

Sami Krimi

*Analyse und Optimierung  
von Montagesystemen  
in der Elektronikproduktion*



Sami Krimi

*Analyse und Optimierung  
von Montagesystemen  
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: 25. September 2000  
Tag der Promotion: 02. Februar 2001  
Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann  
Prof. Dr.-Ing. W. Bär

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Krimi, Sami:**

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion /  
Sami Krimi. - Bamberg : Meisenbach, 2001  
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 115)  
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2001  
ISBN 3-87525-157-1      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 2001  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

# Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls danke ich herzlichst für die großzügige Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die wertvollen Anregungen und den Freiraum, den er mir bei der Bearbeitung dieser interessanten Aufgabe gewährte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Bär vom Lehrstuhl für Regelungstechnik gilt mein herzlicher Dank für die wohlwollende Übernahme des Koreferates, die aufgeschlossenen Diskussionen und fachlichen Anregungen.

Herzlich danke ich meinen Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und die gute Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Andreas Brand, Herrn Dipl.-Ing. Frank Christoph, Herrn Dr.-Ing. Manfred Gerhard, Herrn Dipl.-Ing. Rüdiger Holzmann und Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Schlögl. Weiterer Dank gehört den Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hier sind insbesondere Herr Dipl.-Ing. Christopher Ulrich und Herr Dipl.-Ing. Andreas Pöllot zu nennen.

Bei Herrn Dipl.-Inf. Christoph Felbinger möchte ich mich für die Korrekturlesung, die Unterstützung bei der Anfertigung meines Vortrags und vor allem für die angenehme Zeit in dem gemeinsamen Büro bedanken, die ich gerne in Erinnerung behalten werde.

Mein besonderer Dank gilt vor allem meinen Eltern, die mich schon in frühen Jahren unterstützt und motiviert haben, meine Ziele zu erreichen.

Ich danke schließlich meiner Freundin Anna Mleczo sowohl für die moralische als auch aktive Unterstützung bei der Anfertigung meiner Arbeit.

Nürnberg, im März 2001

Sami Krimi



# Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Motivation .....	1
1.2	Ziele und Vorgehensweise .....	2
2	Aufbau der Bestückungssysteme .....	5
2.1	Kinematischer Aufbau unterschiedlicher Bestückungskonzepte .....	5
2.1.1	Systeme für die Präzisionsbestückung .....	7
2.1.2	Aufbau von Hochleistungsbestückungssystemen .....	7
2.2	Maschinenkomponenten zur Erhöhung der Maschinen- zuverlässigkeit .....	9
2.2.1	Maschinengestell und Bewegungsachsen .....	10
2.2.2	Module zur Sicherung des Bestückprozesses .....	11
2.2.3	Konzept für Maschinenkalibrierung .....	13
2.3	Steuerungsarchitektur moderner Bestückungssysteme .....	15
3	Bestückung neuer Bauelementformen und Schaltungsträger .....	17
3.1	Analyse der Bestückungssysteme hinsichtlich neuer Bauelemente und Schaltungsträger .....	17
3.1.1	Trends in der Elektronik .....	17
3.1.2	Grundlagen der Bestückung neuer Bauelemente .....	18
3.1.3	Bewertung von Bestückungssystemen .....	21
3.2	Bestückkonzepte für spritzgegossene Schaltungsträger .....	22
3.2.1	Prozesse für die räumliche Bestückungstechnik .....	24
3.2.2	Räumliche Bestückung basierend auf einem sechsachsigen Industrieroboter .....	25
3.2.3	Aufbau eines erweiterten Bestückungssystems für spritzgegossene Schaltungsträger .....	31
3.3	Bestückungskonzepte für Sonderanwendungen .....	37
3.3.1	Bestückungskonzept für Steckverbinder .....	37
3.3.2	Integration einer Mikropositioniereinheit in eine flexible Bestückungszelle .....	40

---

3.3.3	Gesamtkonzept zur Folienbestückung.....	42
3.4	Anforderungen an Bestückungssysteme.....	44
4	Auswirkungen des Schwingungsverhaltens auf den Bestückprozess.....	46
4.1	Analyse des Maschinenaufbaus hinsichtlich des dynamischen Verhaltens .....	46
4.1.1	Beschreibung der Systemkomponenten .....	46
4.1.2	Konzept der Achsensteuerung .....	47
4.2	Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Bestückungssystemen .....	50
4.2.1	Beschreibende Systemgrößen des Schwingungsverhaltens .....	50
4.2.2	Messung des Schwingungsverhaltens.....	52
4.2.3	Messung des Einschwingverhaltens.....	54
4.2.4	Auswirkung auf die Bestückgenauigkeit .....	59
4.3	Modellbildung zur Berechnung des Einschwingverhaltens.....	63
4.3.1	Beschreibung der Randbedingungen .....	64
4.3.2	Ergebnis der FEM-Simulation .....	65
4.3.3	Vergleich der Messungs- und Berechnungsergebnisse .....	67
4.4	Ansätze zur Optimierung des Schwingungsverhaltens .....	68
4.4.1	Konzepte für den Maschinenaufbau.....	68
4.4.2	Maßnahmen zur Optimierung der Steuerungskonzepte.....	69
4.4.3	Konzepte für die Maschinenregelung .....	70
5	Thermisches Verhalten von Bestückungssystemen .....	73
5.1	Stand der Forschung.....	73
5.1.1	Thermische Einflüsse auf die Montagegenauigkeit von Bestückautomaten .....	73
5.1.2	Einflüsse der thermischen Verformung auf den Bestückprozess .....	75
5.1.3	Ansätze zur Optimierung der Arbeitsgenauigkeit.....	77
5.2	Messtechnische Ermittlung der thermoelastischen Verformung von Bestückungssystemen .....	78
5.2.1	Methode zur Erfassung des thermischen Verhaltens .....	78
5.2.2	Erfassung der Temperaturverteilung im Bestückungssystem.....	81
5.2.3	Erfassung des thermisch bedingten Versatzes des Bestückkopfs .....	86
5.2.4	Korrelationsanalyse der Messergebnisse .....	92

6	Analyse und Optimierung des thermischen Verhaltens .....	96
6.1	Analytische Modelle zur Darstellung des thermoelastischen Verhaltens .....	96
6.1.1	Ideales Ein-Körper-System .....	97
6.1.2	Theoretischer Bestückversatz aufgrund thermoelastischer Verformung .....	99
6.2	Einsatz der FEM-Simulation .....	102
6.2.1	Vorgehensweise .....	102
6.2.2	Simulation der thermischen Verformung des Maschinenportals .....	105
6.2.3	Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungen .....	108
6.3	Maßnahmen zur Reduzierung der thermischen Einflüsse .....	110
6.3.1	Allgemeine Lösungskonzepte für Bestückungssysteme .....	110
6.3.2	Entwurf einer Korrekturfunktion zur Kompensation des thermoelastischen Versatzes .....	113
7	Konzepte und Methoden zur Optimierung von Bestückungssystemen .....	120
7.1	Systemoptimierung durch die Kinematiksimulation .....	121
7.1.1	Aufbau und Realisierung einer Roboterbestückungszelle .....	121
7.1.2	Gesamtkonzept der Offline-Programmierung .....	123
7.2	Simulationsbasierte Steuerung und Überwachung von Bestückungssystemen .....	125
7.2.1	Beschreibung der Komponenten des Systems .....	126
7.2.2	Konzept des Steuerungs- und Überwachungssystems .....	128
7.2.3	Realisierung des Steuerungs- und Überwachungssystems .....	130
7.3	Betriebsdatenerfassung zur Fehlerfrüherkennung .....	134
7.3.1	Problemstellung .....	134
7.3.2	Konzept für die Online-Übertragung von Maschinendaten .....	135
7.3.3	Visualisierung von Fertigungsszenarien und Übertragung von Fertigungsdaten .....	138
8	Zusammenfassung .....	142
	Literaturverzeichnis .....	145



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Steigerung der Funktionalität elektronischer Produkte lässt sich nur mit immer feineren Strukturen realisieren [64]. Durch den anhaltenden Miniaturisierungstrend im Bereich der Bauelemente finden zunehmend elektronische Bauformen mit Rastermaßen kleiner als  $300\ \mu\text{m}$  Einsatz [32]. Diese stellen höchste Anforderungen an die Genauigkeit der Bestückungssysteme. Gleichzeitig gewinnt der Aspekt der Mengenleistung im Hinblick auf eine wirtschaftliche Fertigung an Bedeutung. Präzisionsbestückungssysteme erreichen mit ihrem aufwendigen Aufbau zwar die erforderlichen Fügtoleranzen, weisen aber hinsichtlich der Bestückleistung und -kosten große Defizite auf. Somit besteht ein erheblicher Bedarf an Bestückungssystemen mit hoher Bestückleistung und dabei hoher Präzision. Die Entwicklung von Bestückungssystemen, die diesen beiden Ansprüchen gleichermaßen gerecht werden, stellt eine besondere Herausforderung dar [24].

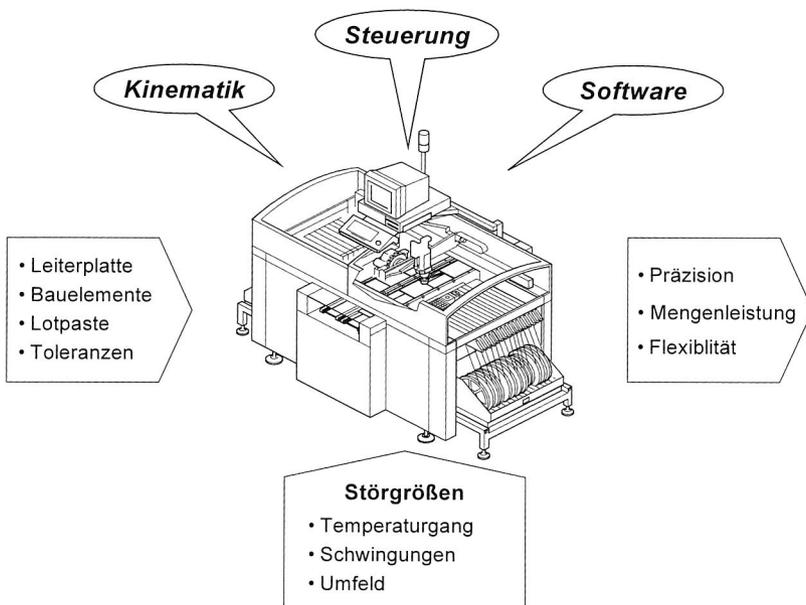


Bild 1: Neue Herausforderungen für stabile Bestückungssysteme durch die Kombination aus hoher Bestückleistung und Präzision

Weiterhin ist die Sicherung der Verfügbarkeit und der Leistungsmerkmale von Bestückungssystemen durch ein verbessertes Maschinenverhalten erforderlich, da eine Einschränkung der Maschinenqualität sowie Ausfallzeiten durch einen Produktionsstillstand immer hohe Kosten verursachen [33].

Insgesamt wird deutlich, dass für eine weitere Optimierung der Bestückungssysteme der Maschinenaufbau, die Steuerung und die wirkenden Störgrößen in einem ganzheitlichen Ansatz verfolgt werden müssen. Dabei sollen insbesondere die auf die Maschinenfähigkeit wirkenden Störeinflüsse, wie zum Beispiel thermische Belastungen und Schwingungen, systematisch untersucht werden, um Schwachstellen aufzudecken und bestehende Bestückungssysteme konstruktiv und steuerungstechnisch weiterzuentwickeln.

## 1.2 Ziele und Vorgehensweise

Das übergreifende Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung optimaler Systemlösungen für die Bestückung hochintegrierter, feinstrukturierter Bauelemente. Dadurch soll ein wissenschaftlicher Beitrag zur schnelleren und präziseren Bestückung in der Elektronikproduktion geleistet werden. Besondere Berücksichtigung finden dabei steigende Anforderungen durch Bauelemente mit flächig angeordneten Anschlussstrukturen im Bereich 300  $\mu\text{m}$  und kleiner. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Erarbeitung von Lösungsansätzen bezüglich der Problematik der automatisierten Handhabung und Montage sowohl planarer als auch räumlicher Substrate.

Zur Weiterentwicklung der Bestückungssysteme für neue Bauelemente sind prozess- und maschinentechnische Arbeiten erforderlich. Hierfür standen verschiedene Maschinenkonzepte als Untersuchungsaufbauten zur Verfügung. Zielsetzung der Prozessuntersuchungen ist es, durch experimentelle Arbeiten Kenntnisse über den Einfluss des Maschinenverhaltens auf die Bestückgenauigkeit bei der Verarbeitung feinerer Strukturen zu gewinnen. Dies betrifft vor allem Untersuchungen zur Nacktchipmontage und die Bestückung von Bauelementen mit vollflächig angeordneten Anschlüssen, z. B. Ball Grid Array (BGA) oder Chip Scale Packaging (CSP). Aus diesen Ergebnissen wird ein Anforderungsprofil zur Weiterentwicklung der Bestückungssysteme erstellt.

Im Rahmen der maschinentechnischen Arbeiten liegt der Schwerpunkt in Anlagenuntersuchungen und -entwicklungen. Basierend auf den Ergebnissen der Prozessanalyse sollen verschiedene Bestückkomponenten entwickelt und implementiert werden, die eine präzise Montage auf feinstrukturierte Schaltungsträger ermöglichen. Grundlage für diese Entwicklungen ist eine systematische Analyse des dynamischen und thermischen Verhaltens des Bestückungssystems unter industriellen Betriebs-

bedingungen und dessen Einfluss auf die Bestückgenauigkeit. Zum Vergleich werden unterschiedliche Maschinenkonzepte hinsichtlich ihres dynamischen und thermischen Verhaltens betrachtet. Anhand der Untersuchungsergebnisse soll der Einfluss des Maschinenverhaltens auf die Maschinenfähigkeit von Bestückungssystemen definiert werden. Dieser resultiert vorwiegend aus der veränderlichen Systemkonfiguration im Betrieb. Möglichkeiten zur Fehlerkompensation sollen im Rahmen einer Systemanalyse erarbeitet werden. Diese Lösungskonzepte sind bei der Neu- und Weiterentwicklung von Bestückungssystemen von besonderer Bedeutung.

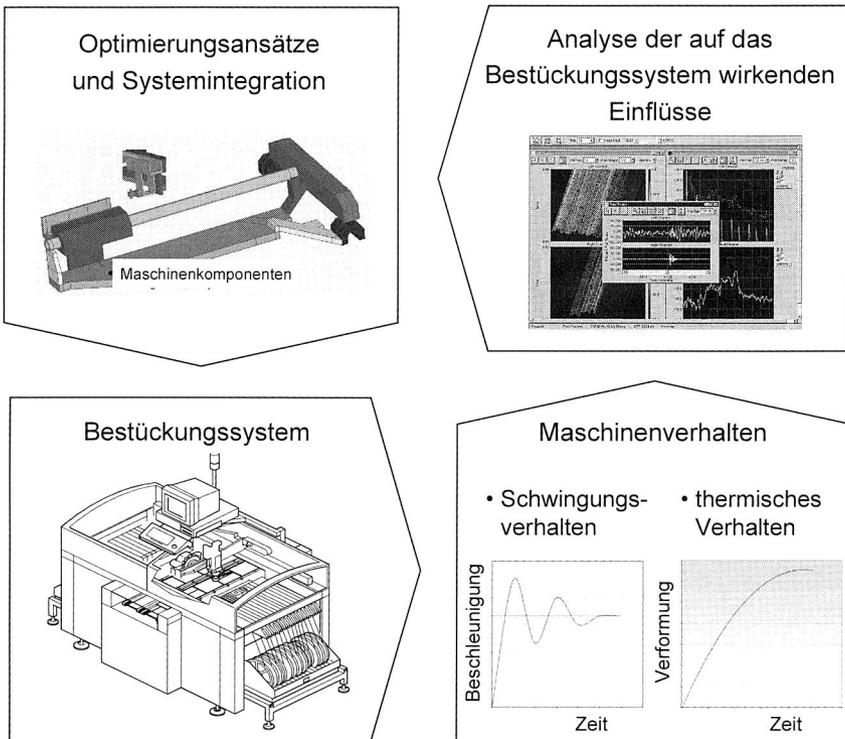


Bild 2: Systematische Optimierung von Bestückungssystemen zur Präzisionsmontage von Bauelementen mit feineren Strukturen

Ausgehend von den Ergebnissen zum Maschinenverhalten wird mit Hilfe der Simulationstechnik eine Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses von Bestückungssystemen vorgestellt. So wird bei der Systementwicklung und -optimierung die 3D-Kinematiksimulation eingesetzt. Diese ermöglicht es, schon im Vorfeld Anla-

gen zu modellieren, zu konfigurieren und zu programmieren. Weiterhin wird in der FEM-Simulation ein Ersatzmodell für Maschinenkomponenten erstellt, um das Schwingungsverhalten sowie das thermische Verhalten zu simulieren und es anschließend zu optimieren.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Lösungskonzepte zur Optimierung der Bestückgenauigkeit von Bestückungssystemen vorgestellt und prototypisch realisiert. Dies erfordert eine Überarbeitung des Maschinenaufbaus und der Steuerung, die durch geeignete Module erweitert werden müssen. Abschließend werden die vollzogenen Änderungen und deren Auswirkungen auf das Maschinenverhalten des untersuchten Bestückungssystems überprüft.

Diese Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zu Grundlagenforschungen bezüglich des Maschinenverhaltens von Bestückungssystemen zur Verarbeitung elektronischer Bauteile mit feinen Strukturen unter Betriebsbedingungen.

## 2 Aufbau der Bestückungssysteme

Die bereits vielfach in [68] angeführten neuen Entwicklungen im Bereich der Bauelemente (Flip Chip,  $\mu$ BGA, CSP) und Schaltungsträger (Flex, MID) führen zu neuen Herausforderungen für die Bestückungstechnik. So wird eine Bestückgenauigkeit von 30  $\mu$ m bei einem Rastermaß von 0,3 mm angestrebt, was gerade bei der Montage höchste Ansprüche an das Bestückungssystem stellt [70]. Gleichzeitig führen schnellere Produktentwicklungszyklen und Produktvielfalt zu erhöhten Anforderungen an Bestückungssysteme hinsichtlich Flexibilität und Mengenleistung [75].

Die konventionelle Trennung von Bestückmaschinen in schnelle Chip-shooter und im Gegensatz dazu in hochpräzise, dafür aber langsamere Automaten für Fine-Pitch-Bauelemente verdeutlicht die Problematik des Maschinenverhaltens. Eine Sicherung der Bestückgenauigkeit wird momentan gewährleistet durch den Einsatz zeitintensiver Inspektionssysteme und Kalibrierungsverfahren. Schwingungen, die während des Bestückprozesses entstehen, führen zu einer Beeinflussung der Bestückgenauigkeit oder bedingen eine Verlängerung der Taktzeiten. Daneben kommt es unter industriellen Fertigungsbedingungen zu einer geometrischen Verlagerung der Maschinenkomponenten durch thermische Einflüsse. Diese Kenngrößen hängen vom kinematischen Aufbau der Bestückautomaten sowie von der Art der Antriebssysteme und Lageerfassung ab.

Da ein Schwerpunkt dieser Arbeit die Analyse des Maschinenverhaltens von Bestückungssystemen unter thermischen und dynamischen Belastungen und deren Einfluss auf die Genauigkeit ist, sollen in diesem Kapitel der Aufbau sowie das Einsatzgebiet der zu untersuchenden Bestückautomaten und die Systemkomponenten zur Sicherung der Bestückgenauigkeit vorgestellt werden. Dabei werden die Eigenschaften dieser Bestückungssysteme und die Anforderungen an den Maschinenaufbau durch neue Technologien dargestellt.

### 2.1 Kinematischer Aufbau unterschiedlicher Bestückungskonzepte

Durch die zum Teil konkurrierenden Anforderungen, wie zum Beispiel Flexibilität, Geschwindigkeit und Präzision an Bestückautomaten, ergaben sich unterschiedliche kinematische Aufbauvarianten und Verfahren für die Montage in der Elektronikproduktion. Bild 3 zeigt die unterschiedlichen Aufbauvarianten der auf dem Markt verfügbaren Bestückungssysteme.

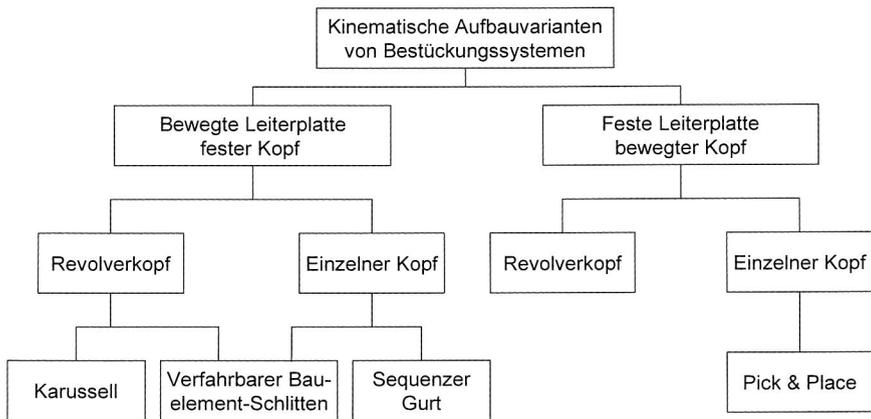


Bild 3: Klassifizierung konstruktiver Varianten von Bestückungssystemen nach deren Kinematik [10]

Bei der Betrachtung der Eigenschaften verschiedener Bestückungssysteme wird deutlich, dass insbesondere die Kinematik und das Arbeitsprinzip den Aufbau der Maschine charakterisieren. Im Gegensatz zur bedrahteten Technik werden bei der Bestückung von SMD-Bauelementen verfahrbare Bestückköpfe eingesetzt, die im allgemeinen eine ortsfeste Leiterplatte bedienen. Der Bestückkopf holt sich aus der Bereitstellungseinheit die Bauelemente und verfährt sie in die geforderte Montageposition. Zur Verkürzung der Verfahwege werden auch in der SMD-Technik bewegliche Bauelemente-Zuführeinrichtungen eingesetzt, mit denen das zu bestückende Bauelement an einer wegoptimierten Abholposition bereitgestellt wird. Dadurch kann die Bestückleistung deutlich optimiert werden. Dieses Konzept wird anhand der Roboterbestückung in Kapitel 3.2.2 vorgestellt.

Bei der Kinematik von Bestückungssystemen unterscheidet man zwischen zwei Prinzipien:

- Bewegte Leiterplatte bei einem festen Bestückkopf
- Feste Leiterplatte bei einem bewegten Bestückkopf.

Diese zwei Konzepte werden in Abhängigkeit der geforderten Bestückleistung und -genauigkeit mit einem einfachen Bestückkopf oder mit einem Revolverkopf ausgestattet. Aufgrund der steigenden Anforderungen an Bestückungssysteme hinsichtlich der Bestückgenauigkeit und Flexibilität werden Maschinenkonzepte mit bewegter Leiterplatte immer stärker vom Markt verdrängt.

### 2.1.1 Systeme für die Präzisionsbestückung

Präzisionsbestückungssysteme sind einfache Pick&Place-Maschinen, bei denen die Bestückung der Bauelemente sequentiell erfolgt. Im Gegensatz zum Chip-Shooter finden hier kartesische Vier-Achssysteme, ausgestattet mit einem Bauelemente-Zuführmodul und einem Bestückkopf, Einsatz [63]. Das kartesische System bietet in der Regel eine höhere Genauigkeit als andere Maschinenkonzepte und wird daher für höchstpräzise Applikationen (Multi-Chip-Modul), für Montagen und das Handling teilweise feinsten Bauelemente (CSP, Flip-Chip) eingesetzt [29]. Der wesentliche Nachteil kartesischer Systeme, entweder schnell und wenig genau bzw. präzise und langsam zu sein, wird bei flexiblen Bestückungssystemen durch die Integration eines zusätzlichen Revolverbestückkopfs konstruktiv gelöst.

Zur Sicherung der Bestückgenauigkeit werden derzeit Bildverarbeitungssysteme mit einer Auflösung unter 10  $\mu\text{m}$  und Achspositioniersysteme mit einer Auflösung von kleiner 2,5  $\mu\text{m}$  eingesetzt. Trotz der Verwendung dieser hochgenauen Systeme sind mit den marktüblichen Bestückungssystemen lediglich Genauigkeiten von 50  $\mu\text{m}$  realisierbar.

Dies ist auf das nicht optimierte Maschinenverhalten hinsichtlich der Schwingungen und der thermischen Verformung des Systemaufbaus zurückzuführen, das besonders bei räumlichen Anwendungen, wie zum Beispiel spritzgegossene Schaltungsträger, zu beobachten ist. In diesem Zusammenhag werden in Kapitel 4 und 5 die Störeinflüsse auf das Maschinenverhalten ausführlich betrachtet.

Präzisionsbestückungssysteme erreichen mit ihrem aufwendigen mechanischen Aufbau zwar die erforderlichen Füge-toleranzen, weisen aber hinsichtlich der Bestückleistung, der Kostensituation und der Beschränkung auf das Bestücken von hochpoligen Bauelementen erhebliche Defizite auf. Deshalb wird in der Regel in einer SMD-Fertigungslinie nur ein Präzisionsbestückungssystem integriert, das die Aufgabe der Bestückung von Bauelementen mit feiner Struktur übernimmt. Bei der entsprechenden Rüstoptimierung wird die Taktung der Linie durch die geringe Bestückleistung des Präzisionsbestückungssystems nicht beeinflusst.

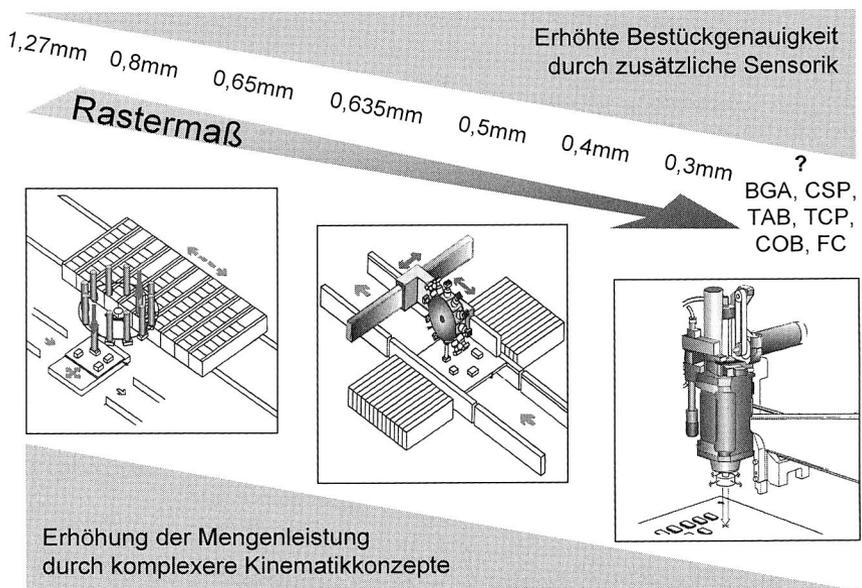
### 2.1.2 Aufbau von Hochleistungsbestücksystemen

Aufgrund der steigenden Anforderungen hinsichtlich der Bestückleistung haben sich in den letzten Jahren die Chip-Shooter als Hochleistungsbestückungssysteme durchgesetzt. Dabei werden gleichzeitig mehrere Bauelemente von einem oder mehreren Bestückköpfen in einem kontinuierlichen Prozess aufgenommen und bestückt.

Bei Chip-Shootern unterscheidet man hauptsächlich zwischen zwei Maschinenkonzepten:

*Karussellbestück-Prinzip*

Bei dem Bestückkarussell handelt es sich um ein Bestückprinzip, in dem die Leiterplatte in X- und Y-Achse bewegt wird, um die Bauelemente zu positionieren. Durch die auf die Leiterplatte wirkenden hohen Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte besteht die Gefahr, dass die bereits bestückten Bauelemente verrutschen. Deshalb beschränkt sich der Einsatz dieser Bestückungssysteme auf die Verarbeitung von Chip-Bauelementen und niedrigpoligen Bauelementen mit einer Bestückgenauigkeit von 100 µm. Bei der Bauelemente-Bereitstellung unterscheidet man feststehende und verfahrbare Bauelemente-Zuführung. Durch die verfahrbaren Zuführmodule kann zwar die Anzahl der Zuführmodule deutlich erhöht werden, jedoch ist das Nachfüllen der Bauelemente während des Bestückens nicht möglich.



**Bild 4:** Zusammenhang zwischen Bestückgenauigkeit und Mengenleistung bei verschiedenen Bestückkonzepten

### Revolverbestück-Prinzip

Dieses Konzept ist eine Weiterentwicklung des Pick&Place-Prinzips. Dabei handelt es sich um einen Chip-Shooter mit zwei bzw. vier Revolverköpfen an einem Doppell- bzw. Vierportalsystem. Das Aufnehmen der Bauelemente erfolgt sequentiell durch die in den Revolverkopf integrierten Saugpipetten. Mit dem Portal können die Bestückpositionen angefahren werden. Im Gegensatz zum Karussell-Prinzip ermöglichen die Fixierung der Leiterplatte im Arbeitsraum sowie die feststehenden Zuführmodule eine bessere Bestückgenauigkeit bei einer hohen Bestückleistung. Damit kann ein Optimum an Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

Durch die zu bestückenden Bauelemente sowie das Produktspektrum werden die Anforderungen an das Bestückungssystem definiert. Dieses bildet die Basis für die Auswahl des geeigneten Maschinenkonzepts. Dabei soll insbesondere der Zusammenhang zwischen der Bestückgenauigkeit und Bestückleistung der verschiedenen Bestückungssysteme berücksichtigt werden (Bild 4).

## 2.2 Maschinenkomponenten zur Erhöhung der Maschinenzuverlässigkeit

Um den Anforderungen an Präzision und Geschwindigkeit zu genügen, muss das Bestücksystem ganzheitlich betrachtet und optimiert werden. So ist es notwendig, die Wechselwirkung zwischen den Hauptkomponenten (Maschinengestell, Achssystem) und den Bausteinen (Steuerung, Sensorik) zu analysieren [61].

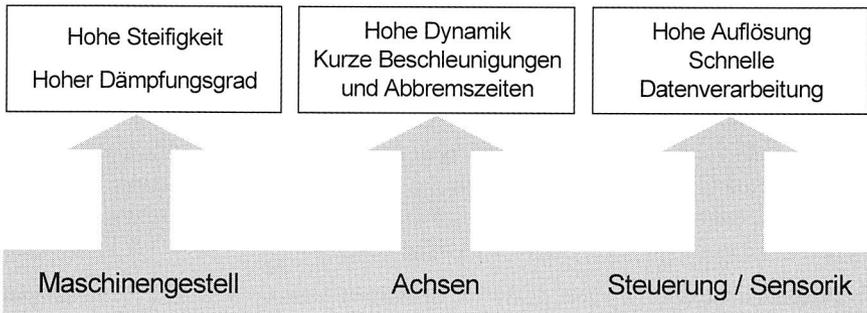


Bild 5: Anforderungen an die Maschinenkomponenten zur Verbesserung der Bestückleistung und -genauigkeit

In diesem Zusammenhang soll das ganze Maschinenverhalten hinsichtlich der Kenngrößen wie zum Beispiel dynamische und thermische Belastungen betrachtet

werden [107]. Die notwendigen Untersuchungen sowie die daraus gewonnenen Ergebnisse werden in Kapiteln 4 und 5 diskutiert.

### 2.2.1 Maschinengestell und Bewegungsachsen

Aufgrund der Wirtschaftlichkeit des Stahlbaus (Werkstoffersparnis, keine Modellkosten) besteht das Gestell eines Automaten aus einer Schweißkonstruktion. Gegenüber der Ausführung des Graugusses ergeben sich jedoch folgende Nachteile: begrenzte Gestaltungsmöglichkeiten, geringe Dämpfungsfähigkeit, geringe Formbeständigkeit [55].

Deshalb ist die weitere Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Bestückungssystemen unmittelbar von den Entwicklungen im Bereich der Maschinendynamik abhängig, um den Einsatz schnellerer Antriebssysteme zu ermöglichen. Dabei ist es notwendig, die bewegten Massen zu verringern, wobei gleichzeitig eine hohe mechanische Steifigkeit und somit hohe mechanische Resonanzfrequenzen angestrebt werden [86]. Hierzu kommt es zu einer Veränderung der Beanspruchung der einzelnen Maschinenteile, wie zum Beispiel Lager, Führungen und Portale, die den Einsatz neuer Werkstoffe, Konstruktionen und Antriebssysteme erfordern. Zur Ausnutzung der hohen Auflösung der Positioniersysteme ist es notwendig, bei zukünftigen Entwicklungen die veränderten Betriebsbedingungen des Bestückungssystems und deren Einfluß auf die Maschinenstruktur zu berücksichtigen. Temperaturunterschiede innerhalb des Bestückungssystems verursachen eine zeitliche Veränderung der Maschinenstruktur, z. B. Verformung einzelner Maschinenteile, die die Bestückgenauigkeit bzw. den Bestückprozess negativ beeinflussen.

Eine Grundlage hierfür bilden die im Kapitel 5 ausgeführten Untersuchungen zur Auswirkung örtlicher und zeitlicher thermischer Gradienten auf die Maschinengenauigkeit. Dabei sollen ausgehend von messtechnischen und konstruktiven Analysen von unterschiedlichen Bestückprinzipien Anforderungen an Bestücksysteme abgeleitet werden. Darüber hinaus werden mit Hilfe der Simulationstechnik Forderungen für die konstruktive Gestaltung der Maschinenkomponenten (Gestellelemente, Portale, Koppelstellen, Lagerungen etc.) abgeleitet.

In Bestückautomaten werden heute hauptsächlich klassische mechanische Linearantriebe bestehend aus einem Antriebsmotor und Übertragungselementen (Zahnriemen, Kugelrollspindel etc.) eingesetzt. Diese Antriebssysteme sind jedoch aufgrund der Spiel- oder Reibungseffekte innerhalb der mechanischen Übertragungskette, der möglichen Laststeifigkeit und Dynamik nur begrenzt für schnellere Verfahrensgeschwindigkeiten und höhere Genauigkeiten geeignet.

Als Alternative zu klassischen Linearantrieben bieten sich die Linear-Direktantriebe an. Durch das hohe Beschleunigungsvermögen und die große statische und dynamische Steifigkeit dieses Antriebsprinzips können hohe Verfahrgeschwindigkeiten und eine Positioniergenauigkeit erreicht werden [96]. Ein Nachteil der Linearmotoren ist jedoch der geringe Wirkungsgrad und damit die große Wärmeeinbringung in die Maschinenstruktur. Die daraus resultierende Wärmeausdehnung der Maschinenteile führt zu einer negativen Auswirkung auf die Positioniergenauigkeit in einem höheren Maß als bei klassischen Linearantrieben. Deshalb muss beim Einsatz von Linearmotoren der Temperatureffekt berücksichtigt und entsprechend durch Korrekturverfahren kompensiert werden.

### **2.2.2 Module zur Sicherung des Bestückprozesses**

Zur Verarbeitung von Fine-Pitch-Bauelementen mit Rastermaß 0,5 mm und kleiner sowie von immer kleiner werdenden passiven Bauelementen (0402, 0201) werden erhöhte Anforderungen an die Bestückgenauigkeit der Bestückungssysteme gestellt [90]. Um diesen Anforderungen zu genügen, werden zur Sicherung des Bestückprozesses zahlreiche Zusatzmodule in das Bestückungssystem integriert. Dadurch lässt sich eine Reihe von möglichen Fehlern bereits während der Bestückung ausschließen und damit aufwendige und kostenintensive Reparaturzyklen vermeiden.

Um ein hochgenaues Bestücken zu gewährleisten, wird bei der Positionierung der Achsen die Abweichung der tatsächlichen Bestückposition von der Sollposition des Bauelements berücksichtigt. Dieses erfolgt durch den Einsatz von Bildverarbeitungssystemen.

Nach dem Einfahren der Leiterplatte in den Bestückbereich erfasst eine am Bestückkopf befestigte CCD Kamera die Lage der Referenzmarken auf dem Leiterplattenlayout. Die daraus berechneten Ist-Werte dienen zur Korrektur der x-y-Fehllage, der Verdrehung und des Verzugs der Leiterplatte. In der Nähe der Bestückposition von Bauelementen mit feinerer Struktur können weitere lokale Referenzmarken zur Erhöhung der Bestückgenauigkeit angebracht werden. Ein weiteres Kamerasystem wird für die optische Bauelementezentrierung verwendet. Die Bildverarbeitung erkennt die Lage des Bauelementes am Bestückkopf und die Auswerteeinheit ermittelt im Korrelationsverfahren den Versatz des Bauelements in x-y und die Winkellage bezogen auf den Referenzpunkt des optischen Moduls.

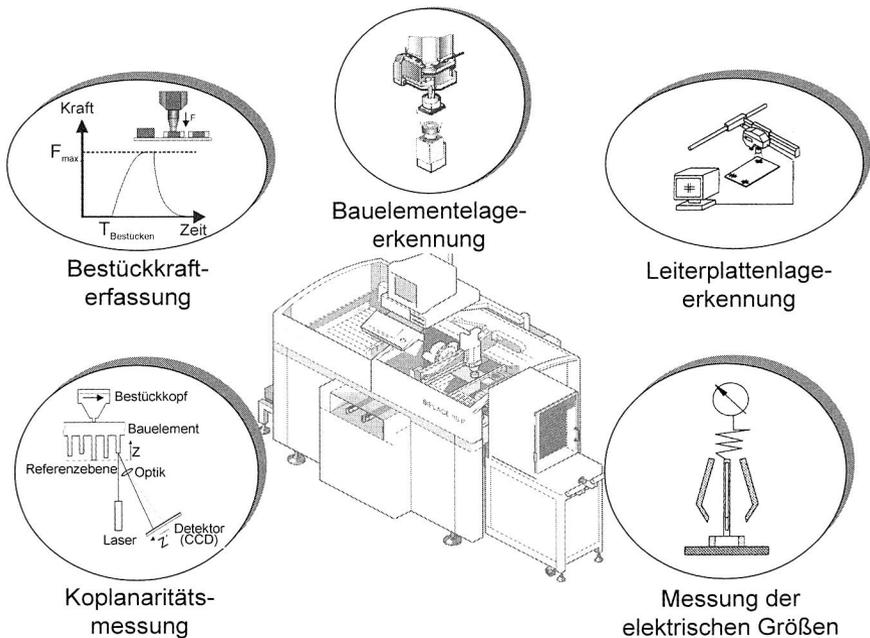


Bild 6: Integration von Systemkomponenten in ein Bestückungssystem zur Sicherung des Bestückprozesses [10]

Diese Bildverarbeitungssysteme arbeiten nach dem zuverlässigen Korrelationsverfahren. Erreicht wird die hohe Zuverlässigkeit dieses Verfahren durch einen Algorithmus, mit dem die Position der gesuchten Sollstruktur im aufgenommenen Bild ermittelt wird. Dabei wird die gesuchte Sollstruktur im Suchbereich der aufgenommenen Ist-Struktur verschoben und so durch Differenzbildung der Pixelwerte der Ort mit maximaler Korrelation bestimmt. Dadurch ist es möglich, auch bei fehlerhaften bzw. unvollständigen Bildstrukturen die Position der Sollstruktur sicher und exakt zu ermitteln. Um die Bestückgenauigkeit weiter zu erhöhen, werden zusätzlich lokale Referenzmarken in unmittelbarer Nähe der Bestückpositionen vorgesehen. Durch diese Maßnahme lassen sich Toleranzen und nichtlineare Verzüge der Leiterplatte beim Bestückvorgang kompensieren.

Ein wichtiger Gesichtspunkt in der Fine-Pitch-Bestückung ist die Koplanaritätsmessung der Anschlussbeinchen. Mittels eines Koplanaritätsmoduls erfolgt eine sequentielle Abtastung der Beinchen in der Form, dass die Anschlüsse des an der Saugpi-

pette haftenden Bauelements über einen ortsfesten Laserstrahl positioniert werden. Gemessen wird eine Verschiebung in z-Richtung mittels des Triangulationsprinzips.

Eine weitere Komponente zum zuverlässigen Bestücken bilden elektrische Prüfgeräte, mit denen elektrische Funktionswerte der Bauelemente während des Verfahrens des Bestückkopfes überprüft werden können. Bauelemente werden bei Unter- oder Überschreiten bestimmter Toleranzen aussortiert.

Für die hochgenauen Positionierbewegungen des Bestückkopfs sind verschleißarme Anordnungen von Positioniersystemen mit hoher Genauigkeit bzw. Auflösung notwendig. Diese Positioniersysteme wurden an die erhöhten Anforderungen der Bestücksysteme angepasst und ermöglichen eine direkte Lageerfassung der Position der Portale und des Winkels der Bestückpipette. Dadurch werden Fehler, die sich durch Getriebespiel, Zahnriemen und Spindel ergeben, bei der Positionserfassung berücksichtigt. Zusätzliche Forderungen, wie der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Positioniergenauigkeit der Meßsysteme, sollen im Rahmen der Untersuchungen des thermischen Verhaltens bestimmt bzw. berücksichtigt werden, damit keine zusätzlichen Fehler durch eine Beeinträchtigung der Meßsysteme auftreten.

Bild 6 zeigt die Zusatzkomponenten, die in ein Bestückungssystem integriert werden, um die Maschinenzuverlässigkeit zu erhöhen. Diese Komponenten sind eine Voraussetzung zur Montage elektronischer Bauteile mit feineren Strukturen. All diese Maßnahmen bedeuten jedoch einen beträchtlichen konstruktiven Aufwand und führen zu Maschinen für Spezialanwendungen mit geringem Arbeitsbereich und geringer Flexibilität bei hohen Anschaffungskosten. Deshalb wird in den heutigen Tagen an andere Möglichkeiten zur Beseitigung der Fehlerursachen bei der Positionierung und damit zur Verbesserung der Genauigkeit gedacht.

### **2.2.3 Konzept für Maschinenkalibrierung**

Zufällige Abweichungen von der Soll-Bestückposition bewirken eine Unsicherheit beim Bestückprozess. Sie führen zu einer Streuung der Bestückpositionen um einen Mittelwert. Die Zufallsstreuung kann durch statistische Verfahren analysiert und beschrieben werden (Mittelwert, Standardabweichung). Im Gegensatz zu den statistischen Abweichungen führen systematische Abweichungen zu einer unrichtigen Positionierung der Achsen. Bekannte systematische Abweichungen, z. B. aus Kalibriermessungen oder Berechnungen, können korrigiert werden. Bei der Kalibrierung eines Bestückungssystems wird eine hochgenau gerasterte Glasleiterplatte mit idealen Bauteilen bestückt und im Anschluss mit einem hochauflösenden Kamerasystem abgetastet. Durch den Vergleich der Ist-Bestückpositionen mit den Soll-Bestückpositionen über den Arbeitsbereich können systematische Abweichungen

bzw. reproduzierbare Fehler erfasst und mit der Eingabe von entsprechenden Korrekturfunktionen steuerungstechnisch kompensiert werden.

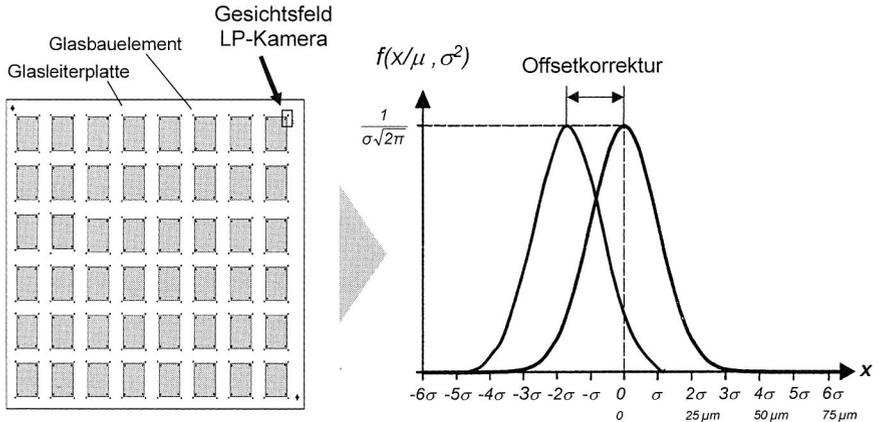


Bild 7: Ermittlung des Offsets der Gauß'schen Glockenkurve - Vermessen aller Bauteil-Leiterplatten Markenpaare [63]

Zur Überprüfung der Bestückgenauigkeit und Neuermittlung von Korrekturfunktionen können sich heutzutage Bestückautomaten mit Hilfe einer integrierten Kalibrierungseinheit selbst vermessen. Dabei wird die bestückte Glasleiterplatte mit dem Leiterplattenkamarasystem abgetastet. Durch die Erfassung dieser Maschinenparameter und die automatische Generierung der Korrekturdaten kann die Maschine die extrem hohe Genauigkeit bei der Bestückung erreichen [111]. Bild 7 zeigt eine schematische Darstellung der mit Glasbauelementen bestückten Glasleiterplatte. Die daraus gewonnenen Messdaten werden verdichtet und dienen zur Bestimmung des Offsets des Achsensystems.

Besondere Aufmerksamkeit verlangen die langfristig veränderten systematischen Fehler wie Alterung und Verschleiß. Sie erfordern eine wiederkehrende Messung der Bestückgenauigkeit und die Ermittlung der Korrekturwerte. Im Hinblick auf das thermische Verhalten weist das oben vorgestellte Kalibrierungsverfahren Defizite auf. Diese ergeben sich daraus, dass bei den Messungen der Bestückpositionen der Betriebszustand bzw. die Maschinenstruktur nicht berücksichtigt werden. So sind die automatisch generierten Korrekturdaten nur für einen bestimmten Betriebszustand optimiert. Im Extremfall können die gespeicherten Korrekturdaten bei Schwankungen

des Betriebszustands zu einer zusätzlichen Beeinträchtigung der Bestückgenauigkeit führen. Diese Zusammenhänge werden in Kapitel 5 systematisch untersucht.

## 2.3 Steuerungsarchitektur moderner Bestückungssysteme

Im Bereich der SMD-Bestückung haben sich hierarchische Steuerungskonzepte etabliert. Eine Bestücklinie wird von einem Linienrechner zentral gesteuert. Die Kommunikation zwischen Linienrechner und Bestückungssystem wird auf der Basis eines LAN-Bussystems bzw. Intranets realisiert.

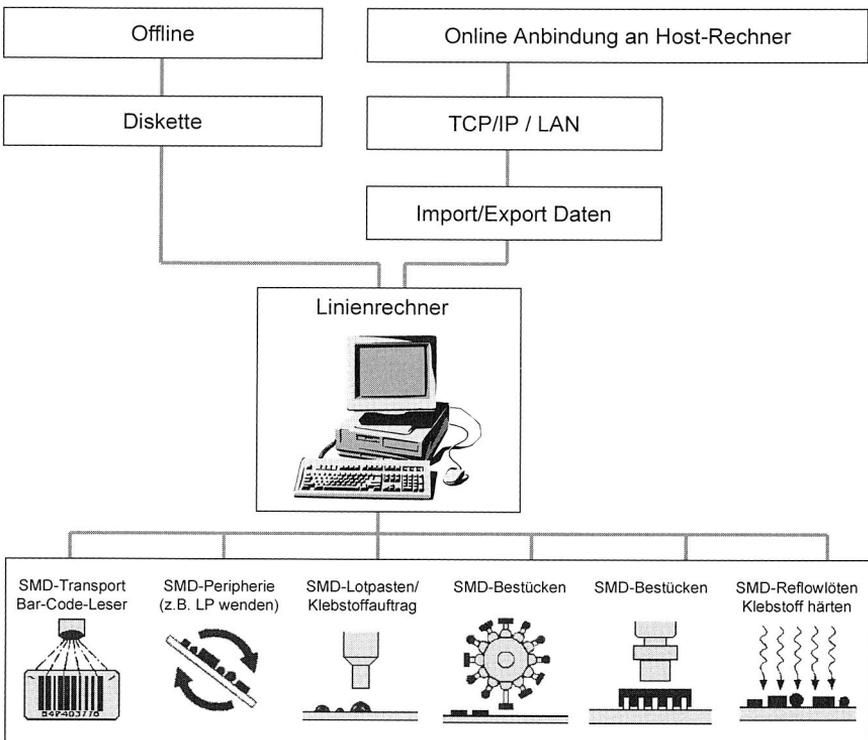


Bild 8: Rechnergestützte Anbindung der Fertigungslinie zur automatischen Generierung und Übertragung der Fertigungsdaten [63]

Hauptaufgabe des Linienrechners ist die Verwaltung aller für die Bestückung notwendigen Daten und die automatische Generierung der Bestückprogramme. Dabei

werden die Bestückpositionen in Abhängigkeit der Rüstung der Bauelemente auf die einzelnen Bestückstationen verteilt. Die Daten, die von den Bestückungssystemen benötigt werden, lassen sich in die drei Gruppen Nutzen-, Rüst- und Maschinendaten unterteilen. Bei der Erstellung der Rüstdaten wird die Bestückreihenfolge optimiert, um die Verfahrwege der Bewegungsachsen zu verkürzen und damit die Bestückleistung zu erhöhen. Die Bestückpositionen können bei einer CAD-Kopplung auch aus einem CAD-System übernommen werden. Diese Daten werden über das Bussystem an den Stationsrechner des Bestückungssystems übertragen (Bild 8).

Die Hauptaufgabe des Stationsrechners ist es, die vom Linienrechner vorgegebenen Bestückprogramme auszuführen. Dabei werden Bewegungsanweisungen für die Achsen generiert, die das Abholen und das Bestücken der Bauelemente ermöglichen. Mit Hilfe der Bildverarbeitung werden die Bestückpositionen nach der Lageerkennung neu berechnet und entsprechende Änderungen in der Bewegungsanweisung durchgeführt. Dieser Ansatz soll auch bei der Kompensation der thermischen Verlagerung des Bestückkopfs verfolgt werden. Diese Strategie ermöglicht die Korrektur der thermisch bedingten Fehler und damit eine Erhöhung der Positioniergenauigkeit des Achssystems.

Zur Sicherung der Maschinenqualität hinsichtlich der Leistung, Bestückgenauigkeit und Flexibilität ist es notwendig, während des Bestückprozesses den Maschinenzustand kontinuierlich zu überwachen und die anfallenden Maschinendaten rechnergestützt zu erfassen. Denn nur durch eine kontinuierliche Anlagenüberwachung lassen sich Aspekte der Betriebsführung, wie beispielsweise die vorausschauende Instandhaltung, die Optimierung der Maschinenauslastung oder die rechnergestützte Prozessführung praxisgerecht verwirklichen.

Hierzu werden neben der in das Bestückungssystem integrierten Sensorik weitere Sensorsysteme (Temperatursensoren, Lasertriangulationssensoren) angebracht, um die Kenngrößen Temperaturverteilung, Verlagerung des Bestückkopfs und Ausschwingverhalten zu erfassen. Auf der Basis dieser gemessenen Daten können Optimierungskonzepte und Regelalgorithmen zum effizienten Maschinenbetrieb entwickelt werden. In Kapitel 4 wird ein Messaufbau zur Durchführung von Betriebszustandsmessungen an Bestückungssystemen vorgestellt.

Weiterhin wird in Kapitel 7 ein internet-basiertes Konzept zur kontinuierlichen Überwachung einer Roboterbestückungszelle und deren Realisierung aufgezeigt. Dabei wird bei der Telediagnose einer Anlage die Kinematiksimulation als Visualisierungswerkzeug eingesetzt. Damit kann ein Experte die Ursachen für Störung in Maschinen und Produktionsanlagen schnell detektieren. Hierbei kommen internet-basierte Bild- und Datenströme zur Anwendung.

### 3 Bestückung neuer Bauelementformen und Schaltungsträger

#### 3.1 Analyse der Bestückungssysteme hinsichtlich neuer Bauelemente und Schaltungsträger

##### 3.1.1 Trends in der Elektronik

Die weltweite Elektronikindustrie wächst derzeit dreimal schneller als das Bruttosozialprodukt. Damit Europa mit dieser Marktentwicklung Schritt halten kann, müssen Rahmenbedingungen und Strategien für die neuen Gegebenheiten geschaffen werden. Basierend auf dem derzeit erreichten Marktvolumen für die Elektronikproduktion prognostiziert der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) bis zum Jahr 2000 für den Halbleiterequipmentmarkt ein Volumen von 70 Mrd. US\$ und für den Halbleitermarkt 350 Mrd. US\$.

