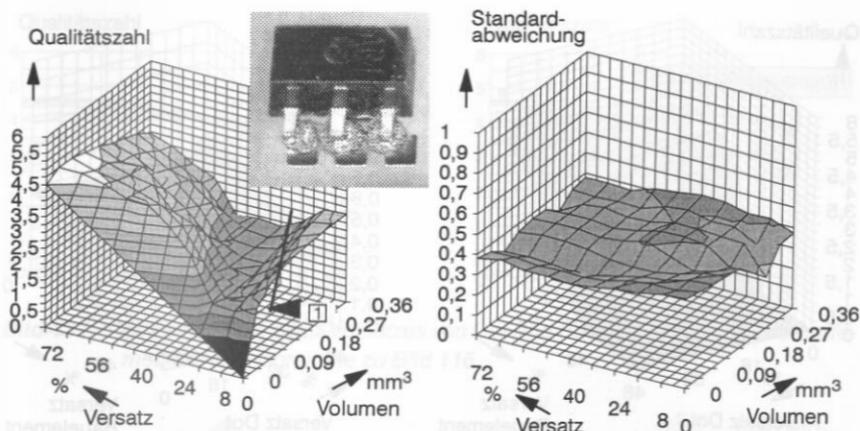


Bild 113: Auswirkungen von Dotversatz und Dotvolumen bei SOT23- und SOT89-Bauelementen: Das überraschend hohe Ansteigen der Qualität mit dem Versatz korrespondiert zu Bild 107 (Foto).

8.2.2 Neuronales Bestückmodell

Untersucht wurde u.a. die Wechselwirkung zwischen Dot und Bauelement. Hier ist besonders der gleichgerichtete Versatz von Interesse. Bezüglich des Versatzes in X-Richtung zeichnet sich der 1206-Chip gegenüber den SOTs durch höhere Toleranz aus. Versagenskriterium ist beim 1206-Chip der Dotversatz, bei SOT der Bauelement-

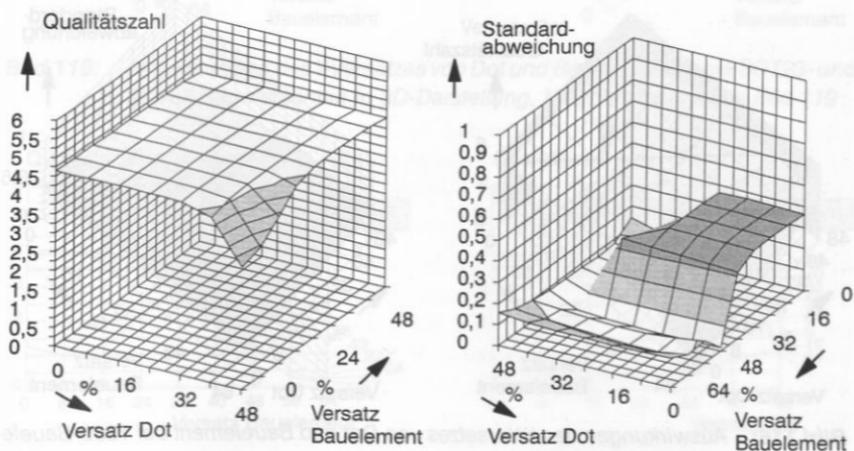


Bild 114: Auswirkungen des X-Versatzes von Dot und Bauelement bei 1206-Bauelementen

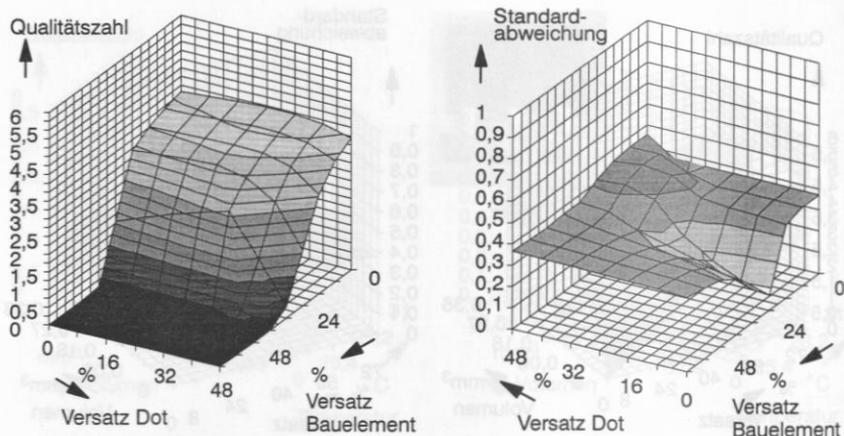


Bild 115: Auswirkungen des X-Versatzes von Dot und Bauelementen bei SOT23- und SOT89-Bauelementen

versatz. In Y-Richtung sind beide Bauformen gleich tolerant. Auffällig ist, daß ein gleicher Versatz von Dot und Bauelement immer zum jeweils besten Ergebnis führt (□ in Bild 116 und Bild 118): Das Lotdepot zieht das Bauelement auf die Pads. Versagenskriterium ist in beiden Fällen der Versatz des Lotdepots. Die Wechselwirkungen mit dem Lotvolumen beschreiben Bild 112 und Bild 113. Somit sind qualitative Beobachtungen bezüglich des Selbstzentriereffekts [39] jetzt quantitativ im Neuronalen Modell beschrieben.

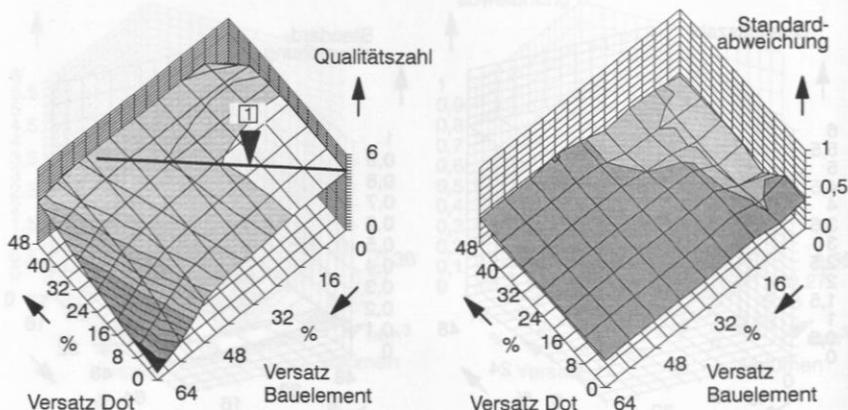


Bild 116: Auswirkungen des Y-Versatzes von Dot und Bauelement bei 1206-Bauelementen in 3D-Darstellung, Nomogramme siehe Bild 117

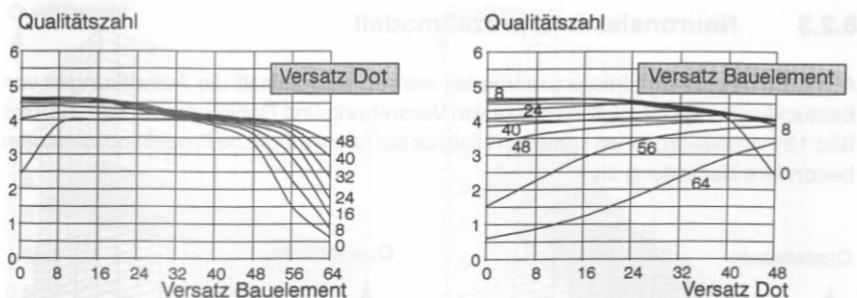


Bild 117: Auswirkungen des Y-Versatzes von Dot und Bauelement bei 1206-Bauelementen: Nomogramme zu Bild 116

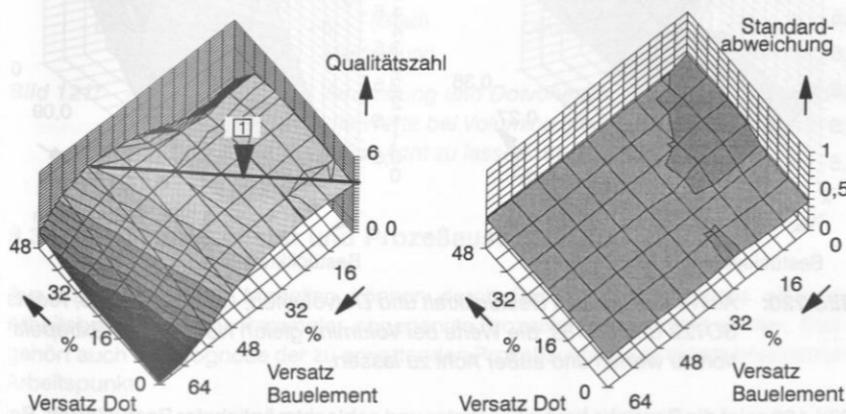


Bild 118: Auswirkungen des Y-Versatzes von Dot und Bauelementen bei SOT23- und SOT89-Bauelementen in 3D-Darstellung, Nomogramme siehe Bild 119

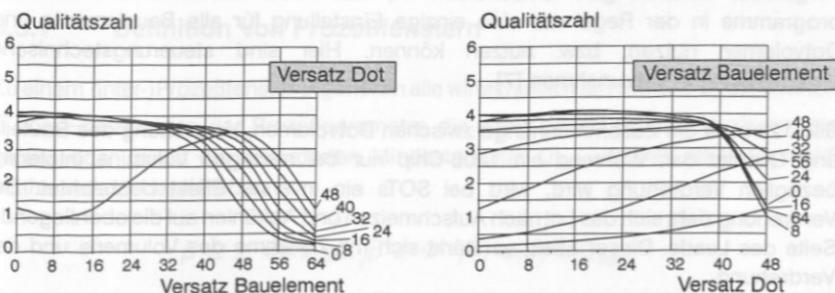


Bild 119: Auswirkungen des Y-Versatzes von Dot und Bauelementen bei SOT23- und SOT89-Bauelementen: Nomogramme zu Bild 118

8.2.3 Neuronales Interprozeßmodell

Aus dem Neuronalen Interprozeßmodell werden beispielhaft die Auswirkungen von Bestückkraft und Dotvolumen sowie von Verdrehung und Dotvolumen in Bild 120 und Bild 121 visualisiert. Ihnen kommt in Hinblick auf heute mögliche Prozeßkoordinatoren besondere Bedeutung zu.

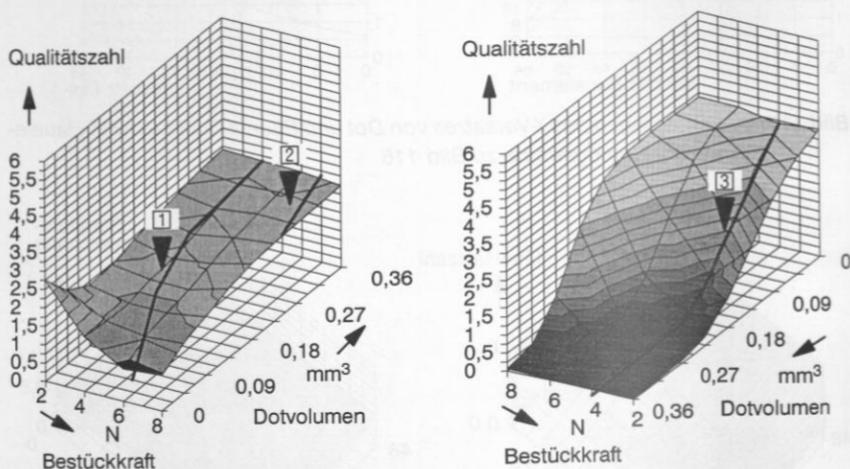


Bild 120: Auswirkungen von Bestückkraft und Dotvolumen, links 1206-Chip, rechts SOT23 und SOT89, die Werte bei Volumina gleich Null sind als Extrapolation zu werten und außer Acht zu lassen.

