

Frank Christoph

*Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen
der Elektronikproduktion*

Frank Christoph

*Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen
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: 19. November 2002
Tag der Promotion: 6. März 2003
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Winnacker
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann
Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, TU Dresden

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 3-87525-191-1
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 2003
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich für die wohlwollende Förderung meiner Arbeit und das mir dabei entgegengebrachte Vertrauen, das mir das eigenverantwortliche Arbeiten auf diesem vielfältigen interdisziplinären Forschungsgebiet ermöglichte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, dem Leiter des Instituts für Elektroniktechnologie der Technischen Universität Dresden, danke ich für die interessierte und engagierte Übernahme des Korreferates.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl danke ich, ebenso wie den Projektpartnern im Bayerischen Forschungsverbund Simulationstechnik FORSIM, im BriteEuram Projekt Prime sowie im VDI FML Fachausschuss Maschinennahe Simulation, für die hervorragende kollegiale und fachliche Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich Dipl.-Ing. Matthias Boiger, Dipl.-Ing. Rüdiger Holzmann, Dipl.-Inf. Matthias Weber, Dr. Yiping Shi und Dr.-Ing. Jürgen Wunderlich für ihre Anregungen, Unterstützung und Diskussionsbereitschaft.

Ich möchte mich auch bei allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich bei der Bearbeitung meiner Projekte und der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, bedanken, insbesondere bei Dipl.-Ing. Thomas Hagspiel, Dipl.-Ing. (FH) Kadir Tekes, cand. ing. Ercan Yanpala und cand. math. Alexander Thekale.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, vor allem meinen Eltern, die mich trotz erheblicher eigener Belastungen durch das zeitintensive Korrekturlesen unterstützten und mir den Rückhalt gaben, der für das Gelingen einer solchen Arbeit unabdingbar ist.

Erlangen, im März 2003

Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion	5
2.1 Prozessketten zur Herstellung elektronischer Baugruppen	5
2.1.1 Schaltungsträgerherstellung	5
2.1.2 Flachbaugruppenherstellung (SMD-Bestückung)	7
2.1.3 Resultierende Herausforderungen	9
2.2 Entwicklungstendenzen in der Elektronikproduktion	9
2.2.1 Zukünftige Anforderungen an die Produktion elektronischer Baugruppen	10
2.2.2 Aufgaben für die Entwicklung von Fertigungseinrichtungen	11
2.3 Notwendigkeit einer simulationsgestützten Planung	13
2.3.1 Potentiale des Simulationseinsatzes	13
2.3.2 Systematik der Planungsaufgaben für die Elektronikproduktion	14
3 Simulationsunterstützung für Planungsaufgaben in der Produktionstechnik ..	16
3.1 Stellung der Simulation innerhalb der rechnergestützten Planung	16
3.1.1 Begriff der Simulation	16
3.1.2 Stellung der Simulation in der betrieblichen Informationslogistik	17
3.2 Simulation von Fertigungsprozessen	18
3.2.1 Einsatz der FEM in der Prozesssimulation	19
3.2.2 Nutzung von Prozessdaten für die Maschinenentwicklung	21
3.3 Simulation der Maschinendynamik mit FEM und Mehrkörpersimulation	22
3.3.1 Aspekte der Maschinendynamik	22
3.3.2 Zentrale Stellung der Mehrkörpersimulation für die Maschinendynamik ..	24
3.4 Simulation der Erwärmung und der thermischen Verzerrung von Maschinenkomponenten	26
3.4.1 Mechanismen und Modellierung des Wärmetransports	27
3.4.2 Simulation der Erwärmung mit der CFD	30
3.4.3 Ermittlung der thermischen Verzerrung mit der FEM	33
3.5 Simulation von Maschinen und Linien mit der 3D-Kinematiksimulation	35
3.5.1 Planung von Fertigungszellen und Offline-Programmierung	36