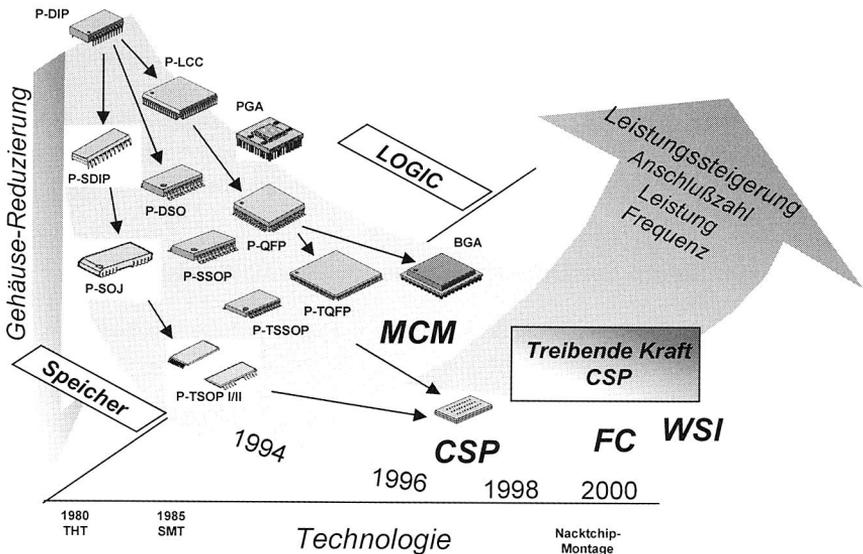


Bild 9: Trends für Bauelementetechnologien – neue Herausforderungen für die Fertigungssysteme in der Elektronikproduktion [80]

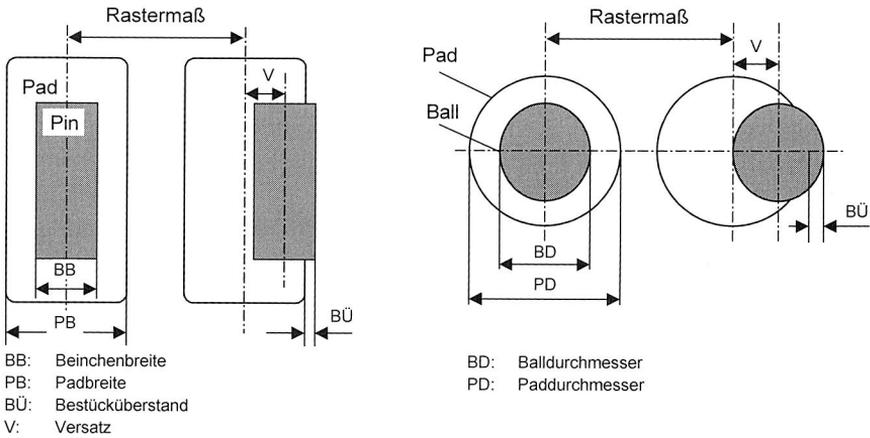
Die wachsenden Anforderungen an Elektronikprodukte haben zu einer zunehmenden Integration bei Schaltungsträgern (MID, Flex, Multilayer) und Bauelementen (Multi-Chip-Module,  $\mu$ BGA, Nackchips) geführt [97] [4]. Die Miniaturisierung wird in den nächsten Jahren zu Pitch-Abständen von 200  $\mu\text{m}$  und zu Leiterbahnbreiten von 50  $\mu\text{m}$  führen [110]. Bezüglich der Zuverlässigkeit der Fertigungsverfahren und der Lebensdauer der Baugruppen werden noch Verbesserungen erwartet [102]. In der Baugruppenfertigung ist vor allem aufgrund der Weiterentwicklung der Maschinen mit einer Halbierung der Bestückkosten zu rechnen. Aus Gründen der Umweltverträglichkeit wurde bereits in der Vergangenheit auf Fluorchlorkohlenwasserstoffe verzichtet, voraussichtlich werden auch Halogene und Blei mittelfristig nicht mehr eingesetzt [5] [69].

Die zukünftige Entwicklung der Elektronikproduktion wird durch ein Anwachsen der Bauteildichte auf dem Schaltungsträger und/oder durch erhöhte Bauteilkomplexität gekennzeichnet [34]. Im Bereich der Telekommunikation (z. B. Mobiltelefone) und der Unterhaltungselektronik (z. B. Videokameras, Camcorder) wird daher aufgrund der Forderung nach geringem Gewicht und kompakter Baugröße vorrangig die Bauteildichte steigen, während im Bereich der PC- und Workstation-Entwicklung die Bauteilkomplexität im Vordergrund steht [64]. Hier werden die verwendeten Bauelemente in absehbarer Zeit durch eine durchschnittlich größere Anzahl an Bauelementanschlüssen charakterisiert. Begründet ist dies einerseits durch die Forderung nach größerer Leistungsfähigkeit der integrierten Schaltungen und andererseits durch nur geringe Einschränkungen des Platzangebots für die Bauelemente [93]. Automobil- und Messelektronik entwickeln sich je nach Anforderung in beide Richtungen und können nicht durch einen eindeutigen Trend dargestellt werden [38]. Eine Erhöhung sowohl der Bauteilkomplexität als auch der Bauteildichte wird zu einer weiteren Miniaturisierung in der Elektronikproduktion führen (Bild 9).

### 3.1.2 Grundlagen der Bestückung neuer Bauelemente

Die bisherigen Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich auf die prozesstechnische Seite der Verbindungstechniken herkömmlicher Substrate- und Bauelementetechnologien [100]. Neue Entwicklungen im Bereich der Bauelemente (z. B. BGA, CSP, Flip-Chip), der Verbindungsmedien (Lotpasten / Klebstoffe) und der Schaltungsträger (neue Materialien, Folienaufbauten), die seither zunehmend an Bedeutung gewinnen, müssen in neuen Maschinenkonzepten für die Verarbeitung dieser Bauelemente auch auf alternativen Schaltungsträgern berücksichtigt werden [82]. Dabei sollen die fertigungstechnischen Forderungen nach erhöhter Bestückgenauigkeit und -leistung als wichtiges Optimierungsziel betrachtet werden.

In Vorversuchen wurden wesentliche Einflussfaktoren auf unbefriedigende Bestückergebnisse aufgedeckt. Vor weitergehenden Maschinenuntersuchungen ist es jedoch erforderlich, den Einfluss der Fertigungstoleranzen der Bauelemente und Leiterplatten auf die Bestückgenauigkeit und damit den Bestückprozess systematisch zu untersuchen. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Bestimmung der Anforderungen an Bestückungssysteme. Daher wird in diesem Abschnitt die gesamte Montagetoleranzkette eines Quad Flat Packaging (QFP) und Flip-Chip (FC) betrachtet. Bild 11 zeigt die geometrischen Zusammenhänge dieser Bauelemente sowie die Angaben aller Toleranzen auf 4 $\sigma$ -Basis.



**Angaben zu Toleranzen auf 4 $\sigma$ -Basis:**

Beinchenverbiegung	$T_{BV} = \pm 70 \mu\text{m}$	Ballposition	$T_{BP} = \pm 10 \mu\text{m}$
Beinchenbreite	$T_{BB} = \pm 50 \mu\text{m}$	Padposition	$T_{PP} = \pm 20 \mu\text{m}$
Padposition	$T_{PP} = \pm 20 \mu\text{m}$	Paddurchmesser	$T_{PD} = \pm 20 \mu\text{m}$
Padbreite	$T_{PB} = \pm 20 \mu\text{m}$	Lokale Referenzmarken	$T_{RM} = \pm 40 \mu\text{m}$
Lokale Referenzmarken	$T_{RM} = \pm 40 \mu\text{m}$		

Bild 10: Maße der Leiterplattenpads und der Pins bzw. Balls - Beispiel der Toleranzberechnung bei QFP bzw. Flip-Chip [63]

Bei der theoretischen Betrachtung der Bestückung ergibt sich ein maximal zulässiger Versatz  $V_{QFP}$  von Pin und Pad bzw.  $V_{FC}$  von Ball und Pad zu:

$$V_{QFP} = \frac{PB}{2} - \frac{BB}{2} + BÜ = \frac{PB}{2} - \frac{BB}{6} \text{ bzw. } V_{FC} = \frac{PD}{2} \quad (1)$$

Die Gesamt toleranz für den Versatz lässt sich nach dem Additionstheorem der Normalverteilung durch quadratische Überlappung berechnen:

$$T_{V_{QFP}} = \sqrt{T_{BV}^2 + \left(\frac{T_{BB}}{2}\right)^2 + T_{PP}^2 + \left(\frac{T_{PB}}{2}\right)^2 + T_{RM}^2} \quad \text{bzw.} \quad T_{V_{FC}} = \sqrt{\left(\frac{T_{BP}}{2}\right)^2 + T_{PP}^2 + \left(\frac{T_{PD}}{2}\right)^2 + T_{RM}^2} \quad (2)$$

Ausgehend von einem QFP-Bauelement mit einem Rastermaß von 500 µm und von einem Flip-Chip mit einem Paddurchmesser von 100 µm ergeben sich folgende Werte für den Versatz, die Versatztoleranz und die daraus resultierende maximal zulässige Positionierabweichung:

$$V_{QFP} = 118,7 \mu\text{m} \quad \text{bzw.} \quad V_{FC} = 50 \mu\text{m}$$

$$T_{V_{QFP}} = 87,3 \mu\text{m} \quad \text{bzw.} \quad T_{V_{FC}} = 46,1 \mu\text{m}.$$

Daraus resultiert nach der Formel  $P = \sqrt{V^2 - T_i^2}$  für die Berechnung der maximal zulässigen Positionsabweichung des Bestückungssystems folgendes:

$$P_{QFP} = 80,4 \mu\text{m} \quad \text{bzw.} \quad P_{FC} = 19,4 \mu\text{m}.$$

Betrachtet man die Normalverteilung eines Standardbestückautomaten mit einer Bestückgenauigkeit von ± 50 µm bei 4σ (Bild 11), kann das QFP-Bauelement mit der geforderten Bestückgenauigkeit und -sicherheit (4σ) bestückt werden. Im Fall der Flip-Chip-Bestückung liegt jedoch die Fehlerwahrscheinlichkeit bei einem Grenzwert von 19,4 µm eindeutig höher als 4,56% (2σ).

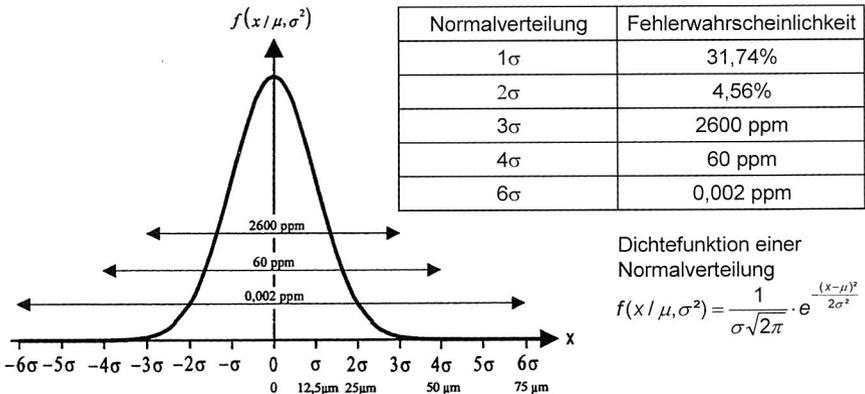


Bild 11: Fehlerwahrscheinlichkeit von normalverteilten Bestückpositionen bei einer Standardabweichung von 12,5 µm

Ausgehend von diesen theoretischen Überlegungen ist es deutlich geworden, dass im Hinblick auf die Verarbeitung feinerer Strukturen wie zum Beispiel Flip-Chip die Optimierung der Maschinenmerkmale von Bestückautomaten notwendig ist.

Weitere experimentelle Bestückversuche mit ausgewählten Bauelementgruppen mit feineren Strukturen (z.B. QFP, TSOP mit bis zu 300 Anschlüssen und 300 µm Pitch) sowie mit flächenförmiger Kontaktierung zum Schaltungsträger haben gezeigt, dass die Problematik bei der Bestückung dieser Bauelemente in der Einhaltung des engen Prozessfensters liegt [72]. Von großer Bedeutung sind die Parameter Verfahrensgeschwindigkeit, Positioniergenauigkeit, Bestückkraft, Bildverarbeitung und Umgebungsbedingungen. Ausgehend von den zahlreichen Bestückversuchen wurden diese Parameter sowie die besonderen Herausforderungen bezüglich Genauigkeit und Handhabung analysiert. In diesem Zusammenhang wurden auch alternative Bestückungssysteme für räumliche Schaltungsträger berücksichtigt (siehe Kap. 3.2).

Aufgrund der Toleranzen der Bauelemente (s. Bild 10) und deren Einfluss auf den Bestückprozess ist es nicht möglich, bei der Untersuchung der Maschinenmerkmale von Bestückungssystemen eine zuverlässige statistische Auswertung für die Bestückgenauigkeit zu erhalten. Deshalb hat man sich bei den Untersuchungen der Bestückungssysteme unter industriellen Einsatzbedingungen in Kapitel 4 und 5 auf die Positioniergenauigkeit des Bestückkopfes beschränkt. Damit konnten die Fehlerquellen durch die Fertigungstoleranzen der Bauelemente und Leiterplatten bei der Erfassung der Positionierabweichungen ausgeschlossen werden. Die dabei gewonnenen Ergebnisse aus der Maschinenentwicklung bilden die Grundlage für die weiteren Entwicklungen der Bestückungssysteme.

### 3.1.3 Bewertung von Bestückungssystemen

Zur Beurteilung maschinenspezifischer Eigenschaften existiert ein breites Feld von Normen und Richtlinien [73]. Es gibt viele Gründe, die für die Beurteilung einer Werkzeugmaschine anhand der Fertigung vieler Werkstücke sprechen. Die zunehmende Integration der einzelnen Maschinen im Gesamtprozess und die ganzheitliche Betrachtung des Produktionssystems fordern Untersuchungsmöglichkeiten für die Eignung der Maschine im Rahmen der geänderten Anforderungen [61]. Neben den Leistungs- und Genauigkeitsprüfungen muss heute unter statistischen Gesichtspunkten nachgewiesen werden können, dass die Maschine in der Lage ist, über einen längeren Zeitraum und unter industriellen Randbedingungen mit definierten Merkmalen zu produzieren [98]. Dieser Nachweis wird durch die Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen ermöglicht [21].

Im Rahmen dieser Arbeit werden Verfahren und Methoden zur Bestimmung der Maschinenqualität von Bestückungssystemen hinsichtlich des dynamischen und thermischen Verhaltens vorgestellt. Der Einfluss einer Vielzahl von Faktoren auf die Bestückgenauigkeit macht oft aus leicht einzuhaltenden Toleranzen schwer überwindbare Probleme. Abschließend werden Möglichkeiten zur Erhöhung der Maschinenfähigkeit aufgezeigt.

Die auf die Bestückgenauigkeit wirkenden Einflüsse verursachen systematische und zufällige Abweichungen. Wenn der Zusammenhang zwischen Prozess und Ursache bekannt ist, wird von systematischen Abweichungen, wie z. B. Verschleiß, Maschinenerwärmung etc. gesprochen. Um durch entsprechende Maßnahmen den systematischen Abweichungen beim Bestücken entgegenzuwirken, ist eine statistische Untersuchung basierend auf Auswertungen von Messdaten erforderlich [47].

Sind die systematischen Einflüsse durch entsprechende Maßnahmen ausgeschaltet, so bleiben nur die stochastischen Abweichungen, die um einen zeitlich konstanten Mittelwert streuen. In diesem Fall nennt man den Prozess "stabil" oder "beherrscht".

Die Analyse der unterschiedlichen Konzepte in der Bestücktechnik zeigt, dass zusätzliche Methoden zur Ermittlung der Maschinenfähigkeit herangezogen werden müssen. Dadurch sollen neben den maschinenbedingten Störeinflüssen möglichst alle Einflüsse erfasst werden, die auf den Bestückprozess während einer längeren Betriebszeit von außen einwirken. Die äußeren Störeinflüsse lassen sich durch die Stichwörter Mensch, Maschine, Material, Methode und Umwelt zusammenfassen [71]. Das Ziel der Untersuchungen ist zum einen der Nachweis, die an den Bestückprozess gestellten Qualitätsanforderungen dauerhaft und unter schwankenden Umweltbedingungen zu erfüllen. Zum anderen sollen die gewonnenen Kenntnisse direkt in die Erarbeitung neuer Konzepte für die Optimierung der Maschinenfähigkeit einfließen. Dabei wird versucht, die Fähigkeit von Bestückungssystemen durch die folgenden Maßnahmen zu verbessern:

- Verringerung der zufallsbedingten Streuung. Es gilt zu beachten, dass die Maschinenfähigkeit nicht beurteilt werden kann, solange irgendwelche systematischen Streuungseinflüsse vorhanden sind.
- Ausrichtung des Prozessmittelwertes auf den Sollwert der Spezifikation.

## **3.2 Bestückkonzepte für spritzgegossene Schaltungsträger**

Die Zahl der Produkte in MID-Technik ist in den letzten Jahren weiter gestiegen [17]. Der überwiegende Anteil der Produkte wird manuell bestückt. Dieses führt zu sehr

hohen Montagekosten und somit zur Benachteiligung dieser Technologie. Dies ist insbesondere auf die noch fehlenden Fertigungssysteme für eine wirtschaftliche Bestückung räumlicher Schaltungsträger zurückzuführen [20]. Hieraus begründet sich der Entwicklungsbedarf für MID-Fertigungssysteme [9].

Darüber hinaus zeichnet sich in der weltweiten Forschung ab, dass die räumlichen Schaltungsträger, in enger Wechselwirkung mit neuen Bauelementformen, neue Fertigungssysteme benötigen [57]. Deshalb werden zur Zeit in Japan und USA verstärkt Grundlagenforschung zur Prozess- und Systementwicklung für die MID-Technologie betrieben [1].

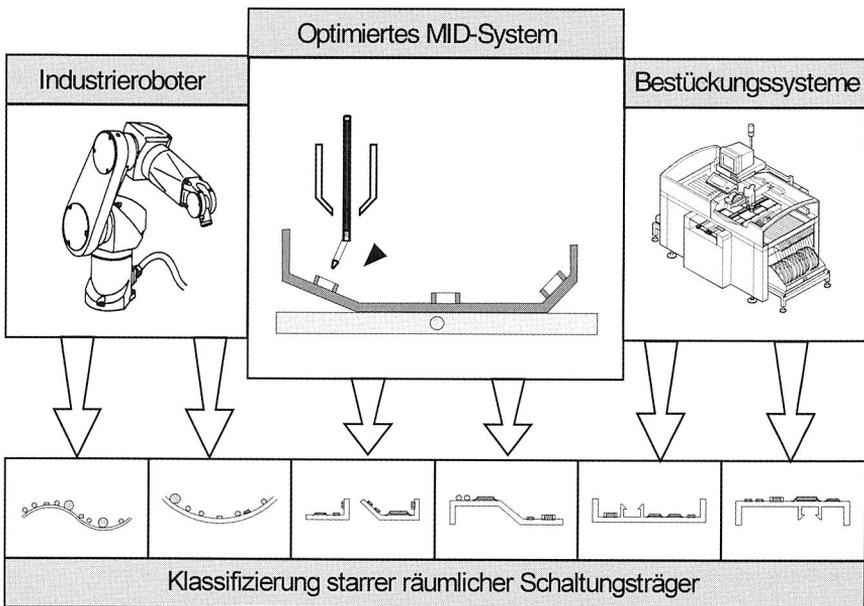


Bild 12: Systemkonzepte für das Bestücken räumlicher Schaltungsstrukturen in Abhängigkeit der Produktstruktur [31]

Die geometrische Gestaltung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger stellt vor allem im Hinblick auf eine automatisierte Bauteilmontage völlig neue Anforderungen an die Maschinen und die Prozessführung [18]. Verfügbare Montagesysteme für die Verarbeitung konventioneller Flachbaugruppen sind bezüglich der Kenngrößen *Bestückeleistung* und *Montagegenauigkeit* bereits untersucht und weitgehend an die Anforderungen der Elektronikmontage angepasst worden [10]. Die Weiterentwicklung der SMD-Bestückungssysteme führt zu hohen Bestückungsleistungen bei

gleichzeitig geringer geometrischer Flexibilität. Deshalb ist die Bestückung nicht planarer Baugruppen mit den vorhandenen Systemen nur sehr begrenzt möglich.

Die Entwicklung von geeigneten Montageprozessen und -systemen für räumliche Baugruppen wird stark von der Geometrie des Schaltungsträgers und der Gehäuseform der Bauelemente beeinflusst. Im einfachsten Fall lassen sich die elektronischen Strukturen an einer planaren, gegebenenfalls geneigten Außenfläche des Teiles anordnen. Für diese und ähnliche Aufbauten erscheinen Systemlösungen als effiziente Alternativen, bei denen konventionelle Automaten durch zusätzliche Kinematikachsen in ihrer Flexibilität erweitert werden [22].

Für dreidimensionale Schaltungsstrukturen mit hoher Geometriekomplexität wurde eine optimierte Bestückungszelle auf der Basis eines 6-achsigen Industrieroboters als eine flexible Systemlösung entwickelt, bei der durch die Integration geeigneter Werkzeuge zum Lotpastenauftrag und zum Bestücken ein hoher Grad an Bewegungsfreiheit erreicht wurde [23] [52]. Dieses ist die Basis für die gezielte Entwicklung eines für MID-Anwendungen ausgelegten Bestückungssystems. Für die erarbeiteten Konzepte wurden am Lehrstuhl FAPS grundlegende Prozess- und Systementwicklungen betrieben.

### **3.2.1 Prozesse für die räumliche Bestückungstechnik**

Die erforderlichen Prozesse und Systeme der räumlichen Elektronikmontage sind unter Berücksichtigung aller prozessrelevanten Parameter zu qualifizieren. Dabei soll die Bestücktechnik nicht isoliert vom Gesamtmontageprozess betrachtet werden. So wird auch die Eignung neuartiger Lotpasten für räumliche Schaltungsträger überprüft. Weiterhin sollen alternative Verbindungstechniken entwickelt werden, die ohne das Verbindungsmedium Lot auskommen. Aufbauend auf diese Prozessuntersuchungen kann schließlich das optimierte Fertigungssystem entwickelt werden.

Die Erweiterung der Werkstoffpalette für räumliche Schaltungsträger in Richtung preisgünstigerer Thermoplaste führt zu einer herabgesetzten Wärmestabilität. Dies macht den Einsatz alternativer Verbindungstechnologien mit niedrigeren Prozesstemperaturen notwendig, da die verwendeten Substratmaterialien thermisch geringer belastbar sind. Im Rahmen zahlreicher Untersuchungen wurden der Einsatz niedrigschmelzender Lote sowie weitere Möglichkeiten zur Realisierung lotfreier Verbindungstechniken hinsichtlich der Bestücktechnik überprüft [58].

Der Lotpastenauftrag als erster Schritt der Prozesskette stellt hohe Anforderungen an die Prozessführung [39]. Zur Reduzierung der Wärmebelastung des Schaltungsträgers wurde der Einfluss von niedrigschmelzendem Lot untersucht [28]. Beim Auf-

trag der Lotpaste sind sequentielle Auftragsverfahren (Dispensen) eingesetzt worden. Dabei wurde in umfangreichen Untersuchungen der Einfluss des Neigungswinkels zwischen Dosiernadel und Prozessfläche in Abhängigkeit der Orientierung der Fügebewegung bestimmt. Anschließende Untersuchungen zur Bestückung auf geneigten Prozessflächen haben gezeigt, dass bei Neigungswinkeln zwischen 0° und 90° kein Verrutschen der Bauelemente (SO8, SO20, MELF, Mini-MELF, CR1206, CR1210 und SOT23) zu verzeichnen war. Versuche mit unterschiedlichen Lotpasten verdeutlichten, dass die Haftfestigkeit und somit die erreichbaren Neigungswinkel beim Bestücken nicht durch die Legierungszusammensetzung sondern, durch das Flussmittelsystem der Lotpaste bestimmt werden [74].

Ein weiteres Kontaktierungsverfahren ist das elektrisch leitfähige Kleben, welches aufgrund seiner niedrigen Aushärtungstemperaturen neue Möglichkeiten im Bereich der MID-Technologie eröffnet. Während konventionelle Massenlötverfahren den Einsatz hochtemperaturbeständiger Trägermaterialien, wie zum Beispiel PEI, PES, PA,... erforderlich machen, so erlauben typische Klebstoffverarbeitungstemperaturen von deutlich unter 120°C die Verwendung günstigerer Materialien wie PBT, PC und sogar ABS [60].

Der beim Löten bekannte Effekt der Selbstzentrierung von mit Versatz bestückten Bauelementen tritt allerdings beim leitfähigen Kleben nicht auf, wodurch sich höhere Anforderungen an den Bestückprozess ergeben [79]. Deshalb ist beim Bestücken feinstrukturierter Bauelemente eine erhöhte Montagegenauigkeit zwingend erforderlich.

### **3.2.2 Räumliche Bestückung basierend auf einem sechsachsigen Industrieroboter**

Industrieroboter sind als flexible, freiprogrammierbare Handhabungssysteme in der Elektronikproduktion zu finden. Sie werden hauptsächlich für die Bestückung von Sonderbauelementen eingesetzt und eignen sich für SMD-Montage auf beliebig geformten räumlichen Schaltungsträgern. In vielen Anwendungen hat es sich gezeigt, dass der Industrieroboter in der Bestückung gegenüber einem Bestückautomaten deutliche Vorteile bezüglich der geometrischen Flexibilität aufweist, aber in den Punkten Mengenleistung und Bestückgenauigkeit den Bestückautomaten klar unterlegen ist. Deshalb ist es wichtig, beim Einsatz eines Industrieroboters in der Bestückung, die Anordnung der einzelnen Systemkomponenten, wie zum Beispiel Materialflusssystem, Werkzeuge und Werkstückträger systematisch zu betrachten. Hierfür gibt es zahlreiche Werkzeuge, die die Entwicklung und Realisierung roboterbasierter Montagesysteme methodisch und rechnerisch unterstützen.

Um die Leistungsfähigkeit der Bestückzelle gegenüber Bestückungssystemen zu verbessern, wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Lösungskonzepte zur Bauelementzuführung in Betracht gezogen und hinsichtlich verschiedener Kriterien untersucht. Von großer Bedeutung sind die Kriterien Bestückflexibilität, Aufwand und Mengenleistung. Nach diesen Kriterien wurden vier Lösungskonzepte gegenübergestellt.

Zur Optimierung der Bestückleistung der Roboterzelle ist es notwendig, die Arbeitswege des Roboters zu verkürzen. Diese Anforderung lässt sich nur dann einhalten, wenn die Bauelemente an einer wegoptimierten Abholposition bereitgestellt werden. Dabei wurden die in Bild 13 aufgezeigten Lösungsansätze für die Bauelementebereitstellung betrachtet und hinsichtlich folgender Kriterien bewertet.

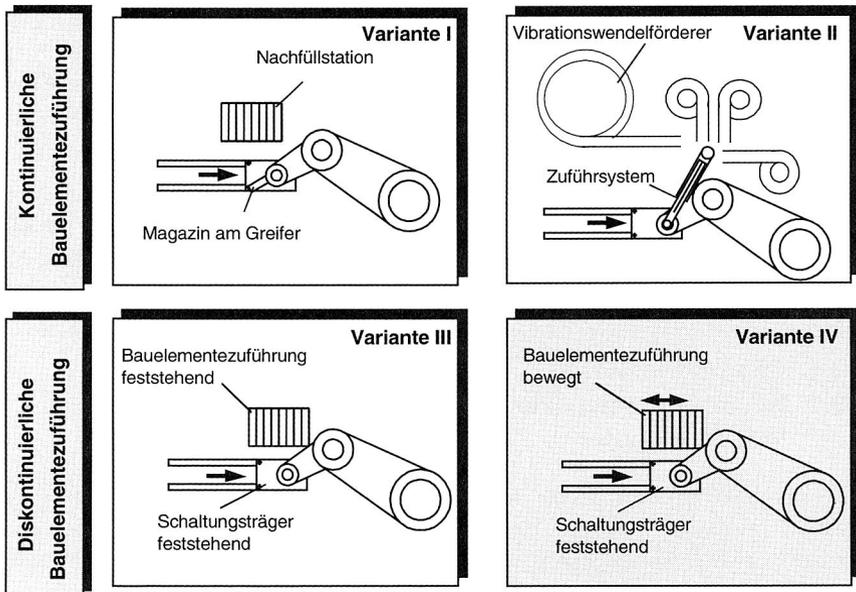


Bild 13: Lösungsvarianten zur Verkürzung der Arbeitswege des Roboters beim Bestücken

Unter Berücksichtigung aller Anforderungen wurde die Lösungsvariante IV mit beweglicher Bauelementzuführeinheit favorisiert. Die zu bestückenden Bauelemente können an einer einheitlichen wegoptimierten Abholposition bereitgestellt werden. Vor der Realisierung dieses Konzeptes wurde mit Hilfe der 3D-Kinematiksimulation das Montageszenario simuliert und das Zellenlayout hinsichtlich Taktzeit optimiert

(Bild 14). Durch die bewegliche Bauelementezuführeinheit konnte die Bestückleistung von 1200 auf 1800 Bauelemente/Stunde erhöht werden.

Aufgrund des Aufbaues des sechssachsigen Industrieroboters ist eine Weiteroptimierung der Bestückleistung nicht möglich. Deshalb wird in einem weiteren Ansatz die räumliche Bestückung auf der Basis von kartesischen Bestückungssystemen verfolgt.

Kriterium	Gewichtung (G <sub>i</sub> )	Variante I	Variante II	Variante III	Variante IV
Bestückflexibilität	20 %	4	4	3	1
Aufwand	18 %	3	5	1	2
Mengenleistung	14 %	2	2	5	2
Bestückgenauigkeit	11 %	3	3	2	2
Bewegte Masse	10 %	3	5	1	3
Vernetzbarkeit	9 %	2	4	1	2
Störsicherheit	8 %	3	4	1	2
Lebensdauer	6 %	2	3	1	2
Geräuschemission	4 %	2	5	2	2
Summe (S)	100 %	2,87	3,87	2,11	1,9

Note (N): 1-5; Summe:  $S = \sum N_i \cdot G_i$

*Tabelle 1: Kriterien zur Auswahl des Funktionsprinzips für die Bauelementebereitstellungseinheit*

Zur Bauelementezentrierung wurde in der Anfangsphase eine mechanische Zentrierstation eingesetzt. Die Leiterplatte wurde ebenfalls mechanisch zentriert. Nach den Bestückgenauigkeits- und Bestückleistungsuntersuchungen hat sich jedoch gezeigt, dass die mechanische Zentrierung den hohen Anforderungen an Genauigkeit und Leistung nicht genügt. Um die Qualität zu steigern, wurde ein Bildverarbeitungssystem zur optischen Zentrierung eingesetzt, das im Gegensatz zur mechanischen Zentrierung bauelementeschonend und nicht von der Geometrie der Bauelemente abhängig ist [37].

Zur Bauelementlageerkennung wird ein fest montiertes Kamerasystem eingesetzt. Ein weiteres Kamerasystem ist zur Schaltungsträgerlageerkennung am Roboterarm mitgeführt. Da die Steuerung des verwendeten Industrieroboters multitaskingfähig ist, kann die Verarbeitung des aufgenommenen Bildes und ihre Wirkung auf den weiteren Programmablauf gleichzeitig mit den Roboterbewegungen erfolgen, d.h. die Bildverarbeitung hat keinen Einfluss auf die Taktzeit der Roboterbestückung.

Bevor eine Strategie zur Korrektur von Bauelementlagefehlern entwickelt werden konnte, mussten die Anforderungen an die Korrekturstrategie unter Berücksichtigung der zu bestückenden 3D-MID Schaltungsträger analysiert werden. Als geeignete Korrekturstrategie wurde eine Werkzeugtransformation realisiert. Dabei wird das vom Roboter aufgenommene Bauelement als Bestandteil des verwendeten Werkzeugs betrachtet.

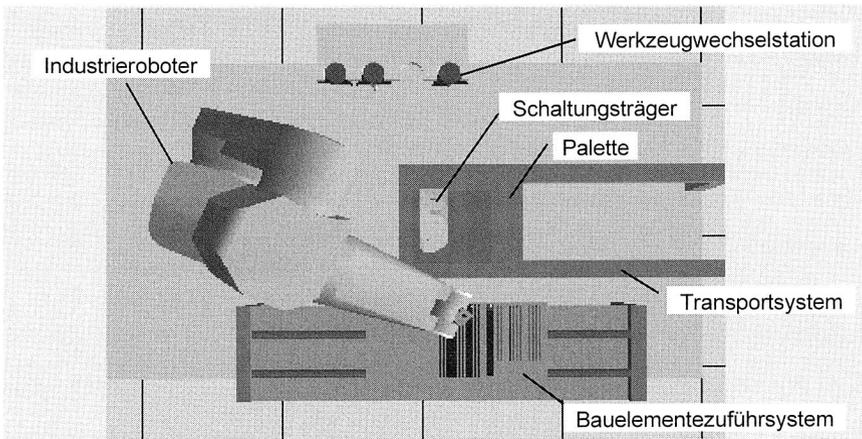


Bild 14: Rechnergeneriertes Layout der optimierten Roboterbestückungszelle für räumliche Schaltungsträger

Dann ist es möglich, den Ursprung des Toolkoordinatensystems in den mit dem Visions-System errechneten Bauelementmittelpunkt ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) zu verlagern und die ermittelte Winkellage des Bauelements in einer Drehung des Tool-Koordinatensystems um seine z-Achse ( $\Delta \alpha$ ) zu berücksichtigen. Wenn die Bestückpositionen an beliebigen Orten des World-Koordinatensystems „geteacht“ werden, lassen sich diese auch nach der Aufnahme von Bauelementen mit variierenden Bauelementmittelpunkten und Winkellagen wieder anfahren, wenn vorab eine an die Lage der Bauelemente angepasste Tooltransformation durchgeführt wurde.

Zur Korrektur von Lagefehlern des Schaltungsträgers werden die Bestückpositionen relativ zu einem Referenzpunkt definiert, der durch die Lage der beiden kreuzförmigen Positionsmarken auf dem Schaltungsträger bestimmt wird. Die Korrektur von Lagefehlern des Schaltungsträgers wird so realisiert, dass die Bestückpositionen relativ zu einem Referenzpunkt definiert werden.

Zu Beginn eines Bestückprogramms werden die Positionsmarken nacheinander mit der am Werkzeugflansch des Roboters befestigten Kamera betrachtet, und von jeder Kreuzmarke ein Kantenschnittpunkt in World-Koordinaten errechnet.

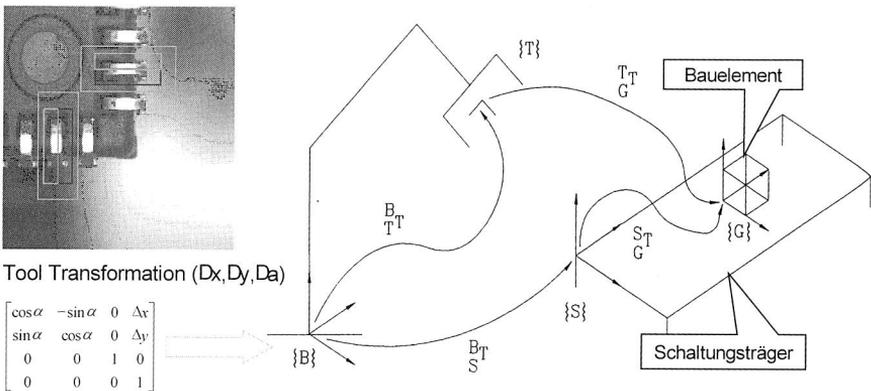


Bild 15: Automatische Lagekorrektur durch die Tool- Koordinatentransformation auf den Ursprung eines Bauelements

Die Verdrehung des Schaltungsträgers in der X-Y-World-Koordinatenebene wird aus der Winkellage der Verbindungsgeraden zwischen den beiden Kantenschnittpunkten bezüglich der X-Achse des World-Systems errechnet. Der Referenzpunkt wird schließlich aus den World-Koordinaten eines der beiden Schnittpunkte gebildet.

Bild 15 zeigt die schematische Darstellung der notwendigen Koordinatentransformationen zur automatischen Berechnung der korrigierten Bestückpositionen. Links im Bild ist die Lageerkennung des Bauelementes PLCC44 zu sehen. Dabei werden durch den „Finder Tools“ die Koordinaten des Bauelementes im Vision-Koordinatensystem bestimmt. Daraus wird die Berechnung der Bestückposition im World-Koordinatensystem angewandt.

Die Beurteilung der Bestückgenauigkeit der Bestückungszelle kann anhand einer Glasleiterplatte erfolgen. Dabei wird die Leiterplatte mit ideal gefertigten Glas-Bauelementen bestückt. Die bestückten Bauelemente werden mit Hilfe eines Bild-

verarbeitungssystem erfasst und ihre Lage bezüglich lokaler Referenzmarken absolut berechnet.

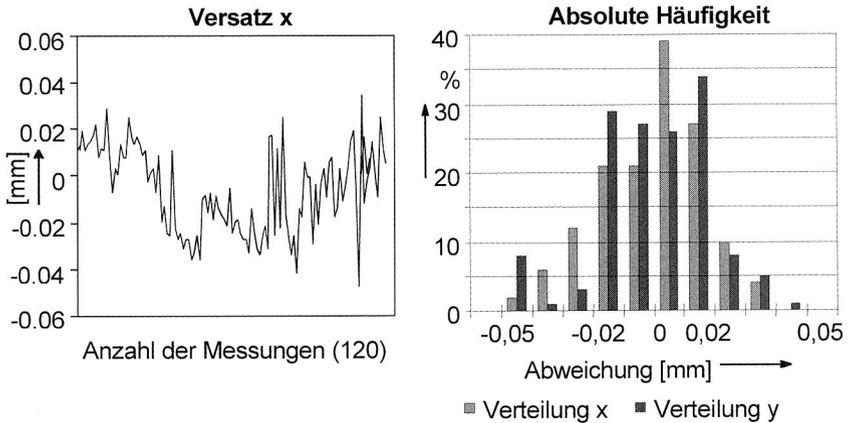


Bild 16: Messungen zur Bestückgenauigkeit der Roboterbestückzelle nach VDI/VDMA Richtlinie 3712

Wie in Bild 16 zu sehen ist, beträgt die Bestückgenauigkeit der Roboterbestückzelle  $\pm 50 \mu\text{m}$ . Die Ergebnisse zeigen, dass Industrieroboter mit integrierter Bildverarbeitung den Anforderung erhöhter Bestückgenauigkeit gerecht werden können. Deshalb ist die roboterbasierte Systemlösung als eine Alternative für die SMD-Bestückung und insbesondere für räumliche Schaltungsträger zu sehen. Jedoch ist diese Lösung nur dann wirtschaftlich, wenn sich die Zahl der zu bestückenden Bauelemente in Grenze hält.

Bild 17 zeigt den Gesamtaufbau der realisierten Bestückzelle, die sich nach der Nutzwertanalyse als geeignetste Lösung herauskristallisiert hat.

#### Steuerung und Programmierung der Roboterbestückzelle

In der Entwicklungsphase der Roboterzelle wurde eine 3D-Kinematiksimulation realisiert. Aufbauend darauf wurde ein Programm zur Offline-Programmierung der realen Roboterzelle entworfen. Dabei wird das in der Simulation optimierte Steuerungsprogramm in die Steuerungssprache des realen Roboters übersetzt. Somit können mittels der Offline-Programmierung die Ablauf- und Positionsinformationen des virtuellen Systems in das reale Fertigungssystem übertragen werden [27]. Weiterhin wurde eine Schnittstelle zur automatischen Erzeugung von Lotpastenauftrags- und Bestückpositionen in der Simulation aus einem IPC-File entwickelt. In Kap. 7.1.2 wird

das simulationsbasierte Konzept zur automatischen Generierung von Steuerungsprogrammen ausführlich vorgestellt.

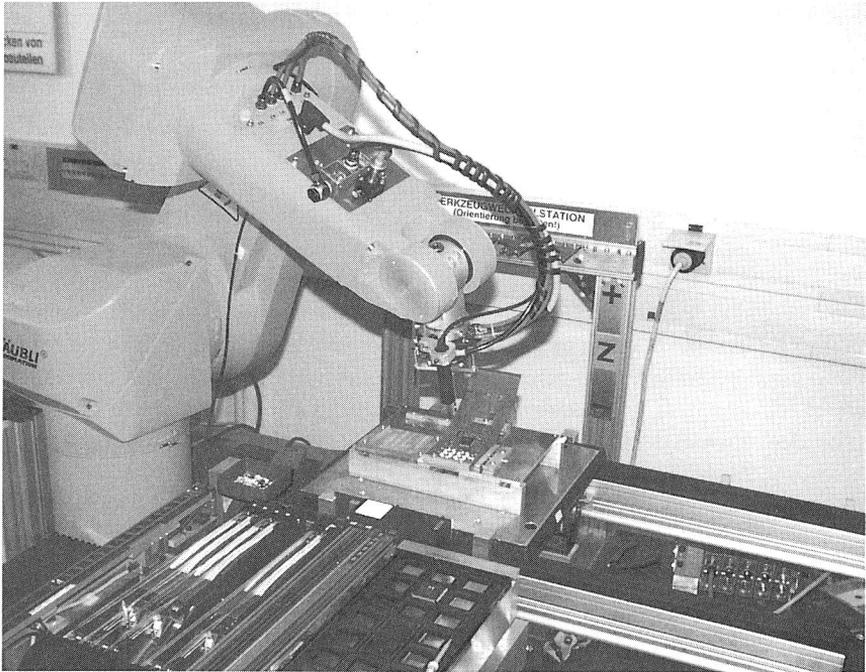


Bild 17: Flexible Roboterzelle zur Bestückung räumlicher Schaltungsträger mit komplexer Geometrie

### 3.2.3 Aufbau eines erweiterten Bestückungssystems für spritzgossene Schaltungsträger

Die roboterbasierte Systemlösung ermöglicht die automatisierte Bestückung hochkomplexer räumlicher Schaltungsträger, bietet aber nicht die hohen Mengenleistungen von gegenwärtig auf dem Markt verfügbaren Bestückautomaten. Diese Bestückssysteme wurden allerdings speziell für die Montage auf 2-dimensionale Leiterplatten entwickelt und sind deshalb für das Bestücken 3-dimensionaler Schaltungsträger nicht geeignet, da sie weder die Voraussetzungen für die Handhabung der MIDs noch für die räumliche Bestückung von Bauelementen erfüllen. Aus diesem Grund wurde an der Entwicklung des Bestückautomaten „MIDPLACE“ gearbeitet

[10]. Die Hauptaufmerksamkeit richtet sich dabei auf das Bestücken von räumlichen Schaltungsträgern mit hoher Bestückleistung und -genauigkeit.

Ausgehend von der geometrischen Gestaltung spritzgegossener Schaltungsträger ergeben sich folgende Defizite von Standardbestückautomaten:

- Der Arbeitsraum wird durch kleine Verfahrwege der Pipette begrenzt,
- Mit starren Pipetten können nicht alle Prozessflächen erreicht werden,
- Geneigte Prozessflächen bereiten erhebliche Schwierigkeiten beim Bestücken.

Um diese Defizite zu kompensieren, wurde unter Berücksichtigung aller fertigungsrelevanten Kriterien zum räumlichen Bestücken und aufbauend auf der Grundkinematik eines Standardbestückautomaten die Systemlösung (MIDPLACE) mit vier Freiheitsgraden zur Manipulation der Bauelemente und zwei rotatorischen Freiheitsgraden für die Handhabung der Schaltungsträger entwickelt. Danach wird die Hauptbewegung (x- und y-Achse) durch die beiden kartesischen Achsen des Standardsystems realisiert. Das Gesamtkonzept ist modular aufgebaut und wurde im Vorfeld mit Hilfe der Kinematiksimulation hinsichtlich der MID-spezifischen Fertigungskriterien optimiert [10].

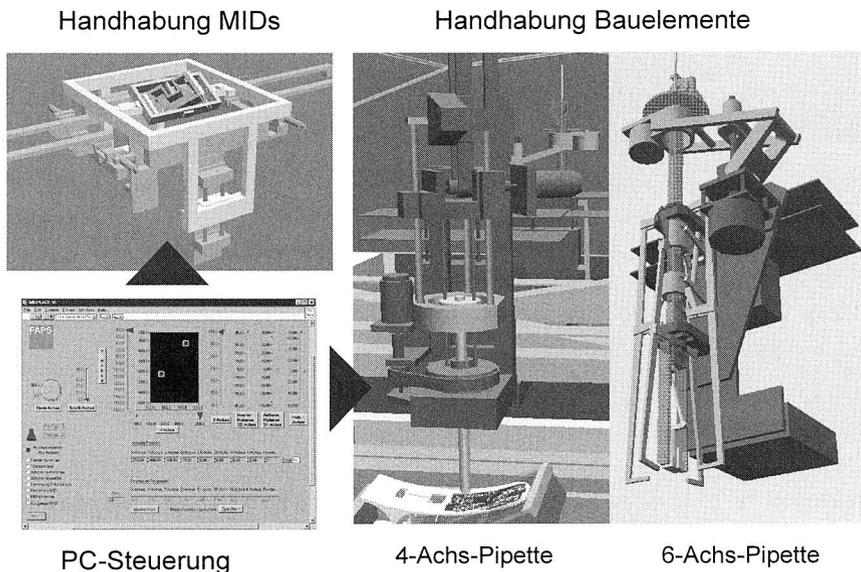


Bild 18: Komponenten des realisierten Bestückungssystems für räumliche Schaltungsträger

### *Entwicklung von erweiterten Handhabungsmodulen für die Bauelemente*

Der Hub der Pipette bei den konventionellen Bestückautomaten hängt von der Größe des Bauelementes ab und ist für die Leiterplattentechnik optimiert worden. Die dreidimensionalen Schaltungsträger verfügen aber über mehrere planare Bestückerbenen und können mit dem begrenzten Pipettenhub nicht bestückt werden. Deshalb wurde im ersten Ansatz ein Bestückkopf mit einem erweiterten Hub realisiert und in das Grundsystem integriert. Eine weitere Lösungsmöglichkeit ist die Erweiterung der starren Pipette zu einer Knickpipette. Somit sind auch Bestückpositionen erreichbar, die mit der Standardpipette nicht bestückt werden können.

### *Realisierung eines Handlingsystems für die Schaltungsträger*

Das Bestücken von geneigten Ebenen mit den konventionellen Bestückautomaten ist entweder unausführbar oder unpräzise. Um eine hohe Bestückgenauigkeit zu erreichen, sollte das Bauelement vertikal zur Bestückfläche platziert werden. Dies kann durch den Einsatz eines Handlingsystems ermöglicht werden. Die Kinematik dieser Einheit basiert auf drei Achsen (eine translatorische und zwei rotatorische Freiheitsgrade).

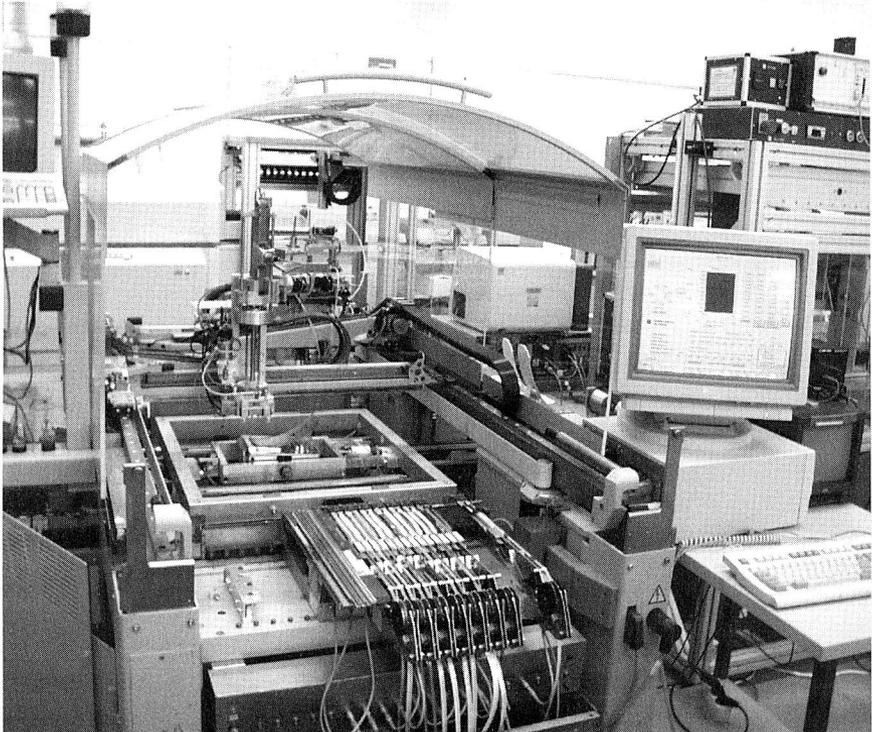
Der Schaltungsträger wird zuerst auf einen Werkstückträger befestigt, der von diesem Handlingmodul aufgenommen wird. Durch Schwenken des inneren bzw. äußeren Rahmens kann der Schaltungsträger auf die gewünschte Ebene gebracht werden. Mit Hilfe der dritten Achse besteht die Möglichkeit, den Schaltungsträger nach unten oder nach oben zu verfahren. Bild 19 zeigt das Gesamtkonzept des Bestücksystems mit den integrierten Modulen für die Handhabung der Bauelemente und Schaltungsträger. Die Bewegungsabläufe werden über eine PC-basierte Steuerung realisiert.

### *Steuerung und Programmierung*

Aufgrund der entwickelten Maschinenkinematik wurde eine PC-basierte Steuerung realisiert, die die zwölf Bewegungsachsen der integrierten Module ansteuert und die Bewegungsabläufe der Komponenten koordiniert. Außerdem wurden basierend auf Restriktionen geeignete Schutzmaßnahmen vorgesehen, um Kollisionen der beiden Bestückköpfe mit dem Schaltungsträger und der Hub-Schwenkeinheit auszuschließen. In das Maschinenbett wurden das Handhabungsgerät und das Transportsystem für die Schaltungsträger integriert. An den beiden unabhängig voneinander arbeitenden x-y-Portalen wurden die beiden neu entwickelten Bestückköpfe adaptiert.

Wegen der Komplexität der 3-dimensionalen Schaltungsträger werden rechnerbasierte Werkzeuge im gesamten Produktentwicklungsprozess eingesetzt. Den Entwurf des logischen Schemas und die Verifikation der elektrischen Funktion unterstützen

leistungsfähige CAE-Systeme. Das Layout der Schaltung wird mit Hilfe von E-CAD-Tools erstellt [2]. Um eine Umsetzung dieser ECAD-Daten in entsprechende Maschinenformate zu ermöglichen, ist für den Aufbau einer Rechnerkopplung zur automatisierten Erzeugung der Bestückprogramme die Entwicklung spezifischer Programme erforderlich.



*Bild 19: Gesamtsystem MIDPLACE zur räumlichen Bestückung spritzgegossener Schaltungsträger [10]*

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept entwickelt, das die automatische Generierung von Bestückungsprogrammen für räumliche Baugruppen aus den vorliegenden ECAD-Daten ermöglicht. In die vorhandene Steuerung des Bestückungsautomaten wurde eine benutzerfreundliche CAD/CAM-Schnittstelle integriert, die eine kollisionsfreie Anweisungsliste für das Bestückprogramm erstellt. Dieses Verfahren reduziert die Programmierzeit an der Maschine und vermeidet Fehler durch falsche Dateneingabe. Die Daten werden aus dem ECAD-System in IPC 355-Format (Institut

for Interconnecting and Packaging Circuits) bereitgestellt und mit Hilfe eines Postprozessors in eine Anweisungsliste umgewandelt.