Bild 120 zeigt die Bereiche bestmöglicher und schlechtmöglicher Bestückkraft. Bei SOT-Bauelementen ist in 3 eine schlechtmöglichste Bestückkraft über alle Volumenbereiche markiert. 1 und 2 markieren volumenabhängige schlechtmöglichste Einstellungen. Entscheiden ist, daß heute Bestückmaschinen- und programme in der Regel nur eine einzige Einstellung für alle Bauelemente und Dotvolumen nutzen, bzw. nutzen können. Hier sind steuerungstechnische Verbesserungen vorzunehmen [7].

Bild 121 stellt die Zusammenhänge zwischen Dotvolumen, Verdrehung des Bauteils und Qualität dar. Während ein 1206-Chip nur bei niedrigen Volumina intolerant bezüglich Verdrehung wird, wird bei SOTs ein inverser Effekt beobachtet: Bei Verdrehung zieht sich das Lot nach Aufschmelzen und Abkühlen auf die oberliegende Seite des Leads. Dieser Effekt verstärkt sich mit Zunahme des Volumens und der Verdrehung.

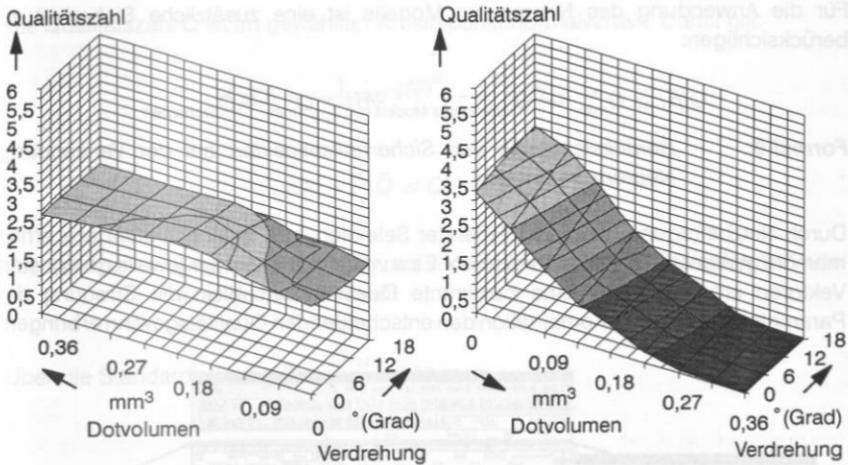


Bild 121: Auswirkungen von Verdrehung und Dotvolumen, links 1206-Chip, rechts SOT23 und SOT89, die Werte bei Volumina gleich Null sind als Extrapolation zu werten und außer Acht zu lassen.

8.3 Prozeßfenster und Prozeßausbeute

Aus den Neuronalen Modellen können durch Befragung des Netzes effiziente Arbeitsbereiche für die Parameter, sogenannte Prozeßfenster, ermittelt werden. Dazu gehört auch die Prognose der zu erwartenden Prozeßausbeute in einem bestimmten Arbeitspunkt.

Die Daten werden nachfolgend aus dem Neuronalen Modell direkt gewonnen, können aber auch über die vorstehenden Nomogramme ermittelt werden.

8.3.1 Definition von Prozeßfenstern

Zu einem (inter-)Prozeßfenster \mathcal{P} gehören alle wirtschaftlich sinnvollen Kombinationen \vec{p} von Einstellungen der Prozeßparameter, die eine Qualität $Q(\vec{p})$ produzieren, die größer oder gleich der geforderten Mindestqualität Q_{min} ist. Dies ist in Formel 8 mathematisch beschrieben.

$$\vec{p} \in \mathcal{P}, \text{ wenn gilt } (\vec{p} \in \mathcal{W} \cap Q(\vec{p}) \geq Q_{min})$$

Formel 8: Definition des Prozeßfensters \mathcal{P} ; \mathcal{W} bezeichnet den wirtschaftlich sinnvollen Bereich

Für die Anwendung des Neuronalen Modells ist eine zusätzliche Sicherheit zu berücksichtigen:

$$Q(\vec{p}) \geq Q_{\min} \Rightarrow Q_{\text{neuronales Modell}}(\vec{p}) > Q_{\min} + Q_{\text{Sicherheit}}$$

Formel 9: Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten bei der Verwendung Neuronaler Modelle

Durch Netzbefragung und anschließender Selektion, z.B. in einer Datenbank erhält man die geeigneten Parametervektoren. Eine weitere Analyse der jeweils geeigneten Vektoren ergab, daß für eine bestimmte Qualität nicht allein die Streuung der Parameter sondern ihre Kombination den entscheidenden Qualitätsgewinn erbringen.

Kennummer	Druck	Zeit	Temp	Volumen	Kartusche	Q wert	StAbw	Vari
3400	0.5	0.2	0.8	0.6	0.8	0.90009	0.065503	0.004291
10312	0.5	0.2	0.8	0.9	0.3	0.900099	0.404495	0.163616
577	-0.2	0.2	0	0.3	0.2	0.900158	0.075475	0.005697
1096	0.5	0.2	0.8	0.5	0.2	0.900391	0.302211	0.091331
10303	0.5	0.2	0.8	0.1	0.1	0.900577	0.000720	0.100464

Bild 122: Die Befragung des (Neuronalen) Prozeßmodelles liefert normierte Werte, die in reale Stellwerte umgerechnet werden.

8.3.2 Prognose der Prozeßausbeute im Arbeitspunkt

Die erweiterte Validierung liefert zu jeder Qualitätszahl Q eine Standardabweichung σ , die sowohl die Streuung der experimentell gewonnenen Daten als auch die Streuung der Netzaussage generalisiert enthält. Ausgehend von einem geforderten Mindestqualitätsniveau Q_{\min} läßt sich so für jede Parameterkombination die Prozeßausbeute prognostizieren.

Die Qualitätszahl Q ist im gewählten Arbeitspunkt normalverteilt. Damit gilt:

$$f_N(Q) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{Q-\bar{Q}}{\sigma}\right)^2}; \quad -\infty < Q < \infty$$

$$F_N(Q) = P(\bar{Q} \leq Q) = \int_{-\infty}^Q f_N(u) du$$

Formel 10: Dichtefunktion $f_N(Q)$ und Verteilungsfunktion $F_N(Q)$ der Normalverteilung der Qualitätszahl

Über die Standardisierung $\bar{Z} = \frac{Q-\bar{Q}}{\sigma}$ erhält man:

$$\varphi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}Z^2}; \quad -\infty < Z < \infty$$

$$\Phi(Z) = P(\bar{Z} \leq Z) = \int_{-\infty}^Z \varphi(u) du$$

Formel 11: Dichtefunktion $\varphi(Z)$ und Verteilungsfunktion $\Phi(Z)$ der standardisierten Normalverteilung der Qualitätszahl Z

Damit wird wie im nachfolgenden Beispiel die Ausbeute und der Ausschuß für den ersten Parametervektor in Bild 122 berechnet:

$$Z_{\min} = \frac{Q_{\min} - \mu_{\text{Netz}}}{\sigma_{\text{Netz}}} = \frac{\frac{4}{5} - 0,9}{0,0655} = -1,526$$

$$\Phi(1,526) = P(\bar{Z} \leq Z) = \int_{-\infty}^Z \varphi(u) du = 6,35\% \text{ Ausschuß}$$

Formel 12: Berechnung der Ausbeute im Arbeitspunkt: Der Ausschuß beträgt 6,35%, die Ausbeute somit 93,65%, vorausgesetzt der Arbeitspunkt kann eingehalten werden.

8.4 Prozeßkoordination mittels Neuronaler Netze

In Abschnitt 5.3.2 wurde ein kennliniengesteuerter Koordinator vorgestellt. Er steuert die Bestückkraft in Abhängigkeit von spezifischen Lotvolumenwerten des Bauelements. Erste Untersuchungen zeigten eine teilweise Verbesserung, aber auch eine teilweise Verschlechterung der Qualität. Dies lag letztlich in der mangelnden Kenntnis und Modellierung der Abhängigkeiten.

Die in Abschnitt 8.2 vorgestellten Zusammenhänge zeigen die Möglichkeiten, Fehler eines Prozesses durch Modifikation eines nachfolgenden Prozesses auszugleichen. Die Analyse der Einflußmöglichkeiten empfiehlt im ersten Schritt die Überführung des Gesamtprozesses in einen stabilen Arbeitspunkt, bei dem die Einstellwerte mit Hilfe des Prozeßmodells aufeinander abgestimmt wurden.

Zufällige Fehler sind jedoch auch dann unvermeidbar. Somit ist es sinnvoll, durch geeignete Zwischenprüfungen und modellbasierte Prognosen Fehler zu erfassen und in ihrer Auswirkung auf die Produktqualität zu bewerten. So kann zumindest eine unnötige Wertschöpfung vermieden werden, in Grenzen wird sogar eine Kompensation des Fehlers möglich sein.

8.4.1 Entwurf eines Neuronales Streckenmodells

Wie in Abschnitt 5.3.2 gezeigt, ist eine Kennlinien- oder Kennfeldregelung nicht ausreichend, da zuviele Prozeß- und Prüfparameter gleichzeitig zu berücksichtigen sind. Der Übergang auf Neuronale Modelle löst dieses Problem.

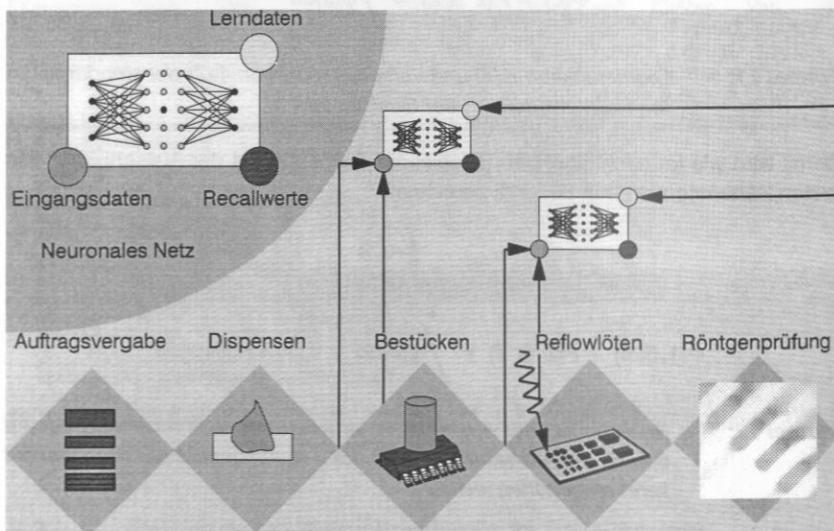


Bild 123: Trainingsphase für Koordinatoren auf Basis Neuronaler Netze

Dazu werden in der Trainingsphase Neuronale Netze parallel zur Produktion geschaltet, wie in Bild 123 dargestellt. Die unterschiedlich langen Abschnitte der Produktion stellen dabei die jeweils betrachtete Strecke der aufzubauenden Koordination dar.