3.5.2	Entwicklung der Maschinenkinematik	36
3.6	Ablaufsimulation zur Planung des Materialflusses	37
3.7	Zusammenwirken der Simulationstechniken auf unterschiedlichen Planungsebenen.....	39
4	Vorgehensmodell zur durchgängigen simulationsgestützten Planung	41
4.1	Planungsaufgaben für Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion.....	41
4.1.1	Produktlebenszyklus von Fertigungseinrichtungen - Gesamtszenario der integrierten Planung.....	41
4.1.2	Phasen der Produktentwicklung nach VDI 2221	43
4.1.3	Entwicklungsziele für Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion	45
4.1.4	Notwendigkeit eines erweiterten Vorgehensmodells	46
4.2	Vorgehensmodell für eine durchgängige simulationsgestützte Planung.....	47
4.2.1	Simulationsergebnisse als Meilensteine der Planung	48
4.2.2	Simulationsgestütztes Vorgehen für einzelne Arbeitsfelder	53
4.3	Durchgängigkeit der integrierten Vorgehensweise.....	56
5	CAE-Umgebung für die durchgängige Planung	58
5.1	Gesamtarchitektur der CAE Umgebung	58
5.2	Übergabe von Temperaturlasten aus der CFD an die Strukturmechanik-FEM ..	60
5.3	Zusammenwirken von Mehrkörpersimulation und FEM	62
5.3.1	Integration von Bauteilflexibilität und FE-Lasten in die MKS	62
5.3.2	Aufbereitung von Lastdaten aus der MKS für die FEM	63
5.4	Kopplung der Offline-Programmierung in der 3D-Kinematiksimulation mit der Dynamiksimulation in der MKS.....	68
5.5	Einsatz der durchgängigen CAE-Umgebung in einem beispielhaften Szenario ..	70
5.5.1	Erstellung des konzeptionellen Mehrkörpermodells	70
5.5.2	Integrierte simulationsgestützte Bauteilentwicklung	71
5.5.3	Simulation des Schwingungs- und Bewegungsverhalten.....	73
5.5.4	Auslegung der Antriebsregelung.....	73
5.5.5	Simulationsgestützte Beherrschung der thermischen Verzerrung	74
5.5.6	Rückkopplung von Daten aus dem Betrieb an die Maschinenentwicklung.....	76
6	Technologiebasierte Neuplanung einer Anlage zur Laserdirektstrukturierung von Leiterplatten	78
6.1	Technologisches und produktionstechnisches Umfeld	78
6.2	Grundsätzliches Vorgehen für die Planung	79
6.3	Zielsystem der technisch-wirtschaftlichen Bewertung.....	80
6.3.1	Kriterien für die technische Bewertung	81

6.3.2	Methodik für die wirtschaftliche Bewertung	83
6.4	Fertigungstechnische Anforderungen der Prozesskette	85
6.5	Konzipierung der Maschine zur Laserstrukturierung.....	87
6.5.1	Analyse marktgängiger Systeme zur Laserbearbeitung von Leiterplatten	87
6.5.2	Identifikation der Gestaltungsbereiche	88
6.5.3	Entwicklung alternativer Konzepte für die Kinematik von Laserstrahl und Werkstück	90
6.6	Simulationsgestützte Analyse der Maschinenkonzepte	92
6.6.1	CAM-Datenformate für die Simulation	92
6.6.2	Punktförmiger Laserstrahl mit XY-Tisch	94
6.6.3	XY-Tisch mit Galvo-Scanner System	95
6.6.4	Pixelbasiertes System mit Polygonspiegel und Linearachse	97
6.6.5	Vektorbasierter Drehtisch für den Excimer-Laser.....	98
6.6.6	Auswahl des geeignetsten Konzepts.....	99
6.7	Logistische und betriebswirtschaftliche Studie der Gesamtanlage.....	102
6.7.1	Ablaufsimulation der Fertigungsanlage	104
6.7.2	Kostensimulation auf Basis der Ablaufsimulation.....	105
6.8	Ergebnis der simulationsgestützten Konzipierung	107
7	Analyse des thermischen Verhaltens und der Maschinendynamik von Bestückautomaten.....	109
7.1	Aufgabenstellung und Ausgangssituation	109
7.1.1	Anforderungen an die Entwicklung von Bestückautomaten	109
7.1.2	Funktionsprinzip des betrachteten Bestückautomaten.....	110
7.1.3	Anforderungen an die Modellierung und Simulation	111
7.2	Methodik und Umsetzung der integrierten Simulation	112
7.3	Simulation des thermischen Verhaltens.....	113
7.3.1	Modellbildung für die Simulation des Erwärmungsverhaltens.....	113
7.3.2	Ergebnisse der Simulation des Erwärmungsverhaltens.....	116
7.3.3	FE-Simulation der thermischen Verzerrung des Portals	119
7.3.4	Weitere Verwendung der Ergebnisse der Simulation des thermischen Verhaltens.....	121
7.4	Simulation des dynamischen Verhaltens	122
7.4.1	Modellierungselemente und –methoden für die Maschinendynamik	122
7.4.2	FE-Simulation des Schwingungsverhaltens von Bauteilen	124
7.4.3	Mehrkörpermodell zur Simulation des Bewegungsverhaltens	125
7.4.4	Einbettung einer Linearführung an einem flexiblen Körper	126
7.4.5	Integration des Zahnriementriebs.....	129