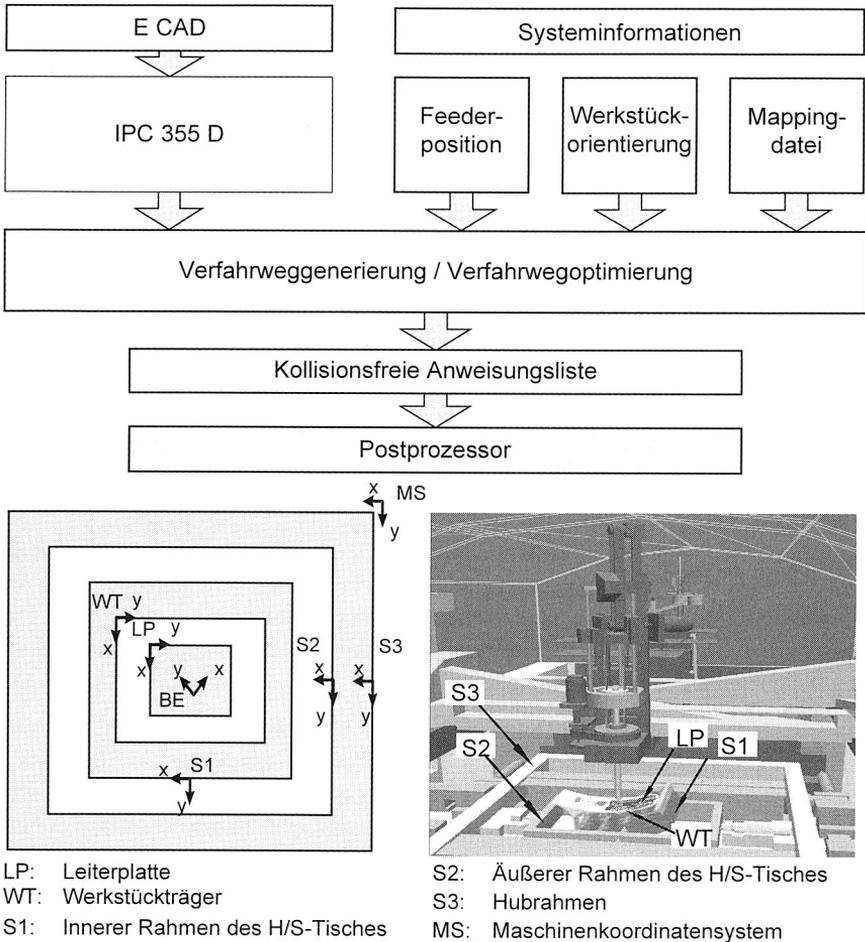


Bild 20: CAD/CAM-Kette zur automatischen Generierung des Programms für die Bestückung räumlicher Schaltungsträger - Zusammenhang vom Leiterplattenkoordinatensystem und Maschinenkoordinatensystem [10]

Der allgemeine Standard IPC-D-35x enthält Informationen über die physikalischen Eigenschaften der elektronischen/mechanischen Komponenten und des Schal-

tungsträgers. Darüber hinaus beschreibt dieser die Beziehungen zwischen den Bauelementen und der Leiterplatte. Der Standard IPC-D-355 behandelt den Transfer von Bestückdaten zwischen der Entwicklung im ECAD-System und der Fertigung im CAM und ist erforderlich für die automatische Generierung von Anweisungslisten. Zudem sind diese Daten notwendig, um die Systeminformationen, wie Feederpositionen, Schaltungsträgerorientierung im Bestücksystem sowie Mappingdaten zu ergänzen. Damit kann eine Anweisungsliste für die Bestückungsaufgabe erzeugt werden, die alle Bewegungsbefehle zur Ansteuerung der 12 Achsen enthält.

Das im ECAD erstellte IPC-File enthält für jedes Bauelement drei Koordinaten und drei Winkel. Die Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  bestimmen die Position des Bauelements auf dem Schaltungsträger bezogen auf das Koordinatensystem des Schaltungsträgers sowie die Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$ , und  $\gamma$  seine Orientierung. Die Orientierung wird festgelegt, indem man das Bezugskordinatensystem zuerst um den Winkel  $\alpha$  um die  $z$ -Achse rotiert, dann um den Winkel  $\beta$  um die  $y$ -Achse und zuletzt um den Winkel  $\gamma$  um die  $x$ -Achse. Die  $z$ -Achse ist dabei die  $z$ -Achse des Bezugskordinatensystems, wogegen die  $y$ -Achse und die  $x$ -Achse die entsprechenden Achsen des verdrehten Zwischenkoordinatensystems nach der  $z$ - bzw.  $y$ -Rotation sind. Das Bezugskordinatensystem entspricht dem Koordinatensystem des jeweiligen Bauelementes, das aus einer Verschiebung des Koordinatensystems des Schaltungsträgers entsteht.

Der Algorithmus spaltet sich in zwei Schritte auf. Zuerst müssen die Winkel ermittelt werden, um die die Rahmen des Hub-Schwenktisches gedreht werden, damit der Schaltungsträger horizontal bestückt werden kann (Winkel  $\beta'$  und  $\gamma'$  gleich Null). Danach werden die Koordinaten des Bauelements bezogen auf das Koordinatensystem der Maschine berechnet.

Zur automatischen Erstellung von Bestückprogrammen wurde eine CAD/CAM-Kette realisiert. Dabei ist ausgehend von der erweiterten Kinematik des Bestückungssystems ein Algorithmus realisiert worden, der die CAD-Koordinaten der Bauelemente in Maschinenkoordinaten transformiert. Dabei wurde eine Koordinatentransformationsmatrix hergeleitet. Wenn  $P_{LP}$  ein Vektor, der die Koordinaten des Bauelements bezogen auf den Schaltungsträger und  $P_{MS}$  ein Vektor bezogen auf die Maschinenkoordinaten ist, dann gilt:

$$P_{MS} = M_{\text{transf}} \cdot P_{LP}.$$

Die Matrix lässt sich schrittweise aus der Matrixmultiplikation ableiten:

$$M_{\text{transf}} = M_{S3 \rightarrow MS} \cdot M_{S2 \rightarrow S3} \cdot M_{S1 \rightarrow S2} \cdot M_{WT \rightarrow S1} \cdot M_{LP \rightarrow WT} \cdot M_{IPC \rightarrow LP}.$$

Zur Berechnung der Winkel  $\alpha$  und  $\beta$ , um die die Schwenktische gedreht werden, benötigt man die Transformationsmatrix  $M_{BE \rightarrow S3}$ .

Gegeben ist ein Vektor  $V_{BE} = (0, 0, 1)^T$  (bezüglich des Koordinatensystems des betreffenden Bauelementes). Ist die Prozessfläche nach der Drehung der beiden Schwenktische nun horizontal, so erfüllt dieser Vektor folgende Bedingung:

$$V_{S3} = M_{BE \rightarrow S3} \cdot V_{BE} = (0, 0, 1)^T.$$

(bezüglich des Koordinatensystems des Hubtisches S3)

Es gilt dabei:  $M_{BE \rightarrow S3} = M_5 \cdot M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1$

mit

$$\begin{aligned} M_1 &= R_z(a) \cdot R_y(b) \cdot R_x(c) && (a, b \text{ und } c \text{ sind die Winkel aus IPC-Zeile 941}) \\ M_2 &= R_z(A) \cdot R_y(B) \cdot R_x(C) && (A, B \text{ und } C \text{ sind die Winkel aus IPC-Zeile 900}) \\ M_3 &= R_z(90^\circ) \\ M_4 &= R_y(\alpha) \\ M_5 &= R_x(\beta). \end{aligned}$$

Die Auflösung dieses Systems nach  $\alpha$  und  $\beta$  ergibt die beiden benötigten Winkel für den Hubschwenktisch. Damit kann die Prozessfläche horizontal bereitgestellt werden.

### 3.3 Bestückungskonzepte für Sonderanwendungen

Für den Bereich der Sonderbestückung gilt es, geeignete Komponenten, die die Verarbeitung extremer Bauelemente und flexibler Schaltungsträger ermöglichen, in den Bestückautomaten einzupassen. Dies erfordert vor allem die Entwicklung verschiedener Handhabungssysteme sowie die Konzeption neuartiger Steuerungsstrategien. Diese Konzepte wurden prototypisch realisiert und in eine roboterbasierte Bestückungszelle integriert. In diesem Kapitel werden zwei Ansätze für die Handhabung von Steckern und Folien vorgestellt.

#### 3.3.1 Bestückungskonzept für Steckverbinder

Trotz steigendem Einsatz von oberflächenmontierbaren Bauelementen bleibt ein Anteil an bedrahteten Bauelementen, der nicht als SMDs hergestellt werden kann. Mittlerweile sind neben den SMD-Bestückungssystemen flexible Roboterbestückungszellen zur wirtschaftlichen Restbestückung von THDs (Trough Hole Devices) zu finden, die unterschiedliche Gehäuseformen von Bauelementen verarbeiten können. Aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen sind Bauteile, wie zum Beispiel Stecker und Kondensatoren, in der Baugruppenfertigung zu finden. Diese werden meistens nach der SMT-Prozesskette manuell montiert und anschließend selek-

tiv gelötet. Um diese Prozesskette zu verkürzen, werden diese THT-Bauelemente im Reflowprozess gelötet. Dieses setzt jedoch eine automatische Montage der THT-Bauelemente voraus, da die manuelle Montage Qualitätsfehler bei den bereits bestückten aber noch nicht gelöteten Baugruppen verursacht [81].

Im Rahmen der Arbeiten wurden Konzepte entwickelt, die eine automatisierte Verarbeitung bedrahteter Bauelemente ermöglichen [36]. Zu lösende Probleme liegen dabei zum einen in der Handhabung von Bauteilen mit zum Teil nicht planaren Außenflächen und zum anderen in der Bereitstellung der zu bestückenden Bauteile.

Die Zusammenstellung erarbeiteter Lösungsansätze verdeutlicht den ganzheitlichen Charakter der Problemstellung. So wurde auf der Basis eines Industrieroboters ein Gesamtkonzept für die automatisierte Restbestückung von THT-Bauelementen entwickelt und prototypisch realisiert.

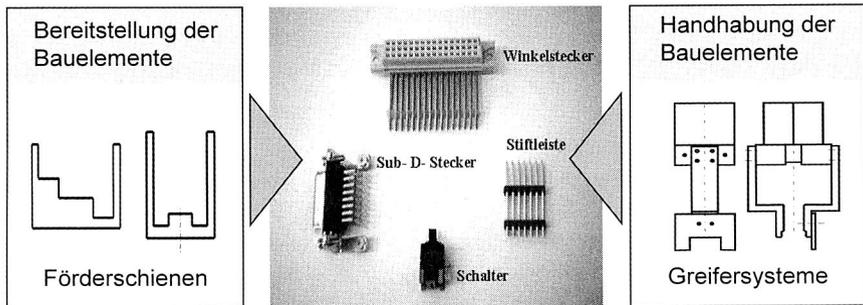


Bild 21: Entwicklung von Systemkomponenten für die automatisierte Montage bedrahteter Bauelemente

Für die Bereitstellung der zu bestückenden Bauelemente wurden Zuführeinrichtungen konstruiert und in der in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Roboterzelle Vibrationslängsförderer angebracht, die an die jeweiligen Bauteile angepasste Förderschienen aufnehmen können. Es wurden die 14-poligen Stiftleisten und die Sub-D-Stecker einer Testbaugruppe bestückt. Dazu wurden für einen Parallelgreifer entsprechende Greiferbacken entwickelt, um die Stiftleiste und den Sub-D-Stecker sicher greifen zu können. Für den Sub-D-Stecker wurde außerdem ein Niederhalter entwickelt, der die Schnappverbinder des Steckers in die dafür vorgesehenen Öffnungen in der Leiterplatte eindrücken kann.

Bestückversuche haben gezeigt, dass eine automatische Bestückung der THT-Bauteile in die vorgesehenen Löcher der Leiterplatte ohne Beschädigung möglich ist.

Dies bedingt jedoch eine genaue Bestimmung der Aufnahme­position und eine opti­mierte Bauelementezuführung.

Der Ablauf der Bestückung des Sub-D-Steckers ist in Bild 22 dargestellt. In Ab­bildung 1 hat der Greifer eine Stiftleiste gegriffen und aus der Schiene herausgehoben. Auf vorgegebener Bahn führt der Roboterarm das Bauteil zur Leiterplatte (Abbildung 2). Abbildung 3 zeigt den Greifer unmittelbar vor dem Absetzen des Steckers in die Durchkontaktierungen. In Abbildung 4 ist der bestückte Stecker zu sehen. Aufgrund der engen Montagetoleranzen ist der Einsatz eines Bildverarbeitungssystems zur Lageerfassung des Steckers notwendig. Damit kann sich die Prozesssicherheit beim Bestücken bedeutend erhöhen.

Eine Fehlbestückung kann zu erheblichen Qualitätsproblemen, wie zum Beispiel Ver­rutschen von bereits bestückten SMT-Bauelementen und Verschmieren der Lotpaste, und damit zu hohen Reparaturkosten führen [48].

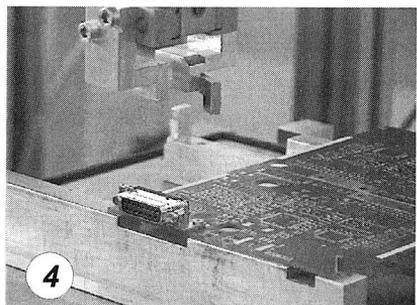
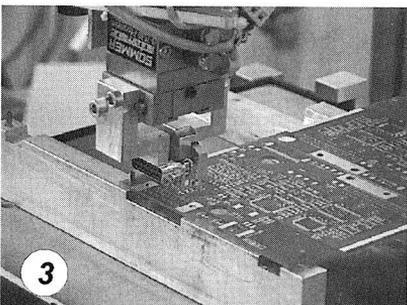
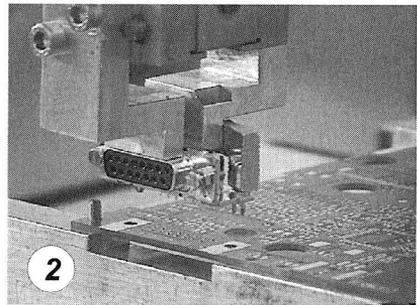
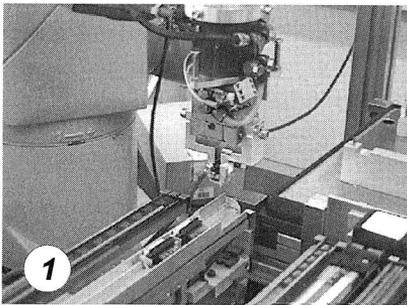


Bild 22: Montageablauf für Bestückung des Sub-D-Steckers mit dem Industrieroboter

Die hier vorgestellte Systemlösung für Sonderbauelemente stellt eine Möglichkeit zur Bestückung von Steckern dar. Weiterführende Entwicklungen zielen auf die Reduzierung der Sonderbauelemente und Flexibilitätserhöhung von Standardbestückautomaten.

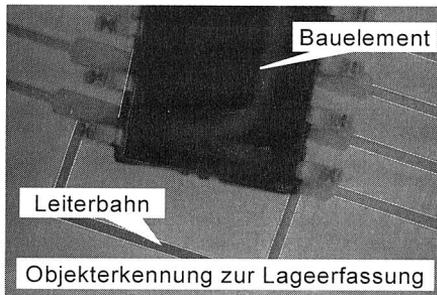
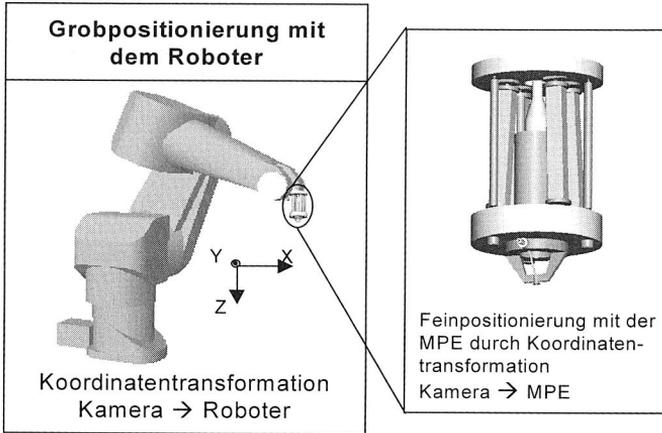
### **3.3.2 Integration einer Mikropositioniereinheit in eine flexible Bestückungszelle**

Wie in Kapitel 3.1.2 vielfach angeführt, gewinnt der Aspekt der Bestückgenauigkeit im Hinblick auf innovative Bauelemente wie zum Beispiel Flip-Chip an Bedeutung. Die erforderliche Fügegenauigkeit können Präzisionsroboter mit ihren aufwendigen Antriebssystemen zwar erreichen, weisen aber gegenüber Standardindustrierobotern hinsichtlich der Bestückleistung und Flexibilität Nachteile auf. Deshalb wird im Rahmen eines Kooperationsprojektes der Bayerischen Forschungsstiftung der Ansatz verfolgt, eine modular aufgebaute Feinpositioniereinheit zu entwickeln, die in einen marktüblichen Industrieroboter integriert werden kann. Dadurch soll die Bestückgenauigkeit der in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Bestückungszelle erheblich verbessert werden. Die Grundidee, den Arbeitsraum des Bestückungssystems in Grob- und Feindomänen durch den Einsatz einer Mikropositioniereinheit (MPE) aufzuteilen, zeigt großes Potential [87].

Die besondere Herausforderung liegt deshalb in der Anpassung des MPE-Konzeptes an die Montageaufgabe ungehäuster Bauelemente mit feineren Strukturen. Das übergreifende Ziel ist es, durch konzeptionelle Maßnahmen einen Beitrag zu präziser Bestückung bei räumlichen Strukturen zu leisten.

Aufbauend auf die bisherigen Arbeiten im Bereich der Roboterbestückung wurde die Mikropositioniereinheit in die Roboterzelle integriert. Unter Berücksichtigung aller Anforderungen, die sich durch den Einsatz der MPE ergeben, wurde die Zelle um mehrere Komponenten erweitert. Durch den Einsatz der MPE mit der integrierten Bildverarbeitung lassen sich die Arbeitsschritte um zwei Schritte reduzieren, da die Lageerkennung des Schaltungsträgers und des Bauelements simultan während des Fügeprozesses erfolgt. Somit ließ sich die Bestückleistung von 1800 auf 2000 Bauelemente/Stunde erhöhen.

Bild 23 zeigt das Gesamtkonzept der roboterbasierten Mikropositionierung. Im Bild ist auch ein Auszug des Bildverarbeitungssystems zur simultanen Lageerkennung des Bauelementes und Schaltungsträgers zu sehen.



*Bild 23: Simultane Lageerfassung des Bauelementes und des Schaltungsträgers mittels des in die MPE integrierten Kamerasystems*

Im Hinblick auf die Bestückgenauigkeit wurde durch den Einsatz der MPE das zu verarbeitende Bauelementespektrum in Richtung miniaturisierter Bauelemente (Rastermaß von 200  $\mu\text{m}$ ) erweitert. Zur Lagekorrektur der elektronischen Bauelementen sind zwei Koordinatentransformationen für die Grobpositionierung mit dem Roboter und für die Feinpositionierung mit der MPE notwendig. Die Soll-Positionen werden über einen Postprozessor direkt vom ECAD-System abgelesen und in das Bestückprogramm eingebunden. Beim Bestückungsprozess sind die durch die simultane Erfassung des Referenzpunktes und des Bauelementes ermittelten Lagekorrekturwerte zu berücksichtigen [76].

Bild 24 zeigt die Applikation der Mikromontage mit Hilfe der Mikropositioniereinheit. Dargestellt ist der Bestückprozess des Bauelementes (PLCC44) auf einem spritzgegossenen Schaltungsträger (MID).

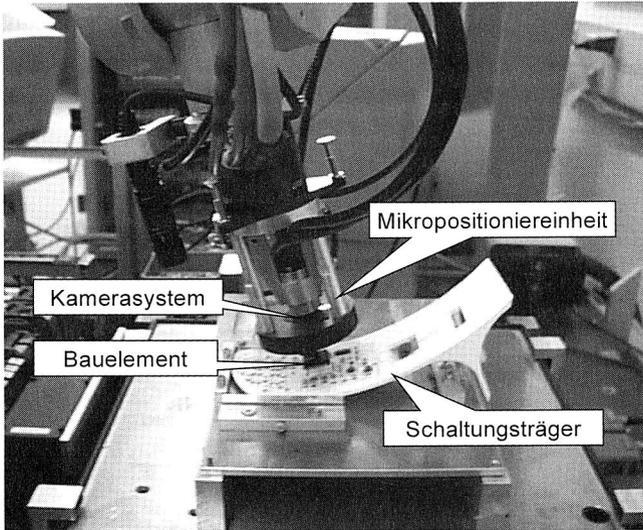


Bild 24: Applikation für die Präzisionsbestückung mit einem Industrieroboter durch den Einsatz der Mikropositioniereinheit

### 3.3.3 Gesamtkonzept zur Folienbestückung

Der Einsatz einer Folie als Schaltungsträger führt zu einer Reihe von technischen Vorteilen, erfordert jedoch auch neue Ansätze zum Bestücken und Löten. Die Prozesskette zur Montage flexibler Schaltungsträger gliedert sich ähnlich wie die Produktion von Flachbaugruppen, soll jedoch an die neue Herausforderung durch die Automatisierung in der Elektronikproduktion angepasst werden. Fertigungssysteme zur kontinuierlichen Verarbeitung flexibler Schaltungsträger sind auf dem Markt bereits vorhanden, bieten jedoch nicht die Flexibilität herkömmlicher SMD-Produktionslinien für die Flachbaugruppenfertigung an. In der Praxis werden die flexiblen Schaltungsträger vereinzelt auf FR4 Leiterplatten manuell aufgeklebt und erst dann wie Flachbaugruppen verarbeitet. Diese Lösung ist unwirtschaftlich und verhindert der Einsatz flexibler Schaltungsträger als Alternative zu FR4-Leiterplatten. Deshalb wurden in dieser Arbeit neben spritzgegossenen auch flexible Schaltungsträger in die Untersuchungen miteinbezogen, da durch den Einsatz von Folien in MID die Möglichkeit zum Aufbau von Multilayern geschaffen wird. Dies erfordert grundlegende Untersuchungen zur Verarbeitung flexibler Strukturen in Bestückungssystemen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde ein Anforderungsprofil für die Materialflusskomponenten der SMD-Fertigungslinie definiert.

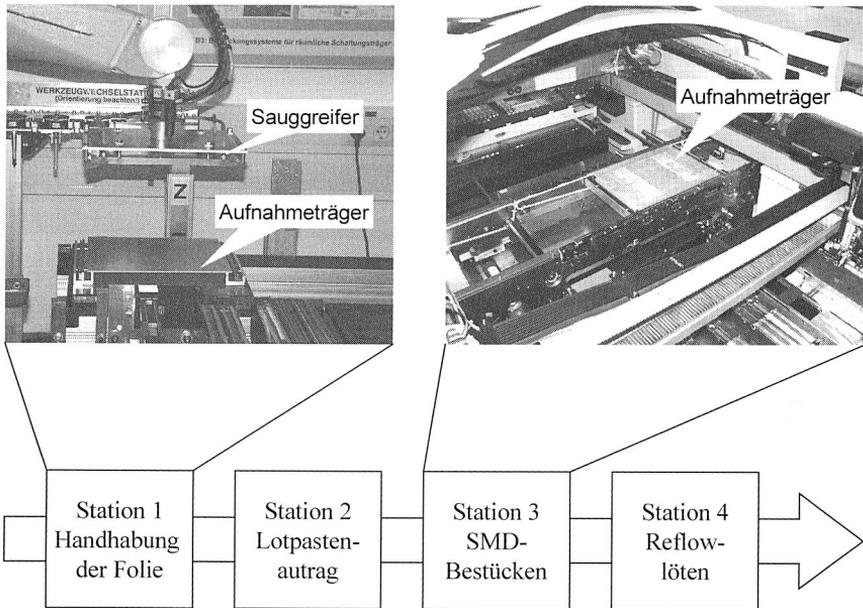


Bild 25: Gesamtkonzept für die Folienhandhabung und -bestückung in einer SMD-Fertigungslinie

Die Eigenschaften flexibler Schaltungsträger (Verformbarkeit, instabile Geometrie) erfordern bei der Bestückung geeignete Verfahren zur Handhabung und Verarbeitung. Hierfür wurde ein Konzept entwickelt, das die automatisierte Verarbeitung von Bauelementen mit feinen Rastermaßen auf flexiblen Schaltungsträgern ermöglicht. Hierbei werden grundlegende Untersuchungen an einem konventionellen SMD-Bestückungssystem durchgeführt. Zunächst wird die Aufspannung der Folien im Werkstückträger betrachtet. Hierbei ist vor allem die für die Verarbeitung hochpoliger Bauelemente erforderliche hohe Koplanarität der Anschlusspads zu untersuchen.

Um eine durchgängige automatisierte Verarbeitung flexibler Schaltungsträger in der Modellfabrik des Lehrstuhls zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieses Projektes ein Handhabungssystem zur Entnahme von vereinzelt Folien aus Magazinen entwickelt. Besonderer Wert wurde auf einen minimalen Umrüstaufwand trotz der großen Produktvielfalt gelegt. Für diesen Anwendungsfall wurde die im Kapitel 3.2.2 vorgestellte Roboterbestückungszelle ausgewählt, die bei den vorgegebenen Layoutbedingungen und den erforderlichen Taktzeiten die sinnvollste und günstigste Lösung darstellte. Die Greifeinheit des Handhabungssystems für die Folie besteht aus einem Sauggreifer und Parallelbacken zur Betätigung der Aufnahmeeinheit. Die

Folie wird mittels des Sauggreifers vertikal aus dem Magazin entnommen, mit dem Parallelbackengreifer in den Folienträger zugeführt und auf dem Transportsystem für die nachfolgenden Prozesse abgelegt. In weiterführenden Arbeiten wurden die Anforderungen an das Handhabungssystem für den Lotpastenauftrag (Schablonendruck, Dispensen) und den anschließenden Lötprozess definiert. Diese Ergebnisse haben gezeigt, dass die durchgängige Verarbeitung flexibler Schaltungsträger möglich ist.

### 3.4 Anforderungen an Bestückungssysteme

Der zunehmende, durch schnellere Prozess- und Produktinnovationen verursachte, Zeitdruck bei der Optimierung und Anpassung der Produktion, erfordert den Einsatz von Methoden und Verfahren, die eine schnelle Neu- und Weiterentwicklung von Fertigungssystemen ermöglichen.

Dem allgemeinen Trend zu höherer Packungsdichte und Funktionsintegration kann mit dem Einsatz innovativer Bauelemente- und Substratetechnologien Rechnung getragen werden. Dabei hat sich jedoch gezeigt, dass diese Technologien, in enger Wechselwirkung mit erweiterten Bauelementformen, neue bzw. optimierte Fertigungssysteme für eine effiziente Bestückung benötigen. Dieser Trend stellt hohe Anforderungen an Bestückssysteme hinsichtlich der Genauigkeit und Bestückleistung. Herkömmliche Automaten haben hier relativ enge Grenzen. Mit klassischen Entwurfsmethoden kann eine hohe Genauigkeit meist nur zu Lasten einer eingeschränkten Flexibilität, einer begrenzten Bestückleistung und mit hohen Investitionskosten erreicht werden. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass die Maschindynamik bei der Entwicklung von Systemen zur SMD-Bestückung nur unzureichend berücksichtigt wurde. Darüber hinaus gibt es keine Untersuchungen zum thermischen Verhalten, also zum Aufrechterhalten der Spezifikation im industriellen Dauerbetrieb.

Um Bestückungssysteme hinsichtlich der Genauigkeit und Leistung zu optimieren, sollen zuerst die Merkmale der unterschiedlichen Systemkonzepte systematisch untersucht werden. Hierbei ist insbesondere auf die Veränderung der Bestückgenauigkeit in Abhängigkeit von der Bestückleistung unter industriellen Betriebsbedingungen einzugehen. Durch die Kinematik des Bestückungssystems (Bild 3) verändert sich entscheidend das Maschinenverhalten im Dauerbetrieb. Dynamische und thermische Belastungen beeinflussen die Prozessfähigkeit. Aufgrund der offenen Kinematikette machen sich diese Einflussgrößen besonders beim Bestücken mit Industrierobotern bemerkbar. Diese Einflüsse sollen in der Konzeptionsphase eines Bestücksystems

berücksichtigt werden, um den steigenden Anforderungen durch die Bestückung feinerer Strukturen bei hoher Bestückleistung zu genügen.

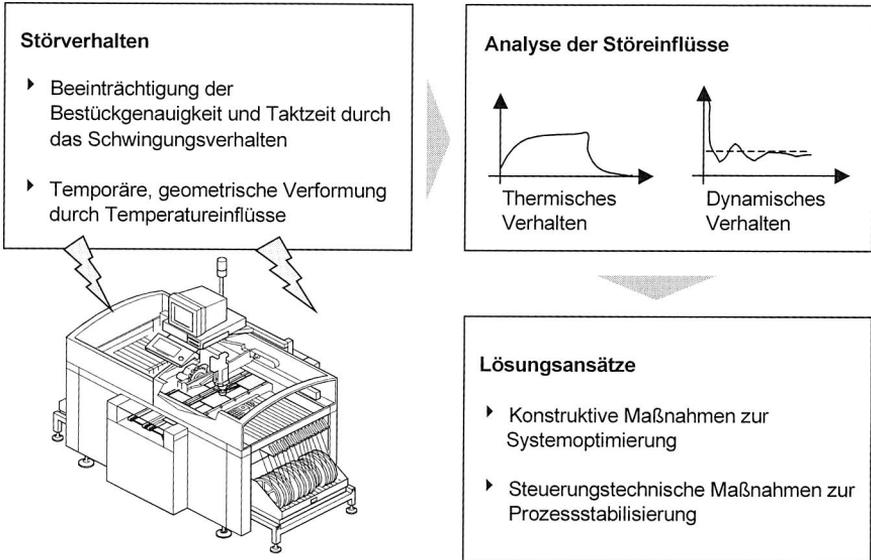


Bild 26: Neue Herausforderungen für stabile Maschinen- und Prozessfähigkeit bei Bestückungssystemen

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Maschinenstruktur von Bestückssystemen unter dynamischen und thermischen Belastungen untersucht werden, die während des Bestückvorgangs entstehen. Damit kann der Einfluss dieser Belastungen auf die Prozess- und Maschinenfähigkeit systematisch bestimmt werden.

Ausgehend von diesen Ergebnissen und unter Berücksichtigung des definierten Anforderungsprofils für zukünftige Bestückungssysteme sollen systematisch Schwachstellen aufgedeckt werden. Zur Bewertung der Systeme ist es notwendig, vergleichend die signifikanten Merkmale vorhandener Bestückungssysteme experimentell zu ermitteln, da hier ebenfalls noch keine Ergebnisse vorliegen. Im Gegensatz zu bisherigen Konzepten, die die Schwachstellen mittels Sensorik und Mappingverfahren überdeckten, werden durch die systematische Analyse unter industriellen Betriebsbedingungen neue Ansätze zur konstruktiven Optimierung von Bestückungssystemen geschaffen.

## **4 Auswirkungen des Schwingungsverhaltens auf den Bestückprozess**

Die Optimierung der Maschinendynamik von Bestückungssystemen zielt auf die Erhöhung der Montagegenauigkeit und Produktivität ab. Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Bestückprozesses ist die Erfassung der Montagegenauigkeit der Bauelemente auf Leiterplatten. Die Prozessfähigkeit einer Bestückmaschine wird dabei sehr stark von dynamischen Belastungen beeinflusst. Aufgrund dieser Belastungen kommt es zu Schwankungen der Bestückgenauigkeit des Systems. Verantwortlich dafür sind u.a. Schwingungen, die während des Bestückvorgangs entstehen.

Die bisherigen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Maschinendynamik haben dazu beigetragen, dass die Qualität und Zuverlässigkeit der Werkzeugmaschinen entscheidend verbessert wurden [91] [15]. Basierend auf diesen Arbeiten wird in diesem Kapitel die Auswirkung der Schwingungen auf die Bestückgenauigkeit systematisch untersucht.

### **4.1 Analyse des Maschinenaufbaus hinsichtlich des dynamischen Verhaltens**

Die Analyse der Maschinendynamik eines Bestückungssystems ermöglicht das Erkennen von Schwachstellen in der Maschinenstruktur. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden für die Optimierung des Schwingungsverhaltens und eine gezielte Strukturverbesserung genutzt. Da Bestückungssysteme aus einer Vielzahl von Komponenten bestehen und es unterschiedliche Kinematikkonzepte gibt, liegt der Schwerpunkt der Analyse des Maschinenaufbaus auf der Bestimmung der Einflussgrößen und auf der Maschinendynamik.

#### **4.1.1 Beschreibung der Systemkomponenten**

Die Maschinenkomponenten haben einen entscheidenden Einfluss auf das dynamische Verhalten eines Bestückungssystems. Neben dem kinematischen Aufbau stellen insbesondere die Antriebstechnik und die Bewegungsübertragung einen solchen Einflussfaktor dar. Die Umsetzung von rotierenden Motorbewegungen in eine lineare Vorschubbewegung wird im untersuchten Bestückungssystem durch Zahnriemen realisiert.

Der Endlich-Zahnriemenantrieb erfüllt folgende Kriterien:

- hoher Wirkungsgrad
- ruhiger und schwingungsarmer Lauf
- geringe Massen für hohe Beschleunigungen

Die Antriebseinheit ist auf zwei Arten angeordnet: Am Ende einer Vorschubstrecke starr befestigt (y-Achse) oder beweglich auf dem Wagen mitgeführt (x-Achse). Trotz der stabilen Mechanik dieses Antriebssystems treten dynamische Effekte, wie z. B. Schwingungen auf, die die Bestückgenauigkeit spürbar beeinflussen. Da bei einer Steigerung der Bahngeschwindigkeit der Bewegungsachsen Trägheitskräfte der bewegten Glieder elastische Verformungen der Antriebselemente verursachen und damit Fehler im Bewegungsverhalten der Achsen entstehen. Durch den Einsatz direkter Lagererfassungssysteme können einige Störeinflüsse, wie z. B. Verwindungen von Getrieben, Spindeln oder Riemen bei hohen Dynamischen Belastungen ausgeschlossen werden. Auch alterungsbedingter Verschleiß der Maschinenkomponenten, der zu einem Spiel im Antriebssystem führt, hat beim Einsatz direkter Meßsysteme einen Einfluss auf die Positioniergenauigkeit der Achsen. In Kapitel 4.4 werden Ansätze zur Optimierung des Schwingungsverhaltens von Bestückungssystemen vorgestellt.

Die Erhöhung der Bestückleistung erfordert jedoch außerdem eine verbesserte Dynamik von Vorschubsystemen der Bewegungsachsen. Hierfür kommen zunehmend Linear-Direktantriebe zum Einsatz. Zur Ausnutzung der vollen Leistungsfähigkeit dieses vielversprechenden Antriebskonzeptes für die Montage ist es notwendig, die bewegten Massen gering zu halten [51]. Dabei werden folgende Ziele angestrebt: hohe mechanische Steifigkeit und somit hohe mechanische Resonanzfrequenzen. Weiterhin sollen auch die thermischen Einflüsse durch geeignete Kompensationsmaßnahmen beseitigt werden, um insgesamt eine verbesserte Positioniergenauigkeit zu erzielen (Kapitel 5) [16].

Zur Verbesserung der Maschinendynamik von Bestückautomaten steht im Vordergrund der Entwicklung die Anwendung von Leichtbauverfahren. In diesem Zusammenhang wird zum Beispiel das Konzept der kohlenfaserverstärkten Maschinenkomponenten verfolgt. Dadurch kann die bewegte Masse erheblich reduziert und eine hohe mechanische Festigkeit erzielt werden.

### 4.1.2 Konzept der Achsensteuerung

Beim Positionierbetrieb führt die Achsenmechanik eine beschleunigungs- und geschwindigkeitskontrollierte Fahrt von der aktuellen Position in eine vorgegebene

Zielposition. Dabei sind die Zielposition selbst, die Beschleunigung, die Verzögerung und die Geschwindigkeit variabel. Die Antriebseinheit einer mechanischen Achse ist in dem folgenden Regelkreis realisiert.

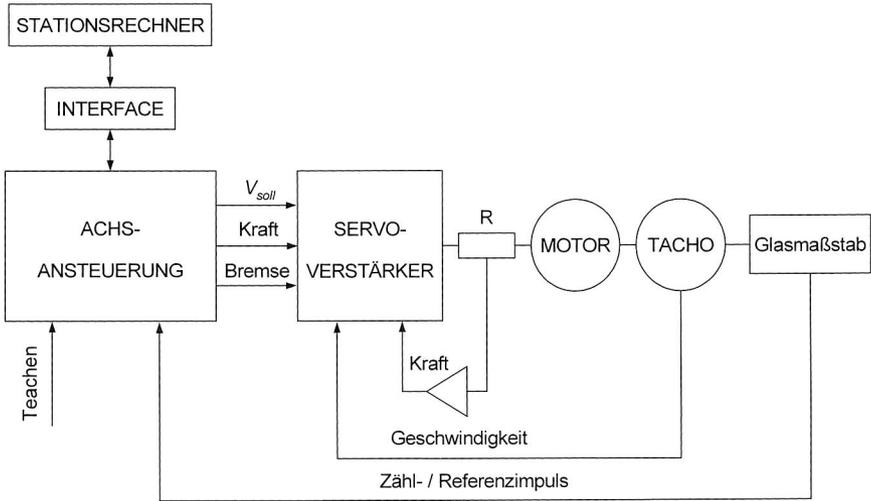


Bild 27: Schematische Darstellung des Gesamtkonzeptes des Achsenregelkreises von Bestückautomaten

Zwei Digital/Analog-Umsetzer setzen die für die Positionierung notwendigen Kraft- und Geschwindigkeitswerte in Spannungen um, damit ein Servoverstärker entsprechend angesteuert wird. Aus der Soll- und Ist-Position errechnet der Prozessor die entsprechenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für den Servoverstärker und gibt über D/A-Umsetzer eine Sollgeschwindigkeit vor. Wegabhängig ergeben sich zwei verschiedene Geschwindigkeitsprofile

- Dreieckbetrieb: Die Differenz von Startposition zu Zielposition ist kleiner als die Summe aus der maximalen Beschleunigungs- und Bremsstrecke.
- Trapezbetrieb: Die Differenz Startposition zu Zielposition B ist größer als die Summe aus der maximalen Beschleunigungs- und Bremsstrecke.

Das Fahrprofil der untersuchten Bestückautomaten entspricht der klassischen PTP-Bahnplanung (Point-to-Point). Der Geschwindigkeitsverlauf stellt sich hierbei trapezförmig dar, d.h. er ist in eine Beschleunigungsphase, eine Phase mit konstanter Geschwindigkeit sowie eine Verzögerungsphase unterteilt. In der letzten Phase nähert sich der Bestückkopf mit konstanter Verzögerung der Sollposition. Wird ein

definiertes Toleranzfenster erreicht, so wird die Positionsregelung ausgelöst. In späteren Untersuchungen interessiert das dynamische Verhalten des Bestückautomaten, d.h. die Einregelgeschwindigkeit und das Einregelverhalten im Allgemeinen. Zunächst wird das zugrundeliegende Reglermodell der Bestückautomaten untersucht.

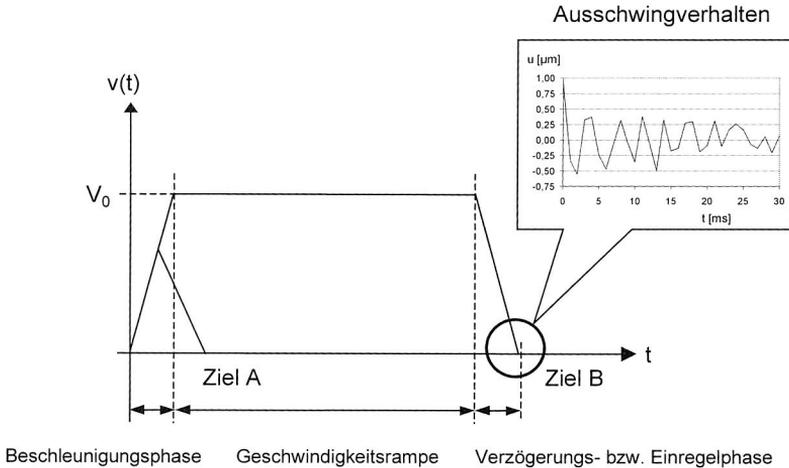


Bild 28: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm für die Bewegung der Hauptachsen eines Bestückungssystems

Das zu untersuchende Bestückungssystem verfügt über einen PI-Regler. Der Proportionalanteil (P) ist ein direkt eingreifender Kanal. Er kann aber die verursachte Regelabweichung nicht beseitigen. Es ergibt sich je nach Abschluss des Regelvorganges eine bleibende Regelabweichung. Sie ist um so kleiner, je größer der Verstärkungsfaktor des Reglers ist. In diesem Fall aber zeigt der Vorschubantrieb Überschwinger bzw. instabiles Verhalten.

Der Vorteil des integrierenden Regleranteils (I) beruht auf der Tatsache, dass ein Integrationsvorgang erst dann zum Abschluss kommt, wenn das Eingangssignal - hier die Regelabweichung - zu Null geworden ist [94]. Im eingeschwungenen Zustand beträgt dann die Abweichung null [84]. Die Eingriffsmöglichkeiten eines verzögerungsfreien I Reglers sind begrenzt durch den Regelbereich, den Stellbereich und zusätzlich die endliche Stellgeschwindigkeit. Die I-Regler werden vorwiegend zusammen mit P-Anteilen eingesetzt, wodurch sich der sehr weitverbreitete PI-Regler ergibt.

## 4.2 Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Bestückungssystemen

Zur Verbesserung des Maschinenverhaltens und der Bestückgenauigkeit sollen die Einflüsse der dynamischen Belastungen systematisch untersucht werden. Um den Anforderungen durch neue Bauelemente mit feineren Strukturen zu genügen, ist die Dynamikanalyse eine notwendige Voraussetzung zur Entwicklung optimaler Bestücksysteme.

Einer der wichtigsten Verursacher der Positionierungsgenauigkeit eines Bestückungssystems ist das fehlerhafte dynamische Verhalten der Achsen. Da die Achsen ständig in Bewegung sind, treten dynamische Schwingungen auf, die Abweichungen bei den Verfahrenswegen und Positionen der Achsen verursachen.

Neben den experimentellen Untersuchungen sind Maschinenkomponenten einer analytischen Betrachtung zu unterziehen. Zum Beispiel ist der Einfluss der Massenverteilung und der Beschleunigungskräfte auf die elastische Verformung des Portal-systems zu ermitteln. Daraus werden Anforderungen an den mechanischen Aufbau und die Steuerung der Systeme bestimmt. Darüber hinaus wird rechnergestützt ein Ersatzmodell erstellt, um eine theoretische Beschreibung der Einflussgrößen auf den Bestückprozess zu ermöglichen. Die zugehörigen Parameter (Schwingungen, Reibungskoeffizienten) werden experimentell definiert.

### 4.2.1 Beschreibende Systemgrößen des Schwingungsverhaltens

Das Schwingungsverhalten von Bestückungssystemen an der Pipettenspitze wird durch die Nachgiebigkeit und Beschleunigungskenngrößen der Bewegungsachsen in der Prozessebene bestimmt. Durch das kurzzyklische Verfahren der Achsen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen entstehen Vibrationen im Bestücksystem, die die Genauigkeit der Achspositionierung beeinflussen. Diese sind von der räumlichen Massenverteilung im System, der Steifigkeit und der Dämpfung der Koppelstellen (Flanschverbindungen, Führungen, Lager) bestimmt. Die Schwingungen werden bisher durch Rücknahme der Geschwindigkeit verringert. Diese Maßnahme bewirkt jedoch eine Senkung der Bestückleistung und damit eine Verschlechterung der Produktivität der Maschine.

Die in Bild 29 dargestellten Einflussfaktoren wirken auf die Streuung der Positionierungsgenauigkeit und damit auf die Standardabweichung der Bestückgenauigkeit von Bestückungssystemen.

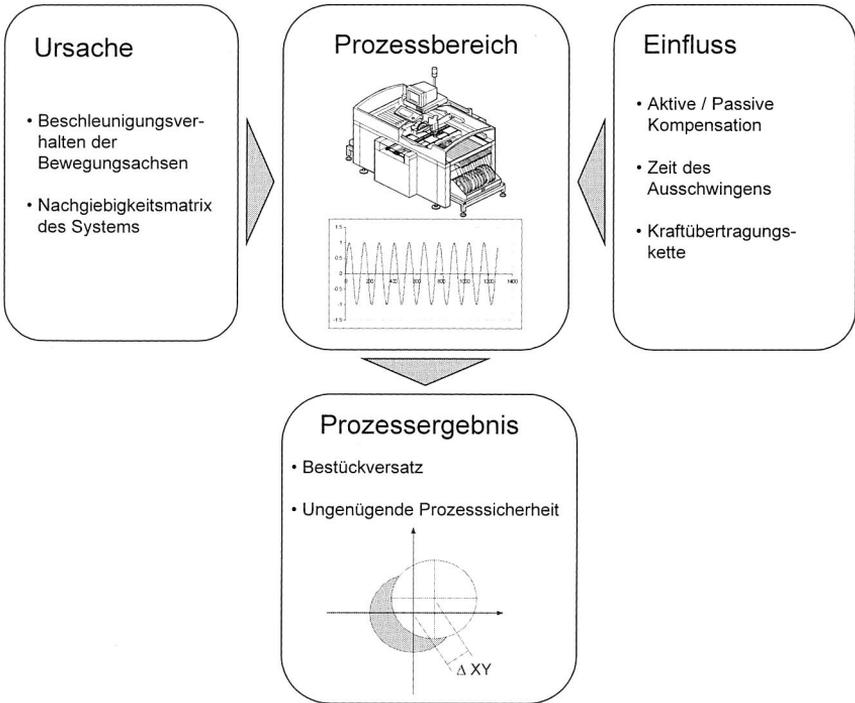


Bild 29: Systemgrößen des dynamischen Verhaltens eines Bestückautomaten und Einfluss auf das Prozessergebnis

Von Bedeutung sind Schwingungen, die bei der Lageerfassung des Bauelements sowie des Schaltungsträgers und während der eigentlichen Fügebewegung auftreten. Diese Schwingungen beeinflussen direkt die Bestückgenauigkeit und führen zum Verrutschen der Bauelemente. Diese Zusammenhänge werden in Kapitel 4.2.4 systematisch dargestellt.

Allgemein sind mechanische Schwingungen periodisch oder aperiodisch. Periodische Schwingungen sind durch Maschinen erzeugt, die gleichmäßig rotieren. Aperiodische dagegen entstehen in Maschinenteilen, die lineare Bewegungen durchführen, die oft mit einem Aufprall enden.

Hauptursachen dieser Schwingungen sind das Spiel und die unregelmäßige Reibung in den Antriebsmotoren und in den Übertragungselementen, die die gewünschten Bewegungen ausführen. Mit Hilfe der Reibkraft verursacht das Ruckgleiten der Schlitten nichtlineare Schwingungen des Systems. Die Schlitten schwingen dann zwischen Haften und Gleiten.

Außerdem verursachen Trägheitskräfte der bewegten Teile bei einer Steigerung der Bahngeschwindigkeit elastische Verformungen der Antriebselemente und damit Fehler im Bewegungsverhalten der Maschine, die in Form von Schwingungen zu sehen sind. Dieses erkennt man an den niederfrequenten Schwingungsamplituden. Diese Fehler sind auch an die Steuerung der Maschine zurückzuführen. Das heute meist in numerischen Steuerungen eingesetzte Geschwindigkeitsprofil hat die Form eines Trapezes (siehe Bild 28). Das dementsprechend blockförmige Beschleunigungsprofil weist an seinem Anfang und Ende einen theoretisch unendlichen Ruck auf, der das System zum Schwingen anregen kann. Dabei beschreibt der Ruck oder der Ruckkennwert das Maximum der dritten Ableitung der Weg-Zeit-Übertragungsfunktion (= das Maximum der ersten Ableitung des Beschleunigungsverlaufs). Die Simulationsergebnisse (siehe [112]) mit verschiedenen Funktionen und Beschleunigungsänderungszeiten lassen den Schluss zu, dass der Ruckkennwert wesentliches Kriterium für die Schwingungsanregung ist. Ein großer Ruckkennwert bedeutet mehr Schwingungen.

Mit folgenden entwickelten Prüfeinrichtungen soll das Verhalten der verschiedenen Maschinen im Bestückungsmodus aufgenommen werden. Aus den Ergebnissen können Abhängigkeiten der Prozessfähigkeit von Bestückweg und -geschwindigkeit abgeleitet werden. Dabei werden die am Lehrstuhl vorhandenen Bestückungssysteme untersucht.

## 4.2.2 Messung des Schwingungsverhaltens

Um die Einflussgrößen der dynamischen Belastungen zu untersuchen, wurde eine Prüfeinrichtung konzipiert und aufgebaut. Dabei wird ein Triaxial-Beschleunigungssensor am Bestückkopf montiert, mit dem die Schwingungen in x-, y- und z-Richtung erfasst werden. Die Messungen werden online während des Bestückvorgangs durchgeführt. Zur Datenerfassung wird ein Rechner mit einer Auswerteeinheit eingesetzt. Weiterhin wurde ein Softwareprogramm zur Schwingungserfassung, -visualisierung und -archivierung implementiert. Dieses ermöglicht die Aufzeichnung der Beschleunigungen während eines Bestückzyklus. Diese Beschleunigungen verursachen ein Verrutschen der Bauelemente und eine Ungenauigkeit beim Aufsetzen der Bauelemente.

Am wichtigsten für die Genauigkeit der Positionierung sind die Schwingungen, die beim Bestücken auf der Leiterplatte auftreten. Deshalb wurden eine Reihe von Messungen durchgeführt, in denen verschiedene Bauelemente an verschiedene Referenzpositionen bestückt wurden. Dabei stammen die Bauelemente aus unterschiedlichen Spuren.

Die ermittelten Beschleunigungsverläufe der x- und y-Achsen, während eines gesamten Bestückzyklus, sind in Bild 30 und Bild 31 dargestellt.

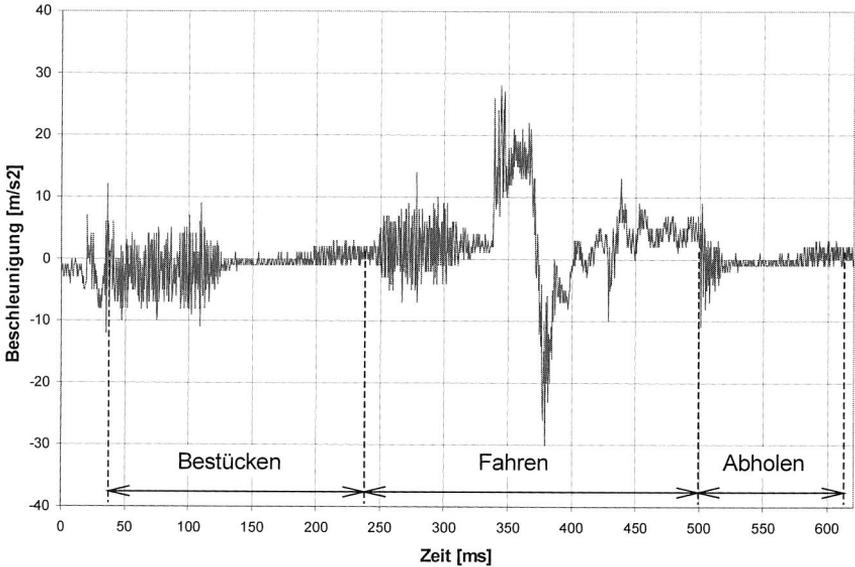


Bild 30: Gemessener Beschleunigungsverlauf in der x-Richtung der Bestückerbene

Beim Auswerten der erhaltenen Daten ist als erstes zu entnehmen, dass alle Bewegungen des Bestückkopfes während der drei Phasen (Abholen, Fahren und Bestücken) mit Schwingungen behaftet sind.

Der Vergleich der Amplituden ergibt, dass diese Schwingungen abhängig von der Länge der einzelnen Fahrwege sind. Die Schwingungsamplituden werden größer bei längeren Fahrwegen und kleiner bei kürzeren. Diese Effekte sind durch die hohen Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte bei langen Fahrwegen zu erklären und verursachen, wie oben erläutert, größere Schwingungen. Eine Reduzierung der Schwingungsamplitude kann aber nicht für sehr kleine Wege (< 60 mm) realisiert werden, da das Geschwindigkeitsprofil eine dreieckige Form hat (siehe Bild 28). Dies führt zu einem größeren Ruckkennwert, der sich durch vermehrte Schwingungen äußert.