Prinzipiell gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Prozeß- und Prüfparameter auf die Eingangs- und Lerndaten zu verteilen. Empfehlenswert ist die folgende Aufteilung:

- Die Prüfdaten der ankommenden Baugruppe sowie die Prozeßdaten, mit denen sie gefertigt wurde, werden als Eingangsvariablen genutzt. Diese Werte stehen über das Informationssystem sowohl während der Lern- und Validierungsphase als auch im Einsatz zu diesem Zeitpunkt der Baugruppenfertigung immer bereit.
- Die Einstellungen, die für die weitere Fertigung der Baugruppe vorgesehen sind, dienen ebenfalls als Eingangswerte.
- Als Lernvorgabe dient die Qualitätszahl des Endproduktes.

8.4.2 Aufbau des Neuronalen Koordinators

Das trainierte Netz des Koordinators kann unter bestimmten Umständen, die in Abschnitt 8.6 erläutert werden, invertiert werden, um Vorgaben für die nachfolgenden Prozeßschritte zu ermitteln. Dies Vorgehen fordert jedoch eine Bijektivität zwischen Prozeßparametern und Qualitätszahl, die nach heutigen Möglichkeiten nicht immer gewährleistet werden kann.

Alternativ wird das Neuronale Modell zur Qualitätsprognose eingesetzt: Dabei werden die Parameter des direkt auf den Koordinator folgenden Prozeß innerhalb vorgegebener Bereiche variiert. Über das Neuronale Modell wird die Qualität vorausberechnet. Die Einstellungskombination mit der besten Qualitätszahl wird verwendet.

Sind gegenüber der aus der Arbeitsvorbereitung vorgegebenen Produktionsparameter keine signifikanten Verbesserungen möglich, werden die ursprünglichen Vorgaben verwendet.

Sind innerhalb dieses Prozesses keine Fehlerkompensationen möglich, werden die Einstellungen des direkt nachfolgenden Prozesses und dessen Nachfolgers variiert. Dadurch entsteht eine Koordinatorkaskade.

Wird dennoch die geforderte Mindestqualität unterschritten, wird der Ausschub der Baugruppe vom Koordinator empfohlen.

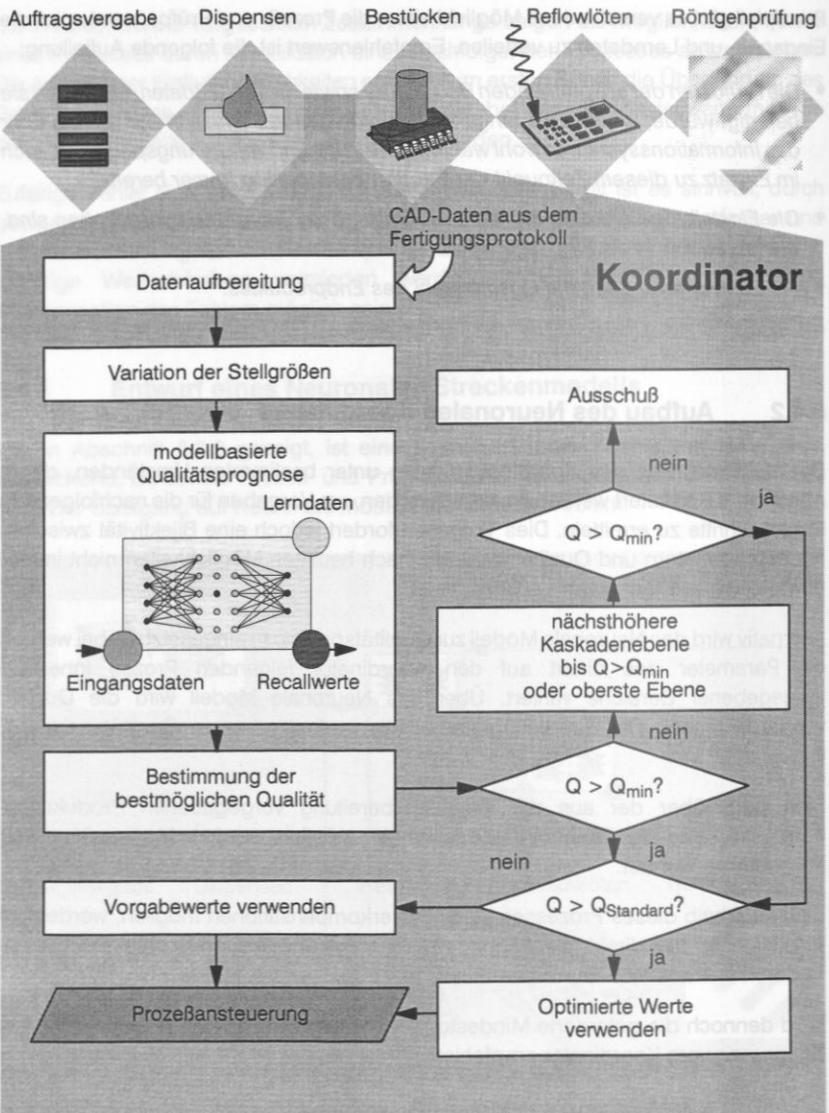


Bild 124: Prinzip des Neuronalen Koordinators auf Basis der Qualitätsprognose

8.5 Textbasierte Fehlerklassifikationssysteme in der Röntgenbildauswertung

Industrielle automatische Klassifikationssysteme für die Röntgenbildauswertung von Lötstellen nutzen nach wie vor lediglich einfache, regelbasierte Auswertelgorithmen auf Basis binärer Logik. Als Datenbasis dienen eine Reihe von geometrischen Merkmalen wie in Bild 125 ausschnittsweise dargestellt.

```
# width_x_100
# trace_length
# heel_solder
# pad_solder
# toe_solder
# valley_width
# measured_length
# heel_pad_delta
# toe_pad_delta
# heel_board_delta
# pad_board_delta
# toe_board_delta
# fillet_solder
# max_toe_slope
# toe_heel_dist
# delta_heel_maxes
# off_pos_width
```

Lötstellenbreite
 Länge des Traces
 Lotvolumen an der Verse
 Lotvolumen auf dem Pad
 Lotvolumen an der Spitze
 Valleybreite am dunkelsten Punkt
 Länge der Lötstelle
 Differenz der Schwärzung Ferse-Pad
 Differenz der Schwärzung Spitze-Pad
 Differenz der Schwärzung Verse-Board
 Differenz der Schwärzung Pad-Board
 Differenz der Schwärzung Spitze-Board
 Lotvolumen im Fillet (Lotmeniskus)
 Maximale Lotflanke in der Spitze
 Länge von Ferse bis Spitze
 Höhe der Lotverse
 Offset für Verschiebung

Auszug aus IRT Regeldatei ruleinfo.500

Bild 125: Meßgrößen industrieller Klassifikationsalgorithmen

Diese Merkmale werden durch einfache, algebraische Operationen aus der Pixelmatrix des Röntgenbildes gewonnen. Durch die verwendete binäre Logik kommt es trotz sehr guter Meßfähigkeit der Röntgenanlagen zu teilweise hohen Pseudofehlerraten. [22]

8.5.1 Merkmalsauswahl und Bestimmung der Korrelation zu den Fehlerklassen

Grundlage jeder Klassifikation ist die Auswahl geeigneter Merkmale. In diesem Fall wurden beispielhaft statistische Texturmerkmale zweiter Ordnung als Kenngrößen bei der Klassifikation von BGA-Röntgenbildern herangezogen. [27]

Durch iteratives Vorgehen wurden dementsprechend die Merkmale der Lötstellen auf ihre Relevanz für die Fehlerklassifikation bewertet. Aus der Vielzahl möglicher Fehlerklassen wurden für die exemplarische Umsetzung diejenigen Fehlerklassen

ausgewählt, die aus der isolierten 2D-Betrachtung einer BGA-Lötstelle heraus bewertet werden können:

- *Voidgröße*
- *Voidanzahl*
- *Lotvolumen*

Die Texturmerkmale Entropie, Kontrast, Homogenität und Inverses Differenzenmoment [27] erwiesen sich als geeignete Kenngrößen für die Beurteilung der Lötstelle.

Diesen statistischen Größen entsprechen jedoch direkt keine metrischen Größen, wie sie in den einschlägigen Normen und Prüfvorschriften für die Beurteilung von Lötstellen herangezogen werden. Die Erkennungssicherheit durch einen einzigen Parameter ist in der Regel nicht ausreichend, unter Umständen müssen alle vier genannten Texturmerkmale zur Bewertung gleichzeitig herangezogen werden. Erschwerend kommt hinzu, daß die Verknüpfung der Texturmerkmale vom zu bewertenden Fehlertyp abhängig ist. Da die Texturmerkmale statistisch basiert sind, ist nicht zu erwarten, daß exakte Grenzwerte für eine Gut-Schlecht-Beurteilung gefunden werden können.

Einen Ausweg bieten Neuronale Netze und NeuroFuzzy-Systeme. In einem ersten Schritt wurden daher Back-Propagation-Netze entworfen, trainiert und analysiert, um Aufschluß über die Relationen zwischen den Texturmerkmalen und den metrischen Kenngrößen zu erhalten (Bild 126).

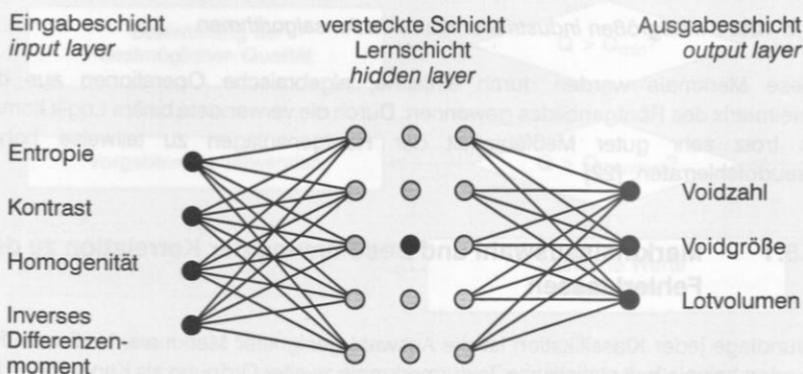


Bild 126: Schema eines Neuronalen Netzes zur Abbildung der Texturmerkmale auf metrische Größen

Durch die Analyse trainierter Netze, die nur ein Neuron in einer versteckten Schicht hatten, wurden die Eingangsparameter bzgl. ihrer Relevanz für die jeweilige Klassifikation bewertet (Tabelle 24).

Eingangsparameter	Zielgröße	Voidzahl	Voidgröße	Lotvolumen
	Homogenität	-	0	+
	Entropie	0	0	+
	inverses Differenzenmoment	++	0	-
	Kontrast	++	0	++

Tabelle 24: Relevanz der Texturmerkmale für die Fehlerbeurteilung
 - keine Relevanz erkennbar, 0 Relevanz erkennbar,
 + hohe bzw. ++ sehr hohe Relevanz erkennbar

Dieses Vorgehen erweist sich gegenüber dem zuvor angewendeten Trennebenenverfahren oder anderen, statistischen Verfahren als vorteilhaft, da mehrere Korrelationen gleichzeitig betrachtet werden können. So konnte z.B. gezeigt werden, daß für die Bestimmung des Lotvolumens neben dem Merkmal Kontrast als Haupteinflußgröße auch die Merkmale Entropie und Homogenität beachtet werden müssen, um die Zuverlässigkeit der Aussage zu steigern.