7.4.6 Überlagerte Simulation von Schwingungen und Starrkörperbewegungen	132
7.4.7 Integration der Antriebsregelung.....	133
7.5 Virtuelle Maschine auf Basis des Mehrkörpermodells.....	136
7.5.1 Integration im Mehrkörpersimulationsmodell	136
7.5.2 Durchführung einer virtuellen Maschinenfähigkeitsuntersuchung	137
7.5.3 Ableitung logistischer Kenngrößen aus dem virtuellen Prototypen	143
8 Integration von Fertigungs- und Maschinenplanung am Beispiel des Reflowlötens im Konvektionsofen	146
8.1 Technologische Randbedingungen des Reflowlötens	146
8.1.1 Technologie des Lötprozesses	146
8.1.2 Anforderungen an Maschinenentwicklung und Prozessplanung	147
8.2 Simulation des Prozessraums des Lötovens	148
8.2.1 Erstellung des Simulationsmodells	148
8.2.2 Ergebnisse der Simulation des Prozessraums	149
8.3 Simulation des Wärmeübergangs auf der Baugruppe	151
8.3.1 Modularer Aufbau des Modells für die Flachbaugruppe	151
8.3.2 Anwendung für die Simulation einer Testplatte	153
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	156
Summary	158
Abkürzungen.....	160
Literatur	161
Anhang A Winkelkorrektur für ein Scannersystem	174
A.1 Geradheitskorrektur für vertikale Linien.....	174
A.2 Linearitätskorrektur zur Erzeugung gleichmäßiger Geschwindigkeiten	176
A.3 Formelzeichen zur Berechnung der Winkelkorrektur	178
Anhang B Anisotrope Wärmeleitfähigkeiten für Ersatzmaterialeigenschaften..	179
B.1 Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Geometrien	179
B.2 Wärmestrom senkrecht zu den Grenzschichten.....	180
B.3 Wärmestrom parallel zu den Grenzschichten.....	182
B.4 Formelzeichen der Ersatzmaterialeigenschaften	183

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit preiswerter Elektronik und elektronischer Systeme führt seit der Entwicklung des ersten integrierten Schaltkreises im letzten Jahrhundert zu einer Veränderung aller Bereiche des Lebens. Das reicht von der Automatisierung in der Fertigung und an Büroarbeitsplätzen bis zur Durchdringung des täglichen Lebens, etwa über das Internet. Die Entwicklung dieser Informations- und Kommunikationstechnologie hängt direkt mit der verfügbaren Rechnerleistung zusammen. Ein Maß hierfür ist die Anzahl Transistoren auf einem Prozessor, die sich nach dem Moore'schen Gesetz [77] alle 18 Monate verdoppelt [54].

Diese exponentielle Zunahme der Leistungsfähigkeit wurde nur durch die fortwährende Miniaturisierung der elektronischen Bauelemente und Baugruppen erreicht. Dadurch werden zunehmend Anwendungen möglich, die bis vor einigen Jahren nicht als realistisch galten. Beispiele hierfür sind die Verfügbarkeit von Mobiltelefonen oder die Entwicklung der Komfortelektronik im Automobilbereich. Dies führt gleichzeitig zu einer Individualisierung dieser Baugruppen, die für das Endgerät häufig funktionsbestimmend sind. Die vom Kunden wahrgenommenen Produkte, etwa in den Bereichen Konsumgüter und Telekommunikation, unterliegen sehr kurzen Produktlebenszyklen. Dies erfordert eine schnelle Anpassung an neue Produkte und damit eine hohe Nachfolge- und Variantenflexibilität der Fertigung (Bild 1).