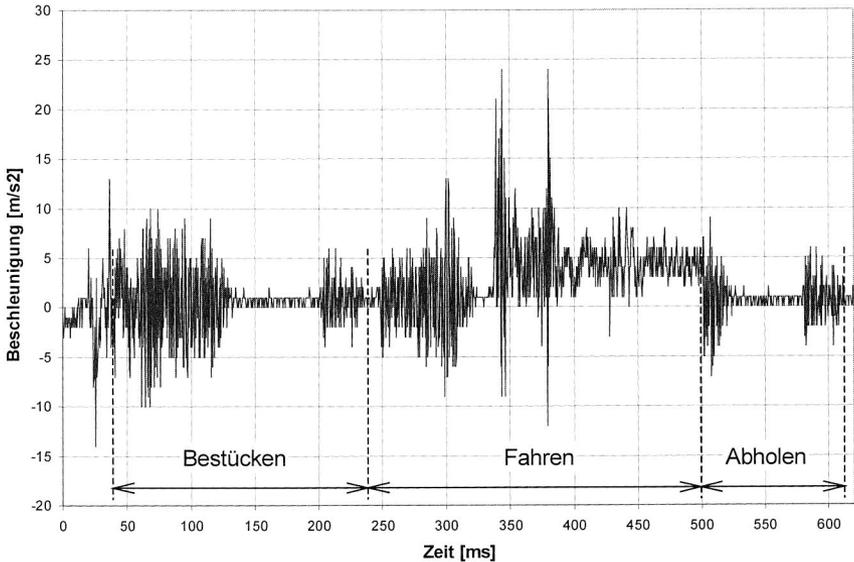


Bild 31: Gemessener Beschleunigungsverlauf in der  $y$ -Richtung der Bestückerbene

Die Schwingungen treten außerdem bei der Fahrt von der Abholposition bis zur Bestückposition auf. Diese werden auch Abweichungen verursachen und die ideale Fahrkurve wird nicht mehr verfolgt. Die Bestückposition wird dann nicht mehr genau erreicht. Dieses erhöht zusätzlich die Ungenauigkeit der Positionierung der Achsen. Die Schwingungen während des Bestückvorgangs erschweren insbesondere die Montage von großen und schweren Bauelementen, da diese nach der Lagererkennung durch die Bildverarbeitung während des Verfahrens der Achsen verrutschen können und fehlerhaft bestückt werden.

Im nächsten Abschnitt soll mit Hilfe von Lasertriangulationssensoren das Einschwingverhalten beim Fügeprozess erfasst werden. Die daraus gewonnenen Ergebnisse dienen dazu, die Zeit sowie die Amplitude des Einschwingens beim Bestücken zu definieren.

### 4.2.3 Messung des Einschwingverhaltens

Um den Einfluss der Schwingungen bei der Bestückphase zu analysieren, wurde ein Versuchsaufbau zur Erfassung des dynamischen Einschwingverhaltens realisiert und

in das zu untersuchende Bestückungssystem integriert. Ein zentrales Problem stellt hierbei die rechtzeitige Auslösung des Messalgorithmus dar. Die Routine zur Datenaufnahme wird in dem Moment gestartet, in dem der als Auslöser definierte Triangulationssensor ein Objekt innerhalb seines Messbereiches erkennt. Zur Aufnahme des dynamischen Einschwingverhaltens müssen beide Achsen voneinander getrennt betrachtet werden. Definiert man nun den Sensor als Auslöser, der auch für die Datenaufzeichnung eingesetzt wird, so gehen in dem Zeitintervall zwischen Auslösung („Triggern“) und tatsächlicher Datenaufnahme ein nicht unerheblicher Anteil der Daten verloren. Aus diesem Grund wird das erstellte Labviewprogramm in der Art modifiziert, dass der jeweils andere Sensor für die Auslösung des Messalgorithmus des anderen verantwortlich ist. Somit wird ein Datenverlust vermieden.

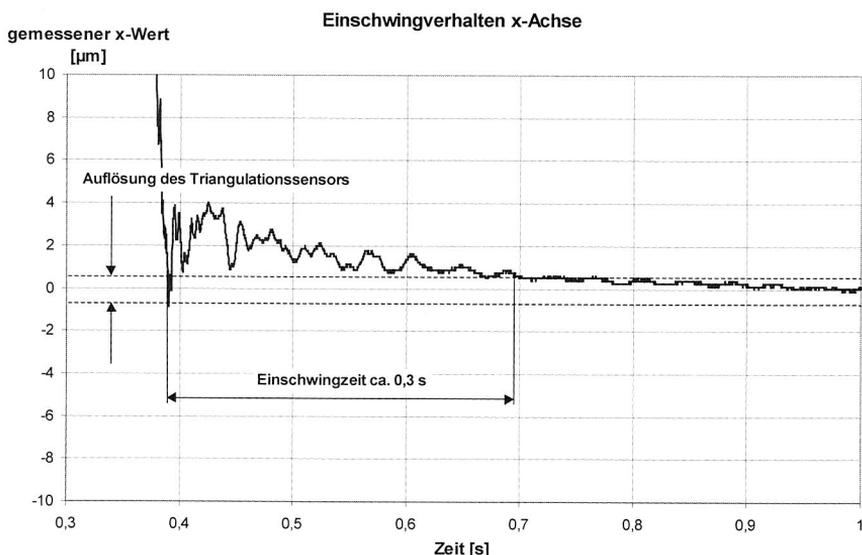


Bild 32: Ermittlung des Einschwingverhaltens in x-Richtung der Bestückerbene

Nachdem der Vorgang ausgelöst wurde, misst der Sensor mit maximaler Frequenz, also 5000 Messungen pro Sekunde. Der Messvorgang ist nach zwei Sekunden beendet, und die Werte werden in einem Array abgelegt.

Die Messungen des Einschwingverhaltens in der x-Achse zeigt Bild 32. Nach dem Eintritt der Pipettenspitze in den Messbereich ergibt sich eine Einschwingzeit von ca. 0,3 Sekunden, wobei die Sollposition hierbei als ein Fenster der Größe des Auflö-

sungsbereiches der Lasertriangulationssensoren definiert wird. Des weiteren zeigt der Diagrammverlauf ein untypisches Einschwingverhalten, welchem nicht eindeutig ein Reglermodell zugrunde gelegt werden kann. Um dies zu erklären, muss der Bestückvorgang in seine zugrundeliegenden Einzelbewegungen unterteilt werden.

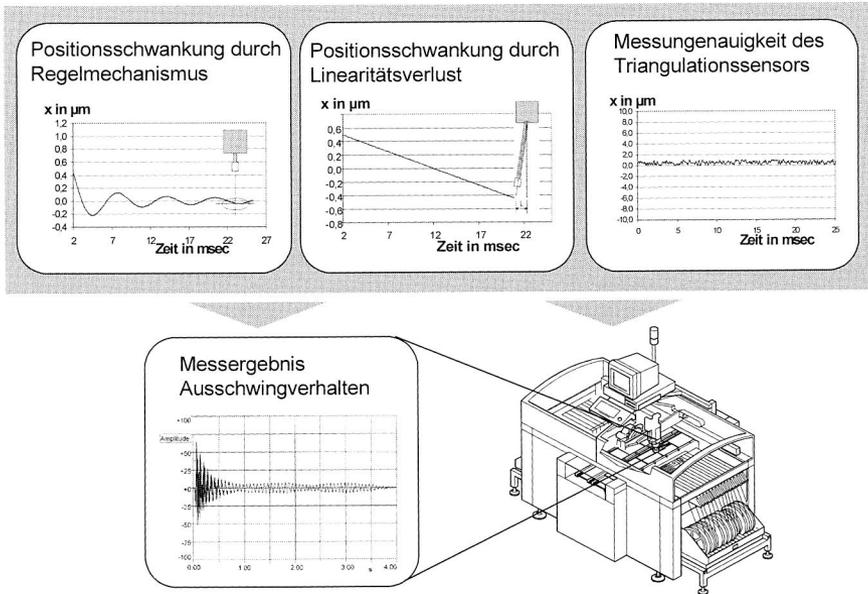


Bild 33: Einfluss der überlagernden Effekte auf das Messergebnis des Einschwingverhaltens

Der Bestückkopf mit eingezogener Pipette bewegt sich zunächst über der Leiterplatte mit Hilfe eines sehr schnell arbeitenden Reglers in ein Toleranzfeld um die Sollposition. Ist dieses erreicht, so verfährt die Pipette unter ständigem Nachregeln der Position in z-Richtung auf die Bestückposition, wobei ein geringer Linearitätsfehler entsteht. Hierbei entstehen zusätzlich Unregelmäßigkeiten, die durch die Bewegung der Pipette in der z-Achse bedingt werden. Außerdem liegen die Messgenauigkeitsschwankungen des Triangulationssensors durchaus innerhalb einer Größenordnung, die sich auf die Darstellung des Graphen auswirkt. Die Addition dieser Einflüsse führt zu den oben dargestellten Messergebnissen.

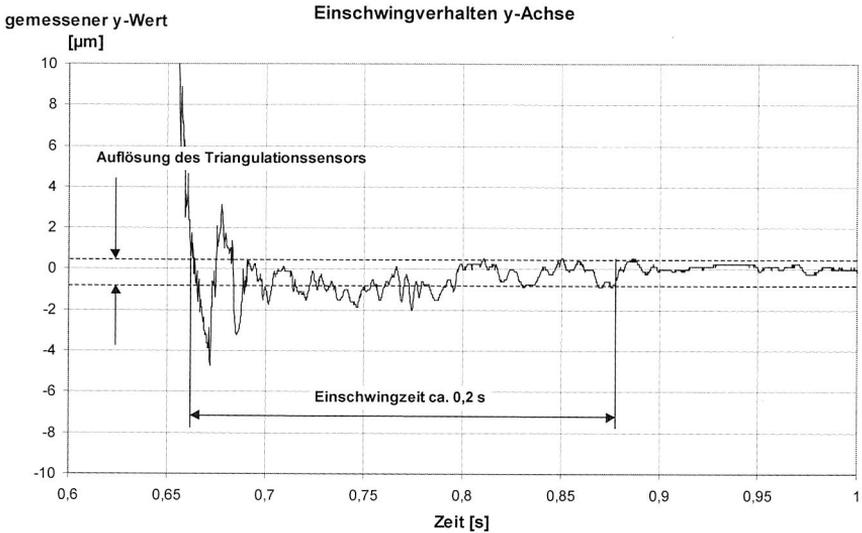


Bild 34: Ermittlung des Einschwingverhaltens in y-Richtung der Bestückerbene

Bild 34 zeigt die Messungen zum Einschwingverhalten der y-Achse. Erwartungsgemäß zeigt sich ein ganz ähnliches Einschwingverhalten wie bei den Untersuchungen bezüglich des Einschwingverhaltens der x-Achse. Etwas deutlicher ist hierbei jedoch ein zweimaliges Überschwingen zu erkennen. Der Einfluss des linearen Versatzes durch die Bewegung in z-Achse ist weit weniger ausgeprägt als in Bild 33, weswegen von einem erhöhten Spiel der z-Achse in x-Richtung ausgegangen werden muss.

Die hier dargestellten Kurven zeigen die mit Hilfe der Lasertriangulationssensoren erfassten Messdaten, und als solche nicht für analytische Betrachtungen geeignet. Es interessieren in diesem Zusammenhang jedoch weitere Eckdaten, wie beispielsweise Geschwindigkeit am Pipettenkopf und maximale verfahrenre Beschleunigung, die theoretisch aus dem Graphen gewonnen werden könnten. Hierzu müssen die Messkurven jedoch zunächst, zumindest teilweise, in eine analytische Funktion umgewandelt werden. Ein schnelles und einfaches Berechnungsverfahren wird in diesem Zusammenhang durch das Differenzenquotientenverfahren repräsentiert, welches aus zwei Messtupeln jeweils einen lokalen Wert für die Ableitung an dieser Stelle errechnet.

$$y'(t_k) = \frac{y(t_{k+1}) - y(t_k)}{t_{k+1} - t_k} \quad (3)$$

Das Verfahren ist jedoch für eine dieser Anwendung entsprechenden Anforderung nicht ausreichend genau, da es die Bereiche zwischen den Messpunkten  $y(t_k)/y(t_{k+1})$  nicht approximiert.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den am deutlichsten ausgeprägten Richtungswechsel durch Interpolation zu betrachten und ihn anschließend durch die mathematischen Iterationsverfahren (polynomische Funktion) zu approximieren.

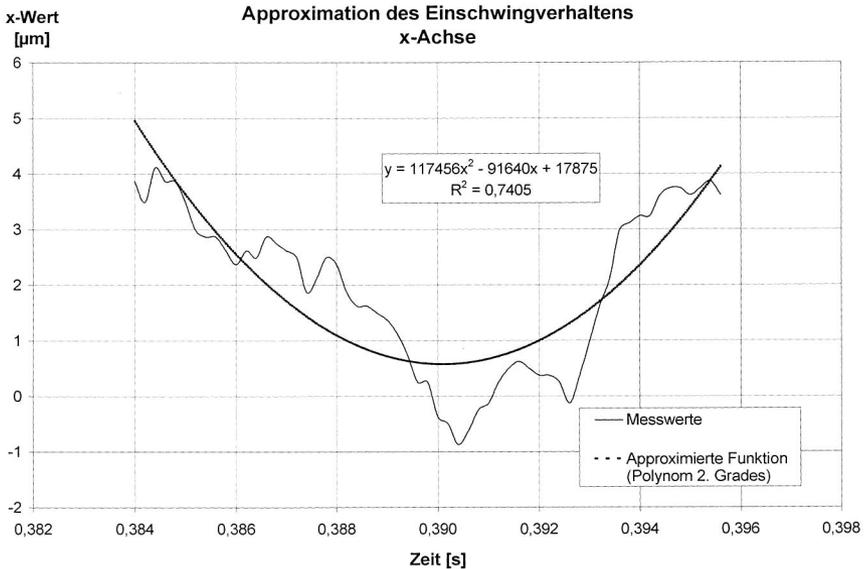


Bild 35: Partielle Approximation der Messkurve durch ein Polynom 2. Grades - Berechnung der Beschleunigung beim Einschwingen

Der Bereich der Umkehrung der Verfahrrichtung am Punkt des ersten Überschwingens wurde hier vergrößert dargestellt. Dieses Segment der Messkurve wurde durch ein Polynom zweiten Grades approximiert. Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$s(t) = 117456t^2 - 91640t + 17875.$$

$$\frac{ds(t)}{dt} = 234912t - 91640 \quad [\mu\text{m} / \text{s}]. \quad (4)$$

$$\frac{d^2s(t)}{dt^2} = 234912 \quad [\mu\text{m} / \text{s}^2].$$

Hierbei entspricht die erste Ableitung dem Geschwindigkeitsverlauf [ $\mu\text{m/s}$ ] der Pipettenspitze, die zweite Ableitung dem der Beschleunigung [ $\mu\text{m/s}^2$ ]. Da der entsprechende Bereich durch eine quadratische Funktion approximiert wurde, ist letztere über den Gültigkeitsbereich konstant. Die daraus berechnete maximale Beschleunigung ist wesentlich niedriger als die während des Verfahrens der Achsen entstandene Beschleunigung.

#### 4.2.4 Auswirkung auf die Bestückgenauigkeit

Während des Bestückvorgangs wird ein SMD-Bauelement mittels einer Pipette angesaugt, wodurch eine kraftschlüssige Verbindung entsteht. Dieser Kraftschluss kann jedoch durch zu hohe auftretende Beschleunigungskräfte unterbrochen werden. Das vollständige Lösen des Bauteils wäre eine denkbare Folge, allerdings interessiert in der Praxis eher der Grenzfall zwischen Haften und Gleiten - ein Erscheinungsbild, welches als Stick&Slip-Effekt bezeichnet wird (Bild 36).

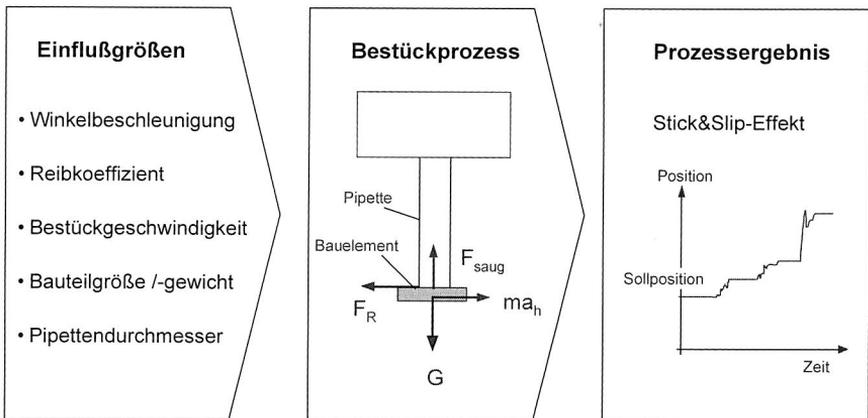


Bild 36: *Dynamische Störeinflüsse auf Bestückgenauigkeit und damit die Maschinenfähigkeit*

Es handelt sich hierbei um ein partielles Lösen der Verbindung (Slip-Phase), was sogleich wieder durch Haften aufgefangen wird (Stick-Phase). Das Bauteil ist somit aus seiner Sollposition gerutscht und wird mit dem entstandenen Versatzfehler auf die Leiterplatte aufgesetzt.

Es treten bei dem angewendeten Modell Massenträgheitskräfte entgegengesetzt der Bewegungsrichtung sowie Massenträgheitsmomente in z- sowie y-Richtung auf.

Letztere entstehen aus der Tatsache, dass die Massenträgheitskräfte, welche auf das Bauteil wirken, auf dessen Schwerpunkt angreifen, wodurch ein Moment um den äußeren Rand der Pipette entsteht. Um dieses Moment klassifizieren zu können, müsste somit die Gewichtsverteilung des Bauteils sowie die Geometrie der Pipette in die Berechnungen miteinbezogen werden. Dieses soll im Rahmen fortführender Arbeiten systematisch untersucht werden.

An dieser Stelle soll vielmehr eine Korrelation zwischen Pipetteninnendurchmesser, Bauteilgewicht und translatorischer und rotatorischer Beschleunigung erstellt werden. Im weiteren wird die Form der Pipettenspitze allgemein als rund angenommen, wodurch sich ein einfacher Zusammenhang zwischen Pipetteninnendurchmesser und vakuumübertragender Wirkfläche ergibt.

Zunächst wird mittels einfacher Berechnungen die maximale horizontale Beschleunigung in Abhängigkeit von Bauteilmasse und Pipettendurchmesser errechnet, anschließend wird daraus auf eine maximale vertikale Beschleunigung geschlossen.

Gemäß [10] gelten für die Reibkraft folgende Beziehungen:

$$F_R \geq \mu \cdot F_N \tag{5}$$

$$F_R \geq m \cdot a_{\text{hori}} \tag{6}$$

$$F_N = F_{\text{Saug}} - m \cdot g \tag{7}$$

$$F_{\text{Saug}} = A_{\text{Pipette}} \cdot p_{\text{Pipette}} \tag{8}$$

Aus (Gl. 5), (Gl. 6), (Gl. 7) und (Gl. 8) ergibt sich

$$\begin{aligned} F_R &\geq \mu \cdot (F_{\text{Saug}} - m \cdot g) \\ m \cdot a_{\text{hori}} &\geq \mu \cdot [A_{\text{Pipette}} \cdot p_{\text{Pipette}} - m \cdot g] \\ a_{\text{hori}} &\geq \mu \cdot \left[ \frac{A_{\text{Pipette}} \cdot p_{\text{Pipette}}}{m} - g \right] \\ a_{\text{hori, grenz}} &= \mu \cdot \left[ \frac{A_{\text{Pipette}} \cdot p_{\text{Pipette}}}{m} - g \right]. \end{aligned} \tag{9}$$

(Gl. 9) präsentiert somit eine Beziehung der Form

$$a_{\text{hori, grenz}} = F(\mu; A_{\text{Pipette}}; p_{\text{Pipette}}; m).$$

Der Reibkoeffizient  $\mu$  ist innerhalb des Einsatzbereiches konstant und wird gemäß [10] mit  $\mu=0,3$  angenommen (Werkstoffpaarung Kunststoffpipettenaufsatz / SMD-Kunststoffgehäuse). Der Ansaugdruck ist ebenfalls konstant und beträgt nach [63] 5,5 bar. Somit entsteht eine Funktion mit Abhängigkeiten von Pipettendurchmesser

sowie der Bauteilmasse. Für praktische Anwendungen wäre es zu einem späteren Zeitpunkt jedoch sinnvoll für verschiedene Pipettentypen Kennlinien maximaler Beschleunigungen in Abhängigkeit der Bauteilmasse zu erhalten.

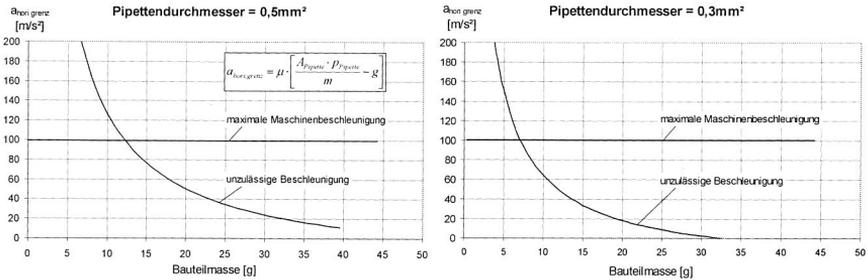


Bild 37: Zulässige Grenzbeschleunigungen bei verschiedenen Pipetteninnenflächen

Die oben dargestellte Kennlinie verdeutlicht also pipettenspezifisch die zulässigen Grenzbeschleunigungen für eine bestimmte Bauteilmasse.

Soll hingegen die Frage geklärt werden, welche Pipette für welches Bauteil eingesetzt werden soll, so kann die Gleichung 9 auch in folgende Form gebracht werden:

$$A_{pip}(m) = \left( \frac{a_{max}}{\mu} + g \right) \frac{m}{P_{pipette}} \tag{10}$$

Es entsteht somit eine Abhängigkeit des zu wählenden Pipettendurchmessers von der Bauteilmasse  $m$  sowie der Maschinenbeschleunigung  $a_{max}$ . Diese ergibt sich gemäß den Maschinendaten aus der geometrischen Addition der einzelnen Beschleunigungen für die horizontalen Achsen.

$$a_{max} = |\bar{a}_{x,max} + \bar{a}_{y,max}| = \sqrt{\bar{a}_{x,max}^2 + \bar{a}_{y,max}^2} = 20,479 \frac{m}{s^2} \tag{11}$$

Nach Herstellerangaben werden allerdings Horizontalbeschleunigungen von bis zu 10 g erreicht. Entsprechend der Annahme der maximalen Maschinenbeschleunigung ergeben sich für die einzusetzenden Pipettendurchmesser in Abhängigkeit der Bauteilmasse folgende Kurvenverläufe: Bild 38

Pipettendurchmesser  
[mm]

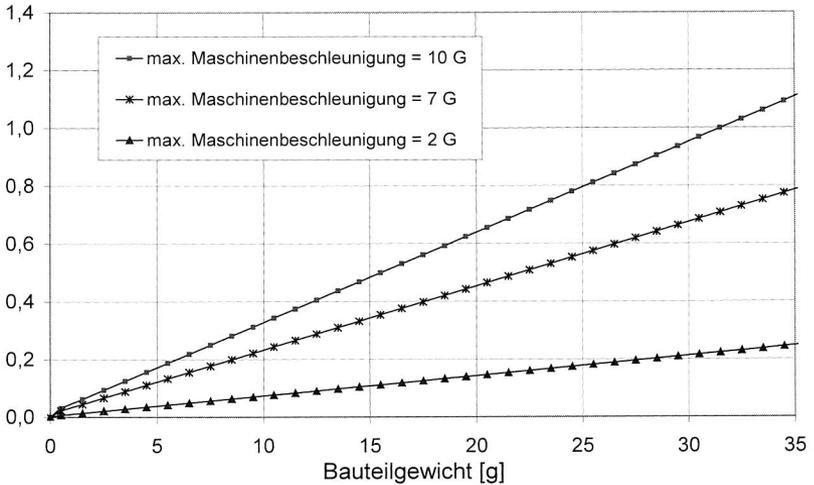


Bild 38: Auswahl der Pipettenwirkläche in Abhängigkeit von der Beschleunigung und der Bauteilmasse

Nach den Ausführungen nach [9] gilt für die maximale vertikale Beschleunigung

$$a_{\text{vert.,grenz}} = \frac{1}{\mu} \cdot a_{\text{horiz.,grenz}} \tag{12}$$

Diese Berechnungen setzen allerdings voraus, dass sich die auftretenden Beschleunigungen nicht überlagern, d.h. dass translatorische Bewegungen in der x-y-Ebene zeitlich getrennt von translatorischen Bewegungen in z-Richtung stattfinden. Dies ist durch die Bestückkinematik des untersuchten Bestückungssystems weitgehend gewährleistet.

Neben den an dieser Stelle berücksichtigten translatorischen Beschleunigungen in x-y-Ebene bzw. z-Richtung treten während des Bestückprozesses auch Winkelbeschleunigungen des Bauteils um die z-Achse auf, wenn an einem Pick&Place-Bestückkopf der Abholwinkel nicht gleich dem Absetzwinkel ist. Deren Einfluss soll im folgenden berechnet werden:

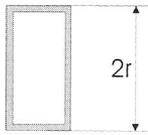
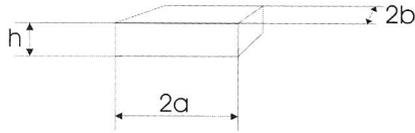
Querschnitt an der  
PipettenspitzeAbmessungen des  
SMD-Bauteils

Bild 39: Geometrische Abmessungen an der Pipettenspitze

Nach [9] gilt mit den oben dargestellten Bezeichnungen für Bauteilabmessungen und Pipettenspitze:

$$\alpha_{\text{grenz}} = \dot{\omega} \leq \frac{3 \cdot (a_{\text{verti.,grenz}} \cdot \mu \cdot r)}{(a^2 + b^2)} \quad (13)$$

Damit ergibt sich für ein quadratisches SMD-Bauelement der Kantenlänge  $2a=2b=4\text{mm}$  und einem Pipettenaufsatz mit einer Querschnittsradius von  $r = 1\text{mm}$  eine maximal mögliche Winkelbeschleunigung von  $\alpha_{\text{grenz}}=9337 \text{ rad/s}^2$ . Es ist somit ersichtlich, dass eine weitergehende Untersuchung in dieser Richtung erforderlich ist.

### 4.3 Modellbildung zur Berechnung des Einschwingverhaltens

Zur Verbesserung des statischen und dynamischen Verhaltens einzelner Maschinenelemente oder ganzer Maschinen werden neben experimentellen Verfahren (z. B. messtechnische Untersuchungen) numerische Verfahren (z. B. Finite Elemente Methode) eingesetzt [11]. Die theoretische Betrachtung von Systemen ermöglicht dem Konstrukteur, schon im Vorfeld wichtige Informationen bei der Entwicklung und Optimierung von Maschinenelementen zu erhalten [13]. Bisher wurden dabei überwiegend die Bestimmung der Eigenschwingungsformen und die entsprechenden Resonanzfrequenzen einzelner Komponenten betrachtet. Aufgrund der meist unbekanntesten Steifigkeits- und Dämpfungseinflüsse der Koppelstellen ist die quantitative Bestimmung der dynamischen Kenngrößen mit sehr hohem Aufwand verbunden und nur in seltenen Fällen gerechtfertigt [109].

Die experimentellen Untersuchungen zum Einschwingverhalten haben gezeigt, dass die negative Auswirkung der Beschleunigungskräfte auf die Bestückgenauigkeit auch auf die Struktur und der Aufbau des Portals zurückzuführen ist. Deshalb wird in diesem Abschnitt das Einschwingverhalten des Portals ohne Berücksichtigung der Kop-

pelstellen rechnerisch betrachtet. Dabei wird mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode die aus den Beschleunigungskräften resultierende elastische Verformung des Portals sowie das entsprechende Einschwingverhalten vorgestellt.

### 4.3.1 Beschreibung der Randbedingungen

Um die Positioniergenauigkeit von Bestückungssystemen konstruktiv zu optimieren, sind Kenntnisse über das Einschwingverhalten einzelner Maschinenkomponenten erforderlich, die direkt die Maschinenfähigkeit beeinflussen. In diesem Zusammenhang ist die Gestaltung des Maschinenportals von großer Bedeutung. Dieses Bauteil neigt unter der Wirkung der Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte zum Schwingen. Die wichtigste Kenngröße für dieses Verhalten ist die Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit und wird durch den Werkstoff, die geometrische Gestaltung und die Art und Lage der auf das Bauteil wirkenden Kräfte bestimmt [8] [62].

Um eine ausreichende Gesamtsteifigkeit des Bestückungssystems zu erzielen, ist eine getrennte Betrachtung und Abstimmung der elastischen Verformung der einzelnen Maschinenkomponenten (z. B. Lager, Spindel, Führungen usw.) erforderlich. Eine einfache Verformungsanalyse gibt zwar Informationen über die elastische Verformung eines Bauteils unter zeitlich konstanter Belastung und damit die Gesamtlagerung der z-Achse des Bestückkopfs, entspricht aber nicht dem tatsächlichen Einschwingverhalten des Portals. Deshalb wird mit Hilfe der rechentechnischen Analyse das Einschwingverhalten des Portals untersucht, um die Beeinflussung auf die Positioniergenauigkeit zu bestimmen. Am Portal greifen in den Koordinatenrichtungen die Beschleunigungskräfte ( $a_x = 3 \text{ g}$ ,  $a_y = 10 \text{ g}$ ) an. Dadurch wird das Portal in x- als auch in y-Richtung auf Biegung beansprucht. Um den Effekt des Ausschlagens im Rechenmodell simulieren zu können, werden die wirkenden Beschleunigungskräfte auf das Portal impulsartig definiert. Die Zeitdauer entspricht dabei der Abbremsphase der Bewegungsachsen.

Bild 40 zeigt die Vorgehensweise bei der rechentechnischen Analyse des Einschwingverhaltens. Hierbei wurde die Finite-Elemente-Methode angewendet. Ausgehend von den CAD-Daten wurde die Geometrie der zu berechnenden Portalstruktur approximiert und zu einem Rechenmodell abstrahiert [114] [116]. Auf dieser Basis können Berechnungen zur elastischen Verformung und Ausschlagungen durchgeführt werden. Dieses ermöglicht eine Schwachstellenanalyse und Bauteiloptimierung.

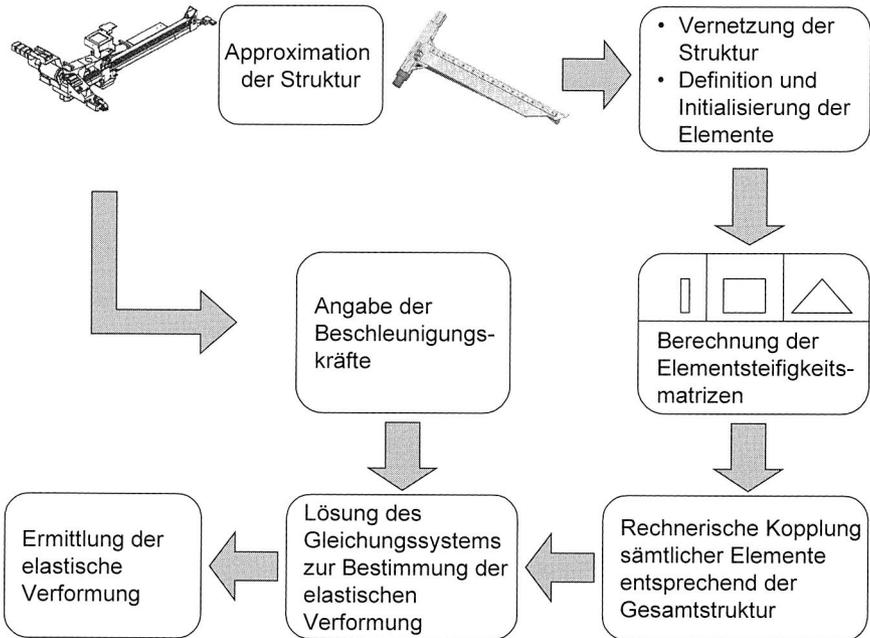


Bild 40: Vorgehensweise bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode zur Simulation der elastischen Verformung des Portals [107]

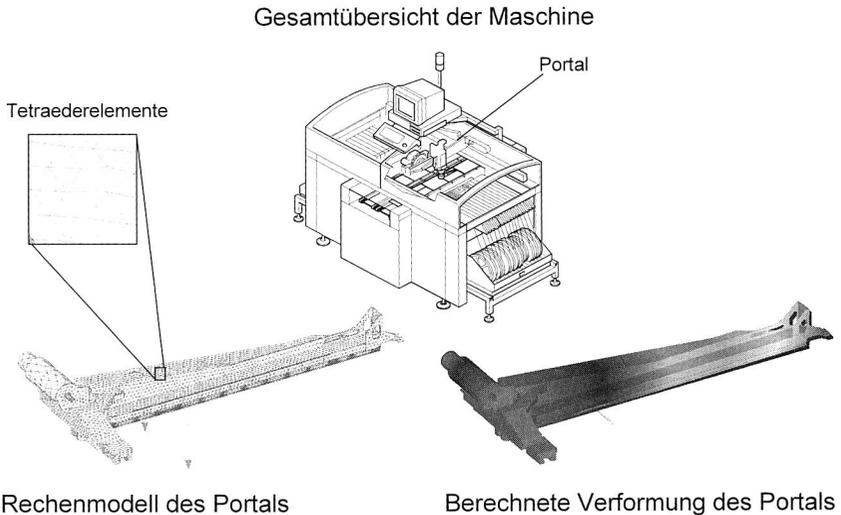
### 4.3.2 Ergebnis der FEM-Simulation <sup>1</sup>

Für die Analyse der elastischen Verformung und des Einschwingverhaltens des Portals wurde das Simulationsprogramm NASTRAN angewendet. Dieses Werkzeug verfügt über eine Elementbibliothek und die dazugehörigen Berechnungsalgorithmen, die je nach Aufgabenstellung neben der Berechnung der elastischen Deformationen auch die Berechnung der thermischen Deformation, des Temperaturfeldes, der Eigenfrequenzen, Schwingungsformen und Ortskurven ermöglicht. In Kapitel 6.2 wird auch mit Hilfe dieses FEM-Simulationsprogramms die thermische Verformung des Portals vorgestellt.

Bild 41 zeigt die Darstellung der ermittelten Modellstruktur des Portals. In diesem Bild ist eine schematische Übersicht des Gesamtmaschinenaufbaus gezeigt.

<sup>1</sup> Die FEM-Simulation erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Frank Christoph [78]

Wichtig für die Positioniergenauigkeit des Bestücksystems ist die Relativverformung zwischen Bestückkopf bzw. z-Achse und Leiterplatte. Deshalb ist die Berechnung des Verformungsverhaltens des Portals von zentraler Bedeutung. Im Bild sind auch das Rechenmodell, die durch Tetraederelemente approximierte Struktur und die in der Bestükebene liegende Verformungskontur des Portals zu sehen. Auf der Basis der Ergebnisse der Analyse zur elastischen Verformung ist eine systematische Konstruktionsoptimierung des Bauteils möglich.



*Bild 41: Verformungsanalyse des Maschinenportals unter Belastung der Beschleunigungskräfte*

Bei der Berechnung des Einschwingverhaltens mit der Finite-Elemente-Methode wurde das Maschinenportal mit einer Beschleunigungskraft über eine Zeitspanne von 0,12 s angeregt. Die Zeitdauer ergibt sich aus dem Beschleunigungsprofil des Achssystems. Der Rechenaufwand des Einschwingverhaltens ist deutlich höher als bei der Berechnung des elastischen Verformungsverhaltens. Deshalb durch Rechenknoten wurden die Eigenschaften des Modells reduziert, die für die Ergebnisse bzw. Randbedingungen relevant sind.

Bild 42 zeigt die FEM-Berechnungsergebnisse des Maschinenportals in x- und y-Richtung. Demnach ist die maximal berechnete Amplitude der Ausschwingfunktion kleiner als 1  $\mu\text{m}$ . Diese Ergebnisse sind für den Konstrukteur von großer Bedeutung,

da diese Erkenntnisse auch heute noch größtenteils auf empirischem Mitarbeiterwissen beruhen.

Wie in Kapitel 4.2 gezeigt, sind systematische experimentelle Untersuchungen zum Einschwingverhalten wegen des hohen Versuchsaufwandes und der damit verbundenen hohen Kosten nur teilweise in der Praxis möglich. Zur Entlastung des Maschinenkonstruktors ermöglicht eine FEM-Simulation die Analyse der Eigenschaften einzelner Komponenten.

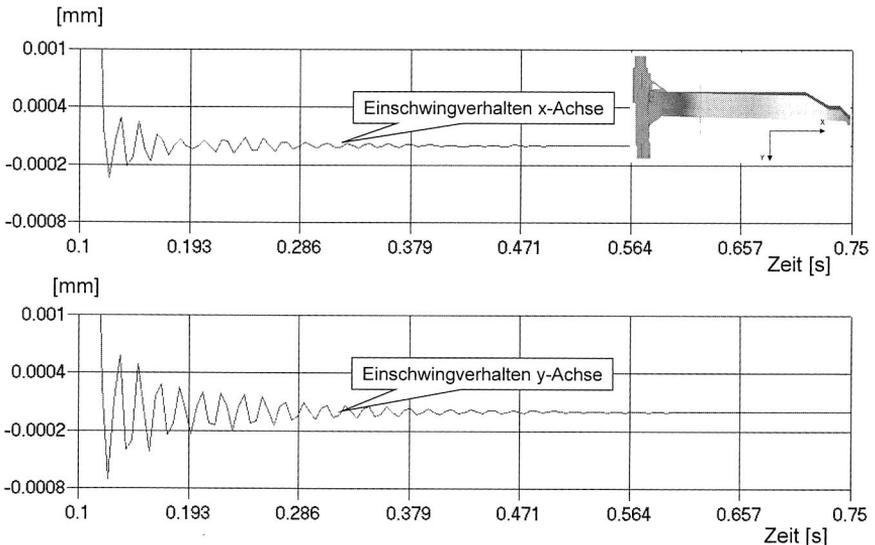


Bild 42: Simulationsergebnis des Einschwingverhaltens des Maschinenportals ohne Berücksichtigung der Koppelstellen

### 4.3.3 Vergleich der Messungs- und Berechnungsergebnisse

Bei der Gegenüberstellung der Simulationsrechnung und der Messergebnisse des Einschwingverhaltens ist festzustellen, dass die maximale berechnete Amplitude deutlich kleiner als die gemessene Amplitude ist (Bild 32). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der FEM-Simulation nur die Struktur des Portals betrachtet wurde. In diesem Zusammenhang war das Ziel, das elastische Verhalten der einzelnen Maschinenkomponenten ohne Berücksichtigung der Koppelstellen zu untersuchen. Grund hierfür ist die unvollkommen bekannten Steifigkeits- und Dämpfungswerte der meisten Komponenten bei der rechnerischen Betrachtung des Portals mit Bestück-

kopf. So ist es notwendig, weitere messtechnische Untersuchungen zur Bestimmung der erforderlichen Parameter für die Validierung des Rechenmodells durchzuführen.

Im Rahmen eines Teilprojektes des Verbundprojektes FORSIM [78] werden mit Hilfe einer integrierten Simulation das statische, dynamische und thermische Verhalten einer Bestückungsmaschine unter Berücksichtigung der technologischen Randbedingungen des Bestückprozesses untersucht. Die in Kapitel 4 und 5 gewonnen Ergebnisse dienen dabei als Grundlage für die Realisierung des Simulationsmodells.

## **4.4 Ansätze zur Optimierung des Schwingungsverhaltens**

### **4.4.1 Konzepte für den Maschinenaufbau**

Zuerst ist eine Verbesserung des Reibungsverhaltens der Maschine nötig. Das erreicht man durch Verwendung geeigneter Materialpaarungen der Führungsbahnwerkstoffe. Das Ruckgleiten wird durch hohe Steifigkeit und Dämpfung im Vorschubsystem und in der Führung vermieden. Außerdem verbessern Bearbeitungsriefen, die quer zur Gleitrichtung liegen, die Gleiteigenschaft der Achsen [107].

Eine Verkürzung der Verfahrswege wird durch Optimierung der Bestückreihenfolge erzielt. Eine bewegliche Leiterplatte führt auch zu einer Minimierung der Abstände zur Abholpositionen. Es besteht aber bei einer bewegten Leiterplatte aufgrund der für hohe Bestückleistungen notwendigen Beschleunigungskräfte die Gefahr, dass bereits bestückte Bauelemente verrutschen. Gefährdet sind insbesondere zylindrische Bauformen sowie große oder schwere Bauelemente. Die Leiterplatte muss also beim Bestücken fixiert sein. Eine gute Lösung wäre, die Leiterplatte zum Beispiel in drei verschiedenen Stellungen zu fixieren. Jedes Mal werden nur die Bauelementen bestückt, die in der Nähe von der vorgesehenen Bestückposition auf der Leiterplatte liegen.

Um die Bestückleistung weiter zu erhöhen, können Bestückungssysteme eingesetzt werden, wie in der Maschinenvariante (Collect and Place), indem ein oder zwei Revolverköpfe die Bauelemente abholen und dann einzeln bestücken. Während der erste Revolverkopf die Bauelemente auf die Leiterplatte setzt, nimmt der andere Bauelemente auf. Durch die meist sehr kurzen Verfahrswege und die geringe Taktzeit für das Weiterdrehen des Kopfes werden sehr hohe Bestückleistungen erreicht. Wichtig bei diesen Maschinenkonzepten ist es, dass das dynamische Verhalten und die Wirkung der Störeinflüsse in einem ganzheitlichen Ansatz bei der Systementwicklung betrachtet werden.

#### 4.4.2 Maßnahmen zur Optimierung der Steuerungskonzepte

Die Optimierung der Steuerung entspricht einer Verbesserung der Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofile der Maschine, so dass weniger Schwingungen beim Verfahren der Achsen auftreten [106].

Wie in der Analyse der Messwerte zu sehen ist, vermindert eine Verringerung des Ruckkennwertes durch längere Beschleunigungsänderungszeiten die Schwingungsanregung. Bei höheren Beschleunigungsänderungszeiten erreicht man jedoch mit einer  $\sin^2$ -Ansteuerung trotz des höheren Ruckkennwertes eine gegenüber dem Beschleunigungstrapez verringerten Schwingungsanregung [112]. Dies deutet darauf hin, dass Knicke im Beschleunigungsverlauf, die einem Sprung in der Ruckfunktion entsprechen, einen gewissen negativen Einfluss auf das Schwingungsverhalten des mechanischen Systems haben. Solche Knicke gibt es bei der  $\sin^2$ -Ansteuerung wegen der hier immer tangentialen Übergänge zwischen den Beschleunigungsabschnitten nicht.

Neben der stetigen Bahnbeschleunigungsführung ist zur Reduzierung der Schwingungsanregung durch steuerungsseitige Maßnahmen unbedingt eine Bahnkorrektur bzw. Führungsgrößenglättung an nicht krümmungsstetigen Übergängen notwendig. Naheliegend ist deshalb die Verwendung der in den numerischen Steuerungen implementierten Splinefunktion für die Eckenglättung [107]. Ein Spline muss dabei so zwischen zwei Bahnelemente eingefügt werden, dass die Krümmung und damit die notwendige Radialbeschleunigung an jeder Stelle stetig ist. Die praktischen Tests bestätigen die bereits aus den Simulationsergebnissen erkennbaren grundlegenden Vorzüge der Verwendung ruckarmer Bewegungsverläufe bezüglich einer Schwingungsanregung des Systems und einer erreichbaren Konturtreue in den Beschleunigungsphasen. Dabei lässt sich die durch sanfte Beschleunigungsänderungen zunächst ergebende höhere Bearbeitungszeit in vielen Fällen durch eine höhere Maximalbeschleunigung ausgleichen.

Schließlich kann man also weniger Schwingungen einerseits durch Verbesserung der Antriebe (leistungsfähiger Motoren, Leichtbaukonstruktionen, Wegfall von Übertragungsgliedern zum Beispiel bei Direktantrieben) erreichen. Andererseits lässt sich die maximale Leistung eines Antriebs nur mit optimaler Steuerung ausnutzen. Das beschriebene Steuerungsverfahren bringt insbesondere dort Vorteile, wo hochdynamische Regler-/Antriebssysteme mit Geschwindigkeits-/Momentenvorsteuerung zum Einsatz kommen [76].

### 4.4.3 Konzepte für die Maschinenregelung

Bei der Ausregelung von mechanischen Strukturschwingungen zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens gehen nahezu alle bisher entwickelten Regelungskonzepte davon aus, diese Schwingungen ausschließlich über die Maschinenantriebe auszuregulieren [115]. Diese Regelungsphilosophie ist jedoch für hochgenaue und schnelle Positionieraufgaben kaum anwendbar, da die dynamische Bandbegrenzung konventioneller Antriebsmotoren die Beeinflussung hochfrequenter Schwingungen verhindert.

Speziell für die untersuchte Bestückmaschine wird ein PI Regler verwendet, deren Parameter von Anfang an festgelegt sind (In diesem Fall durch die Widerstände und Kapazitäten, die sich auf der Servokarte befinden). Aus den durchgeführten Messungen auf der Maschine konnte festgestellt werden, dass die Servosysteme nicht alle Abweichungen ausregeln konnten. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die Regelparameter nicht für den gesamten Arbeitsbereich der Maschine optimiert sind. Deshalb ist es notwendig, hochdynamische Regelungskonzepte für Bestückungssysteme einzusetzen, um den Forderungen nach hoher Bestückleistung und -genauigkeit zu genügen.

Die stabilsten und dynamischsten Regler sind die Regler, bei denen abhängig von der Ist-Position, von der gewünschten Sollposition und von der zum Erreichen der Sollposition benötigten Zeit ein neuer Regelfaktor berechnet wird (Bild 43).

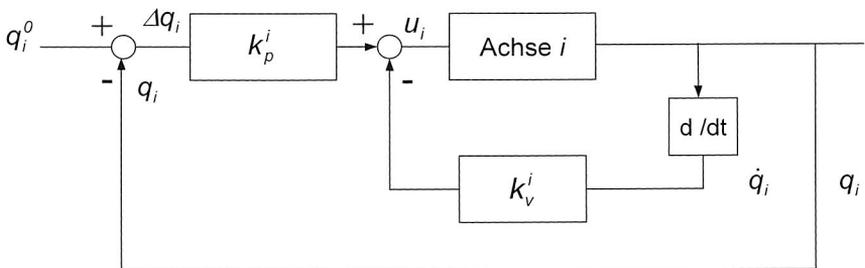


Bild 43: Hochdynamische Regelungskonzepte mit variablen Parametern für schnelle Verfahrbewegungen und hohe Positioniergenauigkeit

Dabei entspricht  $\dot{q}_i$  der momentanen Geschwindigkeit und  $q_i$  der momentanen Position einer Achse  $i$ .  $u_i$  ist das Stellsignal, das die Achse zur Bewegung bringt.  $q_i^0$  ist die Sollposition der Achse.

Die Regelparameter sind variabel und werden an die Strecke angepasst und immer neu berechnet. Dadurch wird auch eine gewünschte Dynamik erreicht. Die Abklingzeiten, also wie schnell die Sollpositionen erreicht werden sollen, können auch verkürzt werden [105]. Da die Regelstrecke des untersuchten Bestückungssystems nicht linear ist, muss eine Linearisierung in der Umgebung eines bekannten Arbeitspunkts durchgeführt werden, an dem die Strecke stetig und differenzierbar ist. Dabei wird deutlich, dass eine der Hauptschwierigkeiten bereits im Vorfeld des eigentlichen Reglerentwurfs liegt: Die Erstellung eines möglichst genauen mathematischen Modells der Maschine, insbesondere die Erfassung der richtigen Systemordnung.

Die beiden variablen Verstärkungen produzieren eine Regelung, die das genaue Erreichen einer Zielposition sichert (Point to Point Control). Abweichungen während der Fahrt können dabei stattfinden. Sie werden am Ende der Bewegung beim Erreichen der Bestückposition ausgeregelt.

Es besteht aber auch die Möglichkeit, während der Bewegung eine Regelung über die Zeit durchzuführen. Dabei wird das genaue Verfolgen der Verfahrkurve erreicht (Trajektorie Tracking). Für diesen Zweck wird das Servosystem mit dem gewünschten Stellsignal  $u_i^0$  eingespeist. Es berechnet sich aus der gewünschten Sollbeschleunigung  $\ddot{q}_i^0(t)$ , der Sollgeschwindigkeit  $\dot{q}_i^0(t)$  und der Sollposition  $q_i^0(t)$  der Achse  $i$  (Bild 44).

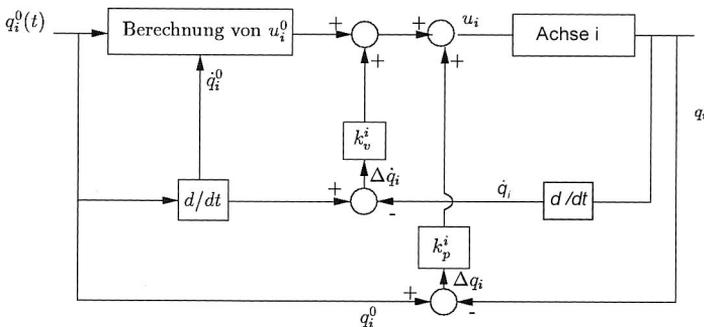


Bild 44: Schematische Darstellung des Konzeptes für das Servosystem für das Verfolgen der Verfahrkurven

Für jede Achse kommt dann ein solches Servosystem zum Einsatz. Bei der Realisierung einer solchen Regelung muss die Komplexität der Berechnung der Parameter in Kauf genommen werden.

Ein Mikroprozessor oder ein digitaler Rechner kann diese Aufgabe übernehmen, so dass die Realisierung möglich wird. Zusätzlich wird bei einer ersten Kalibrierfahrt der Maschine durch eine definierte Anregung die Übertragungsfunktion des gesamten Systems experimentell ermittelt. So lässt sich eine Regelungsstruktur aufbauen, die verglichen mit einem Standard Regelungskonzept höhere Genauigkeiten ermöglicht [76]. Der Prozessor verarbeitet die Sensorsignale, berechnet dadurch die Regelparаметer nach dem gegebenen Regelalgorithmus, führt eine Koordinatentransformation durch und berechnet daraus die nötige Stellgröße. Zur Leistungssteigerung bzw. zur Kostenreduzierung können rechenaufwendige Funktionen auf spezielle Hardwarebausteine verlagert werden [54].

Ein solches Konzept wurde im Rahmen des Forschungsverbunds Mikrosystemtechnik Erlangen-München-Passau (FORMIKROSYS) entwickelt (siehe Kapitel 3.3.2). Dabei wird eine Mikropositioniereinrichtung (MPE) als Ausgleichsmodul zur aktiven Kompensation von Bahnabweichungen und Positionierfehlern realisiert. Die Funktionalität der MPE beinhaltet die optosensorische Erfassung der Abweichungen und die Erzeugung einer entgegen gerichteten Korrekturbewegung über einen Regelalgorithmus. Es wird ein lernfähiger Algorithmus angestrebt, um zeitliche Veränderungen des Maschinenverhaltens kompensieren zu können. Die hohen Anforderungen an die Rechengeschwindigkeit werden durch ein Signalverarbeitungssystem erfüllt, das aus mehreren digitalen Signalprozessoren besteht [56].

## 5 Thermisches Verhalten von Bestückungssystemen

Bei konventionellen Werkzeugmaschinen wurde die Bedeutung des thermischen Verhaltens auf die Maschinenfähigkeit bereits vor Jahren erkannt. Zahlreiche Forschungsarbeiten haben auf diesem Gebiet dazu beigetragen, die Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen bedeutsam zu verbessern [7]. Basierend auf diesen Arbeiten werden im folgenden die thermischen Einflüsse auf die Bestückungssysteme vorgestellt.

Thermische Einflüsse aufgrund von äußeren Wärmequellen oder Temperaturschwankungen innerer Wärmequellen führen zu Deformationen der Maschinenstruktur [35]. Diese Verformung beeinflusst die Positioniergenauigkeit und damit die Bestückgenauigkeit der Bestückungssysteme.

In diesem Kapitel werden systematische Untersuchungen des thermischen Verhaltens von Bestückungssystemen vorgestellt. Aufbauend darauf gilt es, die Positioniergenauigkeit durch Senkung der thermischen Störungen zu verbessern. Um thermisch bedingte Störeinflüsse auf die Positioniergenauigkeit von Bestückungssystemen zu verringern, sollen die Ursachen und die Auswirkungen dieser Störfaktoren durch konstruktive bzw. kompensatorische Maßnahmen verringert werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen des thermischen Verhaltens verschiedener Maschinenkonzepte sollen in die Modellierung und Simulation der Temperatur-Verformung einbezogen werden. Dabei wird der Einfluss der thermischen Verformung kritischer Komponenten untersucht. Mit Hilfe der Simulationstechnik können konstruktive Maßnahmen zur Verringerung der thermischen Störeinflüsse entwickelt und überprüft werden [46].