Um die Zuverlässigkeit der Abbildung und damit der Klassifikation noch weiter zu steigern, wurden generische Algorithmen zur Optimierung der Netztopologie eingesetzt.

8.5.2 Entwurf, Validierung und Einsatz des Klassifikators

Ausgehend von den Texturmerkmalen bzw. den metrischen Größen war ein zuverlässiger Klassifikator zu entwerfen. Die Zuverlässigkeit zeigt sich durch einen niedrigen Fehlerschlupf und eine niedrige Pseudofehlerrate. Zwei weitere, für den praktischen Einsatz wesentliche Eigenschaften eines Klassifikationssystems, sind die Erweiterbarkeit um neue Fehlerklassen und/oder Merkmale sowie die Administrierbarkeit des Systems, worunter auch die Anpassung der Algorithmen an veränderte Normen fällt.

kontinuierliche Logik

binäre bzw. diskrete Logik

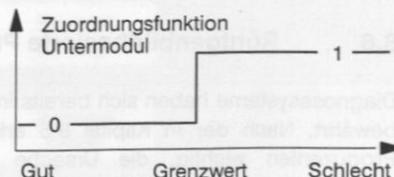
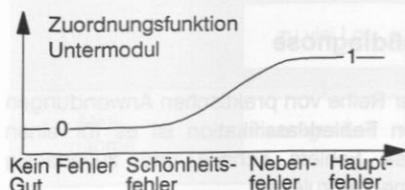


Bild 127: Logikprinzipien zur Fehlerbewertung

An Klassifikationsprinzipien stehen folgende Ansätze zur Verfügung:

- Explizite Klassifikationsregelformulierung mit einem (binäre Logik) oder mehreren (diskrete Logik) Grenzwerten in der Zuordnungsfunktion
- Explizite Regelformulierung mit kontinuierlicher Zuordnungsfunktion (Fuzzy-Systeme)
- Implizite Regelformulierung durch Lernen mit oder ohne Vorgabe (Neuronale Netze)
- Mischformen, insbesondere NeuroFuzzy-Systeme

Explizite Regelformulierungen auf Basis binärer oder diskreter Logik führen schon bei einfachen Klassifikationsaufgaben zur einer Vielzahl von Regeln, die nur schwer frei von Inkonsistenzen gehalten werden können. Die Zuverlässigkeit eines solchen Systems im Einsatz ist nicht gegeben, wie durchgeführte Studien ergaben [29]. Fuzzy-Systeme kommen erfahrungsgemäß zu wesentlich weniger Regeln bei gleicher Aufgabenstellung und sind somit leichter konsistent zu halten. Implizite Formulierungen haben den Vorteil, daß inkonsistente Lernmuster schon in der Trainingsphase sichtbar werden und eliminiert werden können.

Somit und in Hinblick auf die Eigenschaften der Texturmerkmale werden in [27] nur die letzten beiden Ansätze verfolgt. Dazu wurden dort eine Reihe von Klassifikatoren entworfen und erprobt.

Die entwickelten Klassifikatoren wurden trainiert. Die normierte Klassenbreite betrug 0,2. Für das Training wurde ein maximaler Fehler von 0,002 erlaubt. Für die vorliegenden Daten wurde diese Vorgabe meist erst nach Optimierung der Netztopologie mittels genetischer Algorithmen erreicht.

Im Anschluß an das Training wurden die Klassifikatoren validiert, d.h. es wurden Muster automatisch bewertet und das Bewertungsergebnis mit dem Erwartungswert verglichen. Aufgrund der scharfen Lernvorgaben konnten für die vorhandenen Datensätze keine für die Klasseneinteilung signifikanten Unterschiede zwischen den Trainingsvorgaben und den berechneten Werten festgestellt werden. Wenn dies auch als eine Ausnahme betrachtet werden muß, so ist damit zumindest der Nachweis der Eignung des Ansatzes erbracht.

8.6 Röntgenbildbasierte Prozeßdiagnose

Diagnosesysteme haben sich bereits in einer Reihe von praktischen Anwendungen bewährt. Nach der in Kapitel 8.5 erfolgten Fehlerklassifikation ist es für einen Produzenten wichtig, die Ursache dieses Fehlers schnell und zuverlässig aufzudecken, um geeignete Abhilfemaßnahmen einzuleiten.

Ziel war hier die Diagnose von Fehlerursachen bei der Bestückung von BGAs auf Basis eines geeigneten Ursache-Wirkungsmodells, daß sich jedoch wegen der hohen Gesamtkomplexität der Realität auf die wesentlichen Strukturen beschränkt. Dazu wurden alternative Konzepte untersucht und verglichen.

Als Datenbasis für die Analysen dienten die bei der BGA-Verarbeitung miterfaßten Daten Peak-Zeit, Bestückverdrehung, Lotvolumen und Padgröße. Dabei kam ein im Umfang reduziertes Informationssystem zum Einsatz.

Die Methode der adaptiven Fehlerdiagnose [202] auf Basis der Fehler-Möglichkeits- und-Einfluß-Analyse, die am FAPS entwickelt wurde, hat sich in Feldern bewährt, in denen strukturierbares Wissen über Ursache-Wirkungen-Beziehungen für Diagnosezwecke im ausreichenden Maße vorhanden war. Das vorhandene Wissen wird dabei so strukturiert, daß bei der Diagnose eine Aussage gemacht werden kann, welche der im Fehlerbaum hinterlegten Ursachen die wahrscheinlichste oder die kritischste ist.

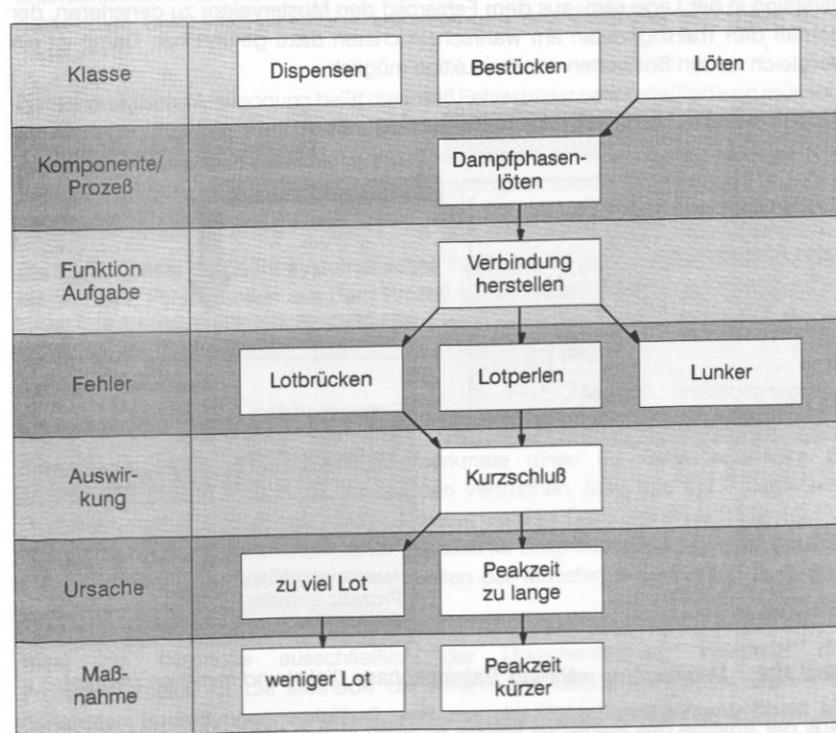


Bild 128: Hierarchische Gliederung der Informationselemente in einer netzartigen Verflechtung

Entscheidend für den Erfolg dieses Ansatzes sind die Kenntnis der relevanten Einflußgrößen auf die Qualität bzw. das Fehlerbild und deren relatives Gewicht bezogen auf die Ausprägung des Fehlers. Beides mußte im vorliegenden Fall erforscht werden. Dies geschah mit Hilfe Neuronaler Netze. Die Ergebnisse dienen zur Erweiterung des Fehlerbaums.

8.6.1 Diagnose mit invertierten Netzmodellen

In Fortführung der in Kapitel 7 gemachten Überlegungen wurde für die diagnoseorientierte Abbildung der Ursache-Wirkungsbeziehungen bei der Verarbeitung von BGAs ein neuronaler Ansatz gewählt. Die Analyse von Zusammenhängen durch Analyse trainierter Neuronaler Netze wurde bereits im vorherigen Kapitel dargestellt. Backpropagation-through-the-time-Netze bieten desweiteren die Möglichkeit der Inversion, d.h. ein mit allen relevanten Prozeßparametern und allen relevanten Fehleraspekten trainiertes Netz wird nach der Inversion in der Lage sein, aus dem Fehlerbild den Mustervektor zu generieren, der gemäß den Trainingsdaten am wahrscheinlichsten dazu geführt hat. Damit ist ein Vergleich zu den Sollwerten der Produktion möglich.

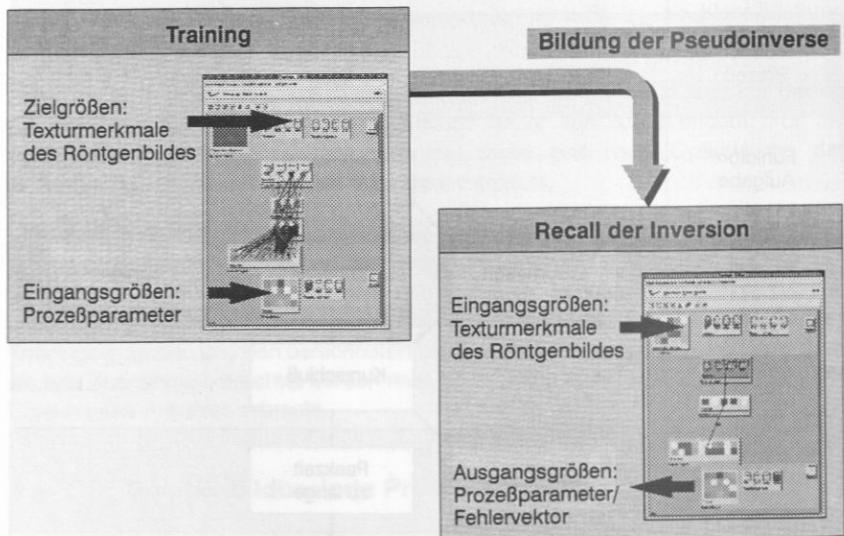


Bild 129: Datenströme während Trainingsphase (links) und Inversion (rechts)

Aus der Analyse des trainierten Netzes ergaben sich in den untersuchten Fällen als wichtigste Einflußgrößen auf die Qualität der Lötstelle die Peak-Zeit, die

Bestückverdrehung und das Lotvolumen. Die Padgröße hatte in den untersuchten Fällen keine entscheidende Wirkung auf das Ergebnis.

Das so bereits trainierte Netz wurde invertiert. Danach wurde ihm ein Fehlerbild eingegeben. Mit der Inversion erhält man aus einem (normierten) Fehlerbild die (normierten) Prozeßparameter, die dazu geführt haben. Ähnlich wie die Risikoprioritätszahl bei der FMEA-basierten Diagnose ist das Produkt aus Einfluß und Soll-Ist-Abweichung eines Parameters ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der er die Ursache für den vorliegenden Fehler ist.