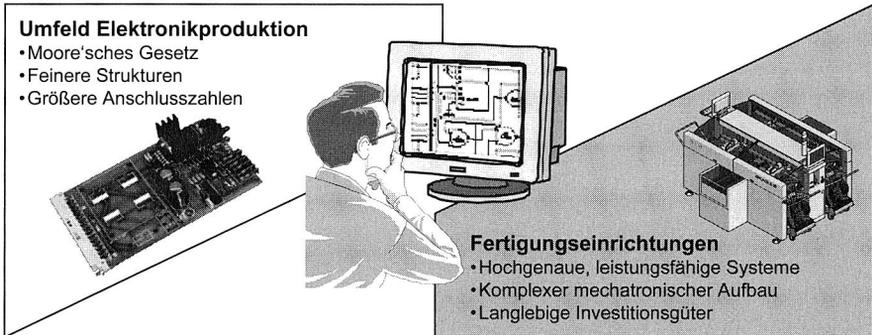


Bild 1: Herausforderungen für die Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

Dieser Fortschritt ist in der beobachteten Geschwindigkeit jedoch nicht ohne erheblichen Aufwand bei der Entwicklung und Fertigung der elektronischen Baugruppen möglich. Insbesondere stößt die Miniaturisierung bei Bauelementen und Schaltungsträgerstrukturen immer wieder an technologische Grenzen. Dies war etwa bei der Ablösung der bedrahteten Technologie (through hole technology, THT) durch die oberflächenbestückten Bauelemente (surface mounted device, SMD) in der 1990er Jahren der Fall. Die zukünftigen Herausforderungen der Elektronikproduktion sind im Bereich der

Schaltungsträger durch Strukturen von kleiner 50 µm gekennzeichnet. Bei den Bauelementen sind miniaturisierte Gehäuseformen sicher zu verarbeiten. Ein Beispiel hierfür ist die Bauform 0201 für passive Bauelemente, die Abmessungen von 0,6 mm x 0,3 mm aufweist [166].

Die Fertigung elektronischer Baugruppen stellt somit sehr hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems (Bild 1). Dessen Leistungsfähigkeit wird neben der realisierten Prozessführung vor allem vom Potential der eingesetzten Maschinen bzgl. Technologie und Durchsatz bestimmt. Daneben spielt das logistische Konzept der Fertigungsanlage eine wesentliche Rolle. Die Maschinenentwicklung muss im geschilderten Spannungsfeld die stetig steigenden Anforderungen in einem mechatronischen System umsetzen. Dabei nimmt die Vernetzung der Teilbereiche Mechanik, Elektronik und Informationstechnik in jeder Maschinengeneration zu. Da Fertigungsmaschinen langlebige Investitionsgüter sind, müssen sie neben den Anforderungen aus der Technologie und der Produktivität flexibel bzgl. des Auftragsvolumens sein: Das bedeutet, dass sowohl hochvolumige Massenartikel (z. B. Mobiltelefone) als auch eher niedrigvolumige, variantenreiche Anwendungen (z. B. Automatisierungssysteme) wirtschaftlich zu fertigen sind. Dies kann durch flexible Materialflusssysteme oder durch die Ableitung von Maschinenfamilien geschehen.

Gleichzeitig stehen die Maschinenanbieter vor der Herausforderung des internationalen Wettbewerbs und der Marktkonzentration der Elektronikfertiger, etwa bei Bestückungsdienstleistern. Es ist dadurch für den ökonomischen Erfolg eines Maschinenanbieters entscheidend, möglichst schnell technologische Anforderungen umzusetzen und somit ein Alleinstellungsmerkmal [85] aufzuweisen. Dies kann auch durch die Weitergabe von Daten für die Linienplanung beim Maschinenbetreiber geschehen, wodurch dieser den Zusatznutzen einer sicheren Planungsgrundlage hat.

Die Analyse dieses Umfelds zeigt deutlich, dass die hier anfallenden, komplexen Aufgaben nur mit dem gezielten und abgestimmten Einsatz rechnergestützter Werkzeuge zu beherrschen sind. Dabei bietet insbesondere die Simulationstechnik ein erhebliches Potential. Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Potential der Simulationstechnik für die Verbesserung und Beschleunigung der Planung von Fertigungseinrichtungen in der Elektronikproduktion zu erschließen. Dies geschieht durch die Entwicklung eines abgestimmten Vorgehensschemas, das in eine entsprechende Software-Umgebung umgesetzt wird (Bild 2). Dadurch werden die schon heute verfügbaren, leistungsfähigen Softwarewerkzeuge durchgängig verbunden und somit Insellösungen vermieden.