### 5.1 Stand der Forschung

#### 5.1.1 Thermische Einflüsse auf die Montagegenauigkeit von Bestückautomaten

Die sich einstellende, zumeist ungleichmäßige Temperaturverteilung wird in erster Linie durch die Wirkung innerer Wärmequellen bestimmt. Die hohe Dynamik eines Bestückungsprozesses implementiert eine hohe Achsmotorenbeanspruchung. Je nach Motorenqualität sind diese mit einem schwankenden Anteil an Verlustleistung

behaftet, die aufgrund des elektrischen Widerstands in Form von Erwärmung der Ankerwicklungen entsteht.

$$P_V = I_{\text{eff}}^2 \cdot R \quad (14) [89]$$

$I_{\text{eff}}$ : Effektiver Ankerstrom

$P_V$ : Verlustleistung

Bei Industrierobotern der Portalbauweise sind diese als wesentliche innere Wärmequelle anzusehen.

Neben den inneren Wärmequellen ist der Einfluss der Umgebung von besonderer Bedeutung. Die Varianzbreite der äußeren prozessrelevanten Randbedingungen ergibt sich in erster Linie durch Schwankungen der Umgebungstemperatur, Wärmestrahlenbelastung durch direkte Sonneneinstrahlung, und i. A. auch durch thermische Belastung benachbarter Maschinen.

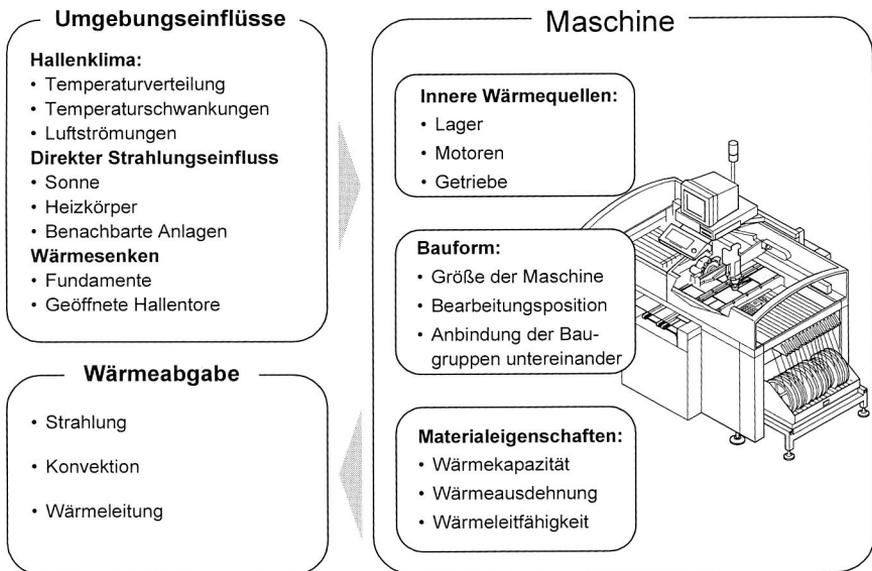


Bild 45: Thermische Störeinflüsse auf die Arbeitsgenauigkeit eines Bestückungssystems

Aufgrund der angesprochenen Wärmequellen bilden sich in den Bauteilen Temperaturfelder aus, deren örtliche und zeitliche Größen von den geometrischen Abmessungen, der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmespeicherkapazität und von den Wärme-

übertragungsbedingungen an die Umgebung abhängen [91]. In Abhängigkeit dieses vorhandenen Temperaturfeldes entstehen thermische Verformungen des Bauteils. Die Summe aller Verformungen der an der Deformationskette beteiligten Bauteile ergibt die Verlagerung an der Wirkstelle zwischen Werkstück und Werkzeug und somit den der Fertigungsgenauigkeit entgegenwirkenden Versatz.

Das thermische Verhalten von Industrierobotern kann durch die Relativbewegung zwischen Handhabungswerkzeug und Sollposition beschrieben werden [95]. Diese Verlagerungen werden durch alle in der thermischen Wirkungskette liegenden Bauteile und deren thermische Verformungseigenschaften bestimmt [107].

### **5.1.2 Einflüsse der thermischen Verformung auf den Bestückprozess**

Die Leistungsmerkmale von Bestückungssystemen werden durch zahlreiche Einflüsse bestimmt. Ein relevanter Einflussfaktor ist das thermische Verhalten, das mit zunehmenden Anforderungen an die Bestückgenauigkeit immer mehr an Bedeutung gewinnt. Aufgrund der engen Fügetoleranzen bei der Montage elektronischer Bauelemente, wie z. B. Flip-Chip und CSP, hat auch die externe Wärmestrahlung (z.B. Sonneneinstrahlung, Umgebungstemperatur) einen Einfluss auf die Temperaturänderung in der Maschinenstruktur. Die daraus resultierende Temperaturverteilung hängt vom Betriebszustand, Maschinenaufbau und der Wärmeleitfähigkeit ab. Diese thermischen Störungsfaktoren führen zur Verformung der Maschinenstruktur und rufen unterschiedliche Effekte hervor: Zum einen ist dies die Verlagerung des Bestückkopfs von der in kaltem Zustand eingegebenen Sollpose und zum anderen die Verlagerung der zu bestückenden Leiterplatte von der Anfangslage. Diese einzelnen Abweichungen summieren sich zu einer Gesamtverlagerung der offline-programmierten Bestückpositionen von der Soll-Position auf. Durch das temperaturbedingte Positionierverhalten wird die Bestückgenauigkeit erheblich beeinträchtigt.

Eine höhere Montagegenauigkeit von Bestückungssystemen erhöht neben der Qualität der gefertigten Baugruppen auch die Verfügbarkeit der Fertigungslinien und ermöglicht die Montage elektronischer Bauelemente mit feineren Strukturen wie zum Beispiel die Nacktchipmontage, die eine erhöhte Anforderung an die Bestückssysteme hinsichtlich der Genauigkeit stellt. Charakterisierend für diese Montageaufgabe ist die erforderliche hohe laterale Bestückgenauigkeit. Um diesen Ansprüchen zu genügen, kommen hauptsächlich Präzisionsbestückungssysteme zum Einsatz. Aufgrund des Maschinenaufbaus und der niedrigen Verfahrensgeschwindigkeit sind Präzisionsbestückungssysteme sehr stabil. Dabei kann eine Bestückgenauigkeit von 12  $\mu\text{m}$  bei einer Bestückleistung von 1500 BE/Stunde erreicht werden. Der wirtschaftli-

Der Einsatz von Bestückungssystemen wird nicht nur von deren Zuverlässigkeit und Arbeitsgenauigkeit sondern hauptsächlich von deren erzielter Mengenleistung bestimmt. Deshalb werden in der Elektronikproduktion hauptsächlich Bestückungssysteme mit einer höheren Bestückleistung größer als 10000 BE/Stunde eingesetzt, die über schnellere Antriebssysteme verfügen. Dieses hat zur Folge, dass die thermischen Störeinflüsse deutlich höher liegen als bei Standard Pick&Place-Bestückungssystemen.

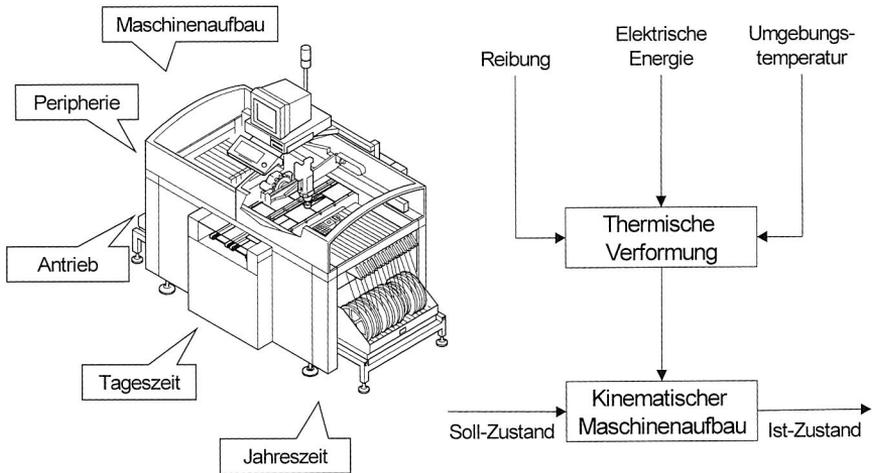


Bild 46: Wirkende Einflussfaktoren auf das thermische Verhalten und die thermische Wirkungskette eines Bestückungssystems

Die Auswirkungen der thermischen Wirkungskette auf die Maschinengenauigkeit ist prinzipiell schwieriger zu erfassen als die im Kraftfluss liegende Deformationskette bei statischer und dynamischer Belastung. Im Gegensatz zu den Kräften, die durch die hohen Beschleunigungen auf den Bestückprozess wirken, können Wärmequellen an beliebigen Stellen auftreten. Daraus ergibt sich, dass sich die bei der Belastung durch Prozesskräfte auftretenden Einzelverformungen aller im Kraftfluss liegenden Bauteile zur Gesamtverlagerung aufsummieren. Thermisch bedingte Verformungen können sich demgegenüber auch gegenseitig aufheben. Durch die gezielte Anordnung der Wärmequellen kann der Einfluss der thermischen Verformung auf die Maschinengenauigkeit gegenseitig kompensiert werden. Dieser Effekt kann im Konstruktionsprozess auch bewusst ausgenutzt werden, um eine thermosymmetrische Konstruktion des Gesamtsystems zu erzielen [107].

### 5.1.3 Ansätze zur Optimierung der Arbeitsgenauigkeit

In einer Vielzahl von Veröffentlichungen wurden die verschiedenen Systemkomponenten von Werkzeugmaschinen auf das thermische Verhalten analysiert und optimiert. Nach [40] lassen sich die Arbeiten auf diesem Gebiet in drei Schwerpunkte unterteilen:

- experimentelle Untersuchungen des thermischen Verhaltens und dessen Ursachen,
- Modellbildung und Simulation der thermischen Einflüsse sowie
- Entwicklung und Erprobung von Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Verhaltens.



Bild 47: Passive und aktive Kompensationsverfahren zur Optimierung des Maschinenverhaltens unter thermischen Belastungen [113]

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind in der Regel nicht allgemeingültig, da die Ergebnisse nur für eine bestimmte Maschinenart geeignet sind. Dies hat dazu geführt, dass für jeden Werkzeugmaschinenaufbau eine Reihe von Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet veröffentlicht wurde. Die umfangreichen Untersuchungen ermöglichten eine deutliche Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen.

Dabei wurden passive und aktive Kompensationsverfahren entwickelt, um die thermischen Einflüsse auf die Arbeitsgenauigkeit zu verringern oder zu vermeiden. Unter der passiven Kompensation versteht man Maßnahmen, die in der Konstruktionsphase einer Werkzeugmaschine ergriffen werden, wie z. B. Wahl der Werkstoffe, thermisch

stabile Gestaltung und Auslegung der Maschinenkomponenten. Diese Maßnahmen werden im Konstruktionsprozess der Maschine eingeleitet. Durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen können die einzelnen Konstruktionsvarianten hinsichtlich des thermischen Verhaltens untersucht werden. Auf dieser Basis werden Schwachstellen im Vorfeld erkannt und systematisch analysiert. Die aktive Kompensation ist die zweite Stufe der Maschinenoptimierung hinsichtlich des thermischen Verhaltens. Sie zielt auf Kompensationsmaßnahmen durch steuerungs- und regelungstechnische Ansätze sowie die gezielte Temperierung der Maschinen.

## **5.2 Messtechnische Ermittlung der thermoelastischen Verformung von Bestückungssystemen**

### **5.2.1 Methode zur Erfassung des thermischen Verhaltens**

*Messverfahren und Versuchsaufbau:*

Ziel des Versuchsaufbaus ist es, den relativen Versatz an der Pipettenspitze während des Bestückprozesses zu messen, ohne in den Steuerungsablauf des Bestückungssystems einzugreifen. Weiterhin wird angestrebt, den Aufbau in der Art flexibel zu gestalten, dass er leicht auf andere Bestückungssysteme übertragbar ist.

Die Hardwarekomponenten des Versuchsaufbaus ergeben sich wie folgt:

- Temperatursensoren zur Erfassung der Temperaturverteilung innerhalb des Automaten,
- Lasertriangulationssensoren zur Erfassung des Bestückversatzes an der Pipettenspitze,
- Externer Rechner zur Online-Erfassung der Temperatur- und Positionsdaten,
- GEM-Schnittstelle zur Erfassung der Daten der Bildverarbeitung des Systems.

*Eingesetzte Temperatursensoren:*

Der Temperaturverlauf der Gesamtmaschinenerwärmung soll ebenso erfasst werden wie die Temperaturverteilung über dem Maschinenportal. Als zu berücksichtigende Randbedingungen sind die Außentemperatur sowie die Innenlufttemperatur der Maschine ebenfalls von Bedeutung. Nach [89] ist die Wahl geeigneter Temperaturmesspunkte ein zentraler Diskussionspunkt. Danach kann die mittlere Temperatur eines balkenförmigen Körpers nicht mit Hilfe nur eines Temperatursensors genau ermittelt werden, da in den verschiedenen Phasen der Erwärmung bzw. Abkühlung die Stelle der mittleren Temperatur wandert. Es müssen deshalb mindestens zwei

Messstellen pro Bauteil untersucht werden, wobei wenigstens eine in der Nähe der inneren Wärmequelle liegen sollte, um die Vorgänge bei der Wärmeleitung zu erfassen [89].

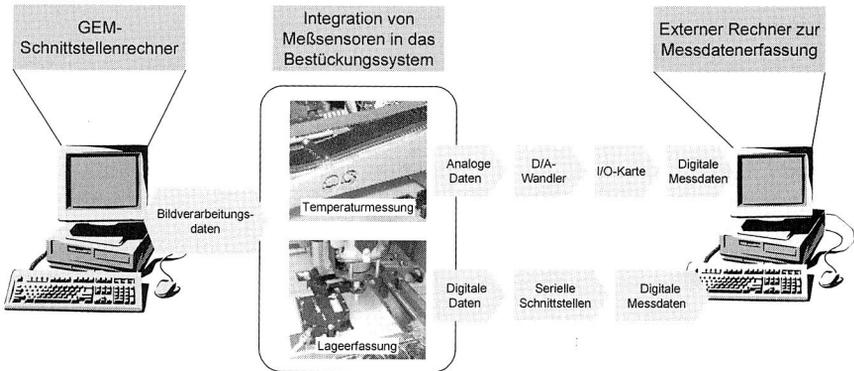


Bild 48: *Rechnergestützte Ermittlung der Temperatur- und Positionsdaten bei Bestückungssystemen*

In dem hier vorliegenden Fall werden die inneren Wärmequellen durch den fest am Portal montierten y-Achsmotor sowie durch den sich auf der beweglichen Mittelschiene befindlichen x-Achsmotor dargestellt. Gemäß den o.g. Richtlinien werden die Temperatursensoren in deren Umgebung konzentriert angebracht, währenddessen sie über das weitere Maschinenportal bzw. die weitere Mittelschiene mit konstanten Abständen fixiert werden. Dies soll v.a. die spätere Übernahme der Messdaten in ein geeignetes Simulationsprogramm erleichtern.

#### *Lasertriangulationssensoren zur Lageerfassung*

Um ein berührungsfreies Messen zu ermöglichen, wurde sich für ein optisches Messsystem entschieden. Die relativ einfache Handhabung sowie die hohe Auflösung sprach neben den verschiedenen anderen optischen Systemen, wie beispielsweise dem faseroptischer Sensor (fiber optic sensor), für die Anwendung eines Lasertriangulationssensors. Da pro Sensor jedoch nur in einer Dimension gemessen werden kann, der Bestückversatz jedoch in zweidimensionaler Ebene gemessen werden soll, sind zwei Sensoren zur Erfassung der x-y-Position notwendig.

Die Funktionsweise eines Triangulationssensors besteht darin, die Lage eines an der Messfläche diffus reflektierenden Lichtpunktes zu vermessen und daraus auf den Abstand der Messfläche zu schließen. Hierzu wird mit einer Laserdiode und entsprechender Optik ein Lichtpunkt auf der Messobjektfläche erzeugt. Über eine zweite

Optik wird das Bild des Punktes auf ein eindimensionales Photoarray projiziert. Das Ausgangssignal ist wiederum vom Abbildungsort des Bildes abhängig.

Das beschriebene Verfahren ist v.a. empfindlich bezüglich der Oberfläche des zu vermessenden Objektes. So führen insbesondere folgende Gründe zum Versagen des Verfahrens:

- Die Messobjektfläche absorbiert den größten Teil des Laserlichtes, so dass die Intensität für eine Betrachtung des Bildes zu gering ist.
- Die Messobjektfläche ist stark spiegelnd. Dies bewirkt, dass der Laserstrahl entweder nahezu vollständig an der Empfangsoptik vorbei reflektiert wird und das diffuse Restbild nicht registrierbar ist, oder der genau in die Empfangsoptik reflektierte Strahl die Empfangselektronik überstreut.

Um dem entgegenzuwirken wurde eine Pipette mit verbesserten Reflektionseigenschaften extra angefertigt.

#### *GEM-Schnittstelle zur Betriebsdatenerfassung:*

An dem zu untersuchenden Bestücksystem ist bereits eine GEM-Schnittstelle integriert, welche neben einer Vielzahl von Prozessdaten auch die durch das Bildverarbeitungssystem entstandenen Daten protokolliert. Auf Definition und Aufgabe dieser Hardwarekomponente sei im folgenden kurz eingegangen.

Es handelt sich hierbei um einen von der Halbleiterindustrie definierten Standard (Semiconductor Equipment Communication Standard – SECS) zur Kommunikation zwischen einem Hostcomputer und einem Gastrechner. Die Hauptaufgaben bestehen in der Übertragung von Produktionsdaten, Steuerung bzw. Dokumentation der Produktion und Steuerung bzw. Dokumentation der Prozessparameter. Dies dient zur Fertigungstransparenz und lässt sich kostengünstig in bestehende Fertigungslinien integrieren. Die GEM-Tätigkeitsfelder lassen sich untergliedern in

#### Dynamic Event Report Configuration

- Definition einer Gruppe von mitzuteilenden Ereignissen
- Gruppe vom Anwender jederzeit konfigurierbar

#### Process Programm Management

- Transfer und Verwaltung von Ablaufprogrammen

#### Trace Data Collection

- Periodisches Sammeln von Maschinenwerten

#### Spooling

- Sicherungsmechanismus bei Kommunikationsstörungen

- Informationssicherung
- Kommunikationsresynchronisation
- Automatisches Überspielen von Daten.

Der entscheidende Vorteil von GEM gegenüber dem Nutzen herkömmlicher Schnittstellen besteht zum einen in der Standardisierung, zum anderen im prozessunabhängigen Datenabgreifen. Die GEM-Steckkarten arbeiten unabhängig vom restlichen CPU-System und behindern bzw. verzögern somit den Prozess als solchen nicht. Man kann hierbei von einem „Abhören“ des Prozesses seitens der GEM-Schnittstelle sprechen.

In diesem speziellen Fall interessiert der Versatz zwischen Soll- und Ist-Position, den das Bildverarbeitungssystem durch Vermessen der sich auf der Leiterplatte befindlichen Passmarken ermittelt.

Auf der 450x600 mm großen Leiterplatte sind insgesamt sechs Messpunkte vorgesehen, so dass eine Verteilung des Bestückversatzes auf der Leiterplatte ausgemessen werden kann. Pro Leiterplattenausschnitt kann eine der sechs Bestückpositionen vermessen werden (Bild 49).

Ein in den Linienrechner geladenes Bestückprogramm fährt über den Arbeitsbereich gleichmäßig verteilte Punkte an. Je nach notwendiger Messhäufigkeit wird der 1mm<sup>2</sup> große Messbereich der Triangulationssensoren angefahren, so dass die Messung automatisch gestartet wird.

## 5.2.2 Erfassung der Temperaturverteilung im Bestückungssystem

In diesem Arbeitspunkt soll die Temperaturverteilung über der Maschinenstruktur mit Hilfe geeigneter Sensoren gemessen werden. Stark beanspruchte Systemkomponenten wie z. B. Antriebe, Führungen und Lager, unterliegen im Betrieb thermischen Schwankungen. Das damit verbundene Ausdehnungsverhalten beeinflusst dabei direkt die Genauigkeit der Positionierachsen. In den Untersuchungen sollen systematische Abhängigkeiten erkannt und aufgezeigt werden. Diese Ergebnisse werden in die Systementwicklung weiterer Bestückkomponenten einfließen.

Die Untersuchungsergebnisse zur thermischen Belastung verdeutlichen den Einfluss des thermoelastischen Maschinenverhaltens auf die Bestückgenauigkeit. Dieser resultiert vorwiegend aus der veränderlichen Systemkonfiguration im Betrieb. Möglichkeiten zur Fehlerkompensation sollen im Rahmen einer systematischen Analyse erarbeitet werden. Aus diesen Ergebnissen soll ein Anforderungsprofil für Bestückungssysteme definiert werden. Diese Kenntnisse sind bei der Entwicklung von Systemkomponenten für die Präzisionsbestückung von besonderer Bedeutung.

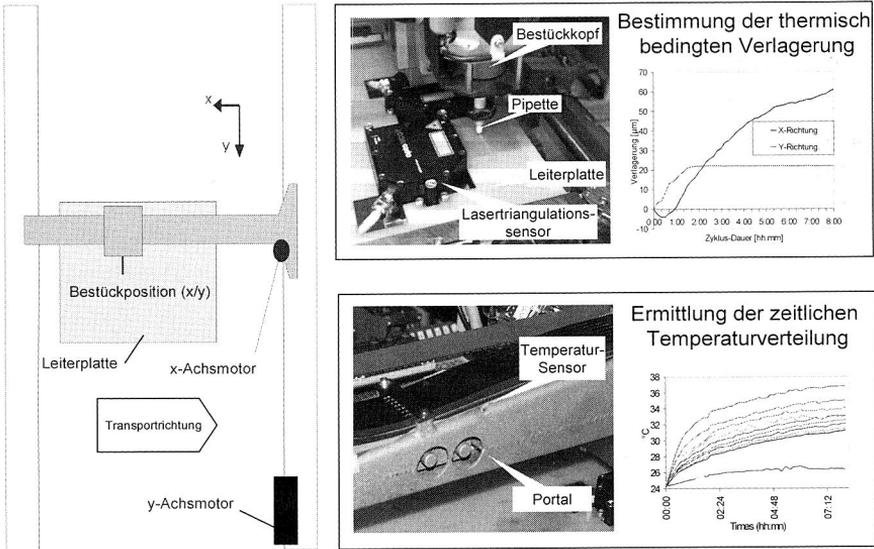


Bild 49: Konzept zur Erfassung der thermoelastischen Drift und der Temperaturverteilung auf dem Bestückungssystem

Die Temperaturmesswerte der Sensoren werden vor Beginn der Messung aufeinander abgeglichen, d.h. jedem einzelnen Sensor wird der Mittelwert aus allen Temperaturmesswerten zugewiesen. Dies begründet sich durch die Annahme, dass innerhalb des Bestückautomaten vor Beginn der Messungen ein homogenes Temperaturfeld vorliegt.

Die Darstellung der Messungen wird in den Bereich des Portals sowie des Maschinengestells unterteilt.

Der Erwärmungs- bzw. Abkühlungsverlauf der Temperaturmesspunkte zeigt eine charakteristische exponentielle Annäherung an eine bestimmte Beharrungstemperatur mit, je nach Sensorort, unterschiedlichen Parametern. Des weiteren sind folgende weiteren Merkmalen des Temperaturverlaufes erkennbar:

Das zackenförmige Temperaturprofil innerhalb des Erwärmungsbereiches lässt sich durch den zeitlich schwankenden Wärmeübergangskoeffizienten des Maschinenportals erklären. Da sich diese, bedingt durch den Bestückprozess mit hoher Geschwindigkeit auf dem Maschinenportal bewegt, kommt es zu Verwirbelungen im Bereich der Oberfläche, welche eine unterschiedliche Temperaturabgabe an die Umgebungsluft hervorrufen. Je nach Lage der Temperatursensoren ist dieser Effekt

unterschiedlich ausgeprägt. Demzufolge ist dieses Verhalten im Abkühlungsbereich der Maschine nicht mehr erkennbar.

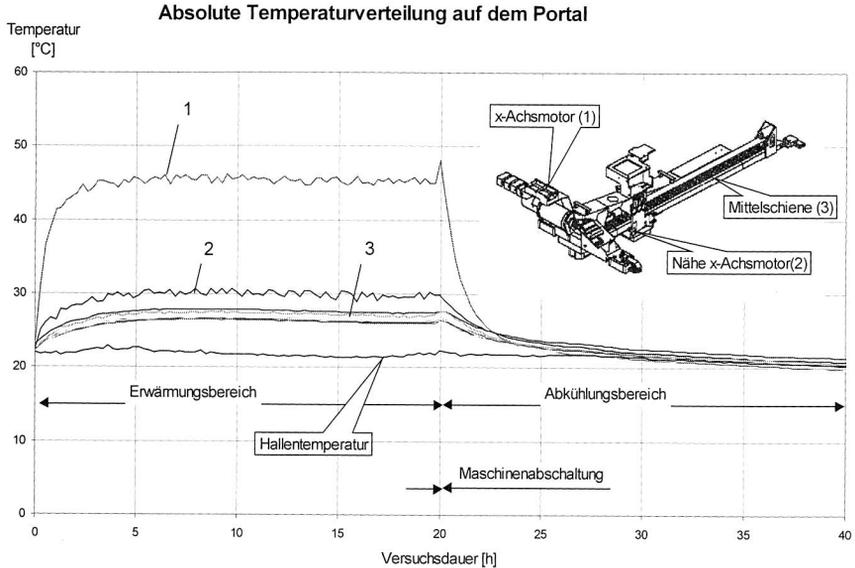
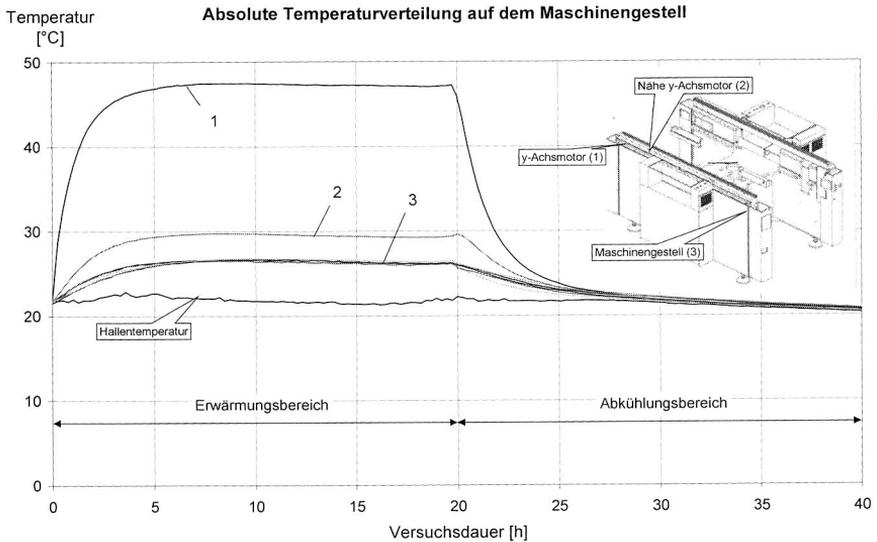


Bild 50: Temperaturverhalten des Maschinenportals im Dauerbetrieb und die Abkühlungsphase nach dem Abschalten der Maschine

Nachdem das Bestückungssystem abgeschaltet wurde, ist bei einigen Sensoren eine leichte Temperaturerhöhung von bis zu 3 K erkennbar. Dies erklärt sich dadurch, dass dem Abschalten der Maschine der Einfluss der erzwungenen Konvektion als Wärmesenke und nur noch die freie Konvektion ist wirksam ist. In Bild 50 ist der Temperaturverlauf nach dem Abschalten dargestellt.

Die sich ändernde Außentemperatur wirkt sich ebenso auf die Temperaturverläufe aus. Geht man vereinfacht von einem idealen Wärmeübergang zwischen Außentemperatur und Bestückungssystem aus, so kann dieser Effekt eliminiert werden.

In Bild 50 ist eine maximale Erwärmung von  $\Delta T_{max, Betrieb} = 24,5 \text{ K}$  zu erkennen. Diese repräsentiert den maximalen zeitlichen Temperaturgradienten während des eigentlichen Bestückprozesses am Achsmotor, welcher aus o.g. Gründen etwas kleiner ist als der tatsächliche maximale Temperaturgradient. Die übrigen Temperatursensoren ergeben einen Mittelwert für die Erwärmung des Maschinenportals von  $\Delta T_{mittel} = 5,6 \text{ K}$ .



**Bild 51:** Temperaturverhalten des Maschinengestells im Dauerbetrieb und Abkühlungsphase nach dem Abschalten der Maschine

Bild 51 zeigt die Temperaturverteilung auf dem Maschinengestell. Im Bild ist auch die Lage der auf dem Gestell angebrachten Temperatursensoren zu sehen. Die Temperaturmessung am Maschinengestell ergibt ein ähnliches Bild wie der Temperaturverlauf auf dem Portal. Der y-Achsmotor erzeugt allerdings etwas mehr Prozesswärme als der x-Achsmotor. Die wesentlichen Unterschiede zum Graphen der Mittelschienenentemperaturen ergeben bzw. erklären sich wie folgt:

#### *Stetiger, glatter Temperaturverlauf*

Die hier dargestellten Temperaturverläufe wurden von Temperatursensoren aufgenommen, die auf dem statischen Teil des Bestückautomaten fixiert wurden. Ein oben beschriebener Kühleffekt durch Luftverwirbelungen ist somit nur im geringen Maße zu erwarten.

#### *Geringere Varianz der Temperaturwerte der Sensoren*

Abgesehen von den erhöhten Temperaturverläufen der in Nähe des Achsmotors angebrachten Sensoren, sind die gemessenen Temperaturdaten nahezu identisch mit den in Bild 50. Die Messungen wurden unter den gleichen Randbedingungen wie beim Maschinenportal durchgeführt.

Nach Elimination des Einflusses der Außentemperatur lässt sich aus dem Graphen ein  $\Delta T_{\max}$  von 25,6 K sowie ein  $\Delta T_{\text{mittel}}$  von 5,2 K herauslesen. Im Vergleich zu den Temperaturdaten der Maschinenportal ist ein leicht unterschiedlicher Wert für die Maximaltemperatur zu vermerken, wohingegen die mittlere Temperatur des Maschinenportals mit der des Maschinengestells nahezu übereinstimmt.

Die Temperaturmessungen unter den beschriebenen Randbedingungen zeigen einen hohen Temperaturgradienten am Achsmotor des Maschinenportals auf. Ein Temperatursensor ist in der Nähe dieser Temperaturquelle angebracht, während die anderen Sensoren in gleichmäßigen Abständen über das Portal verteilt sind. Die Achsmotoren sind aufgrund der Messergebnisse als einzige wesentlichen Wärmequellen zu betrachten. Von Interesse ist nunmehr die Frage, ob die Gesamtmaschinenerwärmung aus einem Festkörperwärmeübergang zwischen Motor und Maschinenportal bzw. Maschinenportal resultiert, oder aber ob die homogene Erwärmung der Maschine durch die Erwärmung der Luft des Maschineninneren hervorgerufen wird. Um diese Frage zu klären, soll der Wärmeübergang zwischen Motor und Maschinenportal anhand einer Thermokamera untersucht werden.

Um zu qualifizieren, inwiefern die lokalen Wärmequellen die Zulässigkeit des idealen Ein-Körper-Systems beeinflussen wird, eine Thermokamera zur Erfassung des Wärmeübergangs an den zu untersuchenden Stellen eingesetzt. Zur Aufnahme der Thermobilder wird das Thermovision900 System von AGEMA verwendet.

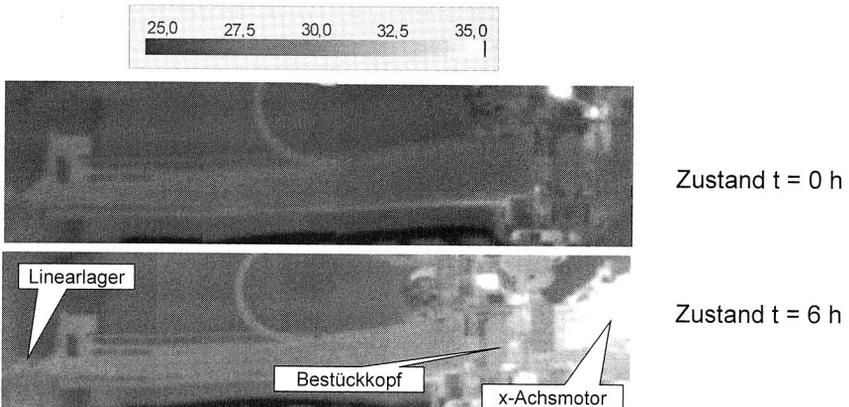


Bild 52: Aufnahmen des Kalt- und Warmzustandes beim Maschinenportal des Bestückungssystems mit der Thermokamera

In Bild 52 ist das Maschinenportal im Kaltzustand erkennbar. Mit dem Bestückautomaten im absoluten Kaltzustand wurde noch kein Bestückvorgang durchgeführt, die

Maschine ist angeschaltet und die Elektronik im Bestückkopf strahlt Wärme ab. Es ist jedoch erkennbar, dass noch keine Wärme auf den eigentlichen Träger übergegangen ist.

Man erkennt hier eine deutliche Temperaturerhöhung im Bereich der lokalen Temperaturquelle des x-Achsmotors. Des Weiteren ist eine leichte Erwärmung des Trägers feststellbar, welche von rechts nach links abnimmt. Die Aufnahmen wurden allerdings in zeitlicher Reihenfolge in dieser Richtung gemacht, weswegen ein Teil des Temperaturgefälles auf die schnelle Abkühlung der Umgebungsluft zurückgeführt werden muss.

Gemäß der aus den vorausgegangenen Messungen gewonnenen Daten ist eine stetige Temperaturerhöhung über den gesamten Körper mit einem hohen Temperaturgradienten in Nähe der lokalen Temperaturquelle zu erkennen.

### **5.2.3 Erfassung des thermisch bedingten Versatzes des Bestückkopfs**

Wie bereits aus Voruntersuchungen bekannt ist, besteht eine Korrelation zwischen der Bestückdauer sowie der Bestückgenauigkeit des untersuchten Bestückungssystems. Verschiedene äußere und innere Einflussquellen wirken sich auf die Maschinenfähigkeit des Systems aus. Der Genauigkeitsverlauf soll in diesem Abschnitt in Abhängigkeit seiner zeitlichen Verteilung erfasst und dokumentiert werden. Ziel dieser Messreihen soll es außerdem sein im weiteren die Frage zu klären, ob ein tatsächlicher Zusammenhang zwischen den dargestellten Einflussquellen und einer auftretenden Maschinendrift herzuleiten ist.

Vor diesem Hintergrund werden Messreihen unter verschiedenen Belastungsprofilen erstellt, wobei im wesentlichen hierbei zwischen Kurzzeit- und Langzeitversuchen unterschieden wird. Durch Deaktivierung des optischen Bildverarbeitungssystems soll des Weiteren untersucht werden, inwiefern das Bildverarbeitungssystem bei der Lageerkennung der Leiterplatte die thermische Drift berücksichtigt.

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden die Daten im Anschluss einer statistischen Betrachtung unterzogen. Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung und Positionsversatz aufgezeigt. Dieses bildet die Basis für die Entwicklung von Kompensationsverfahren.

#### *Streuung im Dauerversuch:*

Im folgenden Versuch wird mit Hilfe experimenteller Untersuchungen qualifiziert, wie sich die Positioniergenauigkeit des Bestückungssystems im Dauerbetrieb verhält.

Dabei wird die Verlagerung des Mittelpunktes des Bestückkopfs bezüglich der Leiterplatte messtechnisch erfasst. Zu diesem Zwecke wird das Bestückungssystem in völligem Kaltzustand hochgefahren, d.h. es soll gewährleistet sein, dass das Bestückungssystem wenigstens 10 Stunden außer Betrieb war.

Die erste Messung wird als Nullpunkt definiert, somit sind die erfassten Messwerte als Abweichung von der ersten Position zu verstehen. Bild 53 zeigt eine Verlagerung der Messwerte in der x- und y-Achse. Bei diesem Versuch wurde die Lage der Leiterplatte mit der Bildverarbeitung vor jeder Messung erfasst und die Messpose entsprechend neu berechnet. Trotzdem ist eine thermisch bedingte Verlagerung vor allem in der y-Achse am deutlichsten zu sehen und beträgt ca. 10  $\mu\text{m}$ . Insgesamt zeigt der Verlauf, dass sich die Bandbreite der Positionsabweichungen in den ersten sechs Stunden erhöht, und dann einen relativ stabilen Wert annimmt. Außerdem ist eine leichte Positionsdrift in positiver x-Richtung bzw. negativer y-Richtung erkennbar.

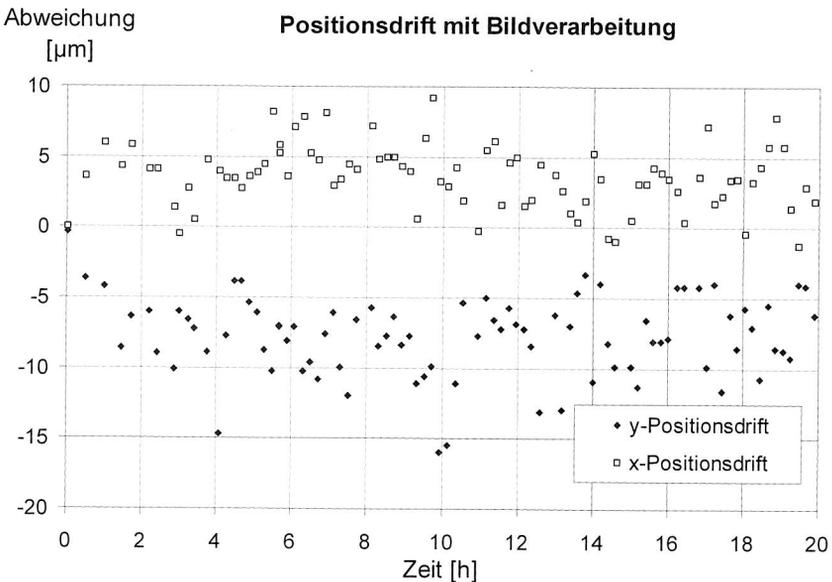


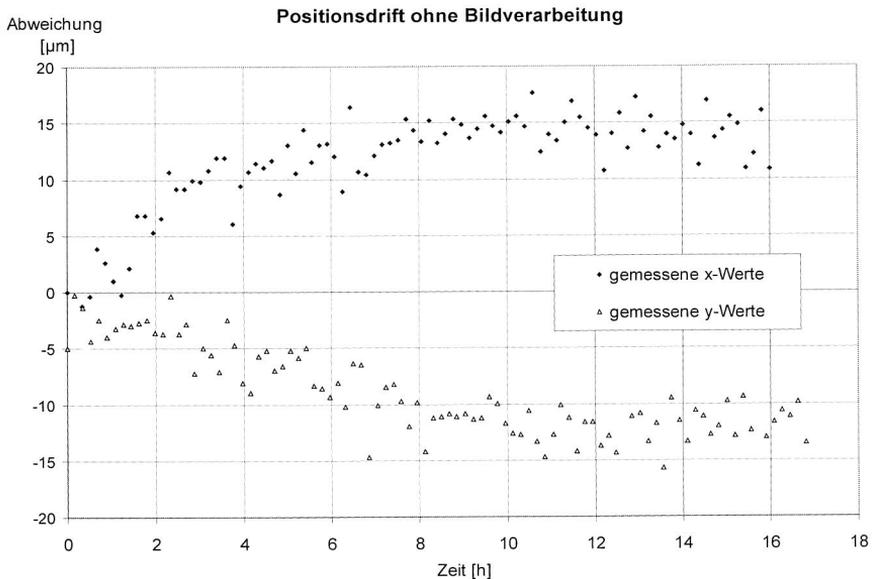
Bild 53: Thermische Positionsdrift des Bestückkopfs mit Leiterplattenlagererkennung

Da die Positionierachsen bei einem tatsächlichen Bestückvorgang vier verschiedene Positionen (Lagererkennung der Leiterplatte, Abholung des Bauelements, Lager-

kennung des Bauelements und Bestückung) anfahren, wird der Fehler durch die thermische Ausdehnung der Maschinenkomponenten wesentlich größer. Deshalb wird in weiteren Versuchen nur die Positioniergenauigkeit der Achsen betrachtet.

*Erfassung des Bestückversatzes ohne Einsatz des Bildverarbeitungssystems:*

Das untersuchte Bestückungssystem ist mit einem Bildverarbeitungssystem zur Lageerkennung der Leiterplatte ausgestattet. Dieses System wirkt der thermoelastischen Drift der Achsen teilweise entgegen. Im folgenden Versuch soll das Bildverarbeitungssystem ausgeschaltet werden, so dass thermisch bedingte Versatzfehler beim Positionieren ohne Einfluss der Bildverarbeitung erfasst werden können.



**Bild 54:** Thermisch bedingte Verlagerung in x- und y-Richtung zwischen Bestückposition und Leiterplatten

Die in Bild 54 dargestellte thermoelastische Drift bildet sich entsprechend der Orientierung der vorausgegangenen Messungen (Bild 53) mit Einsatz des Bildverarbeitungssystems aus, allerdings entsteht nach ca. acht Stunden ein Positioniersatz von ca. 15 µm in x- und 12 µm in y-Richtung. Der Verlauf der Messpunkte folgt jedoch ebenso der charakteristischen Erwärmungskurve wie die Ergebnisse unter Einsatz des Bildverarbeitungssystems.

*Untersuchung der Kompensation durch das Bildverarbeitungssystem:*

Den oben aufgeführten Untersuchungen sollen an dieser Stelle die Daten entgegengestellt werden, die das Bildverarbeitungssystem zur Lageerkennung der Leiterplatte generiert.

Nach jedem Programmdurchlauf und vor der Messung der Verlagerung zwischen der Pipette und Leiterplatte wird der Referenznullpunkt auf der Leiterplatte durch erneutes Vermessen durch das Bildverarbeitungssystem neu definiert. Das Bildverarbeitungssystem vermisst hierbei die relative Positionsveränderung und errechnet korrespondierend zu diesen Werten die Bestückpositionen, die das Achsensystem anfahren muss. Damit kann die thermoelastische Drift teilweise kompensiert werden. Diese Daten werden als Fiducial-Daten bezeichnet und können über die GEM-Schnittstelle erfasst werden.

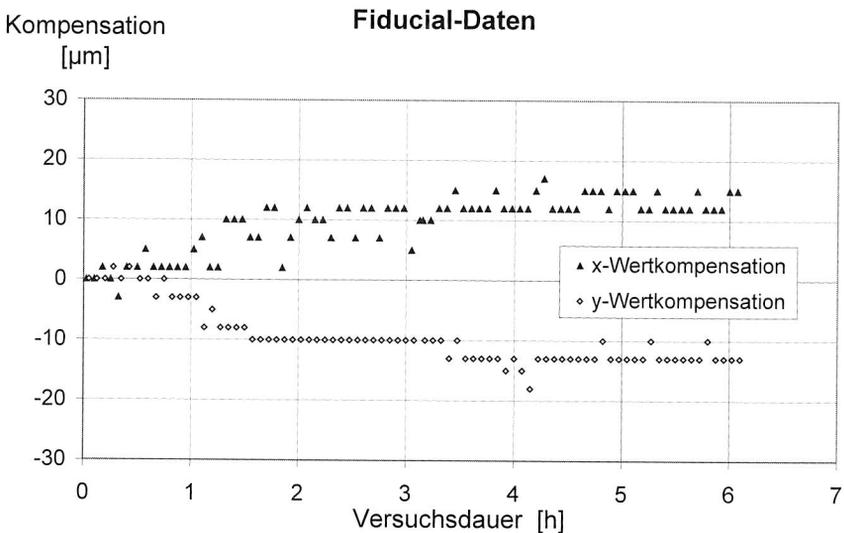


Bild 55: Erfassung der Bildverarbeitungskorrekturdaten der x- und y-Achse mit dem Einsatz der GEM-Schnittstelle

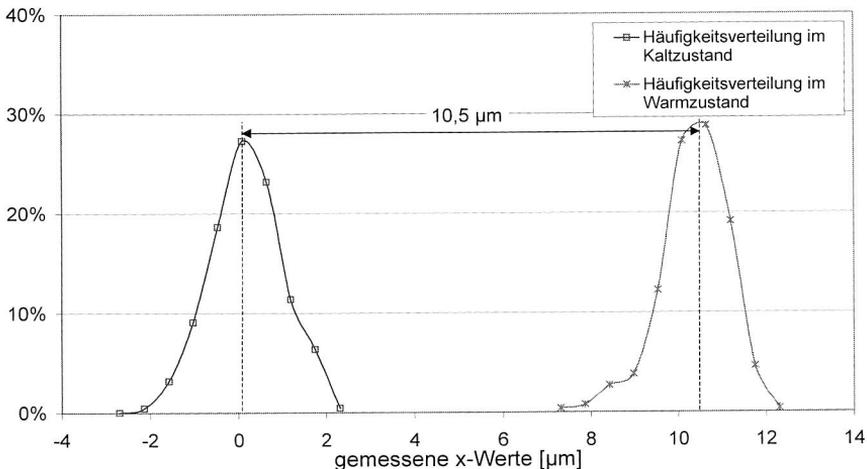
In Bild 55 ist deutlich zu sehen, dass das Bildverarbeitungssystem den thermoelastischen Versatz vermisst und diesem zum Teil entgegensteuert. Allerdings können die thermisch bedingten Störgrößen nicht vollständig durch die Bildverarbeitung kompensiert werden. Dies zeigen die in Bild 53 dargestellten Messungen. Treten noch weitere Störgrößen auf, die keine thermische Ursache haben, wie beispielsweise die

mit der Bildverarbeitung korrigierten Bestückpositionen in y-Richtung verdeutlichen. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass die Maschinensteuerung bei der Berechnung der Bestückpositionen von unveränderten Maschinenparametern, wie zum Beispiel gespeicherte Kalibrierdaten des Bestückungssystems ausgeht. Das bedeutet, dass thermisch bedingte Verlagerungen der Maschinenkomponenten, wie zum Beispiel das Kamerasystem und der Glasmaßstab unberücksichtigt bleiben. Deshalb ist es notwendig, in einem ersten Ansatz das thermische Verhalten der Maschinenstruktur systematisch zu untersuchen. In einem weiteren Ansatz soll die Wechselwirkung zwischen den Zusatzmodulen, wie Bildverarbeitungssysteme und Maschinenaufbau hinsichtlich der thermischen Belastung betrachtet werden.

*Untersuchungen der Wiederholgenauigkeit:*

Die dokumentierten Untersuchungen haben aufgezeigt, dass das Bildverarbeitungssystem die thermoelastische Drift partiell korrigiert. Anhand des dort angewandten Messverfahrens ist jedoch keine Aussage möglich, inwieweit trotzdem eine thermisch bedingte Verschiebung der Ist-Position stattgefunden hat.

Häufigkeit [%]



*Bild 56: Messdaten des untersuchten Bestückungssystems bzgl. der Wiederholgenauigkeit der x-Achse für verschiedene Erwärmungszustände*

Ziel der Untersuchungen ist es nunmehr, in verschiedenen Temperaturzuständen der Maschine eine Messreihe zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit zu er-

stellen, die mittels Auswertverfahren der Normalverteilung interpretiert werden kann. Dabei wird nur die thermisch bedingte Verlagerung des Bestückkopfs ohne Einsatz der Bildverarbeitung betrachtet.

Zu diesem Zweck wird der Messpunkt zu Untersuchung der Wiederholgenauigkeit im Kaltzustand ca. 30 Minuten angefahren, bei einer Wiederholfrequenz von 0,5 Hz ergeben sich somit annähernd 1000 Messreihen. Diese Werte werden entsprechend ihrer Verteilung aufgetragen. Nachdem sich das Bestückungssystem acht Stunden im Dauerbetrieb befand, wird der Versuch wiederholt. Der Einsatz des Bildverarbeitungssystems muss dazu unterdrückt werden, um nur die Auswirkung der thermischen Belastungen auf die Portioniergenauigkeit zu untersuchen.

Häufigkeit [%]

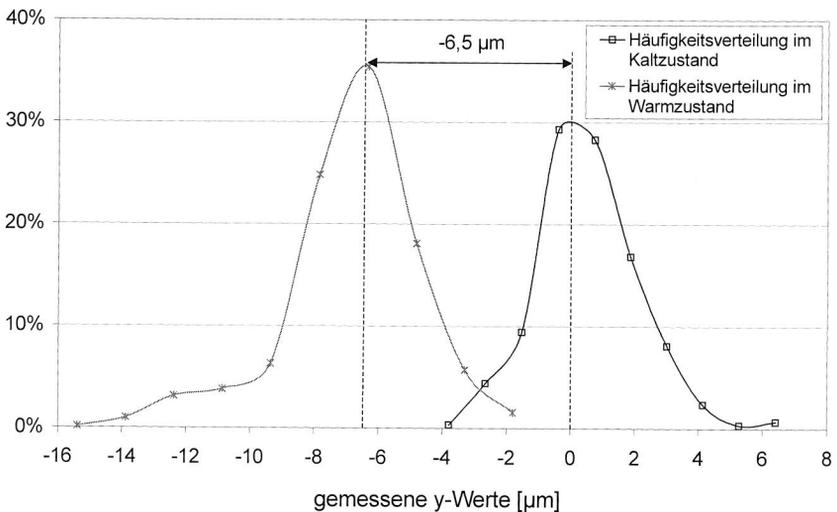


Bild 57: Messdaten des untersuchten Bestückungssystems bzgl. der Wiederholgenauigkeit der y-Achse für verschiedene Erwärmungszustände

Bild 56 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Positionierabweichung des Bestückkopfs im kalten und im warmen Zustand. Der Mittelwert der Messreihen verschiebt sich in x-Richtung um  $10,5 \mu\text{m}$ . Die Positionsmessungen der y-Achse lassen eine thermoelastisch bedingte Verschiebung von  $-6,5 \mu\text{m}$  bezüglich des Mittelwertes erkennen (Bild 57).

Während die den unterschiedlichen Erwärmungszuständen der Maschine zuzuordnende Verteilung bezüglich der x-Achse eine hohe Ähnlichkeit aufweist, ist innerhalb

der Häufigkeitsverteilung der y-Achse im erwärmten Zustand eine deutliche Aufweitung der Streuung zu beobachten.

### 5.2.4 Korrelationsanalyse der Messergebnisse

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Erscheinungsbild des Bestückversatzes sowie das Erwärmungsverhalten des Bestückautomaten untersucht. Hierbei wurde der Bestückversatz ohne Einsatz des korrigierenden Bildverarbeitungssystems dem Bestückversatz unter Einsatz dieses Systems gegenübergestellt. Zwischen der ersten Konstellation gab es ganz offensichtlich einen Zusammenhang, währenddessen dies bei der zweiten Variante nicht eindeutig erkennbar ist.

An dieser Stelle soll der mathematische Zusammenhang des Temperaturverlaufes mit den unterschiedlichen Versatzverläufen mittels einer Korrelationsanalyse qualifiziert werden. Die Messungen werden hierfür durch das Verfahren des „gleitenden Durchschnitts“ in einen Graphen geringerer Streuung überführt, d.h. aus einer bestimmten Anzahl  $i$  von vorausgegangenen Messwerten wird der Mittelwert der Abszissenwerte gebildet, welcher dann den Funktionswert des Mittelwertes des Versatzes repräsentiert. Die Anzahl  $i$  der zu einem Mittelwert zusammengefassten Messstapel ist ein Maß für die Ähnlichkeit der approximierten Kurve zum tatsächlichen Graphen.