8.6.2 Bewertung der Methode

Vorteilhaft ist, daß so auch komplexe Fehlerbilder analysiert werden können und so die konkrete Ursache besser diagnostiziert werden kann. Nachteilig ist die Abhängigkeit von den Trainingsdaten. So dürfen beispielsweise nicht zwei wesentlich unterschiedliche Parametereinstellungen zum gleichen Fehlerbild führen, da sonst die notwendige Bijektivität zwischen Parameterraum und Zielgrößenraum nicht mehr gegeben ist.

Für die praktische Anwendung heißt dies, daß Fehlerbilder sehr detailliert sein müssen, um eindeutig die Ursache zu finden. Die bislang erfolgte Charakterisierung der Fehler war jedoch nicht ausreichend, um genügend eindeutige Datensätze zu generieren. Im Versuch ließ sich, für geeignet selektierte Trainingsdaten, die Eignung des Ansatzes nachweisen.

Die FMEA bietet durch ihr systematisches Strukturieren vorhandenen Wissens, die Möglichkeit, Fehlerquellen aus dem Prozeß selbst, ebenso wie aus den Maschinen und Anlagen zu erfassen. Über die Einordnung in einen Fehlerbaum wird die Basis des Diagnosesystems gebildet. Auch nur potentielle Fehlerquellen können so erfaßt werden.

Die FMEA bietet allerdings nicht die Möglichkeit, Prozeßwissen über Parametereinstellungen und Qualitätsmerkmale direkt für Diagnosezwecke zu verarbeiten. Dieses muß zunächst aus den Versuchen, bzw. aus der Prozeß- und Prüfdatenerfassung gewonnen und aufbereitet werden. Dazu eignen sich wie gezeigt Neuronale Netze. Diese können durch Inversion für Diagnosezwecke genutzt werden. Potentielle Fehlerquellen sowie Fehlerquellen der Maschinen und Anlagen können über Trainingsmuster erlernt werden.

Dient die Diagnose ausschließlich der Ursachenfindung innerhalb der Prozeßparameter, ist die Methode der invertierten Neuronalen Netze unter den genannten Bedingungen vorteilhaft, weil aus der Prozeßbeobachtung direkt auf Ursachen geschlossen werden kann. Sollen bei der Diagnose weitergehende Aspekte, wie Ausfälle von Maschinen- oder Anlagenteilen mit berücksichtigt werden, empfiehlt sich die Methode der adaptiven Fehlerdiagnose.

9 Zusammenfassung

Die Elektronik und ihre Produktion stellen heute und in absehbarer Zukunft die wesentliche Schlüsseltechnologie für nahezu alle technischen Produkte dar. Der Trend zu immer höher integrierten Bauelementen und Baugruppen wird ebenso anhalten, wie der Trend zu immer kürzeren Lebenszyklen eines Produkts und zu einer höheren Innovationsrate. Die Produktionstechnologie muß diesen Herausforderungen Rechnung tragen.

Die Bedeutung des Qualitätsmanagements als unternehmerisches Instrument zur Einnahme und Sicherung von Marktanteilen und zur Kostensenkung wächst zunehmend. Umsatzrendite und Image der Firmen, die dieses Instrument konsequent anwenden, belegen dies.

Für die Elektronikproduktion bedeutet dies letztlich die Umsetzung der bekannten Null-Fehler-Vision in die reale Fertigung und deren Umfeld. Doch gerade dieser Schritt wird durch die besonderen Eigenheiten der Baugruppenfertigung erschwert. Die komplexen Zusammenhänge der zahlreichen Einflußgrößen sind bislang nicht ausreichend erfaßt und beschrieben worden. Die immer geringer werdenden Losgrößen machen das Optimieren der Prozesse durch eine Nullserienfertigung unwirtschaftlich.

Ziel dieser Arbeit war es, einen Beitrag zur Umsetzung der Null-Fehler-Vision in der Baugruppenfertigung zu leisten. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Bewältigung der beiden derzeit größten Hindernisse, die unzureichende Qualitätsdatenlogistik und die aufwendige und unsichere Technik der Analyse und Modellbildung, gelegt.

An praktischen Beispielen und mit theoretischer Herleitung wurden die Mankos der vorhandenen Techniken und Systeme zur Informationsgewinnung und Prozeßmodellierung aufgedeckt und die Anforderungen an leistungsfähigere Werkzeuge auf breiter Basis aufgestellt.

Die Anforderungen an das Informationssystem wurden mit dem Konzept des Begleitenden Fertigungsprotokolls umgesetzt. Im Software-System PRIDE-QVISON wurden dieses und weitere Konzepte zur dynamischen Prozeß- und Qualitätslenkung realisiert.

Neuronale Netze bildeten die Grundlage für die Entwicklung einer neuen, effizienten Modellierungs- und Simulationstechnik für die Prozesse der Elektronikproduktion. Die bekannten Validierungstechniken wurden erweitert. Dadurch wurde unter anderem auch die Prognose der Prozeßausbeute möglich.

Neben der Entwicklung geeigneter, leistungsfähiger Werkzeuge wurden verschiedene Prozesse modelliert. So entstanden ein verbessertes Schädigungsmodell des Popcorn-Effekts, Modelle der einzelnen Produktionsprozesse und ein Modell der

Baugruppenfertigung, das alle Prozesse der planaren SMD-Technik in der Modellfabrik des FAPS umfaßt.

Die Modelle führten zu stabilisierenden und qualitätsverbessernden Maßnahmen, wie beispielsweise die Entwicklung eines verbesserten Dispenskopfes oder die Selektion optimierter Stellvorgaben. Desweiteren wurden auf Basis von Röntgenbildern Verfahren zur texturbasierten Fehlerklassifikation und zur Fehlerdiagnose entwickelt und validiert.

Mit diesen Arbeiten wurde die Basis für weitere Untersuchungen und Optimierungen geschaffen. Erste Schritte in Richtung der Null-Fehler-Produktion wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemacht.

Zukünftige Arbeiten werden neben dem Ausbau des Informationssystems, seiner Adaption auf neue Technologien und die Fortführung und Verfeinerung der Prozeßmodellierung vor allem systemstabilisierende Maßnahmen enthalten. Fehlertolerante Systeme und Komponenten sind dabei zu bevorzugen. Die Überwachung und Koordination der Prozesse kann durch die Integration Neuronaler Modelle in die Maschinen- und Anlagensteuerung effizient erfolgen.

10 Literaturverzeichnis (alphabetisch geordnet)

1. Alger, C., Huffman, W. A., Gordon, S.: *Moisture Effects on Susceptibility to Package Cracking in Plastic Surface Mount Components*, Intel Components Technology and Manufacturing Group, 1988
2. Becker, N., Berlin, F., Grimm, W., Piechottka, U.: *Verwendung von Störgrößenmodellen zur Verbesserung des Regelverhaltens, Teil 1*, in: *Automatisierungstechnik* 42 (1994) 12 R. Oldenburg Verlag, München 1994
3. Bendell, A.; Disney, J.; Pridmor, W.A.: *Taguchi Methods: Application in World Industry*, IFS Publication. London 1989
4. Bhote, K.R.: *Qualität - der Weg zur Weltspitze*, Institut für Qualitätsmanagement, Großbottwar 1990, S. 30-47
5. Biehler, H.M.; Brück, U.: *Prozeßqualität transparent durch CAQ*, in: *Qualität und Zuverlässigkeit* QZ 36 (1991) 10, Carl Hanser Verlag, München 1991, S. 241-243
6. Bozzo, R.; Sciutto, L.; Zunino, R.: *BP Networks for Partial Discharge Analysis and Dielectric Classification*, in: *The 1997 IEEE International Conference on Neuronal Networks*, Volume 1, Houston 1997, S.37-42
7. Brand, A.: *Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)*, Feldmann, K., Geiger, M. (Hrsg.), Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997
8. Brause, R.: *Neuronale Netze*, B.G. Teubner, Stuttgart 1995
9. Cognetti, C.: *Der "Popcorn-Effekt" - Unerwünschte Begleiterscheinungen beim Reflow-Löten von SMDs in Plastikgehäusen*, *Elektronik* 17 (1988), S. 116-120
10. Coleman, D. et al.: *Object-oriented Development - The Fusion Method*, Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1994
11. De Marco, T.: *Structured Analysis and System Specification*, Yourdon Press, New York 1987
12. 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
13. Draeger, G.: *Innovative Umhüllmaterialien in der Mikroelektronik*, *Werkstoff und Innovation* 4 (1991) 4, S. 48-50
14. Dressler, M.: *Wer prüft, sündigt nicht - Wirtschaftliche Prüfstrategien nach DIN ISO 9001*, Sonderheft Leiterplatten, Markt und Technik, München 1993, S. 86

15. Elias, H-G.: *Makromoleküle, Band 2: Technologie*, 5. Auflage, Hüthig und Wepf Verlag Basel-Heidelberg-New York 1992
16. Elmer, K.H.: *Möglichkeiten zur Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Defekten durch Stoßwellen*, Tagungsband zum IV. Kolloquium Technische Diagnostik Dresden 1996, TU Dresden 1996, S. 248-257
17. Ewert, U., Robbel, J., Bellon, C., Schumm, A., Nochermann, C.: *Digital Lamino-graphie*, Materialprüfung 37 (1995) 6, S. 218-222
18. Feldmann, K.; Felbinger, C.; Götz, K.: *Einsatz moderner Meß- und Auswerteverfahren zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion*, Symposium Elektronik-Technologie "Zerstörungsfreie Prüfverfahren in der Oberflächenmontage der Elektronik", Dresden, 22.05.97
19. Feldmann, K., Feuerstein, R., Götz, K.: *Influences of Storage Conditions on Component Cracking*, Proceedings of the Technical Program NEPCON EAST 97, Reed Exhibition Companies, Boston/Norwalk USA 1997, S. 99-107
20. Feldmann, K., Feuerstein, R., Götz, K.: *Einfluß und Folgen der Lagerungsbedingungen auf die Qualität elektronischer Bauelemente*, Tagungsband zur Deutschen ISHM Konferenz, München 1996
21. Feldmann, K., Gerhard, M., Götz, K., Scheller, H., Sturm, J.: *Integrierte Qualitätssicherung in der Elektronikfertigung am Beispiel des Infrarot-Lötens*, Proceedings in SMT-ASIC-HYBRID 1994, VDE-Verlag GmbH Berlin-Offenbach, 1994, Seiten 99-108
22. Feldmann, K., Götz, K.: *System- und Prozeßdiagnose an den Maschinen der Elektronikproduktion*, Tagungsband zum IV. Kolloquium Technische Diagnostik Dresden 1996, Technische Universität Dresden 1996, S. 294-303
23. Feldmann, K., Götz, K.: *Quality assurance in electronics production*, Proceedings of TEST 1996, Inside Communications Ltd, Birmingham/London 1996
24. Feldmann, K., Götz, K., Sturm, J., Zöllner, B.: *Prozeßbegleitende Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion*, aus Feldmann, Geiger (Hrsg.): *Produktionssysteme in der Elektronik*, Meisenbach Verlag GmbH, Bamberg 1995, S. 285-330
25. Feldmann, K.; Götz, K.; Sturm, J.; Zöllner, B.: *Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion*, tm-Technisch Messen, Jahrgang 62, Oldenbourg-Verlag, München 1995, Heft 10, S. 386-391
26. Feldmann, K., Götz, K., Sturm, J.: *CAD/CAM Process Planning for Laser Soldering in Electronics Assembly*, in Geiger, M., Vollertsen, F.: *Proceedings of LANE 94 - Laser Assisted Net shape Engineering*, Meisenbach Verlag, Bamberg 1994, S. 715-724