Dazu wird in Kapitel 2 zunächst das technologische Umfeld der Elektronikproduktion im Detail betrachtet. Dies beinhaltet die Erörterung der relevanten Prozessketten sowie das Aufzeigen der Entwicklungstendenzen. Daraus werden die Herausforderungen für die Planung von Fertigungssystemen abgeleitet und der Bedarf an einer durchgängigen Rechnerunterstützung aufgezeigt.

Für die Erfüllung der zukünftig geforderten Leistungsmerkmale ist der Einsatz leistungsfähiger Methoden und Werkzeuge bei der Entwicklung und Planung erforderlich.

Hier spielen vor allem die Werkzeuge der rechnergestützten Produktentwicklung (Computer Aided Engineering, CAE) eine wichtige Rolle. Da sich der Einsatz rechnergestützter Konstruktionsprogramme in der Produktentwicklung (Computer Aided Design, CAD) auf breiter Basis durchgesetzt hat, bieten vor allem die Werkzeuge der maschinennahen Simulation noch ein erhebliches Potential. Damit ist es möglich, die unterschiedlichsten Fragestellungen zu betrachten. Dies reicht vom Studium des Fertigungsprozesses mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) über das Erfassen des vollständigen Verhaltens der Maschine in der Mehrkörpersimulation bis hin zur Betrachtung der Auslastung in Fertigungsanlagen mit der Ablaufsimulation. Die jeweiligen Simulationstechniken werden in Kapitel 3 vorgestellt und ihre typischen Anwendungsfelder skizziert.

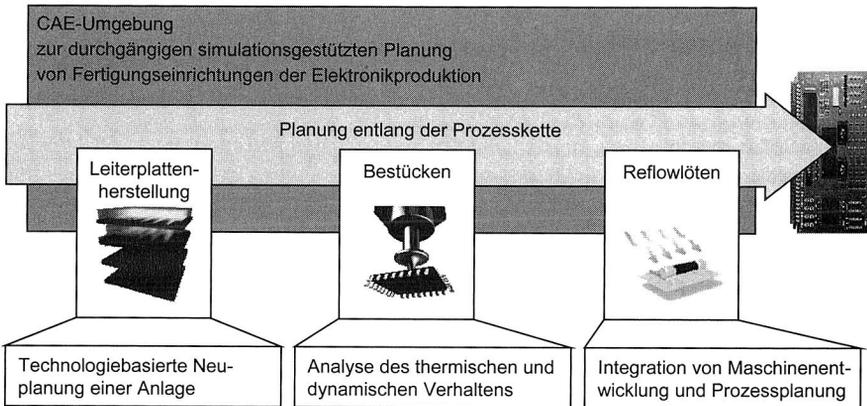


Bild 2: Zielsetzung der Arbeit: Durchgänge Simulationsunterstützung für die Planungsaufgaben entlang der Prozesskette

Zur Ausschöpfung der Potentiale ist ein strukturiertes Vorgehen für die Planung und den Simulationseinsatz erforderlich, das in Kapitel 4 vorgestellt wird. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Maschinenentwicklung, da sich hier die weitestgehenden Beeinflussungsmöglichkeiten ergeben. Für die Entwicklung des Vorgehens ist die gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Anforderungen an Fertigungseinrichtungen ein zentraler Punkt. Im Sinne des effektiven Projektmanagements werden schließlich definierte Simulationsergebnisse als Meilensteine der Planung festgelegt.

Dieses Vorgehensschema wird anschließend in Kapitel 5 in eine CAE-Umgebung umgesetzt. Dabei werden Lücken in den kommerziellen Distributionen identifiziert und durch geeignete Zusatzprogramme geschlossen. Die Mächtigkeit dieser Simulationsumgebung wird danach an einem Anwendungsbeispiel aus der Robotik demonstriert.

In den Kapiteln 6 bis 8 wird jeweils für einen spezifischen Anwendungsfall der Einsatz der simulationsgestützten Planung dargestellt. Dafür wird zunächst die jeweilige Problemstellung beschrieben und der hierfür geeignete Simulationsansatz dargestellt. Dies

kann den Einsatz einer oder mehrerer Simulationstechniken beinhalten, die dann mit Hilfe der entwickelten CAE-Umgebung verknüpft werden. Ein wichtiger Punkt ist die Verwendung bereits vorhandener Daten und Modelle.