Im Fall der linearen Korrelation, die in erster Linie angewendet wird, wird mit der Beziehung

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum x_i \cdot \sum y_i}{\sqrt{\left[ x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 \right] \cdot \left[ y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2 \right]}} \quad (15) [6]$$

der Korrelationskoeffizient für die Stichprobengesamtheit ( $x$ : Versatz,  $y$ :  $\Delta T$ ) geschätzt.  $r_{xy}$  nimmt Werte im Bereich  $-1 \leq r_{xy} \leq 1$  an. Für  $r_{xy} = \pm 1$  ist ein ideal funktionaler Zusammenhang zu erwarten. Die vorausgegangenen Messwerte haben die Zusammenhänge zwischen der Zeit und Temperaturverlauf innerhalb des Bestückungssystems, bzw. der Zeit und der Positionsdrift des Bestückkopfes aufgezeigt. Durch die nachstehenden Berechnungen soll durch Elimination der Zeitachse ein direkter Zusammenhang zwischen Bestückversatz und Temperaturerhöhung untersucht werden. Ist eine lineare Korrelation zwischen den Messgrößen gegeben, so entspricht dies der Aussage, dass der Bestückversatz in direkter Abhängigkeit dem Erwärmungsverlauf folgt.

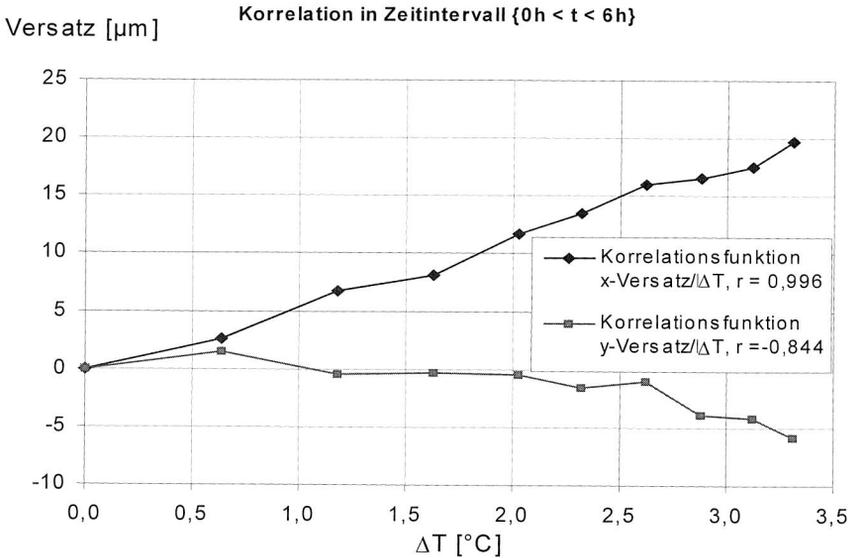


Bild 58: Verlagerung des Bestückkopfs über die Temperaturänderung vom Maschinenportal des Bestückungssystems

Von wesentlicher Bedeutung ist, dass der messbare Temperatur-Verlagerungszusammenhang nicht als Gesamtheit betrachtet werden darf, um eine geeignete Korrelationsaussage über den gesamten Bereich zu erhalten. Vielmehr sind unterschiedliche Korrelationskoeffizienten in den Erwärmungsbereichen sowie in den stationären Bereichen des Temperaturverlaufes zu erwarten. Aus diesem Grund wird die Korrelationsanalyse in den Bereichen  $[0 \leq t \leq 6 \text{ Stunden}]$  und  $[6 \text{ h} \leq t]$  getrennt betrachtet. Die dabei berechneten Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 2 zu sehen.

Der Korrelationskoeffizient für die ersten sechs Stunden lässt einen hohen funktionalen Zusammenhang zwischen x-Positioniersversatz und Temperaturerhöhung erkennen. Der negative Koeffizient für die y-Verschiebung resultiert aus dem durch das Messkoordinatensystem bedingten negativen Versatz in y-Richtung, der durch eine positive Temperaturänderung hervorgerufen wird.

In der Fortführung des Dauerversuches ohne Einsatz des Bildverarbeitungssystems nehmen die Korrelationskoeffizienten nach Erreichen der Beharrungstemperatur deutlich ab. Da eine Temperaturerhöhung in diesem Bereich, v.a. unter Berücksichtigung der gegebenen Messgenauigkeit der Temperatursensoren, nicht mehr fest-

stellbar ist, kann somit kein Zusammenhang zwischen Schwankungen der Bestückgenauigkeit und des zeitlichen Temperaturgradienten festgestellt werden. Die errechneten Werte von  $r_x = 0,792$  und v.a.  $r_y = -0,559$  lassen den Schluss auf einen Zusammenhang nicht zu.

PEARSONSche Korrelationskoeffizienten:

	Korrelation $[\Delta T/\Delta u]_x$	Korrelation $[\Delta T/\Delta u]_y$
{0h < t < 6h} ohne Lageerkennung	0,996	-0,844
{0h < t < 6h} mit Lageerkennung	0,692	-0,559
{6h < t < 12h} ohne Lageerkennung	0,792	-0,559
{6h < t < 12h} mit Lageerkennung	-0,689	-0,645

Tabelle 2: Berechnete Korrelationskoeffizienten  $\Delta T/\Delta u$  am untersuchten Bestückungssystem

Der Dauerversuch unter Einsatz des Bildverarbeitungssystems zeigt grundsätzlich Werte für den PEARSONSchen Korrelationskoeffizienten auf, die die Erbringung des Beweises eines mathematischen Zusammenhanges nicht zulassen. Deshalb wird bei der Entwicklung von Optimierungsstrategien zuerst Kompensationsverfahren zur Verbesserung der Positioniergenauigkeit der Achsen ohne die Berücksichtigung der Bildverarbeitung realisiert (Kapitel 6.3).

Ein idealer funktionaler Zusammenhang von  $r_{x/y} = \pm 1$  wäre gegeben, wenn sich ein Erwärmungsverhalten entsprechend des idealen Ein-Körper-Modells einstellen würde. In Kapitel 6.1 wird das thermoelastische Verhalten eines Ein-Körper-Modells dargestellt. Wirken keine weiteren Einflüsse auf das Bestückungssystem, so ist dieser Zusammenhang auch noch nach Erreichen der Beharrungstemperatur gegeben. In den Versuchen unter Einsatz des Bildverarbeitungssystems wirkt die Steuerung des Automaten außerdem der thermoelastischen Drift zum Teil entgegen, so dass eine Rückführung auf die aufgestellten Modelle nicht möglich ist.

Die Korrelationsanalysen der aus den Dauerversuchen mit sowie ohne Bildverarbeitung haben gezeigt, dass ein tatsächlicher Zusammenhang zwischen Bestückversatz und Temperaturerhöhung der Maschine ohne Einsatz des Bildverarbeitungssystems, und hierbei vor allem in x-Richtung, d.h. auf dem Maschinenportal gegeben ist. Deshalb wird das thermische Verhalten dieses Maschinenteils in Kapitel 6.2 simulationstechnisch analysiert, um daraus Optimierungsansätze für die Konstruktion abzuleiten.

Die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse dienen als Basis für die Weiterentwicklung von Bestückungssystemen hinsichtlich des thermischen Verhaltens. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Berücksichtigung dieses Verhaltens die Bestückgenauigkeit um ca. 20% verbessert werden kann. Im folgenden Kapitel werden unter anderem Optimierungsstrategien zur Kompensation des thermischen Verhaltens aufgezeigt.

## 6 Analyse und Optimierung des thermischen Verhaltens

Zur Optimierung des Maschinenverhaltens von Bestückungssystemen hinsichtlich der thermoelastischen Verformung, soll mit Hilfe der Simulationstechnik ein Rechenmodell realisiert werden. Dabei dienen die in Kapitel 5 aufgezeigten Untersuchungen als Eingangsgrößen. Weiterhin werden aus den experimentellen und analytischen Ergebnissen Lösungsansätze aufgezeigt. Insbesondere wird in diesem Abschnitt ein Korrekturverfahren zur Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen der Positionierachsen vorgestellt. Dabei handelt es sich um eine steuerungstechnische Korrekturmaßnahme, die in Abhängigkeit des Betriebszustands des Bestückungssystems die Bestückpositionen berechnet.

### 6.1 Analytische Modelle zur Darstellung des thermoelastischen Verhaltens

Der Bildung einer Korrekturfunktion muss eine Modellbildung des Systems zugrunde liegen. Die Messergebnisse werden anschließend mit den Modelldaten verglichen, wobei das Modellverhalten so dem realen Verhalten durch Korrekturparameter angeglichen wird.

Wie bereits dargestellt, unterliegen die Temperatursensoren bestimmten Genauigkeitsschwankungen. Auch aus diesem Grund macht es Sinn zu versuchen, dem Temperaturverhalten des Bestückungsautomaten ein bestimmtes Temperaturmodell zugrunde zu legen, um den Anteil eventueller Messschwankungen aus dem Gesamterwärmungsverlauf herausfiltern zu können.

Thermische Modelle dienen zur Beschreibung des Erwärmungs- und Abkühlungsverhaltens eines Körpers oder eines Systems aus mehreren, miteinander gekoppelten Körpern. Die Modelle können in Form analytischer Zusammenhänge, als numerische Modelle oder in einer anderen Form, z. B. als Regeln vorliegen [89].

Vereinfachte analytische Modelle sind am besten geeignet, um den Zustand eines Körpers in kürzester Zeit zu berechnen. Problematisch ist hierbei das Modellieren des physikalischen Systems. Gerade bei thermischen Systemen ist es oftmals unmöglich eine genaue analytische Beschreibung für sämtliche Effekte und deren Zusammenwirkung zu treffen. Eine Alternative bieten numerische Berechnungsverfahren, wie z. B. die Methode der Finiten Elemente (FEM), auf die die Arbeit zu einem späteren Zeitpunkt noch zurückgreifen wird.

### 6.1.1 Ideales Ein-Körper-System

Um den Temperaturverlauf eines einfachen Körpers im instationären Bereich, also beim Erwärmen oder Abkühlen zu beschreiben, ist das ideale Ein-Körper-System bestens geeignet. Dabei wird der Körper als ideales thermisches System ohne internen Temperaturgradienten angenommen. Des weiteren werden eine konstante Umgebungstemperatur, eine konstante Wärmekapazität, ein konstanter Wärmeübergangswiderstand an die Umgebung und ein konstanter zugeführter Wärmestrom vorausgesetzt.

Im Fall der Erwärmung nähert sich die Körpertemperatur  $\vartheta_0$  exponentiell der Beharrungstemperatur  $\vartheta_B$  an.

Dieses Modell eignet sich besonders zur Beschreibung eines Systems, welches in seiner Gesamtheit z. B. durch einen Wärmeübergang durch die Luft erhitzt wird. Da ein System ohne inneren Wärmegradienten vorausgesetzt wird, ist diese Form der Modellierung für ein System mit lokalen Wärmequellen zwar nicht zulässig, es kann jedoch innerhalb des Gültigkeitsbereiches als ausreichend genau angesehen werden.

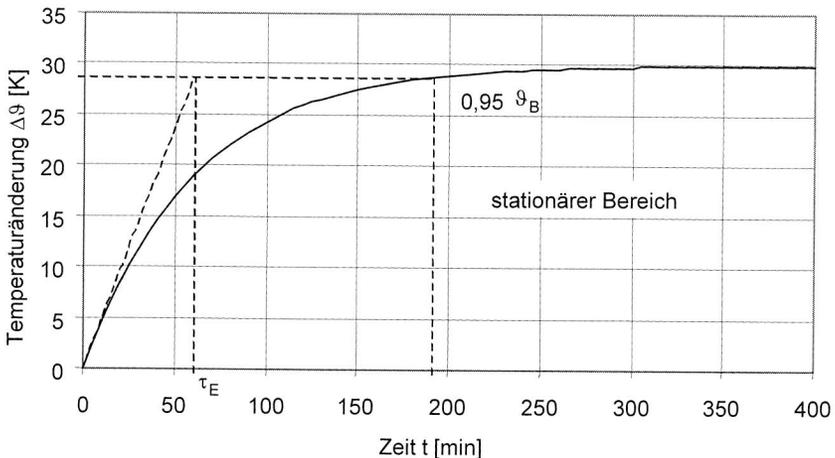


Bild 59: Berechnung der Erwärmungsverhalten eines idealen Ein-Körper-Systems [89]

Für die Erwärmung gilt nach [89]:

$$\vartheta(t) = \vartheta_B - (\vartheta_B - \vartheta_0) \cdot e^{-t/\tau_E} \quad (16)$$

$\vartheta_0$  präsentiert hierbei die Ausgangstemperatur. Da in diesem speziellen Anwendungsfall von einem völligen Kaltzustand der Maschine ausgegangen wird, ist die Temperatur aller Sensoren als einheitlich zu betrachten, weswegen  $\vartheta_0=0$  gesetzt werden kann. Somit gilt:

$$\vartheta(t) = \vartheta_B \cdot (1 - e^{-t/\tau_E}). \quad (17)$$

Der Formel sowie dem Verlauf der Grafik ist zu entnehmen, dass sich die Kurve einem Endwert, der Beharrungstemperatur  $\vartheta_B$ , exponentiell annähert. In der Praxis ist jedoch nach einer bestimmten Zeit keine Temperaturerhöhung mehr feststellbar. Aus diesem Grund ist man dazu übergegangen, einen stationären Bereich innerhalb des Temperaturverlaufes zu definieren, ab dem Wert der Zeitabszisse, bei dem die Temperatur 95% der Beharrungstemperatur erreicht hat.

Die Zeitkonstanten  $\tau_E$  für Erwärmung des Körpers sind proportional zum Verhältnis der Wärmespeicherfähigkeit zu seiner Wärmeabgabefähigkeit. Die Beharrungstemperatur  $\vartheta_B$  ist proportional zum Verhältnis des zugeführten Wärmestroms zu dem Wärmeübergangswiderstand [89].

Die Bestimmung der Konstanten des Temperaturverlaufes kann entweder über Annähern der Kurve mittels Erfahrungswerte an den tatsächlichen Temperaturverlauf erfolgen, oder aber man bedient sich dem Verfahren der linearen Regression.

Zu diesem Zwecke muss die *Gleichung 17* in lineare Form übergeführt werden. Dies geschieht durch Differentiation und Bildung des natürlichen Logarithmus:

$$\ln\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right) = \ln\left(\frac{\vartheta_B - \vartheta_0}{\tau}\right) - \frac{1}{\tau} \cdot t. \quad (18)$$

Man setzt  $a = \frac{1}{\tau}$  und  $b = \ln\left(\frac{\vartheta_B - \vartheta_0}{\tau}\right)$ . (19)

Die Variablen  $a$  und  $b$  bleiben konstant, wodurch eine lineare Gleichung der Form  $f(t)=a \cdot t+b$  entstanden ist. Um den ersten Term der rechten Seite (Gl.18) zu erhalten, muss aus jeweils zwei Messstapeln der Differenzenquotient gebildet werden [41]. Mit zu Hilfenahme der linearen Regression und unter der Annahme  $\vartheta_0=0$  können die Konstanten  $a$  und  $b$  bestimmt werden. Die Rücktransformation führt auf die Werte für die Beharrungstemperatur  $\vartheta_B$  sowie die Zeitkonstante für die Erwärmung  $\tau_E$ . Der PEARSONSche Korrelationskoeffizient qualifiziert die Annäherung des Kurvenverlaufes an den Messgraphen. Ist dieser deutlich über 0,9, so kann von einer ausreichend guten Approximation gesprochen werden.

Im folgenden wird dieses Verfahren exemplarisch für die Messkurve des y-Achsmotors sowie die Gesamtmaschinenerwärmung (GME) durchgeführt.

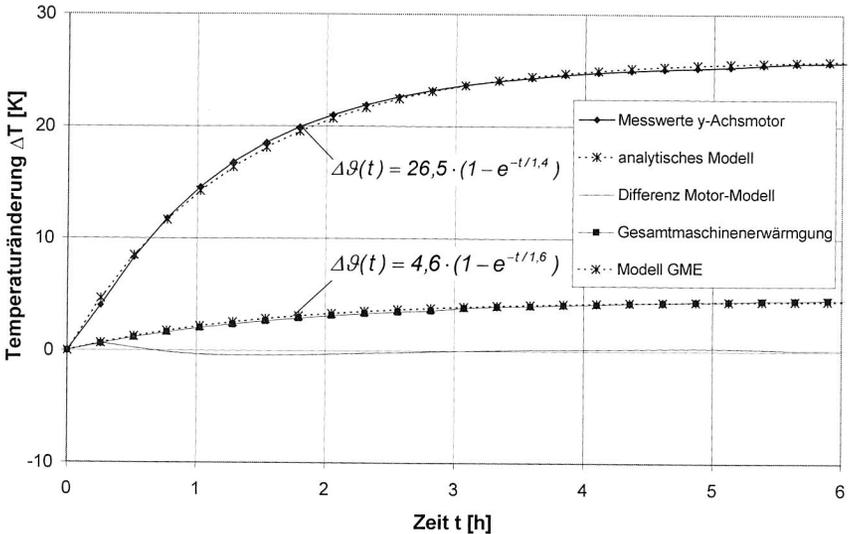


Bild 60: Modelliertes Erwärmungsverhalten einer Temperaturmessung des Bestückungssystems

Die tatsächliche Gesamtmaschinenenerwärmung, im weiteren als GME bezeichnet, präsentiert den Mittelwert aller Temperaturdaten der nicht in Nähe der lokalen Wärmequellen liegenden Temperatursensoren.

Die Annäherung über das Verfahren der linearen Regression zeigte sehr gute Ergebnisse. Der mittlere Fehler lag bei nur 2,1%. Die entstandene Abweichung ist durch die Anwendung des Differentenquotientenverfahrens bedingt, welches mit zunehmend kleineren Messintervallen an Aussagekraft zunimmt. Bei einem mittleren Messintervall von 15 Minuten ist allerdings nur eine begrenzte Annäherung an die tatsächliche Messkurve mit mathematischen Hilfsmitteln möglich.

### 6.1.2 Theoretischer Bestückversatz aufgrund thermoelastischer Verformung

Die erfassten Temperaturdaten zeigen auf, dass sich neben zweier lokaler Temperaturquellen, den Achsmotoren, ein Temperaturgradient von ungefähr  $\Delta T \approx 5 \text{ K}$  über des gesamte Bestückungssystem ausbreitet. Wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die lokalen Temperaturquellen keinen wesentlichen Einfluss auf die thermoelastische Verformung des Maschinenportals bzw. der Mittelschiene haben, dann

kann der Bestückversatz des Automaten an der Messposition mittels einfacher analytischer Verfahren und unter Zugrundelegung des idealen Ein-Körper-Systems abgeschätzt werden. Auch hierbei gilt wiederum, dass eine detailorientierte Simulation oder systematisch durchgeführte experimentelle Untersuchungen die genaueren Ergebnisse für das thermische Verhalten des Bestückungssystems liefern können. Jedoch ist eine analytische Überprüfung der Ergebnisse für die Qualifizierung und Interpretation der experimentellen Untersuchungen sehr nützlich. So kann im Vorfeld bei der Auslegung der Maschinekomponenten durch einfache Rechenmodelle das thermoelastische Verhalten berechnet und durch geeignete konstruktive Maßnahmen optimiert werden.

Weitere Einflüsse auf den Bestückprozess, wie z. B. Fertigungstoleranzen der Bauelemente und der Leiterplatte, bleiben bei der analytischen Betrachtung der thermoelastischen Betrachtung unberücksichtigt. Die Auswirkung der Fertigungstoleranzen der Materialien auf die Bestückungsgenauigkeit wurde in Kapitel 3.1.2 anhand eines Beispiels vorgestellt.

Um die Verformung errechnen zu können, muss dem Bestückungssystem zunächst ein geometrisches Volumenmodell zugrundegelegt werden. Dieses vereinfachte Modell wird in Bild 61 dargestellt.

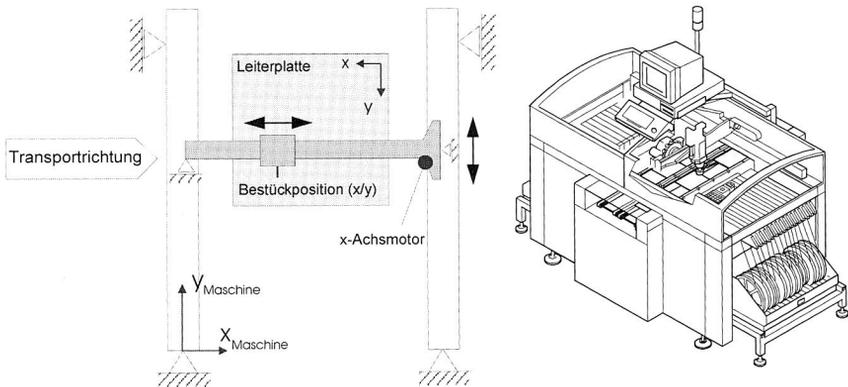


Bild 61: Vereinfachtes Geometriemodell für ein Bestückungssystem zur Berechnung der Verlagerung der Bestückposition

Die dargestellten Lager nehmen der Einfachheit halber keine Biegemomente auf. Das Maschinengestell ist im Nullpunkt mit einem zweiwertigen Lager verankert, auf der gegenüberliegenden Seite mit einem einwertigen, so dass das Modell in der x-y-Ebene statisch bestimmt ist. Das Maschinenportal ist bei  $y = 0$  wiederum mit einem

zweiwertigen Lager auf dem Maschinengestell befestigt, bei  $y = y_{max}$  dagegen nur mit einem einwertigen.

Die Längenänderung ergibt sich mit der bereits errechneten Maschinenerwärmung zu

$$\begin{aligned}\Delta l(t; x) &= \alpha \cdot x \cdot \Delta \vartheta(t) \\ \Delta l(t; y) &= \alpha \cdot y \cdot \Delta \vartheta(t).\end{aligned}\quad (20)$$

mit  $\alpha$  als Längenausdehnungskoeffizient. Das Maschinenportal besteht aus X5-CrNi18-10 und wird gemäß [6] mit  $16,42 [10^{-6}/K]$  angenommen.

Soll nunmehr lediglich die Ausdehnung an einem bestimmten Punkt  $x_0/y_0$  (900 mm/220 mm) dargestellt werden, so ist die Längenänderung lediglich von der zeitlich veränderlichen Temperaturänderung abhängig, währenddessen sich die anderen Parameter über der Zeit konstant verhalten. Von dem linearen Faktor  $\alpha \cdot x_0$  bzw.  $\alpha \cdot y_0$  abgesehen, verhält sich somit die Verschiebung des Punktes der Bestückposition gemäß dem relativen Erwärmungsverlauf.

Dieser soll nunmehr einer theoretischen Verformungsfunktion zugrunde gelegt werden. Nach Gleichung 20 und unter Verwendung der Approximation für die Gesamtmaschinenerwärmung ergibt sich somit für den analytischen Verschiebungsverlauf:

$$\begin{aligned}\Delta l(t; x_0) &= \frac{16,42 \cdot 220 \cdot 5,6 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_E}})}{10^6} \text{ mm} = 20,229 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_E}}) \mu\text{m} \\ \Delta l(t; y_0) &= \frac{16,42 \cdot 900 \cdot 5,6 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_E}})}{10^6} \text{ mm} = 82,757 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_E}}) \mu\text{m}.\end{aligned}\quad (21)$$

Ausgehend von den experimentellen Temperaturmessungen wird es von einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung  $\Delta T = 5,6$  K und ein Erwärmungskoeffizient von  $\tau_E = 1,4$ . Die dabei im Messpunkt berechnete thermoelastische Verformung zeigt Bild 62.

Nach Erreichen der Beharrungstemperatur ergibt sich eine konstante Verschiebung von  $\Delta x_0 = 20,23 \mu\text{m}$  und  $\Delta y_0 = 82,76 \mu\text{m}$ . Die in x-Richtung berechnete Verlagerung entspricht in etwa der erfassten Messungen. Jedoch ist die berechnete x-Verlagerung wesentlich größer als die der tatsächlich erfassten Messungen. Dies kann darauf zurückzuführen, dass beim in Bild 61 aufgestellten Rechenmodell die Verformung des Portals in y-Richtung nicht berücksichtigt wurde. Diese thermische Ausdehnung des Maschinenportals in y-Achse wird in Kapitel 6.2 durch die FEM-Simulation dargestellt.

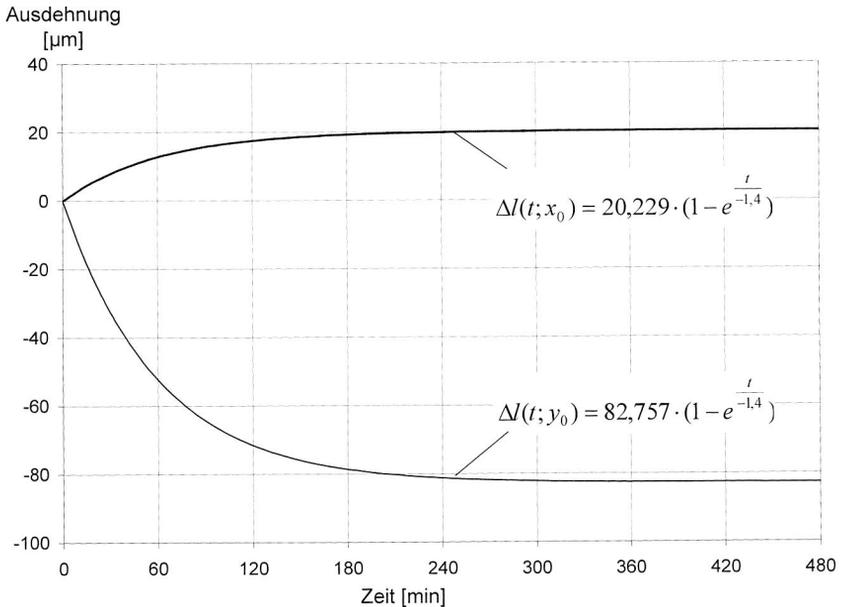


Bild 62: Theoretische thermoelastische Drift gemäß des vereinfachten Geometriemodells

In Kapitel 6.2.3 werden die experimentellen und berechneten Ergebnisse der Verlagerung des Arbeitspunktes beim untersuchten Bestückungssystem gegenübergestellt und ausführlich diskutiert.

## 6.2 Einsatz der FEM-Simulation

### 6.2.1 Vorgehensweise

Um das Maschinenverhalten von Bestückungssystemen hinsichtlich der thermoelastischen Drift schon im Vorfeld des Entwicklungsprozesses zu untersuchen und zu optimieren, kann die FEM-Simulation eingesetzt werden.

Die geometrische Struktur des zu modellierenden Körpers wird dabei mittels einer 3D-CAD-Software erstellt, so dass sie in das Simulationsprogramm Nastran [77] importiert werden kann. Die thermischen Randbedingungen werden entsprechend der Untersuchungen bezüglich des Erwärmungsverhaltens neben den statischen Lage-

rungsverhältnissen und den Materialdaten in das Rechenmodell eingebracht. Die Gesamtstruktur wird auf dieser Basis rechnerisch gekoppelt, so dass die Randbedingungen an den Knotenpunkten der Einzelemente übereinstimmen. Die Belastung, in diesem Falle die thermische Einwirkung auf das Element, bildet die rechte Seite des Gleichungssystems der Finiten Elemente Hauptgleichung. Diese kann nunmehr dem Lösungsgenerator zugeführt werden.

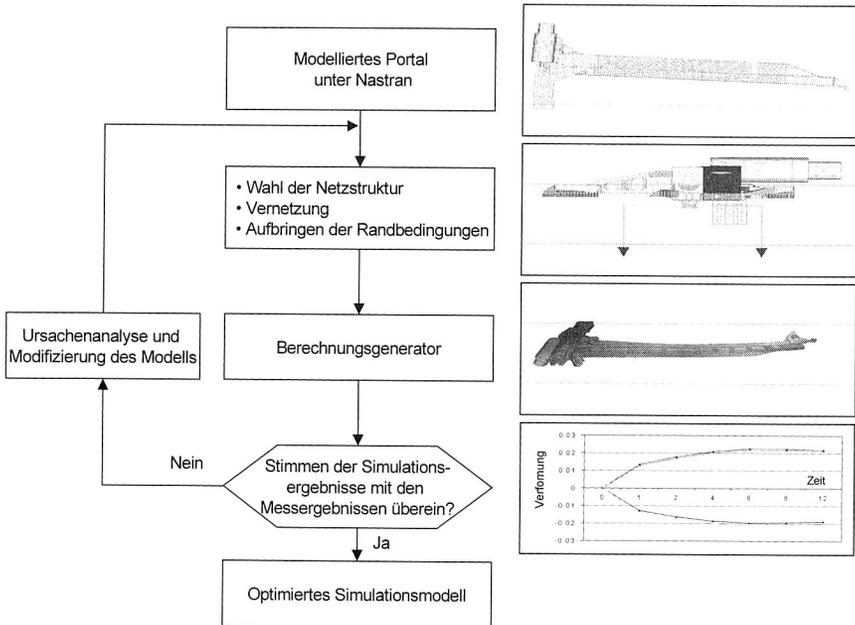


Bild 63: Vorgehensweise zur Erstellung einer Finite-Elemente-Struktur für das Maschinenportal des Bestückungssystems

An dieser Stelle interessieren nur die thermoelastisch bedingten Verformungen, weswegen auf eine Darstellung der entstehenden Spannungen innerhalb der Struktur des Portals verzichtet wird. Ziel der Simulation ist deshalb die Darstellung einer zeitlich abhängigen thermoelastischen Ausdehnung. Der hierfür notwendige Verlauf des Temperaturprofils wird aus den vorausgegangenen Messungen gewonnen (Kapitel 5.2.2). Die lokal bekannten Temperaturpunkte werden auf das geometrische Rechenmodell des Maschinenportals als Randbedingungen übertragen. Nastran generiert hieraus einen stetig differenzierbaren Temperaturverlauf über den Träger.

Das Ergebnis ist eine Funktion der thermoelastischen Verformung über Zeit und Ort. Um zu einem späteren Zeitpunkt die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen vergleichen zu können, interessiert v.a. der Versatz am Ort des Messpunktes  $x_0/y_0$ , so dass die Ergebnisfunktion nur noch eine Variable in Form der Zeit enthält.

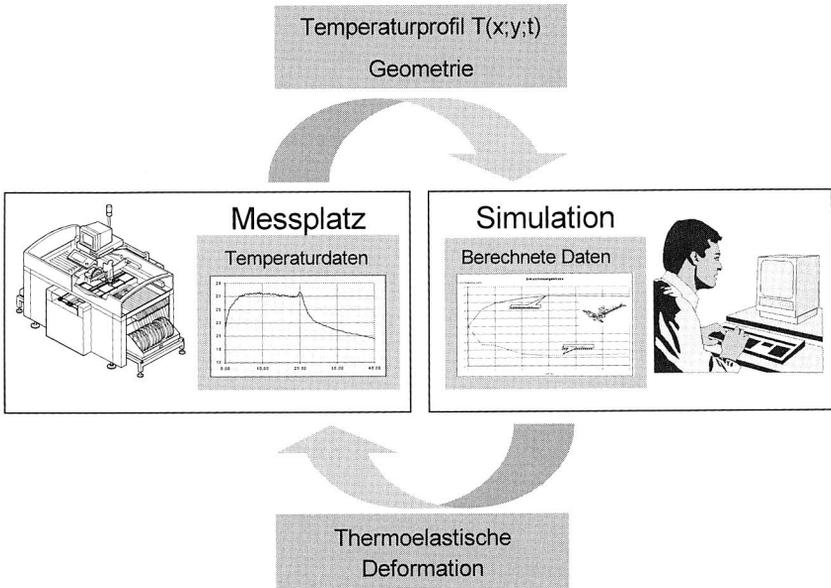


Bild 64: *Transfervorgänge zwischen Mess- und Simulationsdaten – Optimierung des Simulationsmodells anhand der experimentellen Untersuchungen*

Die Messungen liefern somit die Temperaturdaten, die der FEM-Simulation zugrunde gelegt werden. Die Ergebnisse der Simulation wiederum sind notwendig, um den Zusammenhang zwischen dem gemessenen Versatz des Bestückkopfs und der thermischen Ausdehnung des Maschinenportals zu untersuchen. Sind die auf der Basis der experimentellen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse mit denen der FEM-Simulation vergleichbar, so kann davon ausgegangen werden, dass der gemessene Versatz rein thermische Ursachen des Maschinenportals hat, da dies die alleinige Grundlage des numerisch errechneten Versatzes ist.

## 6.2.2 Simulation der thermischen Verformung des Maschinenportals<sup>2</sup>

Die messtechnischen Untersuchungen wurden durch die FEM-Simulation des Verformungsverhaltens des Maschinenportals überprüft. Die der Berechnung des Portals zugrundeliegende Struktur ist in Bild 65 und Bild 66 zu sehen.

Das Ergebnis der Simulation ist ein Verschiebungsfeld über den gesamten Körper in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit:

$$v(\vec{o}; t; T(\vec{o}; t))$$

$\vec{o}$  : Ortsvektor

$t$  : Zeit

$T$  : Temperaturverteilung

Das Verschiebungsfeld kann graphisch durch ein 3D-Modell dargestellt werden.

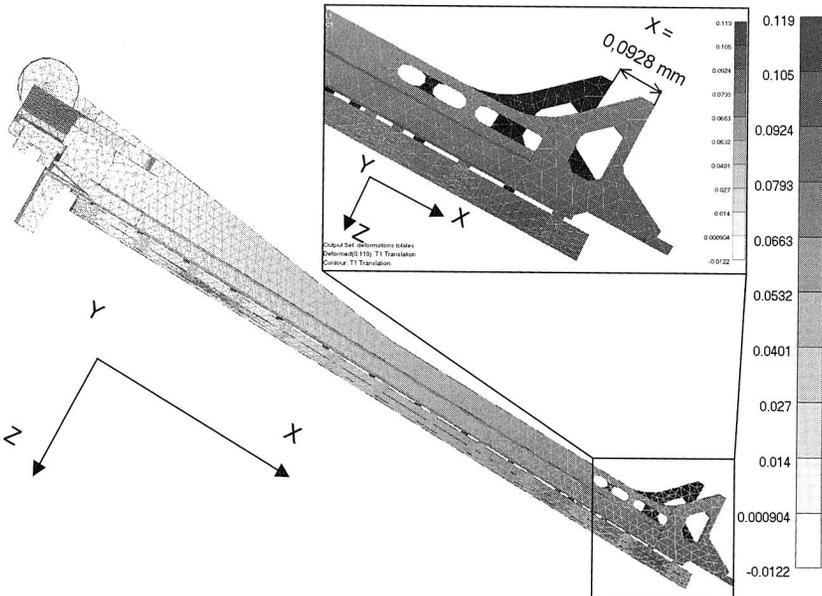


Bild 65: FE-Struktur und thermische Verformung des Maschinenportals in x-Richtung

<sup>2</sup> Die FEM-Simulation erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Frank Christoph [78]

Der 3D-Träger in der Draufsicht stellt den thermoelastischen Verzug in y-Richtung am Ende des Bauteils dar. Das Portal ist an den Stellen  $x=0$  und  $y=0$  fest eingespannt, so dass die maximale Verformung entsprechend der Ergebnisse an dessen Ende zu erwarten ist.

Ausgehend von den oben genannten Randbedingungen führt die thermische Belastung zu einer maximalen Verformung von  $92,8 \mu\text{m}$  in x-Richtung und  $22,4 \mu\text{m}$  in y-Richtung, da das Maschinenportal keine Symmetrieebene aufweist.

Ein Vergleich mit den Messergebnissen erfordert jedoch die Bestimmung des Verformungsverhalten des Portals in der x-y-Ebene. Die Messungen bezogen sich immer auf einen Ortsvektor, nämlich auf den des Messbereiches der Lasertriangulationssensoren auf der Leiterplatte. Dieser tritt somit in der Verschiebungsfunktion sowie in der Temperaturfunktion als Konstante auf. Es besteht somit nur noch eine Abhängigkeit von der Zeit  $t$ .

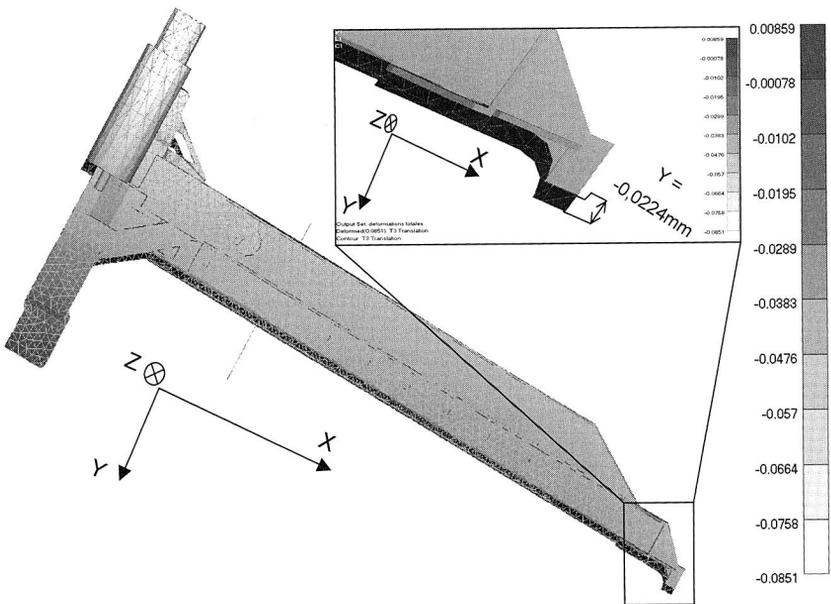


Bild 66: FE-Struktur und thermische Verformung des Maschinenportals in y-Richtung

Die dargestellte Verschiebungsfunktion zeigt den charakteristischen Verformungsverlauf innerhalb der Erwärmungsphase auf. Nachdem die zugrunde liegenden

Temperaturdaten die Beharrungstemperatur erreicht haben, zeigt auch die Simulation erwartungsgemäß keine weitere Verformung auf.

Die im Messpunkt berechneten Verformungswerte für die x-Achse sind vergleichbar zu denen der y-Achse, obwohl die angenommenen Verformungstrecken in x- und y-Richtung sich um den Faktor 5 unterscheiden. Dies erklärt sich aus der Tatsache, dass aufgrund der asymmetrischen Wärmebelastung des Maschinenportals eine zusätzliche Neigung in der y-Achse festzustellen. Deshalb ergibt sich durch die FEM-Simulation ein nichtlinearer Verformungsverlauf des Bestückkopfrägers (Maschinenportal).

Außerdem sind innerhalb des Kurvenverlaufes Differenzierbarkeitssprünge zu erkennen (Bild 67). Diese sind bedingt durch den Temperaturverlauf, der seinerseits äußeren Randbedingungen, wie tageszeitbedingter Temperaturschwankungen, unterliegt.

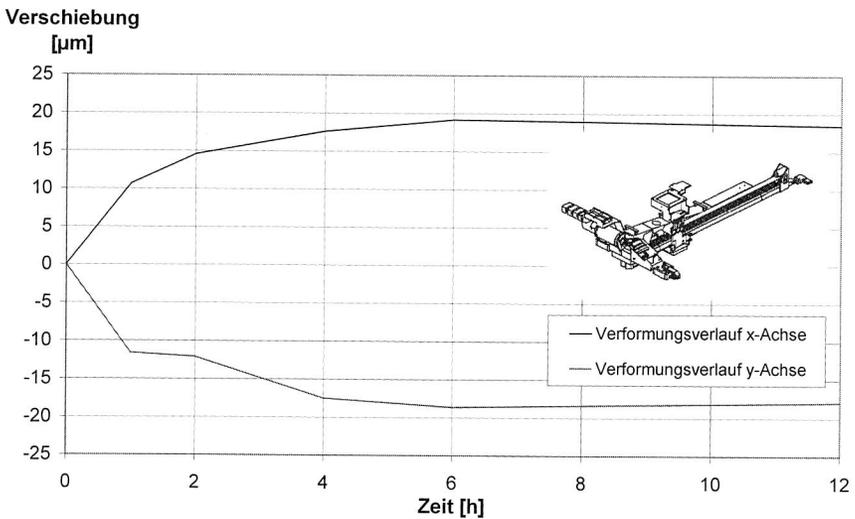


Bild 67: Simulationsergebnisse der temperaturbedingten x/y-Deformation am Bestückkopf

### 6.2.3 Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungen

Die unterschiedlichen Untersuchungen bezüglich der Temperaturdrift haben im Laufe dieser Arbeit zu Ergebnissen geführt, die zwar einen vergleichbaren Trend aufzeigten, jedoch im Detail divergierten. Ein Vergleich der Ergebnisse soll qualifizieren, welches Modell am besten den tatsächlichen Messergebnissen entspricht und als Grundlage für weitergehende Berechnungen konstruktive Optimierungen herangezogen werden kann.

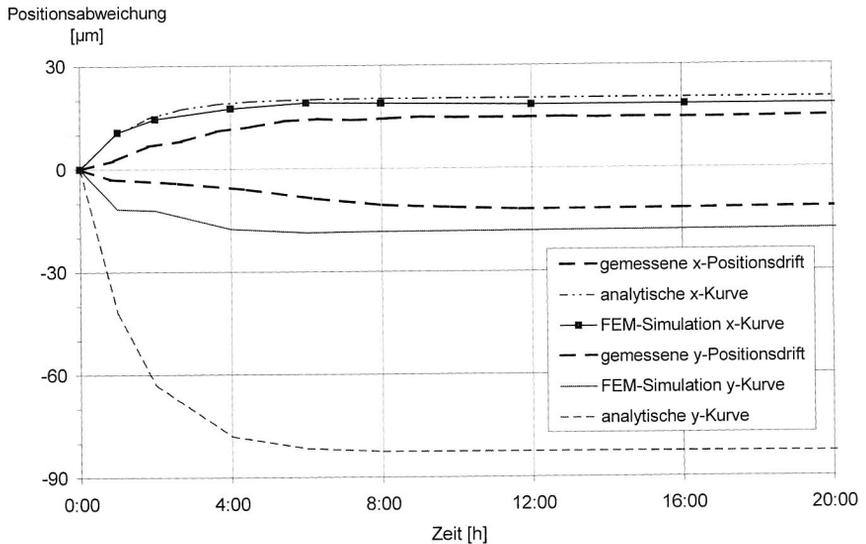


Bild 68: Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsverfahren mit den Messungen

Die numerische und die analytische Berechnungsmethode gehen von unterschiedlichen Modellen zur Berechnungsgrundlage aus. Wie bereits erläutert, wird bei der analytischen Berechnungsmethode die geometrische Struktur stark vereinfacht als Balkenmodell dargestellt. Ebenso wird als Lager zwischen dem Maschinengestell und der Mittelschiene ein Festlager angenommen, um die statische Bestimmtheit des Objektes zu gewährleisten. Das Erwärmungsverhalten des Körpers wird außerdem im Sinne des idealen Ein-Körper-Systems angenommen, also eine weitere Vereinfachung des realen thermischen Verhaltens. Dies impliziert, dass der Tempera-

turverlauf über den Träger als konstant betrachtet wird und die Wirkung lokaler Wärmequellen auf den Bestückversatz vernachlässigt wird.

Das Modell für die numerische Simulation (FEM) hingegen wurde aus der CAD-Datei des Maschinenportals importiert und stellt den realen Träger wesentlich genauer dar. Weiterhin wird der Temperaturverlauf entsprechend der Temperaturmessungen modelliert, d.h. der Einfluss lokaler Wärmequellen wird berücksichtigt.

Die Modellbildung, die der FEM-Berechnung zugrundegelegt wurde, ist somit wesentlich exakter, weshalb hinsichtlich der Resultate hier die geringeren Abweichungen im Vergleich zu den Messergebnissen zu erwarten sind. Als Vergleichswerte werden an dieser Stelle die x- sowie die y-Positionsdrift des untersuchten Bestückungssystems betrachtet (Kapitel 5.2).

#### *Maschinendrift in x-Richtung*

Grundsätzlich ist eine Differenz zwischen den Berechnungen numerischer bzw. analytische Art von ca. 5  $\mu\text{m}$  bezüglich des x-Versatzes zu verzeichnen. Entsprechend den Erwartungen nähert sich die aus dem numerischen Simulationsmodell gewonnene Kurve dem tatsächlichen Verformungsverlauf besser an, als der auf dem Balkenmodell basierende. Trotzdem stellen beide Modelle im stationären Endbereich den realen Verschiebungsverlauf bezüglich des prinzipiellen Verlaufes richtig dar. Dagegen ist im Erwärmungsbereich eine deutliche Divergenz der Modellbildungen im Vergleich zu den Messergebnissen zu verzeichnen, wobei die numerische Simulation eher dem tatsächlichen Verlauf entspricht. Dies erklärt sich durch die fehlerbehaftete Annahme im idealen Ein-Körper-System, dass innerhalb des Körpervolumens kein Temperaturgradient entsteht, d.h. dass eine außen aufgebrachte Temperatur zu sofortigen thermoelastischen Effekten im Portal führt. Tatsächlich findet dies jedoch erst nach einer zeitlichen Verzögerung statt.

#### *Maschinendrift in y-Richtung*

Auffällig ist die deutliche Divergenz zwischen den analytisch gewonnenen Ergebnissen und der durch Messungen gewonnenen Kurve. Die hohe Verformungsstrecke in y-Richtung ist offensichtlich nicht der Grund für die in diese Richtung stattfindende Drift, sondern vielmehr die nichtlineare Verformung des Trägers, wie sie in der FEM-Simulation modelliert wurde.

Die analytischen Ergebnisse in beide Richtungen stellen eine größere Verformung als die tatsächliche dar. Trotzdem entsprechen sie in ihrem grundsätzlichen Verlauf in guter Näherung den Durchschnittskurven der Messdaten. Um sie im folgenden trotzdem als Berechnungsgrundlage heranziehen zu können, werden sie mit einem Korrekturfaktor multipliziert, so dass sie sich dem Verhalten der Messkurven im sta-

tionären Endbereich annähern. Es ergeben sich somit folgende Funktionen für die analytische Modellierung des thermoelastischen Verhaltens:

$$\begin{aligned}\Delta l_k(t, x_0) &= k \cdot \Delta l(t, x_0) = 14,8 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{1,4}}\right) \\ \Delta l_k(t, y_0) &= k \cdot \Delta l(t, y_0) = -12,0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{1,4}}\right).\end{aligned}\tag{22}$$

## 6.3 Maßnahmen zur Reduzierung der thermischen Einflüsse

### 6.3.1 Allgemeine Lösungskonzepte für Bestückungssysteme

Um die thermischen Einflüsse auf den Bestückprozess zu reduzieren, können konstruktive und steuerungstechnische Maßnahmen angewandt werden.

#### **Konstruktive Maßnahmen:**

Die Untersuchungen bezüglich der Bestückgenauigkeit bzw. der Wiederholgenauigkeit haben gezeigt, dass ein thermischer Einfluss auf das Bestückungssystem existiert. Dieser kann trotz des Einsatzes des Bildverarbeitungssystems zur Lagekorrektur nicht systematisch kompensiert werden. In einem ersten Ansatz sollen bereits in der Konstruktionsphase die Maschinenkomponenten des Bestückungssystems hinsichtlich der thermoelastischen Drift und damit der Positioniergenauigkeit ohne Berücksichtigung der Module zur Erhöhung der Bestückgenauigkeit weitgehend konstruktiv optimiert werden. Ziel von Konzepten zur Erhöhung der Bestückgenauigkeit sollte es somit vorrangig nicht sein, den entstehenden thermoelastischen Effekten entgegenzuwirken, sondern die Ursache dieser Effekte, also die Gesamtmaschinenerwärmung, so gut wie möglich zu kompensieren. Da jedoch eine Erhöhung der Maschinentemperatur nicht vollständig vermeidbar ist, müssen an zweiter Stelle Konzepte entwickelt werden, dem entstehenden Bestückversatz durch Implizierung zusätzlicher Daten entgegenzuwirken.

#### *Reduzierung der thermoelastischen Effekte*

Unter diesen Punkt fallen alle Maßnahmen, die dem grundsätzlichen thermoelastischen Versatz entweder durch Reduzierung der Ursache, nämlich der lokalen Temperaturquellen, oder durch Verringerung der Wirkung, der materialspezifischen Temperaturendeckung, entgegenwirken.

### *Reduzierung der thermischen Belastung*

Grundsätzlich stehen hierbei zwei Lösungsalternativen zur Verfügung. Zum einen kann die entstehende Wärme aus dem Maschinenraum herausgeführt werden, oder aber die eigentliche Wärmeentstehung wird reduziert. Die Thermobilder aus Kapitel 5.2.2 sowie die Untersuchungen mit den Temperatursensoren haben gezeigt, dass als wesentliche lokale Wärmequellen die beiden Achsmotoren der x- und y-Achsen zu betrachten sind. Die Erwärmung von mechanisch beanspruchten Teilen hat hierbei nur einen marginalen Einfluss auf die Gesamterwärmung des Bestückungssystems.

### *Materialeinsatz*

Da das Maschinenportal des Bestückungssystems mit dem darauf befindlichen Bestückkopf bezüglich der y-Achse frei gelagert ist und somit keine feste Verbindung mit dem Maschinengestell besteht, kann der Versatz in y-Richtung nicht vollständig auf eine thermoelastisch bedingte Materialausdehnung zurückgeführt werden. Jedoch hat der Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen gezeigt, dass die Ausdehnung des Portals in x-Richtung zum x-Versatz des Bestückkopfs führt, da der Bestückkopf in x-Richtung auf dem Portal gelagert ist. Die Wahl eines Materials mit einem geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten beeinflusst somit direkt den thermoelastischen bedingten Versatz.

### *Temperierung*

Eine Verbesserung des thermischen Verformungsverhaltens kann schließlich durch die Realisierung eines gleichförmigen Temperaturniveaus in der Maschine erzielt werden. Das kann durch den Einsatz von temperiertem Kühlschmierstoff erreicht werden. Ein weiterer Ansatz ist die gezielte Anbringung von Wärmequellen, um eine symmetrische thermoelastische Verformung zu erzielen.

### **Regelungstechnische Maßnahmen:**

Soll das thermische Gesamtverhalten der Maschine beherrscht d.h. die Verformungen minimiert werden, so sind konstruktive Maßnahmen in der Regel sehr kostenintensiv. Hier stellt die steuerungstechnische Kompensation für eine Vielzahl von Anwendungen eine attraktive Alternative dar und ermöglicht zudem das Verhalten bestehender Maschinen nachträglich zu verbessern. Hierbei wird das auftretende Verformungsverhalten bestimmt und über die Maschinenachsen oder zusätzliche Stellglieder korrigiert. Dabei wird zwischen direkten und indirekten Verfahren unterschieden.

### *Direkte Steuerungstechnische Kompensation*

Ziel der direkten Kompensation ist die unmittelbare messtechnische Erfassung der relativen Abweichung. Es handelt sich hier um eine summarische Fehlergröße, die durch die thermoelastischen Strukturverformungen der Einzelbauteile bedingt ist. Die Verformungen (z. B. Längenausdehnung) werden mit einem in der Maschine integrierten Sensor erfasst.

Das Verfahren stellt einen überlagerten Regelkreis dar, in dem die Umsetzung der Korrekturwerte in Stellgrößen geprüft werden kann. Hierzu muss ein geeignetes Wegmeßsystem in der Bestückmaschine integriert werden. Dies setzt voraus, dass eine in ihrer Lage nahezu unveränderte Messposition in der Maschine realisiert werden kann. Eine Messung an dieser Position muss des weiteren repräsentative Aussagen für das Verformungsverhalten in anderen Positionen des Arbeitsraumes zulassen. Wenn diese Randbedingungen erfüllt werden können, bietet dieses Verfahren die höchste Genauigkeit. Die direkte Messung der Verformungen stellt noch dazu eine kostengünstige Alternative dar.

Im Gegensatz zur indirekten Kompensation ist bei einer direkten Erfassung der thermischen Verformungen ein Messzyklus erforderlich. Um diese zusätzliche Nebenzeit zu minimieren, wurde der Kompensationsablauf automatisiert. Alle für die Temperaturkompensation erforderlichen Funktionen werden dann von einem Kompensationsrechner ausgeführt. Diese umfassen die Ermittlung aller Messwerte, die Berechnung und Übertragung der Korrekturgrößen, die Bestimmung der Sensorkennlinie, die Berechnung eines überlagerten Korrekturanteils und die Steuerung des Kompensations- und Kalibrierungsablaufes.

### *Indirekte Steuerungstechnische Kompensation*

Im Gegensatz zur direkten Kompensation wird bei diesem Verfahren durch Messen einer verlagerungsproportionalen Größe auf das Verformungsverhalten der Maschine geschlossen. Man greift v.a. dann auf dieses Verfahren zurück, wenn aus konstruktiven Gründen eine direkte Implizierung eines sensorischen Messsystems in den Maschinenaufbau nicht möglich ist. Die vorausgegangenen Arbeitspunkte haben den Nachweis erbracht, dass der Temperaturverlauf als eine solche Größe herangezogen werden kann.