27. Feldmann, K.; Götz, K.; Sturm, J.; Kaiser, C.; Essa, S.K. Sauer, W.; Wolter, K.-J.: *Bildverarbeitungssysteme für die Diagnose in der Elektronikproduktion*, Ergebnisbericht des Forschungsprojektes FE 224/8-1, SA 514/2-3, Erlangen-Dresden 1996
28. Feldmann, K., Götz, K., Wilke, P.: *Prozeßbegleitende Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion*, Tagungsband Symposium "Anwendung von Fuzzy Technologien und Neuronalen Netzen", Hrsg. Transferstelle Mikroelektronik/Fuzzy Technologien Aachen, Aachen 1996
29. Feldmann, K., Götz, K., Wilke, P.: *Fehlerklassifikation auf Röntgenbildbasis*, Tagungsband Symposium "Anwendung von Fuzzy Technologien und Neuronalen Netzen", Hrsg. Transferstelle Mikroelektronik/Fuzzy Technologien Aachen, Aachen 1996
30. Feldmann, K.; Sturm, J.: *Qualitätssicherung in der Elektronikbaugruppenproduktion durch prozeßbegleitende Prüfung*, in: VDI Berichte NR. 966, VDI-Verlag, Düsseldorf 1992
31. Feldmann, K.; Sturm, J.: *Analyse von Fine-Pitch-Lötstellen durch Röntgenfeinstrukturuntersuchung*, in: DVS-Berichte Band 153, Dt. Verl. für Schweißtechnik, München 1993
32. Franke, J.: *Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID)*, Feldmann, K., Geiger, M. (Hrsg.), Carl Hanser Verlag, München Wien 1995
33. Franke, U.; Fritz, H.; Mehring: *Long Distance Driving with the Daimler-Benz Autonomous Vehicle VITA*, PROMETHEUS Workshop, Grenoble, Dezember 1991
34. Frehr, U.: *Total-Quality-Management*, in: W. Masing (Hrsg.), *Handbuch Qualitätsmanagement*, Carl Hanser Verlag, München 1994, S. 31-48
35. Freund, B.: *Entwicklungslinien der Elektronikproduktion mit neuen Herausforderungen an die Forschung*, Tagungsband zum Öffentlichen Berichtskolloquium des Sonderforschungsbereiches 356 Produktionssysteme in der Elektronik 20. März 1997, FAU Erlangen-Nürnberg, 1997
36. Fritz, H.; Franke, U.: *Neuronale Netze in der autonomen Fahrzeugführung*, VDE Jubiläumskongreß '93, Berlin, Januar 1993, S. 8-15
37. Froese, T.: *Neuronale Netze in Meßtechnik und Sensorik*, MessTec 4/96, GIT Verlag GmbH, Darmstadt 1996, S. 130-132
38. Gantert, M.; Reiner, M.; Schöneburg, E.: *Aktienkursprognose mit neuronalen Netzwerken*, Computerwoche Nr. 40, 1989, S. 121-124

39. Gerhard, M.: *Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen*, Feldmann, K., Geiger, M. (Hrsg.), Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997
40. Geihs, K.: *Client/Server-Systeme: Grundlagen und Architekturen*, International Thomson Publ., Bonn 1995
41. Geßner, J.: *Wissensbasierte Diagnose für variantenreiche technische Anlagen*, Diss., TU München, 1992, Kap. 4
42. Göhringer, J., Götz, K.: *Beitrag der Diagnose zur Optimierung des Qualitätsstandards*, Tagungsband FOWEP-Seminar Produktivitätssteigerung in der Elektronik - Rechnergestützte Planungs- und Diagnosewerkzeuge, FAPS Erlangen, 1997
43. Götz, K.: *Prozeßbegleitende Qualitätssicherung - Vom Informationssystem zur Prozeßbeherrschung*, FOWEP-Seminar "Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion - Strategien und Inspektionssysteme", Erlangen, 10. Oktober 1996
44. Götz, K.: *Prozeßbegleitende Qualitätssicherung in der Elektronik*, FAPS-TT-Seminar Elektronikproduktion - aktuelle Entwicklungen zur Verbindungstechnik 23.6.95, Tagungsband, Erlangen, 1995
45. Götz, K.: *Ansätze zur prozeßbegleitenden Qualitätssicherung in der Elektronik*, VDI-Seminar SMT-Rationelle Produktion in der Elektronik. Integration neuer Technologien 13.-14.2.1996, Tagungsband, Erlangen 1996
46. Götz, K.: *Ganzheitliche Vorgehensweise zur Qualitätssicherung mit Maschinendiagnose und Regelungsstrategien*, Tagungsband FOWEP-Seminar Neue Technologien bei Aufbau und Produktion elektronischer Baugruppen, FAPS Erlangen, 1997
47. Götz, K.: *Dispenser für ein Medium*, Aktenzeichen 197 32 040.6, Deutsches Patentamt München 1997
48. Götz, K.: *Verfahren für die optische Volumenmessung*, Aktenzeichen 197 35 246.4, Deutsches Patentamt München 1997
49. Gottschalk, A.: *Accelerated Stress Tests (Hast)*. Firmenbroschüre: Freigabeprüfungen, SES Electronics
50. Halsal, F.: *Data communications, computer networks, and open systems*, Addison-Wesley, 1992
51. Hanke, H.-J.: *Baugruppenttechnologie der Elektronik / Leiterplatten*, Verlag Technik GmbH, Berlin 1994, S. 75 - 92

52. Hacke, J.: *Montage integrierter Schaltungen*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg 1987
53. Hebb, D.O.: *The Organization of Behavior* Wiley, New York 1949
54. Heistermann, J.: *Genetische Algorithmen*, Teubner Verlag, Stuttgart 1994, S. 40-57
55. Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H.-P. (Hrsg.): *Qualitätssicherung für Ingenieure*, VDI Verlag, Düsseldorf 1993, S. 168-184
56. Herman, G.; Buck, T.: *Handbuch der Leiterplattentechnik*, Leuze, Saulgau/Würt. 1991
57. Hessel, G., Schmitt, K., van der Vorst, K., Weiß, F.-P.: *Anwendung neuronaler Netze zur akustischen Leckortung und Leckratenabschätzung*, Tagungsband zum IV. Kolloquium Technische Diagnostik Dresden 1996, Technische Universität Dresden 1996, S. 203-211
58. Janssen, I.; Schaible, J.: *Bildverarbeitung mit neuronalen Netzen*, in: E. Schöneburg (Hrsg), Industrielle Anwendung Neuronaler Netze, Fallbeispiele und Anwendungskonzepte, Addison Wesley, Bonn 1993, S. 110 - 114
59. Jeschke, K.: *Integrationspfad Qualität*, in: E. Westkämper CIM Fachmann CIM Technologie-Transferzentrum, TU Braunschweig, Springer Verlag, Berlin 1991, S. 24-28
60. Jeschke, K.: *Grundlagen und Prinzipien zur Null-Fehler-Produktion*, aus Westkämper, E. (Hrsg.): Null-Fehler-Produktion in Prozeßketten - Maßnahmen zur Fehlervermeidung und -kompensation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1996, S. 9-28
61. Kaiser, H.: *Total auf dem Chip-Trip - Der Mensch im Auto als Sonderausstattung*, in: Der Stern 41/97, Gruner und Jahr, Hamburg 1997
62. Kak, A. C., Roberts, B.A.: *Reconstruction from Projections: Applications in Computerized Tomography (Chapter 27)*, aus Tzay Y. Young, King-Sun Fu (eds): Handbook of Pattern Recognition and Image Processing, Academic Press, San Diego (1986)
63. Kalinke, P., Meltzer, G., Weber, T.: *Bestimmung von Schadensparametern mit Neuronalen Netzen aus Impuls-Echo-Verfahren*, Tagungsband zum IV. Kolloquium Technische Diagnostik Dresden 1996, TU Dresden 1996, S. 238-247
64. Kalka, K.; Wallich, T.: *Simulation einer Robotersteuerung*, in: E. Schöneburg (Hrsg), Industrielle Anwendung Neuronaler Netze Fallbeispiele und Anwendungskonzepte, Addison Wesley, Bonn 1993

65. Keller, G.: *Oberflächenmontagetechnik*, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1995, S.13-25
66. Kepner, Charles H.; Tregoe, Benjamin B.: *Entscheidungen vorbereiten und richtig treffen*, Verlag moderne Industrie (o.O.) 1982
67. Kernler, H.: *PPS der 3. Generation: Grundlagen, Methoden, Anregungen*, Hüthig, Heidelberg 1993
68. Kertsen, G.: *Fehlermöglichkeits- und einflußanalyse (FMEA)*, in: W. Masing (Hrsg.), *Handbuch Qualitätsmanagement*, Carl Hanser Verlag, München 1994, S. 469-490
69. Kessel van, C.G.M.; Gee, S.A.; Murphy, J.J.: *The Quality of Die Attachment and its Relationship to Stresses and Vertical Die-Cracking*, Proc 33th Electronic Components Conference 1983, S. 237-244
70. Kiecker, H.E.: *Qualitätssteigerung durch Einsatz optischer Inspektionssysteme nach dem Lotpastenauftrag*, FOWEP-Seminar Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion - Strategien und Inspektionssysteme, FAPS Erlangen, 1996
71. Kirstein, H.: *Der Einfluß Demings auf die Entwicklung des Total Quality Managements*, Hanser-Verlag, München 1994
72. Kitagawa, H., Kido, Y., Maeda, K., Umeda, Y., Sano, H., Hasegawa, S.: *The Study of Plastic Package Cracking Induced by the Moisture/Solder Reflow Process*, Proceedings - 39th Electronic Components Conf., 1989, S. 445-449
73. Kitano, M., Nishimura, A., Kawai, S., Nishi, K.: *Analysis of Package Cracking During Reflow Soldering process*, IEEE/IRPS 1988, S. 90-95
74. Klar, R.: *Digitale Rechenautomaten*, de Gruyter, Berlin 1989
75. Köppe, D.; Heid, W.: *Möglichkeiten und Grenzen von SPC, QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, Carl Hanser Verlag, München 1989, S. 21-25
76. Kratze, K.P.: *Neuronale Netze: Grundlagen und Anwendungen*, Carl Hanser Verlag, München 1993, S. 22-32
77. Krebs, T.: *Integration elektronmechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell*, Feldmann, K., Geiger, M. (Hrsg.), Meisenbach Verlag, Bamberg, 1996
78. Kuhn, H.: *Klassische Versuchsplanung, Taguchi-Methode, Shainin Methode, Industrielle Versuchsmethodik*, VDI - Verlag, Stuttgart 1990
79. Langmann, R.: *Prozeßlenkung - Grundlagen zur Automatisierung technischer Prozesse*, Vieweg, Wiesbaden 1996, S. 31 ff

80. Lauber, R.: *Prozeßautomatisierung* Band 1, Springer-Verlag, Berlin 1989
81. Lawrence, J.: *Neuronale Netze Computersimulation biologischer Intelligenz*, Systema Verlag, München 1992, S. 70-76
82. Lawson, R. W.: *A review of the status of plastic encapsulated semiconductor reliability*, British Telecom Technol., J. 2 (1984) 2, S. 91-111
83. Lea, C.: *Evidence that Visual Inspection Criteria for Solder Joints are no Indication of Reliability*, Soldering & Surface Mount Technology No. 9, Wela Publications Ltd., Isle of Man 1991, S. 19-24
84. Lehmann, D.: *Electronic Package Inspection with Microfocus X-Ray*, FeinFocus Inc., Agoura Hills, USA, 1994, in: Referate ZFP 95 03 050
85. Lenzen, A., Waller, H.: *Anwendung der Singulärwertzerlegung zur Schadenserkenkung und -lokalisierung*, Tagungsband zum IV. Kolloquium Technische Diagnostik Dresden 1996, TU Dresden 1996, S. 258-269
86. Lin, R.; Blackshear, E.; Serisky, P.: *Moisture Induces Package Cracking in Plastic Encapsulated Surface Mount Components During Solder Reflow Process*, IEEE/IRPS 1988, S. 83-89
87. Lipp, P.: *Zuverlässigkeit von SMD-Plastikgehäusen für ASICs*, SMD MAG. (1990) 3/4, S. 78-80
88. Lutz, J.: *Motor-Diagnose mit Neuronalen Netzen*, In E. Schöneburg (Hrsg.), Industrielle Anwendung Neuronaler Netze Fallbeispiele und Anwendungskonzepte, Addison Wesley, Bonn 1993
89. Masing, W.: *Das Unternehmen im Wettbewerb*, in: W. Masing (Hrsg.), Handbuch Qualitätsmanagement, Carl Hanser Verlag, München 1994, S. 3-16
90. Massone, L.L.E.; Myers, J.D.: *The Role of Plant Properties in Arm Trajectory Formation: A Neutral Network Study*, in: IEEE Transaktionen on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE, New York 1996
91. Matthäi, G.: *Der Einfluß physikalischer und chemischer Eigenschaften von Epoxidharzplastmaterial auf die Zuverlässigkeit bipolarer Transistoren*, Diss., Technische Hochschule Ilmenau 1988
92. Matthäi, G.: *Feuchte-Wärme-Belastungen an kunststoffgekapselten elektronischen Bauelementen. Vorschlag für ein komplexes Degradationsmodell*, QZ 35 (1990) 11, S. 670-673
93. Matthäi, G.: *Feuchte-Wärme-Belastungen an kunststoffgekapselten elektronischen Bauelementen. Experimentelle Befunde*, QZ 35 (1990) 12, S. 719-721

94. Mc Culloch, W.S.; Pitts, W.h.: *A Logical Calculus of the Ideas Imminent in Neural Nets*, Bulletin of Mathematical Biophysics Vol 5., 1943, S. 115-133
95. Mesch, F.: *Statistische Qualitätssicherung bei Stückgut und Fließprozessen*, in: Automatisierungstechnische Praxis 35 (1993) 10, R. Oldenburg Verlag, München 1993
96. Moore, T.M.; McKenna, R., Kelsall, S.J.: *The Application of Scanning Acoustic Microscopy to Control Moisture/Thermal-Induced Package Defects*, Proc. Int. Symp. Testing and Failure Analysis 1990, S. 251-258
97. Moore, T.M.; Kelsall, S.J.: *The Impact of Delamination on Stress-Induced and Contamination-Related Failure in Surface Mount ICs*, 30th Annual Proceedings. Reliability Physics 1992 (Cat. No. 92CH3084-1), S. 169-176
98. Mullen, W.B. et al.: *Multiple Alloy Solder Preform*, US-Patentschrift, Patentnummer 5,427,865, USA 1995
99. Nau, D.; Klawonn, F.; Kruse, R.: *Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme*, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig/Wiesbaden 1994
100. Neubauer, C. *Modellierung visueller Erkennungsvorgänge mit neuronalen Netzen*, Erlangen 1995, S. 60-84, S. 102-114
101. Niemann, H.: *Klassifikation von Mustern*, Springer Verlag, Berlin 1983, S. 10-24
102. Nishimura, A.; Kawai, S.; Murakami, G.: *Effect of Lead Frame Material on Plastic-Encapsulated IC Package Cracking under Temperature Cycling*, IEEE Trans. on Compon. Hybrids Manuf. Tech. 12 (1989) 4, S. 639-645
103. N.N.: *Das CECC System für gütebestätigte Bauelemente der Elektronik - Grundzüge der Gütebestätigung*, CECC General Sekretariat, Frankfurt 1990
104. N.N.: *Das CECC System für gütebestätigte Bauelemente der Elektronik - Leitfaden zur Befähigungsanerkennung für Hersteller elektronischer Bauelemente*, CECC General Sekretariat, Frankfurt 1991
105. N.N.: *Das CECC System für gütebestätigte Bauelemente der Elektronik - Leitfaden für Hersteller von elektronischen Bauelementen*, CECC General Sekretariat, Frankfurt 1990
106. N.N.: *Das CECC System für gütebestätigte Bauelemente der Elektronik - Die Spezifikationen des CECC-Systems*, CECC General Sekretariat, Frankfurt 1990
107. N.N.: *Das CECC System für gütebestätigte Bauelemente der Elektronik - Leitfaden für die Erstellung von Bauartspezifikationen*, CECC General Sekretariat, Frankfurt 1991

108. N.N.: *Das CECC System für gütebestätigte Bauelemente der Elektronik -Leitfaden für Auslieferungslager elektronischer Bauelemente*, CECC General Sekretariat, Frankfurt 1989
109. N.N.: *Das CECC System für gütebestätigte Bauelemente der Elektronik -Leitfaden für unabhängige Prüflaboratorien*, CECC GeneralSekretariat, Frankfurt 1989
110. N.N.: *Dem "Popcorn-Effekt" auf die Spur kommen*, Surface Mount Technology 5 (1991), S. 14, 17-19
111. N.N.: *Die Welt der Surface Mount Technologie*, Siemens AG, München 1993
112. N.N.: *DIN ISO 9000: Qualitätsmanagement- und Qualitätssicherungsnormen - Leitfaden zur Auswahl und Anwendung*, Berlin 1990
113. N.N.: *DIN ISO 9000 Teil 3: Leitfaden für die Anwendung von ISO 9001 auf die Entwicklung, Lieferung und Wartung von Software*, Berlin 1992
114. N.N.: *DIN ISO 9001: Qualitätssicherungs-Nachweisstufe für Entwicklung und Konstruktion, Produktion, Montage und Kundendienst*, Berlin 1990
115. N.N.: *DIN ISO 9002: Qualitätssicherungssysteme-Modell zur Darlegung der Qualitätssicherung in Produktion und Montage*, Berlin 1990
116. N.N.: *DIN ISO 9003: Qualitätssicherungssysteme-Modell zur Darlegung der Qualitätssicherung bei der Endprüfung*, Berlin 1990
117. N.N.: *DIN ISO 9004: Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätssicherungssystems - Leitfaden*, Berlin 1990
118. N.N.: *Duroplastische Kunststoffe für die Elektronik: Aufbau und Eigenschaften*, Ciba-Geigy, 1989
119. N.N.: *Entwurf DIN IEC 47(CO)1316, SMD-Halbleiterbauelemente-Widerstandsfähigkeit gegenüber kombinierter Einwirkung von Feuchtigkeit und Lötwärme*, Januar 1993
120. N.N.: *Entwurf DIN IEC 91(Sec)49, Leitfaden: Genomtes Verfahren zur Spezifizierung oberflächenmontierbarer Bauelemente (SMDs) mit Gütebestätigung*, Oktober 1994
121. N.N.: *Geschäftsbericht der Siemens AG 1997*, Siemens AG, München 1997
122. N.N.: *IC Memory*, Hitachi Ltd., 1989
123. N.N.: *IPC-TM-600A: Acceptability of Printed Boards*, IPC-Norm, Illinois, August 1995

124. N.N.: *IPC-TM-650: Test Methods*, IPC-Norm, Illinois, Januar 1995
125. N.N.: *IPC-SM-786A, Procedures for Characterizing and Handling of Moisture/Re-flow Sensitive Ics*, IPC-Norm, Illinois, Januar 1995
126. N.N.: *IPC-4202: Assembly Process Preconditioning for Qualification of Components*, IPC-Norm, Illinois, April 1994
127. N.N.: *IZM Jahresbericht 1995*, Fraunhofer-Institut IZM, Berlin
128. N.N.: JEDEC Standard JESD22-A112, Test Method A112, *Moisture-Induced Stress Sensitivity for Plastic Surface Mount Devices*, IPC-Norm, Illinois, April 1994
129. N.N.: JEDEC Standard JESD22-A113, Test Method A113, *Preconditioning of Plastic Surface Mount Devices Prior to Reliability Testing*, IPC-Norm, Illinois, April 1994
130. N.N.: JESD22-A102-A, *Accelerated Moisture Resistance - Unbiased Autoclave*, IPC-Norm, Illinois, September 1987
131. N.N.: JEDEC Standard No. 22-A110, *Highly-Accelerated Temperature and Humidity Stress Test (HAST)*, IPC-Norm, Illinois, Juli 1988
132. N.N.: *Kunststofftechnik*, Bd. 12, 1987
133. N.N.: *Kupfer*, Deutsches Kupfer Institut eV (DKI) (Hrsg.), Saladruck Derlin 1982
134. N.N.: *Metals Handbook*, ASM International (Hrsg.), Vol.2, ASM 1990
135. N.N.: *NEC Device Technology International*, NEC Electronics, No. 7 (1987), S. 52-58
136. N.N.: *NEC Report: Surface Mount Technology*, NEC Electronics (Europe), 1993
137. N.N.: *QC-Circle Kory - General Principles of the Q-Circle*, Juse Verlag, Tokio 1980
138. N.N.: *Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie*, Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz, VDA Verband der Automobilindustrie e.V., Frankfurt / Main 1986, S. 30-47
139. N.N.: *Quality Function Deployment QFD*, American Supplier Institute, Dearborn Michigan/USA 1987
140. N.N.: *Soldering Surface Mount Device - Photographic Guide*, I.T.R.I. Publication No. 700, International Tin Research Institute, Uxbride, Middx/GB, 1988

141. N.N.: *Technical Report. The Risk of Package Cracking (Pop Corn Effect) in the SMT Soldering Process*, SGS-Thomson Microelectronics Agrate (Italy), September 1989
142. N.N.: *Trends in der Mikroelektronik und ihrer Anwendung 1996-2001*, GMM-Studie (Hrsg.), TZM-Report Mai/Juni 97, TZM e.V., Erfurt 1997
143. N.N.: *Visual Solderung Inspection Inconsistences - Interpretation of MIL-SPEC Visual Acceptance Criteria*, Untersuchungsbericht der AT&T Laboratories, Burlington, NC, 1988
144. Ockel, J.; Preuß H.-P.: *Lernverfahren für Fuzzy-Regler*, in: *Automatisierungstechnische Praxis* 37 (1995) 7, R. Oldenburg Verlag, München 1995
145. Olma, B.J.: *Automatisierte Klassifizierung akustischer Burstschnalle mit einem Neuronalen Netz - Betriebserfahrungen bei Körperschall-Überwachung am Primärsystem von Kernkraftwerken*, Tagungsband zum IV. Kolloquium Technische Diagnostik Dresden 1996, TU Dresden 1996, S. 213-225
146. Pathirana, P.N.; Zaknich, A.: *Surface Identification by Acoustic Reflection Characteristics using Time Delay Spectrometry and Artificial Neironal Networks*, in: *The 1997 IEEE International Conference on Neuronal Networks*, Volume 1, Houston 1997, S.31-36
147. Pfeifer, T.; Glimpe, B.: *Konzept zur Produkt- und Prozeßoptimierung in Qualität und Zuverlässigkeit*, 34, Heft 9, Carl Hanser Verlag, München 1989, S. 495-496
148. Pfeifer, T.: *Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken*, Carl Hanser Verlag, München 1993
149. Pomerleau, D.A.: *Rapidly adapting artificial neuronal network for autonomous navigation*, in: R.P. Lippmann, J.E. Moddy, D.S. Touretzky (Hrsg.), *Advances in Neural Information Processing Systems 3 (NIPS-3)*, Morgan Kaufmann, 1991, S. 429-435
150. Rahn, A.: *Heißgeliebter Standard gemeuchelt - MIL-STD-2000A ersatzlos gestrichen*, SMT & CADS Ausgabe 4/96, EMO GmbH-Verlag, Böblingen 1996, S.58
151. Rauch, C., Augustin, H.: *Marktstudie PPS/CAQ - Innovative Entwicklungen und Integrationspotentiale*, Sonderpublikation der VDI-Z *Integrierte Produktion*, Hrsg. Warnecke, G., VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1996
152. Rechenberg, I.: *Evolutionsstrategie*, problemata frommann-holzboog, 1973
153. Rehkugler, H; Poddig, T.: *Statistische Methoden versus Künstliche Neuronale Netzwerke zur Aktienkursprognose*, Bamberger betriebswirtschaftliche Beiträge 73, Bamberg 1990, S. 3-7