Eine Möglichkeit der indirekten steuerungstechnischen Kompensation ist die Entwicklung einer Korrekturfunktion auf Modellbasis unter Einbeziehung empirischer Korrekturwerte.

### 6.3.2 Entwurf einer Korrekturfunktion zur Kompensation des thermoelastischen Versatzes

Das thermoelastische Verformungsverhalten eines volumetrischen homogenen isotropen Körpers lässt sich nach [89] in vektorieller Schreibweise durch die Beziehung

$$\Delta\{u\} + \frac{1}{1-2\nu} \cdot \text{grad}(\text{div}\{u\}) - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \cdot \beta \cdot \text{grad}\vartheta = 0. \quad (23)$$

darstellen, wobei  $u$  den Verlagerungsvektor darstellt. Die Lösung dieses Gleichungssystems ist mittels einer Funktion für die Temperaturverteilung als Funktion von Ort und Zeit erbringbar. Dabei wird angenommen, dass die Wärmeleitfähigkeit der Maschinenkomponenten konstant ist.

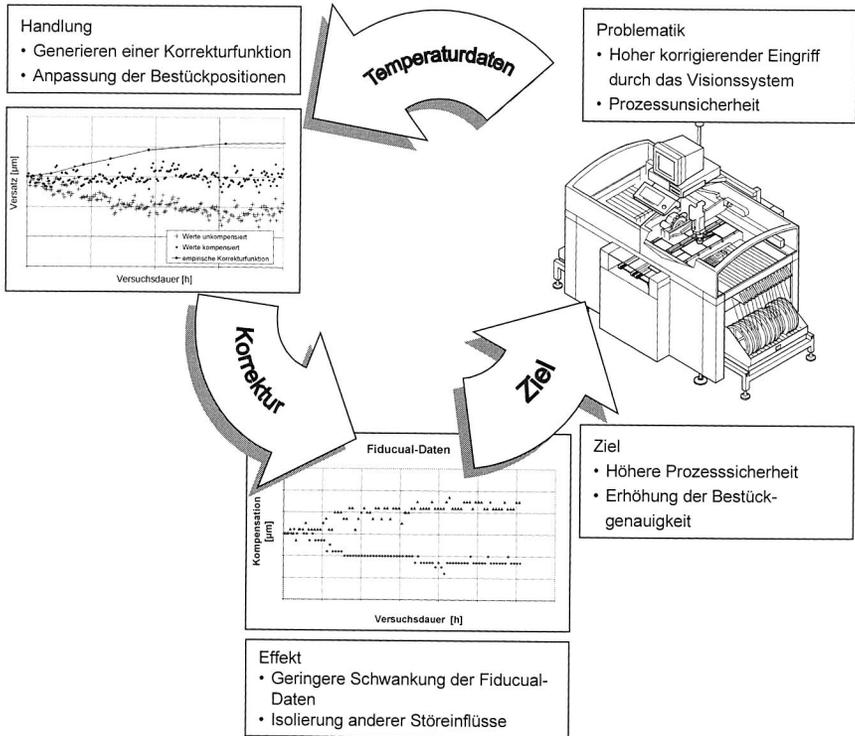


Bild 69: Zielsetzung der Korrekturfunktion - Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Bestückungssystemen

Zu diesem Zwecke müssen Randbedingungen an den Grenzen dieses Raum-Zeitkontinuums, wie Temperaturverteilung zum Zeitpunkt  $t_0$ , Temperatur an der Berandung des Körpers, Temperaturgradient an der Berandung und der Wärmeübergang der Umgebung, angegeben werden. Diese analytische Beschreibung des Temperatur-Verformungszusammenhanges ist jedoch nur für einfache Geometrien lösbar.

Zur Erstellung einer numerischen Korrekturfunktion kann für komplexere Problemstellungen deshalb auf die Methode der Finiten Elemente zur Beschreibung des thermoelastischen Verhaltens einer Maschinenstruktur übergegangen werden (vgl. Kapitel 6.2). Ziel dieses Kapitels ist es vielmehr, ausgehend von den experimentellen und analytischen Untersuchungen und auf empirischer Basis Korrekturfunktionen zu erstellen, die dem thermoelastisch bedingten Versatz unter den gegebenen Randbedingungen, d.h. ohne eine Form der passiven Kompensation, entgegenwirken.

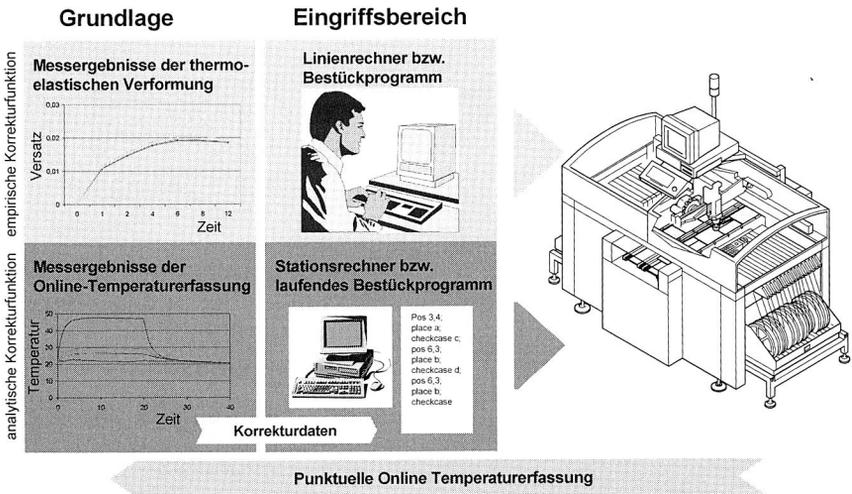


Bild 70: Konzepte zur Generierung einer Korrekturfunktion

Ein korrigierender Eingriff in das Bestückprogramm auf der Basis empirischer Daten in Form von vorausgegangenen Messungen, findet einmalig vor Ablauf des Bestückprogramms statt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich der thermoelastische Verzug unter vergleichbaren Randbedingungen ähnlich verhält, d.h. dass innerhalb eines bestimmten Toleranzfeldes eine Voraussage des Maschinenverhaltens getroffen werden kann. Dabei werden in bestimmten Korrekturintervallen die Bestückpositionen neu berechnet, um den thermischen Versatz zu kompensieren.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mittels analytischer Verfahren auf Basis von Online-Temperaturmessungen eine Korrekturfunktion zu entwerfen, die ohne Erfassung der eigentlichen Drift einen Korrekturparameter generiert (indirekte Kompensation). Dieses Modell würde sich den ändernden Randbedingungen anpassen. Problematisch hierbei ist allerdings, dass bei der derzeitigen Hardwarekonzeption eine Einflussnahme auf das Bestückprogramm während dessen Ablauf nicht möglich ist. Deshalb soll dieses Konzept in enger Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller realisiert werden.

#### *Analytische Korrekturfunktion*

Nach [91] lässt sich das summarische Verformungsverhalten in eine Koordinatenrichtung als Temperatur-Verformungszusammenhang durch die folgende Beziehung darstellen:

$$\delta_x = \alpha \cdot \int_0^l \vartheta(x) dx . \quad (24)$$

Das Integral repräsentiert die Temperaturverteilung innerhalb einer Dimension. Diese ist jedoch durch Messtechnik in diesem Versuchsaufbau nicht bestimmbar, da die Temperatur nur an lokalen Messpunkten aufgenommen wurde. Die Gleichung wird somit zu

$$\delta_x = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n \Delta x \cdot \Delta \vartheta_{xi} . \quad (25)$$

(n = Anzahl der Temperaturmesspunkte)

reduziert, wobei in erster Näherung der integrale Ausdruck beschreiben wird (Mittelpunktsregel). Für eine allgemeine Beschreibung des Temperatur-Verformungszusammenhangs wird die Gleichung auf die Form

$$\delta_x = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n C_i \cdot \Delta \vartheta_i . \quad (26)$$

gebracht. Die einzelnen Gewichtungsfaktoren  $C_i$  bewerten nach [91] den Einfluss des an einem Ort vorliegenden Temperaturzustandes auf das Verformungsverhalten und fassen damit den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  und den Anteil der Dehnlänge  $\Delta x$  zusammen.

#### *Modellbasierte empirische Korrekturfunktion*

Der empirischen Korrekturfunktion können sowohl die messtechnisch, analytisch oder durch numerische Simulationsverfahren gewonnenen Ergebnisse zugrunde gelegt werden. Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, unterliegt der tatsächliche Versatz

einer Vielzahl von äußeren Einflüssen, von denen sich die Maschinenerwärmung als der wesentliche herausstellte. Die zusätzlich auftretenden Einflussfaktoren auf den Kurvenverlauf, wie Messungenauigkeit der Lasertriangulationssensoren, Außentemperaturschwankungen, etc. unterliegen nicht dem vorausgesetzten Kriterium der „Vorhersagbarkeit“. Die so entstehenden Varianzen können somit mit dem Modell einer empirischen Korrekturfunktion nicht korrigiert werden. Aus diesem Grund wird die Korrekturfunktion auf Basis der analytischen Verschiebungsfunktion aus Kapitel 6.1 mit den Korrekturwerten aus Kapitel 6.2.3 entworfen.

Unter Elimination anderer Störgrößen setzt man für die Korrekturfunktion folgende Beziehung:

$$\int_0^t \int_{x=0}^l \xi_x(t; x) dx dt = \int_0^t \int_{x=0}^l (\vartheta_x(t; x) + \delta_x(t; x)) dx dt = 0. \quad (27)$$

$\xi$ : Restfehlerfunktion

$\delta$ : Korrekturfunktion

Die Restfehlerfunktion, d.h. die Differenz zwischen Korrekturfunktion und analytischer Verschiebungsfunktion, ist über den zu betrachtenden Bereich gleich Null. Für den Bestückversatz ist an dieser Stelle jedoch nur der Versatz an der Stelle  $x_0/y_0$  interessant. Unter Anwendung von

$$\int_0^t (\vartheta_x(t) + \delta_x(t)) dt = \int_0^t \vartheta_x(t) dt + \int_0^t \delta_x(t) dt \quad (28)$$

gilt somit

$$\int_0^t \vartheta_x(t) dt = - \int_0^t \delta_x(t) dt \quad (29)$$

$$\vartheta_x(t) = -\delta_x(t).$$

Die Korrekturfunktion entspricht somit der negativen Verschiebungsfunktion. Da nur der Punkt des Bestückkopfes in Betracht gezogen wird, ist das Verschiebungsfeld des gesamten Bestückautomaten nicht notwendig.

Somit ergibt sich für die Korrekturfunktionen

$$\delta_x(t) = -14,2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_x}}) \mu m \quad (30)$$

$$\delta_y(t) = 12,0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_y}}) \mu m.$$

*Anwendung der empirischen Korrekturfunktion*

Da der zur Realisierung des ersten Modells notwendige Regelkreis nicht geschlossen werden kann, d.h. eine automatische Einflussnahme auf das Bestückprogramm

während des Bestückvorgangs nicht möglich ist, kann eine Qualifizierung der analytischen Korrekturfunktion an dieser Stelle nicht vorgenommen werden.

Zur Ermittlung der Funktionalität der empirischen Korrekturfunktion wird ein Bestückprogramm erstellt, das die Messposition alle 5 Minuten anfährt. Der Versuch wird über 8 Stunden angelegt. Die Messposition stellt die eigentliche Variable des Versuchsaufbaus dar. Sie wird innerhalb des Bestückprogramms gemäß Gleichung 29 entgegengesetzt des zu erwartenden thermoelastischen Versatzes modifiziert.

Mit Hilfe der entwickelten Korrektur, die auf der Basis der experimentellen und analytischen Untersuchungen realisiert wurde, konnte gezeigt werden, dass durch die Berücksichtigung des thermischen Verhaltens von Bestückungssystemen eine Verbesserung der Positioniergenauigkeit möglich ist.

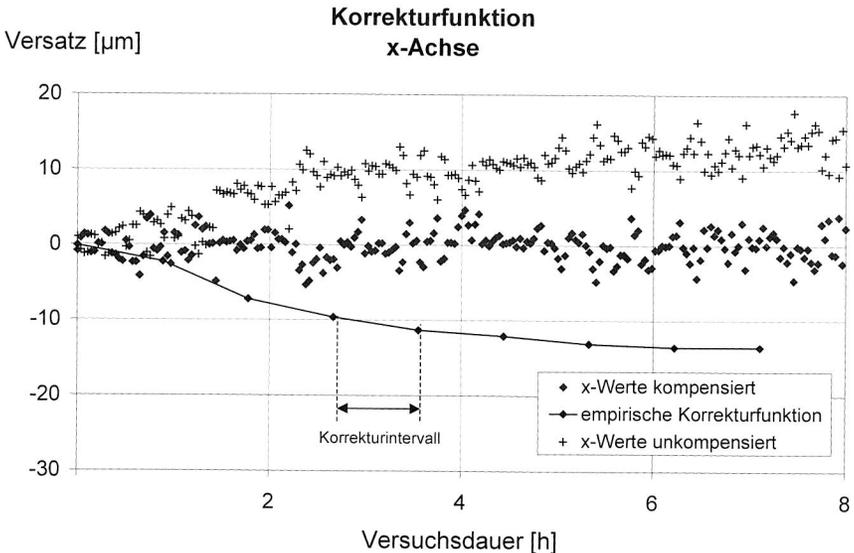


Bild 71: *Kompensierte Temperaturdrift des x-Versatzes durch die entwickelte Korrekturfunktion*

Der in Bild 71 dargestellte Verlauf des Bestückversatzes enthält die angewandte Korrekturfunktion, die tatsächlichen Messwerte (x-Werte kompensiert) sowie die Werte, die sich unter Elimination der Korrekturfaktoren ergeben. Man erkennt in diesem Verlauf das klassische thermoelastische Verhalten. Nach Anwendung der Korrekturfunktion ist dieses Verhalten vollständig kompensiert worden. Ohne konstruktive

Änderungen des Maschinenaufbaus wurde somit eine wirksame Korrektur des thermoelastischen Versatzes des Arbeitspunkts erreicht.

Eine weitere Verbesserung des Ergebnisses kann durch die Erhöhung der Korrekturfrequenz bzw. durch Reduzierung des Korrekturintervalls erreicht werden. Dieses bezeichnet den zeitlichen Abstand zwischen zwei Punkten, in dem in das Bestückprogramm zur Korrektur eingegriffen wird. Eine parallel ablaufende Temperaturmessung wird in der Wahl des Korrekturparameters ebenfalls berücksichtigt. Somit kann eine Online-Korrektur im weitesten Sinne realisiert werden.

Ein vergleichbares Bild ergibt sich für den  $y$ -Versatz, wenn als Grundlage zur Erstellung der Korrekturfunktion die analytisch hergeleitete Funktion mit dem Korrekturfaktor verwendet wird.

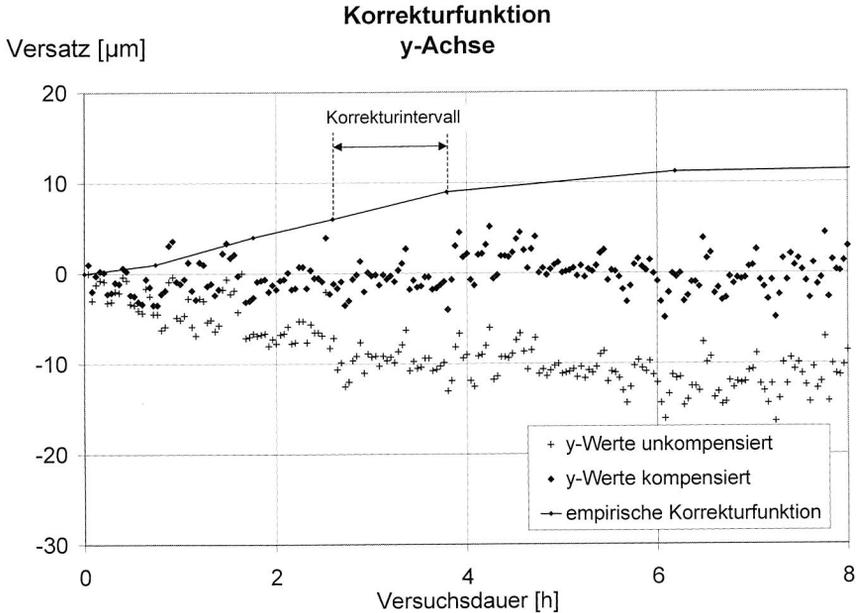


Bild 72: Kompensierte Temperaturdrift des  $y$ -Versatzes durch die entwickelte Korrekturfunktion

Die in Bild 71 und Bild 72 dargestellten Ergebnisse zeigen auf, dass mittels der Korrekturfunktion dem thermoelastisch bedingten Versatz entgegengesteuert werden kann. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für weitere Untersu-

chungen in Richtung Kompensation von thermoelastischen Verformungen bei Bestückungssystemen. Um die dabei entwickelten Korrekturfunktionen in die Steuerung der Bestückungssysteme zu integrieren, ist eine Zusammenarbeit mit Maschinenherstellern erforderlich. Dabei kann auf vorhandene Maschinenmodule aufgebaut werden, wie zum Beispiel die Bildverarbeitung zur Bestimmung der veränderten Maschinenstruktur, um eine direkte Kompensation der thermischen Verformung zu ermöglichen. Weiterhin ist es notwendig, die Maschinenkalibrierdaten dynamisch in Abhängigkeit des Betriebszustands verändern zu können.

## 7 Konzepte und Methoden zur Optimierung von Bestückungssystemen

Zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses neuer Bestückungssysteme wurden in dieser Arbeit Simulationswerkzeuge und insbesondere die 3D-Kinematiksimulation eingesetzt [30]. Diese ermöglicht eine ausführliche Analyse der Planungsergebnisse, wodurch sich die Entwicklungsflexibilität und die Planungssicherheit erhöhen [3]. Nach den Optimierungsschleifen der virtuellen Anlage können Steuerungsprogramme durch Offline-Programmierung generiert werden [2]. Zur Durchführung zusätzlicher Funktionen, wie Fernsteuerung, -überwachung und -diagnose flexibler Produktionsanlagen, kann die 3D-Kinematiksimulation als Plattform bzw. Visualisierungswerkzeug verwendet werden [26] [88]. In diesem Kapitel wird das Potential der Kinematiksimulation bei der Entwicklung, Optimierung und Überwachung von Bestückungssystemen aufgezeigt. Dabei wird die Vorgehensweise bei der Realisierung der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Roboterbestückungszelle vorgestellt.

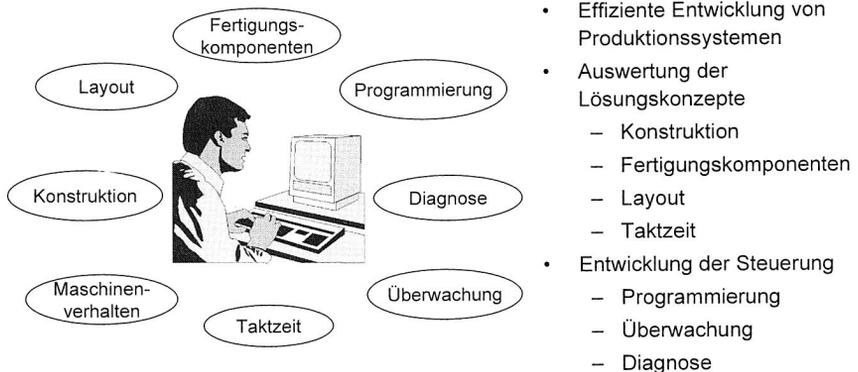


Bild 73: Teilaufgaben bei der Planung und Realisierung neuer Fertigungssysteme

Die Simulationstechnik dient dazu, real ablaufende oder noch zu erstellende Vorgänge anhand von Modellen zu untersuchen und zu optimieren. Heutzutage existieren bereits 3D-Simulationsprogramme, die den Materialfluss einer kompletten Fertigungsanlage simuliert darstellen oder die kinematische Simulation einer Roboterzelle ermöglichen [25].

Während sich die Produktivität im Fertigungsbereich Jahr für Jahr zwischen 5% und 8% gesteigert hat, konnten die Bürobereiche für Entwicklung, Konstruktion und Arbeitsplanung mit diesem Anstieg nicht Schritt halten [104]. Dies hat zur Folge, dass sich die Kostenbereiche von der Produktion in die Bürobereiche verlagert haben. Diese Situation erfordert neue Planungsmethoden und Planungshilfen, da die Kostenverantwortung hauptsächlich diese Bereiche tangiert. Verbesserungsmöglichkeiten ergeben sich durch den verstärkten Einsatz von rechnergestützten Hilfsmitteln zur Datenintegration - und was für diese Arbeit von Bedeutung ist - durch den Gebrauch der neuesten Entwicklungen der Simulationstechnik [42] [53].

Bereits in der Planungsphase bietet die Simulation und insbesondere die kinematische Simulation folgende Vorteile: Bei der Simulation können frühzeitige Planungsfehler erkannt und somit die Planungssicherheit erhöht werden [101]. Die Anlage kann sowohl bei der Planung als auch nach der Inbetriebnahme optimal dimensioniert werden. Es besteht also die Möglichkeit des Aufbaus einer CAD-Versuchsanlage, in der Layout-Alternativen verglichen werden können. Außerdem werden nach einer Optimierung die CAD-Daten der dazu notwendigen Bauteile bereitgestellt [44].

## **7.1 Systemoptimierung durch die Kinematiksimulation**

### **7.1.1 Aufbau und Realisierung einer Roboterbestückungszelle**

Mit Hilfe der kinematischen Simulation können vollständige Montageprozesse in der Bestücktechnik modelliert werden. Damit besteht die Möglichkeit, detaillierte Ablaufstudien durchzuführen und hinsichtlich fertigungstechnischer Kriterien das Layout des Bestückungssystems zu optimieren [43]. So können im Vorfeld Taktzeiten berechnet und Bewegungsabläufe auf Kollisionen ohne Beschädigungsgefahr getestet werden [59]. Weiterhin ermöglicht die Kinematiksimulation, die Auswirkungen einer Produktänderung auf die Fertigungsanlage und eingeleitete Optimierungsmaßnahmen zu analysieren und letztendlich durch die Offline-Programmierung den Zeitaufwand bei der Inbetriebnahme deutlich zu verkürzen [48].

Bild 74 zeigt die Vorgehensweise für den Aufbau einer virtuellen Fertigungsanlage. Bei der Modellierung der Anlagenkomponenten können andere CAD-Systeme eingesetzt werden. Die Kinematiksimulation ermöglicht das Importieren von CAD-Daten aus verschiedenen CAD-Systemen [67].

Zur Realisierung der virtuellen Bestückungsanlage sind drei Schritte notwendig. Zunächst gilt es, die 3D-Modellierung aller Fertigungskomponenten unter Berücksichtigung der bestücktechnischen Randbedingungen fertig zu stellen.

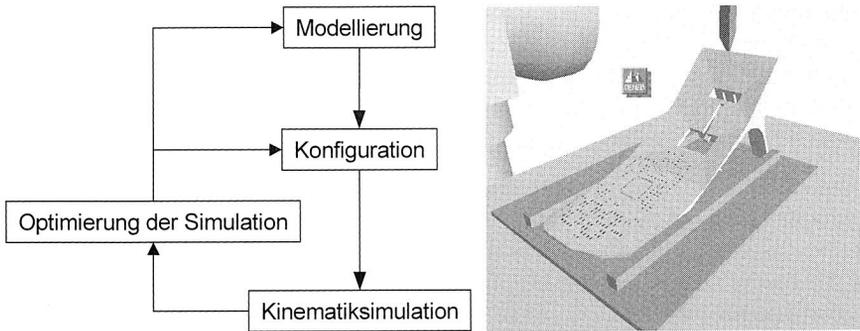


Bild 74: Vorgehensweise zur Realisierung einer 3D-Kinematiksimulation – Beispiel der Roboterbestückungszelle

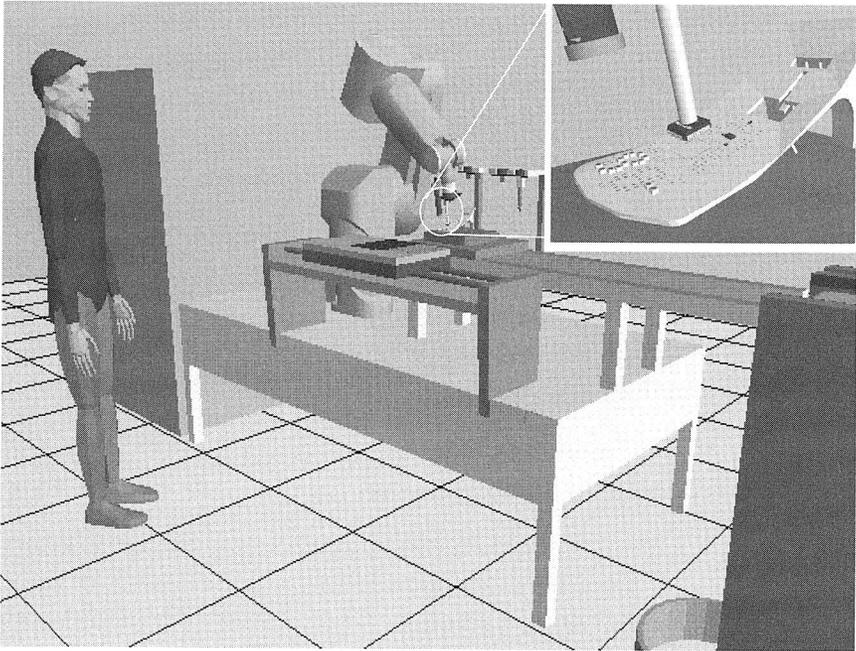
Hierbei werden die Komponenten der Zelle, bestehend aus einem Industrieroboter, einer Werkzeugwechselstation, Bestückwerkzeugen, einem Bauelementezuführungssystem, einem Leiterplattentransportsystem und einer Transportpalette, im Simulationsprogramm als CAD-Modelle nachgebildet. Darauf aufbauend sind die Funktionen und die Kinematik der einzelnen Komponenten der virtuellen Zelle zu definieren. Im letzten Schritt wird das Steuerungsprogramm sowie die Steuerungsstruktur in eine simulationsspezifische Programmiersprache implementiert. An dieser Stelle ist neben den Steuerungsprogrammen der Fertigungskomponenten die Kommunikation zwischen der Robotersteuerung (Hauptsteuerung) und der Peripherie zu realisieren. Aufbauend auf diesen Schritten kann das Bestückungssystem durch Änderungsschleifen hinsichtlich der Mengenleistung optimiert werden. Dabei werden die Bewegungsabläufe, die Rüstung und Werkzeugbereitstellung an die Anforderungen des zu bestückenden Produktes angepasst.

Durch den Einsatz der Kinematiksimulation und deren Integration in den Entwicklungsprozess von Montagesystemen ergeben sich insgesamt folgende Vorteile:

- Kürzere Entwicklungszeiten für Produktionssysteme bei höherer Planungssicherheit
- Optimierung und Test der Produktionssysteme durch Änderungsschleifen
- Fehlererkennung durch Visualisierung der Fertigungsabläufe.

Weiterhin trägt die Kinematiksimulation besonders zur Erweiterung der horizontalen Datenintegration bei. So können Bereiche der Produktplanung und der Montage mit Hilfe der Simulation ein gemeinsames Optimum für Produktgestaltung und Produktionsanlage entwickeln.

Bild 75 zeigt die in der Kinematiksimulation abgebildete Roboterbestückungszelle.



*Bild 75: Aufbau der Kinematiksimulation der Roboterbestückungszelle für die Bestückung räumlicher Schaltungsträger*

### **7.1.2 Gesamtkonzept der Offline-Programmierung**

Die Grundlage für das für die Roboterbestückungszelle entwickelte Offline-Programmierungskonzept ist die 3D-Kinematiksimulation. Im Gegensatz zum Online-Verfahren, bei dem die Programmierung direkt an der Anlage erfolgt, beruht das Offline-Verfahren auf der physikalischen Entkopplung von Steuerung, Industrieroboter und Programmierung. Bei der konventionellen Offline-Programmierung handelt es sich überwiegend um ein textuelles Verfahren. Die Programmierung erfolgt indirekt durch eine Beschreibung der Aufgabe in einer problemorientierten Programmier-

sprache. Die Eingabeinformationen werden in das hier notwendige Rechnersystem in Steuerungsinformationen für den Roboter übersetzt. Hierfür stehen das explizite und das implizite Programmierverfahren zur Verfügung. Die Kinematiksimulation unterstützt beide Verfahren und ermöglicht sowohl die bewegungsorientierte Beschreibung als auch die aufgabenorientierte Beschreibung der Fertigungsabläufe.

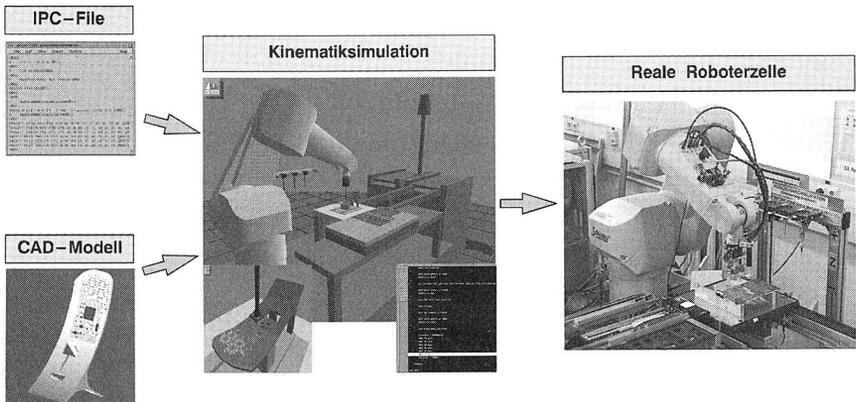


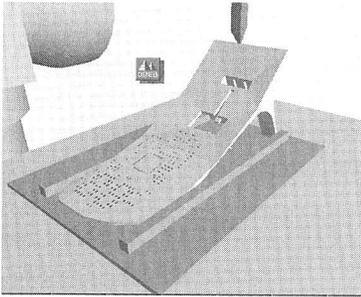
Bild 76: Darstellung der simulationsbasierten CAD/CAM-Kette zur automatischen Generierung von Bestückprogrammen

In der Entwicklungsphase der Roboterbestückungszelle wurde eine 3D-Kinematiksimulation realisiert. Aufbauend wurde ein Postprozessor zur automatischen Generierung des Steuerungsprogramms entworfen. Die Kombination der kinematischen Simulation und Offline-Programmierung bildet die virtuelle Bestückungsanlage, in der die Steuerungsstruktur sowie das Bestückprogramm entwickelt und getestet werden. Mit diesem gewonnenen Werkzeug kann der Entwickler die Auswirkungen beliebiger Abweichungen (z. B. in Produktgestaltung räumlicher Schaltungsträger etc.) schnell simulieren und bei der Inbetriebnahme umsetzen. Dabei wird das in der Simulation optimierte Steuerungsprogramm in die Steuerungssprache des realen Roboters übersetzt. Somit können mittels der Offline-Programmierung die Ablauf- und Positionsinformationen des virtuellen Systems in das reale Fertigungssystem übertragen werden.

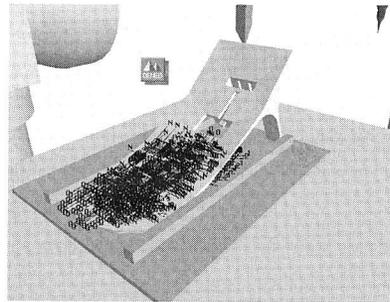
Zur Einbindung von Bestückdaten in das Simulationsprogramm wurde ein Programm erstellt, das die Bestückpositionen aus einem IPC-File importiert. Hierfür wurde eine Funktion implementiert, die ein IPC-File lexikalisch und syntaktisch analysiert, die

Bestück- und Lotpastenauftrags-Positionen für den beschriebenen Schaltungsträger speichert und die Positionen im virtuellen Raum automatisch erzeugt.

Als Beispiel zeigen die nachfolgenden Abbildungen die 3D-Darstellung eines spritzgegossenen Schaltungsträgers ohne Bestückdaten und nachdem die Bestückinformationen aus der IPC-Datei in die Kinematiksimation automatisch eingebunden wurden.



*Schaltungsträger ohne Positionseinträge*



*Schaltungsträger mit Positionseinträgen*

*Bild 77: Automatisches Importieren der Bestückdaten aus einem ECAD-System in die Kinematiksimation*

Das Bild 77 stellt einen Auszug des Schaltungsträgers mit den Bestückinformationen dar. Es zeigt die Bestückposition und die Lötpasteneintragspositionen in Form von Koordinatensystemen. Die so eingebundenen Positionen sind mit Namen versehen, die beim Programmieren der virtuellen Montageanlage abgerufen werden können.

## **7.2 Simulationsbasierte Steuerung und Überwachung von Bestückungssystemen**

Die technische Entwicklung von Produktionsanlagen ist in den letzten Jahren unaufhaltsam gestiegen. In der Vergangenheit wurden Produktionssysteme möglichst einfach konzipiert, unter anderem auch um den Einsatz von Überwachungs- und Steuerungssystemen (supervisory control systems) zu ermöglichen und zu fördern. Diese supervisory control systems genügten nur den geringen Anforderungen der bislang weitgehend einfach konzipierten Produktionsanlagen. Die modernen automatisierten, flexiblen und integrierten Produktionsanlagen erheben den Anspruch auf

komplexe Steuerungs- und Überwachungssysteme, die ihren Anforderungen gerecht werden [12].

Die rasante Entwicklung der Hardware und der Software in der Computertechnologie eröffnet in der Produktionstechnik neue Wege. Durch leistungsfähige Softwarepakete können, bei der Planung und beim Betrieb der Anlagen, Konzepte realisiert werden, wie sie in der Vergangenheit nicht möglich waren. Als Beispiel ist die 3D-Kinematiksimulation zu nennen. Mitunter ist ein enormer Fortschritt in der Realisierung von Schnittstellen eingetreten. Mit der Entwicklung von Rechnernetzen hat sich die Kompatibilität von mehreren Systemen verbreitet. Mehrere Systeme nutzen durch definierte Protokolle ein gemeinsames Netz (zum Beispiel durch das TCP/IP-Protokoll) [99]. Das Internet ist bei dieser Betrachtung auch einbezogen. Durch die Nutzung dieser Kommunikationsnetzwerke können die Komponenten einer Anlage sich in verschiedenen Räumen beziehungsweise Orten befinden.

Die Konzeption und Realisierung eines Steuerungs- und Überwachungssystems auf der Basis der 3D-Kinematiksimulation für ein flexibles Bestückungssystem stellen erhöhte Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle und den Simulationsaufbau der zu überwachenden Anlage. Das Steuerungs- und Überwachungssystem wurde an einer Bestückungszelle realisiert. Die visuelle Überwachung erfolgt mittels einer 3D-Kinematiksimulationsplattform, in der die reale Bestückungszelle nachgebildet ist. Die Steuerung wurde für die Online-Steuerung und -Überwachung erweitert. Die Kommunikation zwischen der realen Bestückungszelle und der 3D-Kinematiksimulation erfolgt über das Internet.

### **7.2.1 Beschreibung der Komponenten des Systems**

Das Steuerungs- und Überwachungskonzept für Bestückungssysteme wurde auf der Basis der in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Roboterbestückungszelle realisiert. In diesem Abschnitt werden die Komponenten des Steuerungs- und Überwachungssystems dargestellt. Die in Kapitel 7.1 gezeigte 3D-Kinematiksimulation der Roboterbestückungszelle stellt eine wichtige Komponente des Gesamtsystems dar.

Das Online-Steuerungs- und -Überwachungssystem bedient sich der 3D-Kinematiksimulation für zwei wichtige Aufgaben. Zum einen verwirklicht sie das visuelle Überwachungsmedium und zum anderen bietet sie eine Ablaufplattform für die Steuerung und Überwachung der Fertigungsanlage. Die 3D-Kinematiksimulation hat sich dabei als geeignet für die Visualisierung, Steuerung und Fehlerlokalisierung erwiesen.

Das Programmpaket wurde für eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Bestückungszelle verwendet. Dabei wurde als erstes die Modellierung durchgeführt. Die

einzelnen Teile der Bestückungszelle (Baulementzuführsystem, Materialflusssystem, Werkzeugwechselsystem, Werkzeuge, Tisch, Bauelemente usw.) wurden modelliert und zu einer Bestückungszelle zusammengesetzt. Wichtig bei der Modellierung ist die genaue Nachbildung der Kommunikationskanäle innerhalb der Zelle. Nach der Modellierung sind die Steuerprogramme für die einzelnen Komponenten implementiert worden. Durch den Ablauf dieser Steuerprogramme kann der Bestückvorgang im 3D-Simulationsprogramm erfolgen. Dabei wird sichergestellt, dass sich die abgebildete Zelle genau wie die reale Bestückungszelle verhält, dadurch dass bei beiden Zellen die gleichen Programme den Ablauf definieren und diese Programme durch die gleiche Steuerung aufgerufen werden. Somit wird eine Überwachung der realen Bestückungszelle durch die 3D-Simulation erreicht.



Bild 78 Komponenten des auf der Kinematiksimulation basierten Steuerungs- und Überwachungssystems

Bild 78 zeigt die drei Komponenten des Systems. Das Online-Steuerungs- und -Überwachungssystem setzt auf diese Komponenten auf. Durch die Entwicklung von

entsprechenden Schnittstellen und Protokollen wird die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten realisiert.

## 7.2.2 Konzept des Steuerungs- und Überwachungssystems

Unter Einbeziehung der in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Komponenten wurde ein Konzept entwickelt, um ein Online-Steuerungs- und Überwachungssystem zu realisieren. Dabei konnten die einzelnen Komponenten der simulierten Bestückungszelle zum großen Teil übernommen werden. Alle Änderungen die vorgenommen wurden, beziehen sich hauptsächlich auf die internet-basierte Kommunikation zwischen der realen und virtuellen Anlage.

In diesem Abschnitt wird das entwickelte Gesamtkonzept für das Online-Steuerungs- und -Überwachungssystem vorgestellt. Hierbei wird auf den grundlegenden Aufbau und die Funktionsweise eingegangen. Der Datenaustausch zwischen der virtuellen und realen Anlagen erfolgt auf der Basis der Internet-Kommunikation. Diese standardisierte Kommunikation ermöglicht eine Flexibilität hinsichtlich der Einsetzbarkeit des Konzepts.

Bild 79 zeigt die Basiskomponenten, die das Online-Steuerungs- und -Überwachungssystem bilden. Dabei wird die in der Kinematiksimulation realisierte virtuelle Fertigungsumgebung als Basis für die Durchführung der Fernüberwachung und Ferndiagnose genutzt. Dies lässt sich durch die Online-Anbindung der virtuellen Anlage an die reale Anlage realisieren. Die Kommunikation zwischen den Basiskomponenten (die Bestückungszelle, die 3D-Kinematiksimulation und das Steuerungsprogramm) kann durch die Benutzung eines Intranets realisiert werden oder auch durch die Verwendung des Internets, das in der heutigen Zeit eine wichtige Rolle in der weltweiten Kommunikationstechnologie übernommen hat.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine fehlerfreie Steuerung und Überwachung mit Hilfe der Kinematiksimulation ist die exakte Übereinstimmung der Produktionsanlagen in der Planungs- und Fertigungsebene. Dies soll gewährleisten, dass die Systeme alle Steuerbefehle korrekt ausführen und dass bei der Überwachung eine Visualisierung der Bestückungszelle durch die Kinematiksimulation dem Betrachter wiedergegeben wird. Durch die Erweiterung der Kinematiksimulation kann eine Schnittstelle nach außen generiert werden, die das TCP/IP-Protokoll für die Kommunikation benutzt.

Die reale Produktionsanlage ist demnach vom Steuerungs- und Überwachungssystem räumlich unabhängig. Im Falle der Benutzung des Internets kann sich diese räumliche Trennung über alle Kontinente erstrecken.

Bei der Anbindung der Kinematiksimulation an die Fertigungsanlage werden die Steuerungsfunktionen bzw. die Steuerbefehle gleichzeitig in der virtuellen und in der realen Produktionsanlage ausgeführt. Folglich wartet das in der Kinematiksimulation realisierte Steuerungsprogramm auf die Bestätigung der Befehlsausführung der realen Anlage. Wenn die Befehlskette an einer Stelle unterbrochen wird, kann die Steuerung nach einer vorgegebenen Zeit die Anwendung abbrechen oder Korrekturmaßnahmen in beiden Systemen einleiten. Die Überwachung mittels der Simulation zeigt dem Anwender, an welcher Stelle die Ablaufkette unterbrochen worden ist. Die Maßnahmen, die der Anwender unternimmt um diese Störung zu beheben, können ebenfalls in die 3D-Kinematiksimulationsplattform eingebunden und somit am Überwachungsmonitor visuell dargestellt werden.

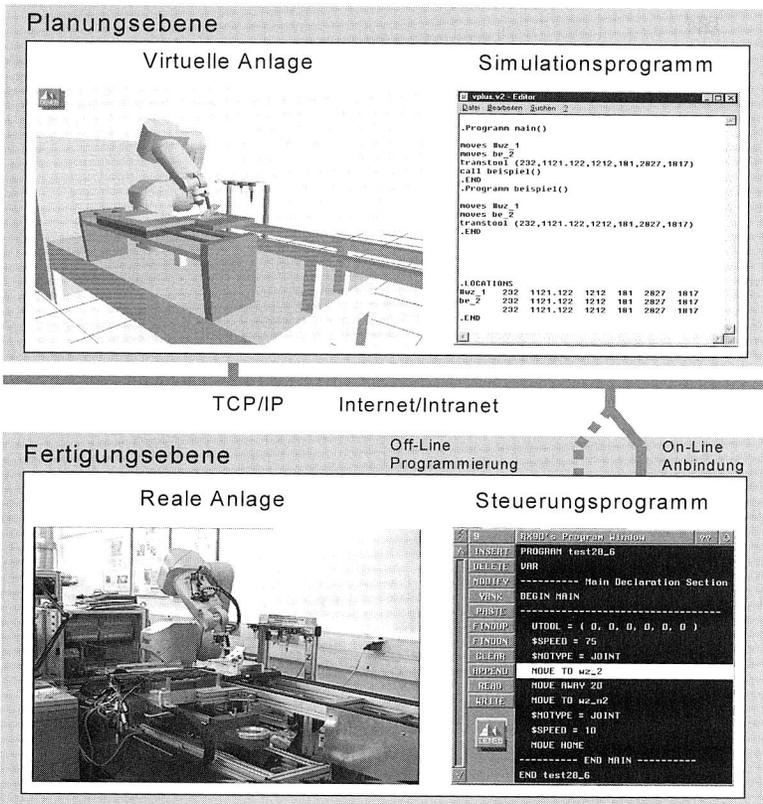


Bild 79: Gesamtkonzept der Integration von Planungs- und Fertigungsebene für die Steuerung und Überwachung

### 7.2.3 Realisierung des Steuerungs- und Überwachungssystems

Das Steuerungs- und Überwachungssystem wurde, unter der Voraussetzung auf bereits vorhandenen Komponenten (Anlagenmodell, Steuerung und Anlage) aufzubauen, konzipiert und realisiert. Das bedeutet, dass die Steuerungsprogramme der 3D-Kinematiksimulation und die der realen Bestückungszelle nicht in ihrer Funktion geändert werden müssen, um das Steuerungs- und Überwachungssystem verwenden zu können. Geringfügige Änderungen in den vorhandenen Programmen müssen lediglich bei der Systemintegration vorgenommen werden.

Das Gesamtkonzept zur Fernsteuerung und -überwachung der Bestückungszelle besteht aus drei Softwareeinheiten. Die erste Einheit wird auf der 3D-Kinematiksimulations-Plattform ausgeführt und wurde in der Simulationssprache GSL (Graphic Simulation Language) implementiert. Das zweite Softwaremodul ist in den Steuerprogrammen der realen Bestückungszelle integriert. Die dritte Softwareeinheit ist ein Schnittstellenprogramm, das auf dem Zellenrechner läuft.



*Bild 80: Online-Steuerung und -Überwachung der Roboterbestückungszelle durch die 3D-Kinematiksimulation*

Die erforderlichen Funktionen und Prozeduren für die Kommunikation mit der realen Bestückungszelle sind modular realisiert. Ihre Einbindung in das System erfolgt über die INCLUDE-Anweisung in den jeweiligen Programmen der modellierten Kompo-

nennten der Bestückungszelle. Die EXECUTE- und WAIT-Anweisungen, die in die Programme zusätzlich eingebunden werden, übernehmen die Aufgabe einen Befehl an die reale Zelle zu schicken und auf dessen Ausführung zu warten.

Der Weg, der bei einem Steuerungsprogramm aufruf bestritten wird, beginnt mit dem Empfangen eines Befehls aus der 3D-Simulations-Plattform. Der Befehl wird über den NT-Rechner (siehe Bild 82) an das Steuerungs- und Überwachungsprogramm gesendet. Der Steuerbefehl wird durch die Kommunikationseinheit empfangen und dekodiert. Danach wird er zur Ausführungseinheit weitergeleitet. Hier erfolgt der entsprechende Aufruf des empfangenen Zellenprogramms. Die erfolgreiche Ausführung des Programms wird an die Ausführungseinheit gemeldet. Diese setzt wiederum den Kreislauf fort, und sendet über die Kommunikationseinheit eine Ausführungsbestätigung an die 3D-Kinematiksimulation.

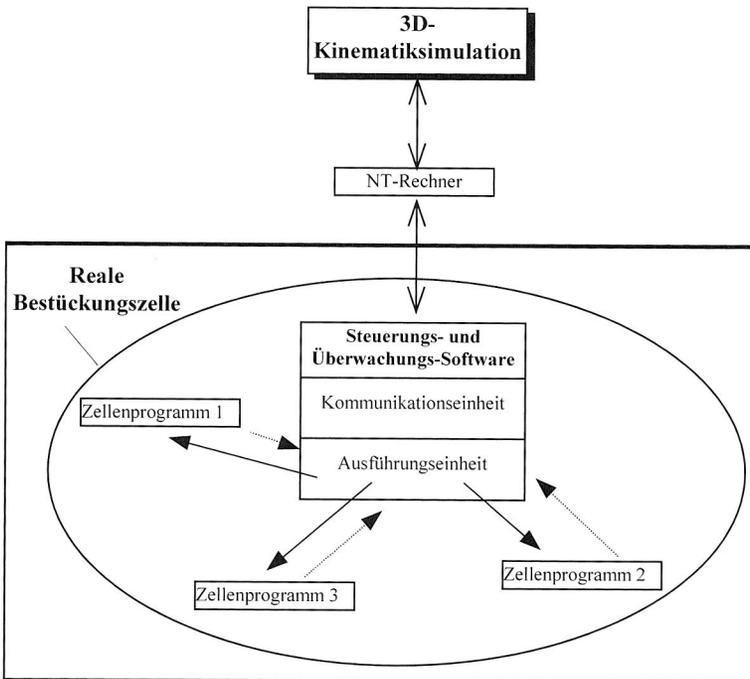
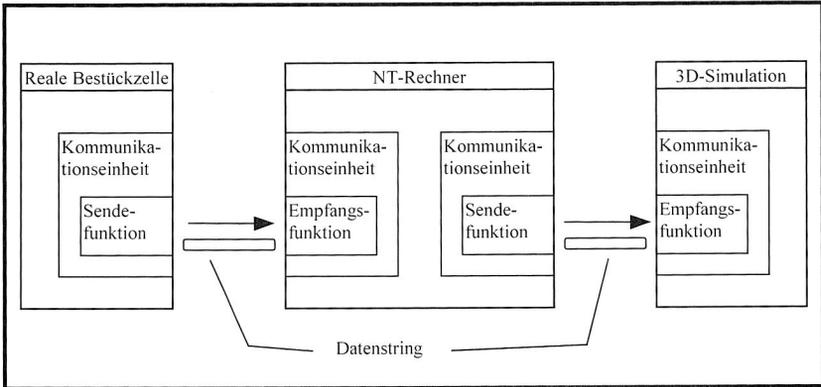


Bild 81: Softwareeinheit für das Steuerungs- und Überwachungssystem integriert in der realen Bestückungszelle

Um eine Kommunikation zwischen den Systemen sicher und übersichtlich zu gestalten, wurde ein einheitliches Protokoll eingerichtet, das in allen Komponenten des Steuerungs- und Überwachungssystems eingesetzt wird. Der Befehl wird dafür in einen Datenstring verpackt und über die Schnittstellen an die anderen Komponenten verschickt. Im folgenden wird das Konzept des Versendens und Empfangens von Nachrichten gezeigt.



*Bild 82: Schematische Darstellung der internetbasierten Datenübertragung zwischen der Bestückzelle und der Kinematiksimulation*

Der Inhalt des Datenstrings übergibt dem Kommunikationspartner mehrere Informationen. Dabei handelt es sich um die Art der Nachricht (Ausführungsbestätigung, Verbindungsaufbau, etc.), den Funktionsnamen der ausgeführt werden soll und einer laufenden Nummer, die zu Sicherheitskontrollen verwendet werden kann. Das gesamte Steuerungs- und Überwachungssystem muss zuerst verbunden werden, um alle Komponenten zu aktivieren. Dies ist in zwei wichtige Schritten unterteilt. Der erste Schritt ist der Verbindungsaufbau der Bestückungszelle mit dem NT-Rechner, der zweite Schritt der Verbindungsaufbau des NT-Rechners mit der 3D-Kinematiksimulations-Plattform. Danach können die Funktionen zur Fernsteuerung und -überwachung der realen Roboterzelle durch die Kinematiksimulation ausgeführt werden. Dabei können Funktionen und einzelne Bewegungsbefehle getestet und überwacht werden. Durch die Bestätigungs- bzw. Protokollfunktion kann beim Auftreten einer Störung die entsprechende Meldung angezeigt werden, die zu einer schnellen Fehlerlokalisierung im Steuerungsprogramm dient. Um die Funktion der Fernsteuerung und -überwachung durch die Kinematiksimulation zu gewährleisten, muss die Bestückungszelle einschließlich der Steuerung in der Kinematiksimulation exakt abgebildet sein.

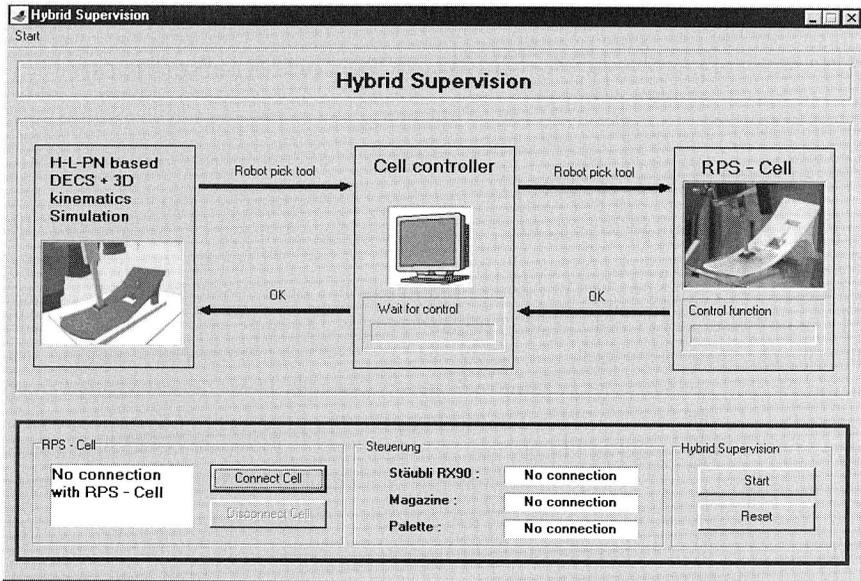


Bild 83: Menü für die Online Steuerung und Überwachung – Anbindung der Robotersteuerung an die Kinematiksimulation

Die Erweiterung der Kinematiksimulation ermöglicht die Online-Steuerung und Überwachung von Fertigungsabläufen. Dabei stellen die virtuelle Anlage und die Offline-Programmierung die Basis des Konzeptes für die Visualisierung der realen Abläufe dar. Die Internet-basierte Kommunikation zwischen der virtuellen und der realen Fertigungsebene erlaubt dem Online-Steuerungs- und -Überwachungssystem eine räumliche Unabhängigkeit.

Der vorgestellte Entwicklungsprozess und die Integration der Planungsebene in die Fertigungsebene ermöglichen eine schnelle Umsetzung von Fertigungskonzepten und eine schnelle Umstellung auf veränderte Produktgestaltungen. So können Fertigungssysteme schnell an neue Anforderungen durch eine Produktänderung in der Kinematiksimulation optimiert und die Steuerungsprogramme online übertragen werden.

## 7.3 Betriebsdatenerfassung zur Fehlerfrüherkennung

### 7.3.1 Problemstellung

Der Bestückprozess unterliegt Umgebungseinflüssen. Diese sind entweder durch die Parameter der jeweiligen Maschine bestimmt, oder sie resultieren aus den gegebenen Randbedingungen der Umgebung (Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt etc.). Diese Einflüsse haben eine wesentliche Wirkung auf das Prozess- und Maschinenverhalten. Dieses lässt sich durch die Darstellung und Erfassung der Betriebsdaten und insbesondere der Maschinendaten realisieren. Deshalb ist es notwendig, ein übergreifendes Konzept zur Fehlerfrüherkennung in der Elektronikfertigung zu entwickeln. Die Grundidee ist es, die anfallenden Maschinendaten in einer Bestückungslinie für eine bessere Systemüberwachung sowie Fertigungstransparenz zu nutzen [50]. Eine effektive Nutzung der Daten ermöglicht Rückschlüsse auf die gesamte Prozesskette. Dies kann zur Fehlerfrüherkennung während des Fertigungsprozesses und zur schnellen Fehlerlokalisierung bei Maschinenstörungen eingesetzt werden.

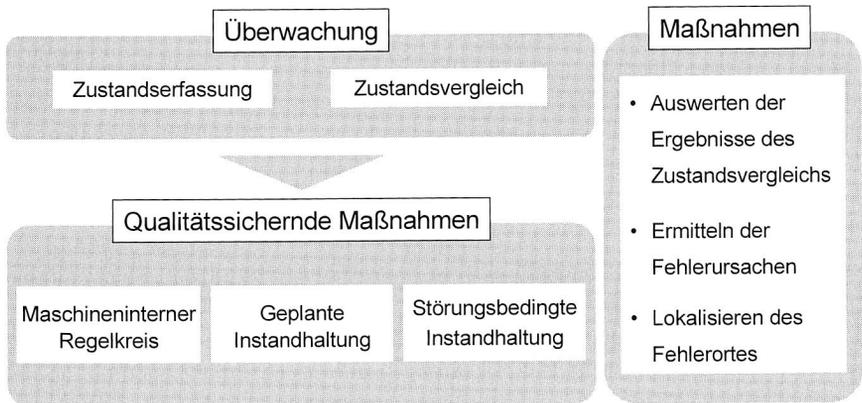


Bild 84: Aufgaben und resultierende Maßnahmen bei der Maschinenüberwachung, Diagnose und Instandhaltung

Um ein übergreifendes Dateninformationssystem in der Elektronikproduktion realisieren zu können, soll zuerst ein Datenerfassungssystem zur Überwachung von Fertigungsanlagen entwickelt werden. Die Datenerfassung beinhaltet die Aufnahme von

Sensordaten und Maschinenparametern, die den Maschinenzustand beschreiben. Diese Daten werden mit den vorgegebenen Soll-Daten und -kennlinien verglichen. Das Ergebnis des Datenvergleichs dient als Grundlage zur Bestimmung von Fehlerort und -ursache.

Zusätzlich ist eine durchgängige Vernetzung aller Produktionsschritte von der Planung bis zur Endkontrolle notwendig, um die anfallenden Daten allen beteiligten Anwendern zur Verfügung zu stellen. Eine Online-Korrektur bei anfallenden Trends oder Ausschussteilen wäre das übergeordnete Ziel. Dies entspricht im weitesten Sinne der Definition einer Regelung.

Die wesentlichen Beweggründe zur Betriebsdatenerfassung (BDE) sind die Erhöhung der Verfügbarkeit der Maschinen sowie die Kontrolle des Fertigungsprozesses und der eingesetzten Komponenten (Bauelemente, Leiterplatte). Des Weiteren ist es notwendig, den Fertigungsprozess in der Elektronikindustrie hinsichtlich der gestiegenen Anforderungen zu optimieren. Dies geschieht in modernen Fertigungsanlagen durch die Erfassung und Auswertung relevanter Betriebsdaten mit Hilfe eines übergreifenden Informationssystems.

In diesem Zusammenhang wurde ein internetbasiertes Beobachtungssystem am Roboterbestückungssystem realisiert. Die Aufgabe dieses Systems lässt sich in die folgenden Schwerpunkte unterteilen:

- Erfassung und Visualisierung der Maschinendaten
- Vergleich des Ist-Zustands mit dem Soll-Zustand der Anlage

### **7.3.2 Konzept für die Online-Übertragung von Maschinendaten**

Neben der Steuerung von Fertigungsabläufen erfordert die Automatisierung in der Elektronikproduktion eine Überwachung der Betriebszustände und Fertigungsprozesse im Hinblick auf die Funktionssicherheit und damit die Qualität der Produkte. Eine weitgehende Vernetzung von Produktionseinheiten und eine systematische Überwachung mit Sensoren sind grundlegende Voraussetzungen zur Aufnahme der Betriebszustände. In diesem Zusammenhang unterstützt die Internet-Technologie die Datenübertragung, so dass es für den Anwender bzw. Systembeobachter kaum einen Unterschied macht, wo sich die Anlage befindet. Die Datenfernübertragung via Internet ermöglicht die Visualisierung der Momentansensorwerte, das Auslesen der Datenspeicher, die Bedienung von analogen und digitalen Ausgängen, das Ändern von Programmparametern, die komplette Umprogrammierung und das Laden von neuen Steuerungsprogrammen. Basierend auf diesen Überlegungen wurde ein Überwachungssystem an einem Bestückungssystem realisiert und erprobt, das über

Internet beobachtet werden kann. Für diese Applikation wurde die in Kapitel 3.2.2 vorgestellte flexible Roboterbestückungszelle verwendet.

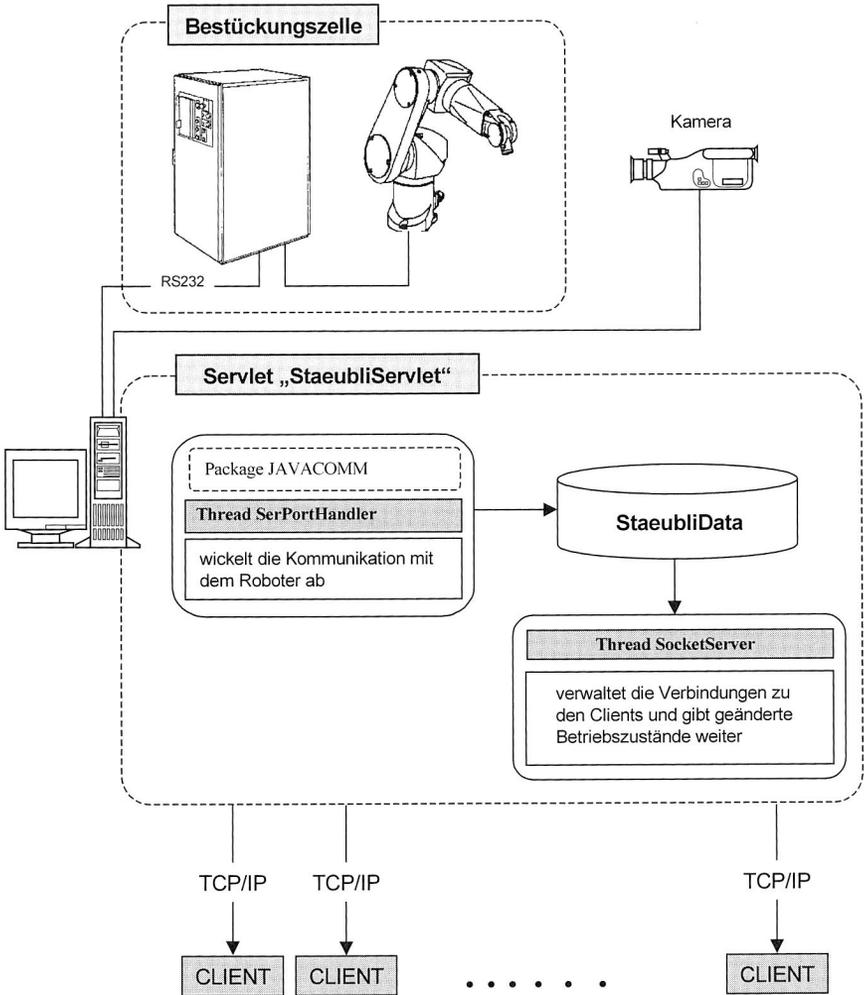


Bild 85: Gesamtkonzept der realisierten Netzwerkstruktur zur Internetüberwachung der Roboterbestückungszelle<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Die Konzeption und Realisierung der Anbindung an die Bestückungszelle erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Schlögl

Die internen Parameter der Bestückungszelle und angeschlossene Sensoren können via Internet abgefragt werden. Weiterhin können die Fertigungsabläufe beim Bestücken durch die Videoübertragung beobachtet werden. Auf einem Server-Rechner, der über eine Schnittstelle mit der Zellensteuerung verbunden ist, werden die Maschinendaten in Form von HTML-Dokumenten von einem Web-Server bereitgestellt, so dass sie von autorisierten Benutzern mit einem Web-Browser betrachtet werden können. Bei der Implementierung wurde nur Standardsoftware auf Client-Seite verwendet.

Die zu beobachtende Bestückungszelle wurde über eine serielle Schnittstelle an einen Server-PC angeschlossen, auf dem ein HTTP-Webserver und ein Videosever läuft. Von diesem Rechner können beliebig viele, über das Internetübertragungsprotokoll TCP/IP angeschlossene Rechner (Client) die Fertigungsdaten weltweit abfragen und die Bestückabläufe in der Fertigungszelle über Videoübertragung beobachten. Die Fertigungsdaten, wie zum Beispiel Bestückpositionen, Bildverarbeitungsdaten und Vakuum, werden über die serielle Schnittstelle RS232 von der Zellensteuerung an den angeschlossenen Server-PC geliefert. Hierfür wurde in einem Hintergrundtask der Steuerung eine Routine für die Kommunikation mit dem Server-PC und Datenübertragung implementiert. Damit kann die Bestückungszelle zum einen kontinuierlich diejenigen Parameterdaten liefern, die permanent von Interesse sind. Zum anderen sollen auch ständig eventuelle Client-Anfragen nach speziellen Informationen beantwortet werden können.

Der gegenwärtige Entwicklungsstand des WWW ist so zu beschreiben, dass auf den meisten Plattformen Browser zur Verfügung stehen, die Java-Applets bearbeiten können. Dennoch wird auch für die Benutzer älterer Browser oder weniger leistungsstarker Rechner eine Möglichkeit geschaffen, zeitnahe Fertigungsdaten abzurufen. Daher wurde ein zweigleisiges Konzept entwickelt (siehe Bild 86): Nicht Java-fähige Browser können die meisten Fertigungsdaten auch über reine HTML-Seiten anzeigen. Hierfür wurde eine einfache, HTML-basierte Visualisierung der Parameterwerte vorgesehen. Für leistungsstärkere und modernere Browser hingegen ermöglicht ein Java-Applet eine komfortable Echtzeit-Anzeige der gewünschten Fertigungsdaten.

Der Zugriff auf sensitive Fertigungsdaten wird nur einem bestimmten Personenkreis gewährt. Zu diesem Zwecke wurde die Betriebsdatenvisualisierung durch ein Passwort geschützt werden. Dies erfolgt, indem serverseitig Benutzergruppen durch sog. „Access Control Lists“ (ACL) zusammengefasst werden. Einzelne Dateien oder sogar ganze Verzeichnisse können bei der Konfigurierung des Servers einer oder mehreren ACLs zugeordnet werden. Zugriff auf die Daten erhält ein Benutzer nur dann, wenn er sich durch Username und Passwort als Mitglied einer zugeordneten ACL ausweisen kann.

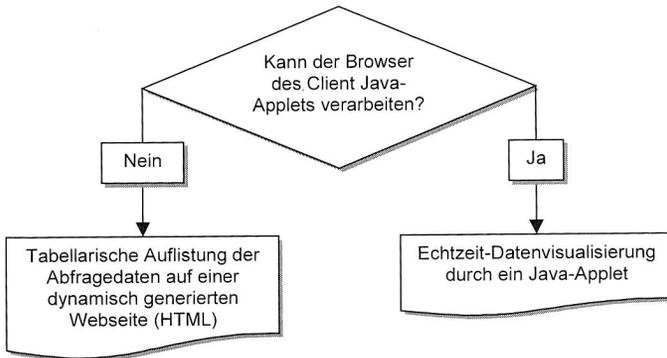


Bild 86: Lösungsvarianten zur Abfrage und Visualisierung der Betriebsdaten der Roboterbestückungszelle

Auf dem Server-PC läuft ständig ein Web-Server, der durch ein Java Servlet „StaeubliServlet“ in Verbindung mit dem Stäubli-Roboter steht. Dieses Servlet wertet die erfassten Maschinendaten aus, die in einem Datenstrom von der Bestückungszelle geliefert werden, und speichert sie in einer internen Datenstruktur. Sobald ein registrierter Benutzer aktuelle Fertigungsdaten von der Bestückungszelle anfordert, leitet der Web-Server die Anfrage an das StaeubliServlet weiter. Je nach Art der Client-Anfrage wird nun entweder auf dem Client ein Applet gestartet, das über Socketverbindungen ständig mit den aktuellsten Maschinendaten „gefüttert“ wird, oder es wird eine HTML-Seite aufbereitet und an den Client-Browser geschickt.

### 7.3.3 Visualisierung von Fertigungsszenarien und Übertragung von Fertigungsdaten

Der User startet einen WWW-Browser und wählt die URL der zu beobachtenden Fertigungszelle an. Dadurch wird der Webserver auf dem Server-PC angesprochen, der die Anfrage seinerseits gegebenenfalls an ein Java-Servlet weiterleitet. Dadurch kann der Client Daten über den aktuellen Betriebszustand der Fertigungszelle bekommen, die so häufig wie möglich und notwendig aktualisiert werden. Kann der Browser keine Java-Applets betreiben, werden die Parameterwerte in einer dynamisch erstellten HTML-Seite grafisch angezeigt. Der Benutzer kann diese bei Bedarf (durch Anklicken des „Reload“-Buttons des Browsers) selbst aktualisieren. Eine regelmäßige automatische Erneuerung der Anzeige im Abstand weniger Sekunden durch das Client-Pull-Verfahren ist ebenfalls denkbar, wurde aber in diesem Fall wegen des unvermeidlichen Flackerns beim neuen Seitenaufbau nicht realisiert.

Falls der Client-Java-Applets verarbeiten kann, wird eine andere HTML-Seite mit einem eingebetteten Java-Applet geliefert. In diesem Applet ist ein Thread über Sockets ständig in Kommunikation mit einem korrespondierenden Servlet-Thread auf dem Server. Dadurch erhält das Java-Applet ständig die aktuellsten Betriebsdaten, die in einer internen Datenstruktur abgelegt werden. Ein weiterer Thread baut aus diesen Datensätzen eine aktuelle Bildschirmanzeige mit graphischer Darstellung auf. Bei der Visualisierung wurden die erfassten Betriebsdaten in Abhängigkeit vom Wertebereich in vier Kategorien eingeteilt:

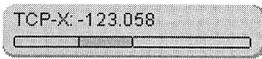
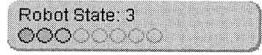
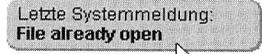
Parametertyp	Visualisierungsbeispiel
float	
integer	
text	
binary	

Tabelle 3: Beispiele für die definierten Parametertypen zur Visualisierung der Betriebsdaten

Die vom Client empfangenen Fertigungsdaten können einzeln über die Zeit dargestellt und automatisch ausgewertet werden. Für die Erkennung eines Maschinenfehlers, z. B. nicht optimierte Beschleunigungsparameter der Bewegungsachsen, wird dabei der Verfahrenweg bei einem Bestückzyklus über die Zeit abgebildet. Im nicht optimalen Fall tauchen charakteristische Schadenverläufe auf. Aus diesem Grund werden diese Wegprofile auf Grenzüberschreitungen von vorher festgelegten Soll-Profilen überwacht. So lassen sich Lagerdefekte oder Verschleiß vom Experten über das internetbasierte Beobachtungssystem schnell detektieren und lokalisieren. In Bild 88 ist ein Beispiel für den Parameter TCP-Z dargestellt. Bei nicht-numerischen Werten ist eine solche Darstellung nicht möglich. Deswegen wird bei Parametern des Typs „text“ stattdessen ein Logfile angezeigt, in dem alle Änderungen des Parameterwertes mit Zeitangabe aufgezeichnet werden.

In dieser Arbeit wurde ein internetbasiertes Server-Client-System konzipiert und implementiert, das es einem weitverteilten Interessentenkreis ermöglicht, sich aktuelle Fertigungsdaten nahezu in Echtzeit anzeigen zu lassen. Dabei wurden Protokolle

und Kommunikationsmechanismen der vorhandenen und weitentwickelten Internet-Technologie benutzt.

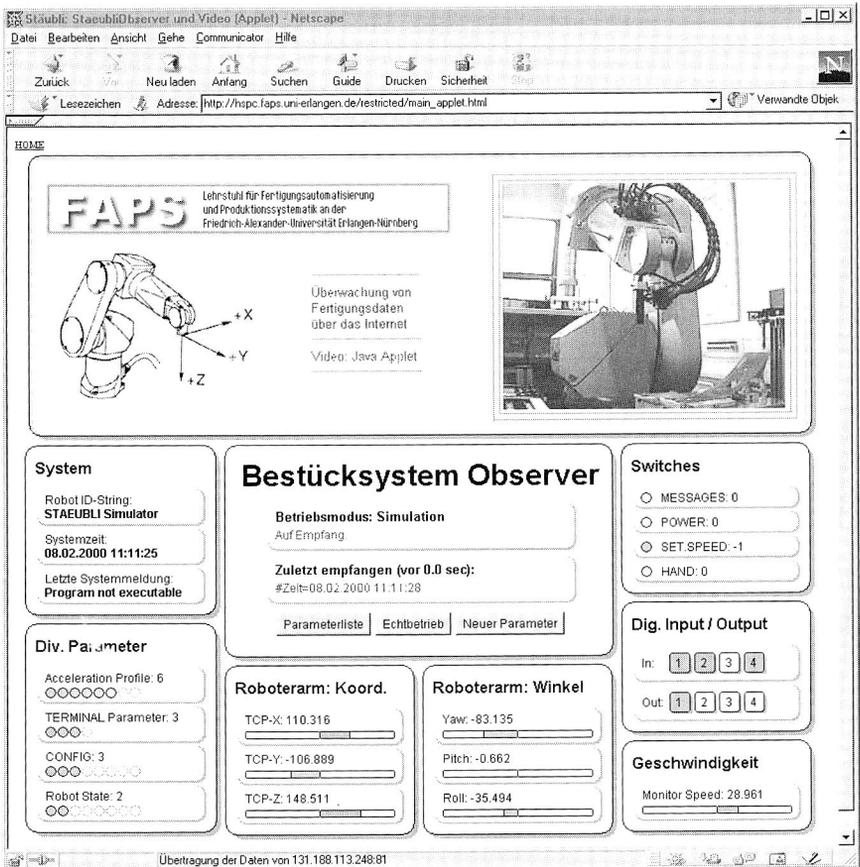


Bild 87: Benutzeroberfläche der internetbasierten Online-Überwachung - Visualisierung der Betriebsdaten der Roboterbestückungszelle

Ein systematischer Vergleich der diversen Möglichkeiten, einen Webserver durch Programmierung in seiner Funktionalität zu erweitern, führte zur Entscheidung für den Einsatz der Programmiersprache Java und des Servlet-APIs. Der ausgewählte Java-basierte Webserver ermöglicht einen plattformunabhängigen Einsatz, ebenso wie die entwickelte Applet-Lösung bei den Clients. Da das entwickelte Servlet nicht nur die bei ihm angemeldeten Applets mit Daten versorgt, sondern auch normale

HTTP-Anfragen zulässt, können auch ältere oder weniger leistungsfähige Browser zum Abfragen der Fertigungsdaten eingesetzt werden.

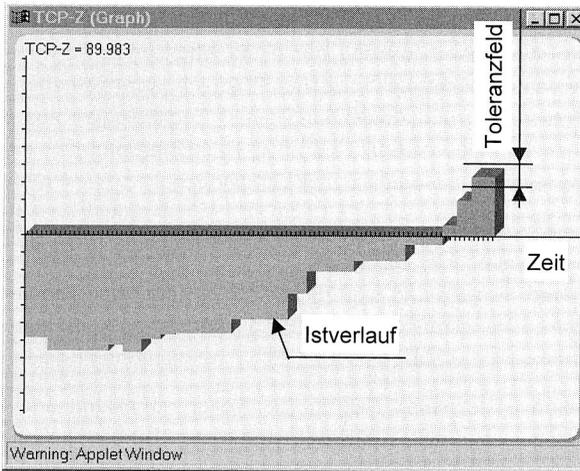


Bild 88: Beispiel für die zeitliche Darstellung eines über Internet erfassten Parameters

Zusammenfassend ermöglicht das vorgestellte Beobachtungssystem die Online-Fernüberwachung von Bestückungssystemen und im Falle einer eingetretenen Störung diese rechtzeitig durch Ferndiagnose anzuzeigen und zu melden.

## 8 Zusammenfassung

Die dynamischen Entwicklungen in der Elektronikindustrie, kurze Innovationszyklen und der globale Wettbewerb werden durch die wachsende Funktionalität und zunehmende Integrationsdichte elektronischer Produkte vorangetrieben. Dieser Trend erfordert die Entwicklung und Anwendung neuer Technologien aus den Bereichen Bauelemente und Schaltungsträger, die neue Herausforderungen für die Prozesse und Systeme der Elektronikproduktion mit sich bringen.

Zukünftige Anwendungen in der Elektronik erfordern die hochpräzise Montage elektronischer Bauteile mit Genauigkeitsanforderungen deutlich unterhalb von 30 µm. Vor diesem Hintergrund sind die Sicherung der Verfügbarkeit und die Gewährleistung der Leistungsmerkmale von Produktionsanlagen zwingend erforderlich, da eine Einschränkung der Maschinenqualität immer zu hohen Kosten führt.

Diese Dissertation leistet einen Beitrag zur Weiterentwicklung und Sicherung der Maschinenleistung von Bestückungssystemen unter Berücksichtigung technologischer Randbedingungen, um eine wirtschaftlichere Verarbeitung innovativer Bauelementformen zu ermöglichen. Dabei werden ausgehend von Bauelemente- und Schaltungsträgertechnologien der Maschinenaufbau, die Steuerung und vor allem die Störeinflüsse auf die Maschinenfähigkeit von Bestückungssystemen in einem ganzheitlichen Ansatz untersucht.

Zunächst wurde die Leistungsfähigkeit bestehender Bestückungssysteme in der Elektronikproduktion unter Berücksichtigung der Faktoren alternative Schaltungsträger, Sonderbauelemente und insbesondere Bauelemente mit feinen Strukturen, dargestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Aufdeckung von Maschinenschwachstellen und Einflussfaktoren auf die Bestückergebnisse. Daraus ergeben sich Anforderungen an die Bestücktechnik hinsichtlich der Genauigkeit, Geschwindigkeit und Flexibilität.

Für die Bestückung alternativer Schaltungsträger (z. B. spritzgegossene und flexible Schaltungsträger) wurde auf der Basis eines sechsachsigen Industrieroboters eine Systemlösung realisiert. Durch den Einsatz eines Bildverarbeitungssystems und die Entwicklung von Bestückwerkzeugen ist die Roboterzelle für die Bestückung spritzgegossener Schaltungsträger mit komplexer Geometriegestaltung besonders geeignet. Es konnte gezeigt werden, dass sechsachsige Robotersysteme eine wirtschaftliche Alternative für die Handhabung und Bestückung von Sonderbauelementen (z. B. Stecker) sind. Entsprechende Untersuchungen erfolgten in einer intensiven Zusammenarbeit mit der Industrie.

Ein zentraler Bereich dieser Arbeit befasste sich mit dem maschinentechnischen Aufbau von Bestückungssystemen. Dabei wurden insbesondere die dynamischen und thermischen Belastungen, die auf die Bestückung elektronischer Bauteile mit feinen Strukturen wirken, systematisch untersucht. Auf der Basis dieser experimentellen Analysen wurden industrielle Einsatzbedingungen, das Maschinenverhalten sowie dessen Einfluss auf die Maschinenfähigkeit erfasst und daraus Lösungsansätze für die Systemoptimierung abgeleitet.

Bei der Systemanalyse hinsichtlich des Schwingungsverhaltens konnten wichtige Informationen gewonnen werden, die zur Bestimmung der Prozessparameter, wie zum Beispiel Pipettendurchmesser, Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofil, dienen. Bei der Untersuchung der thermoelastischen Relativverlagerung des Bestückkopfs wurde deutlich, dass die Entwicklung einer steuerungstechnischen Kompensationsfunktion zur Reduzierung dieses Effektes notwendig ist. Ausgehend von einer detaillierten messtechnischen Analyse des Bestückungssystems und auf der Grundlage einer Korrelationsanalyse wurde eine Korrekturfunktion entwickelt. Dies umfasst eine indirekte Vorgehensweise auf der Basis punktueller Temperaturmessungen. Der Vorteil dieses Kompensationsverfahrens liegt darin, dass kein Messzyklus während der Bestückung notwendig ist. Umfangreiche Versuche haben gezeigt, dass mit dem entwickelten Kompensationsverfahren die Positioniergenauigkeit zwischen 70% und 90% verbessert werden kann.

Weiterhin wurden auf der Basis der Simulationstechnik Ansätze zur Neu- und Weiterentwicklung sowie zur Optimierung von Bestückungssystemen aufgezeigt. So wurde mit Hilfe der 3D-Kinematiksimulation die Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Roboterbestückungssystems dargestellt. Die Anbindung der Kinematiksimulation an die Robotersteuerung hat neue Ansätze bei der Maschinensteuerung und -überwachung gezeigt. Zur Unterstützung der Überwachung des Bestückungssystems wurde ein internetbasiertes Datenerfassungssystem realisiert. Dieses System bildet die Basis für ein übergreifendes Dateninformationssystem zur Fehlerfrüherkennung und -lokalisierung in Bestückungssystemen, das in einer weiterführenden Arbeit entwickelt wird.

Zur weiteren Optimierung von Bestückungssystemen sind Systemlösungen für die Verbesserung des Maschinenverhaltens zu entwickeln. Ziel ist es dabei, im Konstruktionsprozess eines Bestückungssystems die Kenngrößen, dynamische Belastung, thermische Belastung und die technologischen Randbedingungen bei der Montage elektronischer Bauteile zu berücksichtigen. Gerade im Bereich des Maschinenverhaltens von Bestückungssystemen ist weiterer Entwicklungsbedarf zu sehen. Durch die erhöhten Anforderungen an Bestückungssysteme hinsichtlich der Bestückleistung und -genauigkeit ist eine verbesserte Maschinendynamik zwingend

notwendig. Um dieses Ziel zu erreichen, ist der Einsatz innovativer Antriebssysteme und Regelungssysteme erforderlich. In diesem Zusammenhang soll die Eignung alternativer Antriebssysteme (z. B. Linearantriebe) für Hochleistungsbestückungssysteme untersucht werden.

Durch den verstärkten Einsatz der Simulationstechnik im Entwicklungsprozess von Bestückungssystemen kann eine Optimierung in den einzelnen Konstruktionsphasen erzielt werden. Ein letzter Schwerpunkt weiterer Forschungsaktivitäten stellt die Maschinenüberwachung zur Fehlerfrüherkennung dar. Durch eine kontinuierliche Erfassung relevanter Maschinendaten kann ein optimaler Produktionseinsatz von Bestückungssystemen erzielt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Baghurst, D.:  
Characterization of a Poly-meric, Area Array, Z-Axis Interconnect Film  
Adhesive for Microelectronic Assembly. MID'96 Molded Interconnect Devices,  
Meisenbach Verlag Bamberg, 1996
- [2] Banks, J:  
Handbook of Simulation. New York: Wiley & Sons, 1998
- [3] Bauer, W.H.:  
Entwicklung eines Systems zur virtuellen ergonomischen Arbeitsgestaltung.  
Berlin u.a.: Springer, 1997
- [4] Bautsch, S.; Dorn, L.; Herbert, F.:  
Ultrasonic-Adhesive - a New Method for Plastic- Manufacturing.  
MID'96 Molded Interconnect Devices, Meisenbach Verlag Bamberg, 1996
- [5] Beitinger, G.; Feldmann, K.:  
Flex Circuitries of Silicones - A Material with high Potentialities, in: Surface  
Mount International Proceedings of the Technical Program, San Jose, CA,  
Seite 217 ff., 1997
- [6] Beitz, W.; Küttner, K.-H.:  
Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau.  
18. Auflage Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1996
- [7] Bonse, R.:  
Thermisches Last-Verformungsverhalten von Werkzeugmaschinen.  
Diss., RWTH Aachen, 1999
- [8] Boshoff, F.:  
Integration von FEM-Berechnungen in den CAD-gestützten  
Konstruktionsprozess durch bidirektionalen automatischen  
Geometrieaustausch.  
Aachen: Shaker, 1997
- [9] Brand, A.:  
Modular System for Assembling SMD onto Complex Shaped MIDs, in: MID'96  
Molded Interconnect Devices.  
Meisenbach Verlag Bamberg, 1996
- [10] Brand, A.:  
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen

- (3D MID).  
Meisenbach Verlag, Bamberg 1997
- [11] Breitenecker, F.; Troch, I., Kopacek, P.:  
Simulationstechnik. 6. ASIM Symposium in Wien, September 1990
- [12] Colombo, A. W.; Carelli, R.; Kuchen, B.:  
A Temporized Petri Net Approach for Designing, Modelling and Analysis of Flexible Production Systems.  
International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, Num. 3, pp. 214-226. Springer Verlag London, 1997
- [13] Ehrlenspiel, K.:  
Kostengünstig Konstruieren. Konstruktionsbücher 35,  
Berlin u.a.: Springer, 1985
- [14] Eversheim, W.:  
Organisation in der Produktionstechnik. Band 1: Grundlagen.  
Düsseldorf: VDI, 1981
- [15] Eversheim, W.:  
Organisation in der Produktionstechnik, Band 4: Fertigung und Montage.  
Düsseldorf VDI, 1981
- [16] Feinauer, A.:  
Dynamische Maschineneinflüsse auf die Werkstückqualität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen.  
Diss., Univ. Stuttgart, 1999
- [17] Feldmann, K.; Brand, A.:  
Chancen und Herausforderungen durch räumliche elektronische Schaltungsträger, Symposium Elektronik-Technologie 1996
- [18] Feldmann, K.; Franke J.:  
Neue Rationalisierungspotentiale durch Funktionsintegration.  
Oldenburg Verlag, München 1992
- [19] Feldmann, K.:  
Skript „Produktionssysteme in der Elektronik 1 – 7, Erlangen 1996
- [20] Feldmann, K.:  
Berücksichtigung neuer Schaltungsträger und Packungsformen in der Produktion elektronischer Systeme.  
Leitplattenhersteller, Bestücker und Anwender im Dialog, Euroforum 1998
- [21] Feldmann, K.; Feuerstein, R.; Götz, K.:  
Influences of Storage Conditions on Component Cracking.

- Proceedings of the Technical Program NEPCON EAST 97, Reed Exhibition Companies, Boston/Norwalk USA, S. 99 ff., 1997
- [22] Feldmann, K.; Krimi, S.:  
Prozesse und Systeme für die räumliche Montage elektronischer Bauteile in spritzgegossene Schaltungsträger.  
Wt Werkstattstechnik, Springer VDI-Verlag, 1999
- [23] Feldmann, K.; Krimi, S.:  
Alternative Placement Systems for Three Dimensional Circuit Boards.  
Annals of the CIRP, Athene, 1998
- [24] Feldmann, K.:  
Elektronikfertigung am Standort Deutschland.  
2. Robtersymposium: Standortsicherung durch Automation und Organisation, Reutigen, 1997
- [25] Feldmann, K.; Krimi, S.; Colombo, A.W.:  
A Hybrid Simulation-Based Approach for Design and Implementation of Flexible Production Systems.  
IASTED International Conference: Modelling and Simulation, Philadelphia, PA USA, 1999
- [26] Feldmann, K.; Krimi, S.; Colombo, A. W.:  
Remote Monitoring and Diagnostics of Flexible Production Systems Using Motion-Oriented Simulation.  
Annals of the German Academic Society for Production Engineering (WGP), Vol. V, Nr. 2, 1998
- [27] Feldmann, K.; Krimi, S.; Colombo, A. W.:  
Off-line Programming of Robot Placement Systems based on the Integration of Motion Oriented Simulation and Discret-Event Control.  
CESA '98 IEEE, Hamamet-Nabeul, Tunisia 1998
- [28] Feldmann, K.; Krimi, S.; Reichenberger, M.; Götz, K.:  
Assembly: Electronics.  
Handbook of Industrial Robotics, 2nd ed., chapter 51, p. 997-1012, USA, 1999
- [29] Feldmann, K.; Roth, N.; Rottbauer, H.:  
Relevance of Assembly in Global Manufacturing.  
Annals of the CIRP Vol., 1996
- [30] Feldmann, K; Schlögl, W.:  
Optimierung von automatisierten Bestücksystemen.  
ZWF, Heft10, S. 497-499, 1998

- [31] Franke, J.:  
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D MID).  
Meisenbach Verlag, Bamberg 1995
- [32] Freund, B.:  
Entwicklungslinien der Elektronikproduktion mit neuen Herausforderungen an die Forschung.  
Tagungsband zum Öffentlichen Berichtskolloquium des Sonderforschungsbereiches 356 Produktionssysteme in der Elektronik, FAU Erlangen-Nürnberg, 1997
- [33] Freund, B.:  
Produktion 2000 – und was kommt danach? Eine Herausforderung für Industrie und Wissenschaft.  
Tagungsband: Montagetechnologie für Bare Chips und Chip-Size-Package, 1997
- [34] Gamalski, J.:  
Stand und Trends in der Baugruppenproduktion, in: Industrialisierung moderner Baugruppen-Technologien am Beispiel von Fine Pitch-SMD und Ball Grid Array. Tagungsband 1996
- [35] Gebert, K.:  
Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnelldrehenden Motorspindeln.  
Aachen: Shaker, 1997
- [36] Gerhard, M.:  
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozessführung beim Lötten komplexer Baugruppen.  
Bamberg: Meisenbach, 1998
- [37] Gray, J.O.; Caldwell, D.G. (Ed.):  
Advanced Robotics & Intelligent Machines.  
The Institution of Electrical Engineers, 1996
- [38] Hajny, F.; Kriebitzsch, I.:  
3-D MID in Automotive Technology.  
MID'96 Molded Interconnect Devices, Meisenbach Verlag Bamberg, 1996
- [39] Härtl, A.:  
SMD- Surface Mounted Devices.  
Hirschau: Härtl, 1994

- [40] Heisel, U.:  
Ausgleich thermischer Deformationen an Werkzeugmaschinen.  
TU Berlin, Hans Verlag, 1980
- [41] Hering; Martin; Stohver:  
Physik für Ingenieure. VDI Verlag 1989
- [42] Holden, H.:  
Advanced Substrate Technologies.  
SMTA (Hrsg.), SMTA Newsletter, S. 1 + 3, 1996
- [43] Hurron, R.D.:  
Simulation: Applications in Manufacturing.  
Springer, IFS Publications, UK, 1986
- [44] Ichige, T.; Komagine, R.:  
3-D Products Aiming at the Customers' Request: Wireless, Easy Fabrication  
and Low Cost.  
MID'96 Molded Interconnect Devices, Meisenbach Verlag Bamberg, 1996
- [45] Jäger K. W.:  
Schnittstellen bei CAD/CAE-Systemen.  
VDI Verlag, Düsseldorf 1991
- [46] Jungnickel, G.:  
Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen.  
Dresden, 2000
- [47] Kaiser, J.:  
Qualitätsbewertung von Prozessen und Prozessergebnissen durch integrierten  
Einsatz von Fuzzy Logic und Fuzzy Arithmetic.  
Aachen: Shaker, Diss., TH Darmstadt, 1997
- [48] Kampe, G.; Zeitl, M.:  
Simulationstechnik. 9. ASIM Symposium in Stuttgart, 1994
- [49] Kempe, W.:  
Produktionstechnik für neue Elektronikanwendungen im Verkehr und für die  
Kommunikation.  
Tagungsband Karlsruher Arbeitsgespräche 1998 Produktion 2000 Ergebnisse  
und Zukunftschancen 12./13, 1998
- [50] Kleinhans, V.:  
Informationssystem für heterogen verteilte Qualitätsinformationen.  
Diss., TU Berlin, 1997

- [51] Koch, K.-F.:  
Technologie des Hochpräzisions-Hartdrehens.  
Berichte aus der Produktionstechnik, Aachen: Shaker, 1996
- [52] Krimi, S.;  
Alternative SMD Placement Systems for Three Dimensional Circuit Boards.  
Third International Congress Molded Interconnected Devices, MID '98,  
Erlangen, Germany, 1998
- [53] Krug, W.; Grabowski, H.:  
Integrierte Produkt- und Prozeßmodellierung.  
Proceedings von der Klausurkonferenz auf der Wartburg bei Eisenach, 1993
- [54] Krüger, J.:  
Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken.  
Diss., TU Berlin, 1999
- [55] Lee, C.H.:  
Statische und dynamische Optimierung von Spindel-Lagersystemen.  
München, Wien: Hanser, 1991
- [56] Lemme, H.:  
Sensoren in der Praxis:  
Daten Applikationen und Bezugsquellen. München: Franzis, 1990
- [57] Leveque, D.J.-P.:  
Molded Interconnect technology in a Multi-position Control Switch.  
MID'96 Molded Interconnect Devices, Meisenbach Verlag Bamberg, 1996
- [58] Luchs, R.:  
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung  
elektronischer Bauelemente in der SMT.  
Meisenbach Verlag Bamberg, 1998
- [59] Makkonen, P.:  
On Multi Body Systems Simulation in Product Design.  
Royal Institute of Technology, KTH Stockholm, 1999
- [60] Meeuwssen, F.:  
MID Versus Metal Insert Technology, in: MID'96 Molded Interconnect Devices,  
Meisenbach Verlag Bamberg, 1996
- [61] Meschke, J.:  
Verbesserung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen durch  
Erhöhung der Systemdämpfung.  
Essen: Vulkan-Verlag, 1995; Diss., TU Braunschweig, 1994"

- [62] Monsef, Y.:  
Modelling and Simulation of Complex Systems: Concepts, Methods and Tools.  
SCS, Erlangen, , 1997
- [63] N.N. Siemens AG:  
SIEMENS Die Welt der Surface Mount Technology.  
Technologiebroschüre 1995
- [64] N.N. :  
Mobil mit Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik.  
Vorträge der GMM-Fachtagung anl. d. VDE-Kongresses, GMM-Fachbericht  
23, VDE, 1998
- [65] N.N.:  
NEPCON East '97. Proceedings of the Technical Program.  
Conference, 1997
- [66] N.N.:  
Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der industriellen Praxis.  
Franzis-Verlag GmbH München, 1. Auflage, 1993
- [67] N.N.:  
Deneb Robotics 1995. GSL Reference Manual.
- [68] N.N.:  
Electronic Forum, 1997
- [69] N.N.:  
General Requirements for Dielectric Surface Mounting Adhesives.  
Standard for Surface Mount Assemblies, Vol. 2
- [70] N.N.:  
Guidelines for Chip-on-Board Technology Implementation.  
Standard for Surface Mount Assemblies, Vol. 2
- [71] N.N.:  
Proceedings 1996 IEMT Symposium.  
Piscataway, NJ: IEEE, 1996
- [72] N.N.:  
Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik: Mikrotechnische Produktion  
BMF-Verbundprojekte PROBOS, SIMTES, PROBAT, Berlin: VDI, 1998
- [73] N.N.:  
SMT Process Guideline and Checklist. Standard for Surface Mount  
Assemblies, Vol. 2

- [74] N.N.:  
Surface Mount Design and Land Pattern Standard. Standard for Surface Mount Assemblies, Vol. 2
- [75] N.N.:  
Tagungsbericht Leiterplatte '94.  
Tagung Karlsruhe, Band II: Bestückung, Baugruppenprüfung - Hybride. VDI, 1994
- [76] N.N.:  
FORMIKROSYS, Mikropositioniereinrichtung für die Präzisionmontage.  
Zwischenbericht von 9/95 bis 3/96
- [77] N.N.:  
NASTRAN User Guide, 1997
- [78] N.N.:  
Bayerischer Forschungsverbund Simulationstechnik (FORSIM).  
Antrag 2000
- [79] N.N.:  
Procedures for Characterizing and Handling of Moisture/Reflow Sensitive ICs.  
Standard for Surface Mount Assemblies, Vol. 2
- [80] N.N.:  
Marktinformationen zur SMT/ES&S/Hybrid.  
VDMA, 1999
- [81] N.N.:  
Tutorial Nr. 21 Rapid-Prototyping in der Elektronik.  
SMT ES&S Hybrid, Nürnberg, 1999
- [82] Patterson, T.:  
Looking for a Commercially Viable Successor to Chip-On-Flex.  
Electronic Packaging & Production, page 49 ff., 1997
- [83] Pegden, C. D.:  
Simulation: a look to the future.  
Proc. of 11th. European Simulation Multi Conference (ESM'97), pp. K-17-k-21,  
Istanbul, Turkey 1997
- [84] Pressler, G.:  
PID, Grundelemente der Regelungstechnik.  
Hochschultaschenbücher 1980
- [85] Pritsker, A. B.:  
Introduction to Simulation and SLAM II.  
West Lafayette/Indiana, Systems Publishing Corp., 1986

- [86] Profos, P.:  
Einführung in die Systemdynamik.  
Teubner-Studienbücher Maschinenbau/Elektrotechnik, 1982
- [87] Reinhart, G.:  
Mikropositioniereinrichtung für die Präzisionsmontage.  
Maschinenmarkt 101, 1995
- [88] Reinhart, G.; Cuiper, R.;  
Roßgoderer, U.: System for Continuous Planning and Control of Assembly  
Systems.  
Reger, K.: Proceedings Concurrent Engineering Europe '97 - Building  
tomorrow's virtual enterprise, Erlangen. Ghent: SCS, S. 161-166, 1997
- [89] Richter, F.:  
Erfassung und Ausgleich thermische bedingter Verformungen an  
Industrierobotern.  
Medien Verlag Köhler, 1998
- [90] Sauer, W.; Wohlrabe, H.; Zerna, T.:  
Bestimmung der Maschinenfähigkeit und Prozessfähigkeit während der  
Fertigung von Flachbaugruppen.  
GMM-Fachbericht zur Leiterplatte '97, VDE-Verlag GmbH, Berlin 1997
- [91] Schäfer, W.:  
Steuerungstechnische Korrektur thermoelastischer Verformungen an  
Werkzeugmaschinen.  
Berichte aus der Produktionstechnik Aachen, 1994
- [92] Schaupp, J.:  
Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik  
und dem Zerspanprozeß beim Fräsen.  
Diss., Univ. Karlsruhe, 1996
- [93] Scheel, W.:  
Baugruppenttechnologie der Elektronik: Montage.  
Berlin: Verlag Technik; Saulgau: Leuze Verlag, 1997
- [94] Schlitt, H.:  
Regelungstechnik. Vogel Fachbuch 1993
- [95] Schmitt, T.:  
Modell der Wärmeübertragungsvorgänge in der mechanischen Struktur von  
CNC-gesteuerten Vorschubsystemen.  
Aachen: Shaker, 1996

- [96] Schroeder, H.-B.:  
Thermische Einflüsse durch Prozess und Raumtemperatur bei der  
Ultrapräzisionsdrehbearbeitung.  
Diss. TH Aachen, 1996
- [97] Schwaderer, J.:  
Montagetechnik für Fine-Pitch-BGA und CSP.  
Montagetechnologie für Bare Chips und Chip-Size-Package, Tagungsband,  
1997
- [98] Stehle, T.:  
Berechnung thermischer Verformungen und Verlagerungen an  
Werkzeugmaschinen und Möglichkeiten zur Kompensation.  
Diss., Univ. Stuttgart, 1997
- [99] Steinwasser, P.:  
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und  
Prozeßplanung.  
Bamberg: Meisenbach, 1997
- [100] Strauss, R.:  
SMD Oberflächenmontierte Bauteile: Eine Einführung in die Praxis der  
Oberflächenmontage.  
Bonn: VTT Verlag, 1989
- [101] Sydow, A.:  
Simulationstechnik. 8. ASIM Symposium in Stuttgart, September 1993.  
Tagungsband. Braunschweig, 1993
- [102] Thompson, P.:  
Chip-scale packaging, IEEE Spektrum, 1997
- [103] Tietze U.; Schenk Ch.:  
Halbleiterschaltungstechnik.  
Springer-Verlag 1991
- [104] Tzafestas, S.:  
Modern Manufacturing Systems: An Information Technology Perspective,  
Computer-Assisted Management and Control of Manufacturing Systems.  
Ed. S. Tzafestas, Advanced Manufacturing Series, London. Springer Verlag,  
1997
- [105] Unbehauen, R.:  
Systemtheorie. Oldenbourg Verlag, 1993
- [106] Vukobratovic, M.:  
Introduction to Robotics. Springer Verlag, 1989

- [107] Weck, M.:  
Werkzeugmaschinen Band 2, Konstruktion und Berechnung.  
VDI-Verlag GmbH, 1981
- [108] Weiss, E.:  
Untersuchung der Einflussgrößen auf die Bestimmung der Staubemission bei  
der maschinellen Holzbearbeitung.  
Diss., Univ. Stuttgart, 1998
- [109] Wiedemann, M.:  
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen.  
Berlin u.a.: Springer, 1993; Diss. TU München, 1993
- [110] Winterott, G.:  
Chips verlangen High-Tech-Boards.  
VDI Nachrichten Nr. 28, Seite 14 ff. , 1996
- [111] Wohlrabe, H.; Keil, M.; Kaiser, C.:  
Estimating Accuracy and Precision for an SMD Placement Systems.  
NEPCON West 95 Proceedings, pages 27-39, 1995
- [112] Wollenberg, G.; Mandel, U.:  
Beeinflussung der Sollwertverläufe zur Reduzierung dynamischer Bahn  
Abweichungen bei numerisch gesteuerten Maschinen.
- [113] Wulfsberg, J.P.:  
Diagnose und Kompensation thermischer Verlagerungen in Schleifmaschinen.  
Dissertation Universität Hannover, 1991
- [114] Yuan, H.:  
Optimierung des dynamischen Verhaltens von Spindeleinheiten.  
Diss., Univ. Stuttgart, 1997
- [115] Zeller, F.-J.:  
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter.  
Diss., Univ. Erlangen-Nürnberg, 1995
- [116] Ziebeil, F.:  
Mechanische und thermische Belastung von Zerrspanwerkzeugen.  
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 18 Nr. 193Düsseldorf: VDI, 1996



## Lebenslauf

Sami Krimi

geb. 2. August 1970

### Ausbildung:

09/76 - 06/82      Grundschohle Ezzouhour V in Tunis, Tunesien  
09/82 - 06/85      Gymnasium Charaf in Tunis, Tunesien  
09/85 - 06/89      Technisches Gymnasium „Lycée Technique de Tunis“  
09/89 - 07/90      Studienkolleg München  
11/90 - 11/95      Studium des Maschinenbaus an der Technischen Universität  
München, Schwerpunkt: Konstruktion und Entwicklung

### Berufstätigkeit:

03/96 - 10/00      Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für  
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik  
an der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg.  
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

seit 11/00      Ingenieur im Bereich der Produktionstechnik  
Grundig AG  
Nürnberg



# Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

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

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

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

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektiertung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

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

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**

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

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

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

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

Band 9

Rainer Eisele

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

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

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

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

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

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

Band 14  
Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

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

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

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

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

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

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

Band 21

Egon Sommer

**Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen**

188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22

Georg Geyer

**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage**

192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen**

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen : Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

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

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung  
einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

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

Band 35

Bertram Ehmann

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

Band 36

Harald Kolléra

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

Band 37

Stephanie Abels

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

Band 38

Robert Schmidt-Hebbel

**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender  
Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39

Norbert Lutz

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

Band 40

Konrad Grampp

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

Band 41

Martin Koch

**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung  
in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42

Armin Gropp

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

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

Band 43

Werner Heckel

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

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

Band 44

Armin Rothhaupt

**Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung**

180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 45

Bernd Zöllner

**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**

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

Band 46

Bodo Vormann

**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile**

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

Band 47

Peter Schnepf

**Zielkostenorientierte Montageplanung**

144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 48

Rainer Klotzbücher

**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen**

156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 49

Wolfgang Greska

**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**

144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 50

Jörg Franke

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

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

Band 51

Franz-Josef Zeller

**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**

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

Band 52

Michael Solvie

**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**

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

Band 53  
Robert Hopperdietzel  
**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**  
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54  
Thomas Rebhan  
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**  
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55  
Henning Hanebuth  
**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**  
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56  
Uwe Schönherr  
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**  
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57  
Stefan Holzer  
**Berührunglose Formgebung mit Laserstrahlung**  
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 58  
Markus Schultz  
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 59  
Thomas Krebs  
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-  
Produktmodell**  
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60  
Jürgen Sturm  
**Prozessintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion**  
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

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

Band 62  
Michael Kauf  
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63  
Peter Steinwasser  
**Modulares Informationsmanagement in der integrierten  
Produkt- und Prozessplanung**  
190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 64

Georg Liedl

**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß  
in der Elektronikproduktion**

196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 65

Andreas Otto

**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**

132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997. Kartoniert

Band 66

Wolfgang Blöchl

**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen  
zur Prozeß- und Programoptimierung**

168 Seiten, 96 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 67

Klaus-Uwe Wolf

**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und  
Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln.**

186 Seiten, 125 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 68

Frank Backes

**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung**

138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 69

Jürgen Kraus

**Laserstrahlumformen von Profilen**

137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 70

Norbert Neubauer

**Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>-Laseranlagen**

120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 71

Michael Steber

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

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 72

Pfedorf, Markus

**Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 73

Volker Franke

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

143 Seiten, 81 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 74

Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 75

Arthur Meißner

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

Band 76

Mathias Glasmacher

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

Band 77

Michael Schwind

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

Band 78

Manfred Gerhard

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

Band 79

Elke Rauh

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

Band 80

Niederkorn Sorin

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

Band 81

Stefan Schuberth

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
unter Einsatz von adaptiven Optiken**  
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 82

Armando Walter Colombo

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

Band 83

Otto Meedt

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

Band 84

Knuth Götz

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

Band 85

Ralf Luchs

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

Band 86

Frank Pöhlau

**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

144 Seiten, 99 Bilder. 1999. Kartoniert.

Band 87

Roland Kals

**Fundamentals of the miniaturization of sheet metal working processes**

128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 88

Gerhard Luhn

**Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion.**

253 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999. Kartoniert.

Band 89

Axel Sprenger

**Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen**

114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 90

Hans-Jörg Pucher

**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**

158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 91

Horst Arnet

**Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung**

128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 92

Doris Schubart

**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung**

133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 93

Adrianus L. P. Coremans

**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlesinterter Metallkörper**

184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 94

Hans-Martin Biehler

**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**

199 Seiten, 105 Bilder. 1999. Kartoniert.

Band 95

Wolfgang Becker

**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften**

**Excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**

175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 96

Philipp Hein

**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**

129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 97

Gunter Beitinger

**Herstellungs- und Prüfverfahren für  
thermoplastische Schaltungsträger**

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

Band 98

Jürgen Knobloch

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

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

Band 99

Frank Breitenbach

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

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

Band 100

Bernd Falk

**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge  
der Kaltmassivumformung**

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

Band 101

Wolfgang Schlögl

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

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

Band 102

Christian Hinsel

**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter  
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**

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

Band 103

Stefan Bobbert

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

123 Seiten, 77 Bilder. 2000. Kartoniert.

Band 104

Harald Rottbauer

**Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement  
in der Elektronikproduktion**

176 Seiten, 106 Bilder. 2000. Kartoniert.

Band 105

Thomas Hennige

**Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformung**

120 Seiten, 50 Bilder. 2001. Kartoniert.

Band 106

Thomas Menzel

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

152 Seiten, 71 Bilder. 2001. Kartoniert.

Band 107

Thomas Stöckel

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

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

Band 108

Frank Pitter

**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**

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

Band 109

Markus Korneli

**Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund**

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

Band 110

Burkhard Müller

**Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion**

In Druck

Band 111

Jürgen Göhringer

**Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen**

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

Band 112

Robert Feuerstein

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

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

Band 113

Marcus Reichenberger

**Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage**

168 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 114

Alexander Huber

**Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren**

122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 115

Sami Krimi

**Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion**

155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001. Kartoniert.