154. Reichenberger, M.: *Löten mit Licht - ein alternatives Selektivlötverfahren*, Tagungsunterlagen FAPS-FOWEP-Seminar Verbindungstechniken in der Elektronik 23.1.1997, Erlangen, 1997
155. Rinne, H., Mittag, H.J.: *Statistische Methoden der Qualitätssicherung*, Carl Hanser Verlag, München, Wien 1991
156. Ritter, H.; Martinez, T.; Schulten, K.: *Neuronale Netze - Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke*, Addison Wesley (2. Auflage), Bonn 1991, S. 73
157. Reinhart, G., Lindemann, U., Heinzl, J.: *Qualitätsmanagement*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1996
158. Rojas, R.: *Theorie der neuronalen Netze*, Springer-Verlag, Berlin u.a. 1996
159. Rosser, J.G.: *What's different about ANSI/J-STD-001B?*, SMT-Surface Mount Technology Magazine August 1997, IHS Publishing Group, Libertyville Illinois/USA 1997, S. 121-124
160. Rosenblatt, F.: *The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain*, Psychological Research, Vol 5, Nr. 11/12, New York 1958, S. 585-601
161. Rosenblatt, F.: *Principles of Neurodynamics*, Spartan Book, New York 1962
162. Rothhaupt, A.: *Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung*, Feldmann, K., Geiger, M. (Hrsg.), Dissertation, Carl Hanser Verlag München Wien, 1995
163. Rothhaupt, A.; Sturm, J.: *Systematische Untersuchungen zum Lotpastenauftrag mittels Dispenstechnologie für unterschiedliche Rastermaße*. Surface Mount Technologies, VDE-Verlag, Berlin Offenbach, 1993
164. Rumbaugh, B.: *Object Oriented Modelling an Design*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall 1991
165. Sachs, M.Ch.: *Computergestützte Qualitätssicherung CAQ*, Verlag Vahlen, München 1993, S. 69 ff
166. Sandweg-Kohmann, A.: *Regelung eines ereignisdiskreten Stückprozesses*, in: *Automatisierungstechnik* 40 (1992) 9 R. Oldenburg Verlag, München 1992
167. Sauer, W. et al.: *Zuverlässigkeit von SMT-Weichlötstellen im visuellen Grenzfallbereich*, Kompendium zum Verbundprojekt "Zuverlässigkeit von SMT-Weichlötstellen im visuellen Grenzfallbereich" des BMBF, VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Teltow/Dresden 1996

168. Sauer, W.; Wohlrabe, H.; Zerna, Th.: *Bestimmung der Maschinenfähigkeit und Prozeßfähigkeit während der Fertigung von Flachbaugruppen*, Tagungsband Leiterplatte, VDE Verlag, 1997
169. Sejnowski, T.J.; Rosenberg, C.R.: *NETtalk: A parallel network that learns to read aloud*, Electrical Engineering and Computer Science Technical Report, John Hopkins University 1986
170. Sondermann, J. P.; Leist, R.: *Methodenbausteine für eine qualitätsorientierte Prozeßplanung*, Carl Hanser Verlag, München 1989, S. 656 - 662
171. Schweizer von Weidenfelden, M.(TG): *Wissensanalyse und -erkennung mit Kohonen-Netzen am praktischen Beispiel der Lawinenprognose*, Diss., Zürich 1995, S. 80 - 142
172. Scheffler, E.: *Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1974
173. Scheer, A.-W.: *Wirtschaftsinformatik*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag 1994
174. Scheer, A.-W.: *CIM Computer Integrated Manufacturing*, Springer Verlag, Berlin 1989
175. Schikarski, H.: *Die gedruckte Schaltung - Herstellung, Anwendung und Reparatur von gedruckten Schaltungen*, Telekosmos-Verlag Franckh'sche Verlagshandlung, W.Keller & Co., Stuttgart 1966
176. Schmidt-von Rhein, A.; Rehkugler, H.: *KNN zur Kreditwürdigkeitsprüfung bei Privatkundenkrediten*, in: Rehkugler H., Neuronale Netze in der Ökonomie: Grundlagen und finanzwirtschaftliche Anwendungen, Vahlen, München 1994
177. Schneider, B.: *Neuronale Netze für betriebliche Anwendungen: Anwendungspotentiale und existierende Systeme*, in: Prof. Dr. j. Becker, Prof. Dr. H.L. Grob, Prof. Dr. K. Kurbel, Prof. Dr. U. Müller-Funk, Prof. Dr. R. Unland, Prof. Dr. G. Vossen (Hrsg.): *Arbeitsbericht des Instituts für Wirtschaftsinformatik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster*, Münster 1993, S.10-11
178. Schöneburg, E. (Hrsg.): *Industrielle Anwendung Neuronaler Netze: Fallbeispiele und Anwendungskonzepte*, Addison-Wesley, Bonn u.a., 1993
179. Schöneburg, E., Heinzmann, F., Feddersen, S.: *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien*, Addison-Wesley, Bonn u.a., 1994
180. Schöneburg, E.; Hansen, N.; Gawelczyk, A.: *Neuronale Netze: Einführung, Überblick und Anwendungsmöglichkeiten*, Markt & Technik Verlag, Haar bei München 1990, S. 76-86

181. Schreuder, S.; Upmann, R.: *CIM Wirtschaftlichkeit*, TÜV-Rheinland, Köln 1988
182. Stark, R.: *SPC für die Praxis (Teil1) QZ, Qualität und Zuverlässigkeit*, Carl Hanser Verlag, München 1991
183. Staal, R.; Buch, V.: *TQM-Leitfäden für die Produktions- und Verfahrenstechnik*, Springer Verlag, Berlin 1996, S. 74 - 128
184. Stevens, C.: *Die Nervenzelle in Gehirn und Nervensystem*, in: Spektrum der Wissenschaft Heidelberg 1988, S. 2 - 13
185. Stockinger, K.: *FMEA ein Erfahrungsbericht*, QZ - Qualität und Zuverlässigkeit, Carl Hanser Verlag, München 1989, S. 155-158
186. Sturm, J.: *Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion*, Feldmann, K., Geiger, M. (Hrsg.), Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1997
187. Sturm, J.: *Mikrofocus-Röntgentechnik in der Fertigung von Elektronikbaugruppen - Prozeßbegleitende Lötstelleninspektion*, in: Tagungsband zum feinfocus Symposium "Qualitätskontrolle durch Mikrofocus-Röntgentechnik", Garbsen 1992
188. Straub, R.: *Zeitreihenanalyse und -prognose*, in: E. Schöneburg (Hrsg.): *Industrielle Anwendung Neuronaler Netze Fallbeispiele und Anwendungskonzepte*, Addison Wesley, Bonn 1993
189. Tanenbaum, A.S.: *Computer-Netzwerke*, Wolfram's Fachverlag, Attenkirchen 1992
190. Thiede, R., Ziolkowski, A.: *Stoß-Wechselwirkung: Eine Methode zur Fehlerdetektion in Strukturen*, Tagungsband zum IV. Kolloquium Technische Diagnostik Dresden 1996, TU Dresden 1996, Seiten 226-237
191. Tilgner, R.; Alpern, P.; Baumann, J.: *Changing States of Delamination Between Molding Compound and Chip Surface: A Challenge for Scanning Acoustic Microscopy*, IEEE Transaction on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part B, Vol. 17, No 3, August 1994
192. Turing, A.: *On Computable Numbers with an Application to the Decisionproblem*, Proceeding of the London Mathematical Society, Vol. 42, London 1937, S. 230-265
193. Unland, Rainer: *Objektorientierte Datenbanken: Konzepte und Modelle*, Bonn: International. Thomson Publ. 1995

194. van Vroonhoven, J.C.W.: *Effects of Adhesion and Delamination on Stress Singularities in Plastic-Packaged Integrated Circuits*, Trans. ASME, J. Electron. Packag. Vol. 115 (1993) 1, S. 28-33
195. Walker, R.J.: *Die Zuverlässigkeit von IC's für Oberflächenmontage*, Elektron. Ind. 17 (1986), S. 124, 127-128
196. Warnecke, G.: *Quality Function Deployment (QFD) im Entwicklungsprozeß, Konzepte, Modelle, Methoden und Hilfsmittel, Fertigungstechnik und Betriebsorganisation*, Universität Kaiserslautern 1995, S 11-48
197. Watson, D.: *Small Outline Package Reliability*, New Electron. 20 (1987) 13, S.28-29
198. Westkämper, E. (Hrsg.): *Null-Fehler-Produktion in Prozeßketten - Maßnahmen zur Fehlervermeidung und -kompensation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1996
199. Wohlrabe, H.; Kaiser, Ch.; Keil, M.: *Maschinen- und Prozeßfähigkeit von Bestückausrüstungen in der SMT*, Seminarunterlagen, Technische Universität Dresden, Institut für Elektronik-Technologie, Zentrum für mikrotechnische Produktion, 1996
200. Zell, A.: *Simulation Neuronaler Netze*, Addison-Wesley, Bonn u.a., 1994
201. Zimmermann, G.: *Neuronale Netze als Entscheidungskalkül*, in Rehkugler, H.: *Neuronale Netze in der Ökonomie: Grundlagen und finanzwirtschaftliche Anwendungen*, Vahlen, München 1994
202. Zöllner, B.: *Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion*, Feldmann, K., Geiger, M. (Hrsg.), Carl Hanser Verlag München Wien, 1995

Lebenslauf

Knuth Götz

geboren am 28.02.1967 in Erlangen

- 1973 - 1977 Pestalozzi-Grundschule in Friedrichshafen/Bodensee
- 1977 - 1986 Karl-Maybach-Gymnasium in Friedrichshafen/Bodensee
- 1986 - 1987 Grundwehrdienst
- 1987 - 1993 Studium der Fertigungstechnik
an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- 1993 - 1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
- 1994 - 1998 Geschäftsführer des Sonderforschungsbereiches 356
Produktionssysteme in der Elektronik an der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Sprecher: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

ISSN 1431-6226
ISBN 3-87525-112-1