Kapitel 6 schildert eine Vorgehensweise für die Neuentwicklung eines Fertigungssystems auf der Basis technologischer Vorgaben. Dieser Fall ist für die Elektronikproduktion besonders interessant, da die fortschreitende Miniaturisierung immer wieder technologische Sprünge erfordert. Diese Thematik wird am Beispiel der Leiterplattenherstellung demonstriert.

Wichtige Punkte bei der Entwicklung von Maschinen sind das thermische und das dynamische Verhalten, die in Kapitel 7 dargestellt werden. Die jeweils isolierte Betrachtung der Einflüsse ist jedoch nicht ausreichend, da sich im Betrieb der Maschine beide Wirkungen überlagern. Für diese umfassende Betrachtung werden die beiden Teilm Modelle zu einem "virtuellen Prototypen" integriert. An diesem werden dann Aussagen zur Integration in die Fertigungsumgebung sowie zur Maschinenfähigkeit abgeleitet.

In Kapitel 8 wird schließlich am Beispiel des Reflowlötens die Integration von Maschinenentwicklung und Prozessplanung vorgestellt. Dabei werden die Ergebnisse aus der thermischen Auslegung des Prozessraums im Ofen für die Planung des Temperaturprofils in der Prozessplanung übernommen.

Nach der Darstellung der Anwendung von Methodik und CAE-Umgebung für die einzelnen Planungsaufgaben schließt Kapitel 9 die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf die Integration in die Virtuelle Fabrik ab.

2 Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

Die Anforderungen an die Fertigungseinrichtungen für die Elektronikproduktion orientieren sich unmittelbar an den Forderungen, die an die zu produzierende Baugruppe gestellt werden. Dazu werden im folgenden Kapitel das technologische Umfeld und die Potentiale der Simulationsunterstützung erörtert.

2.1 Prozessketten zur Herstellung elektronischer Baugruppen

Die geschilderten, beispielhaften Aufgaben fallen prinzipiell bei allen vier Prozessketten der Elektronikproduktion an:

- Die Produktion von Bauelementen ist, insbesondere im Halbleiterbereich, durch den Einsatz physikalischer und chemischer Fertigungsverfahren wie der Ionenimplantation oder der Kristallzüchtung gekennzeichnet und stellt einen für sich geschlossenen Bereich dar. Sie wird im Folgenden nicht näher diskutiert.
- Die Herstellung der Schaltungsträger zeichnet sich durch eine Vielzahl von Prozessschritten aus, die zum größten Teil mehrfach durchlaufen werden. Hier wird auch eine Vielzahl umweltbelastender Prozesse eingesetzt, z. B. beim nasschemischen Ätzen von Leiterbahnstrukturen.
- Die Flachbaugruppenherstellung ist eine Prozesskette, die beim Anbieter des Endprodukts oder bei Bestückdienstleistern durchgeführt wird. Die Hauptprozessschritte sind der Lotpastenauftrag, die SMD-Bestückung, das Reflowlöten zum Aufschmelzen der Lotpaste und die Qualitätsprüfung.
- Der letzte Arbeitsgang ist die Montage einer oder mehrerer Flachbaugruppen zusammen mit einem Gehäuse und anderen mechatronischen Komponenten zum Endprodukt. Dies ist ein Teilgebiet der makroskopischen Handhabungs- und Montagetechnik.

Die Halbleiter- und Schaltungsträgerherstellung werden wegen der speziellen Prozesstechnik fast ausschließlich von spezialisierten Anbietern übernommen. Bei der SMD-Bestückung zeichnet sich ebenfalls ein Trend in diese Richtung ab [140], [25].

Die Prozessketten für die Leiterplattenherstellung und die SMD-Bestückung bilden den Schwerpunkt der Herstellung elektronischer Baugruppen. Sie werden im Folgenden dargestellt.

2.1.1 Schaltungsträgerherstellung

Bei der Schaltungsträgerherstellung dominiert derzeit das Subtraktivverfahren (Metallresistverfahren). Bei diesem Verfahren dient ein vollflächig verkupfertes Harzgewebe als Ausgangsmaterial. Die Schaltungsstrukturen werden durch anschließendes Ätzen

dieser Kupferschicht erzeugt. Die wesentlichen Prozessschritte sind in Bild 3 dargestellt.

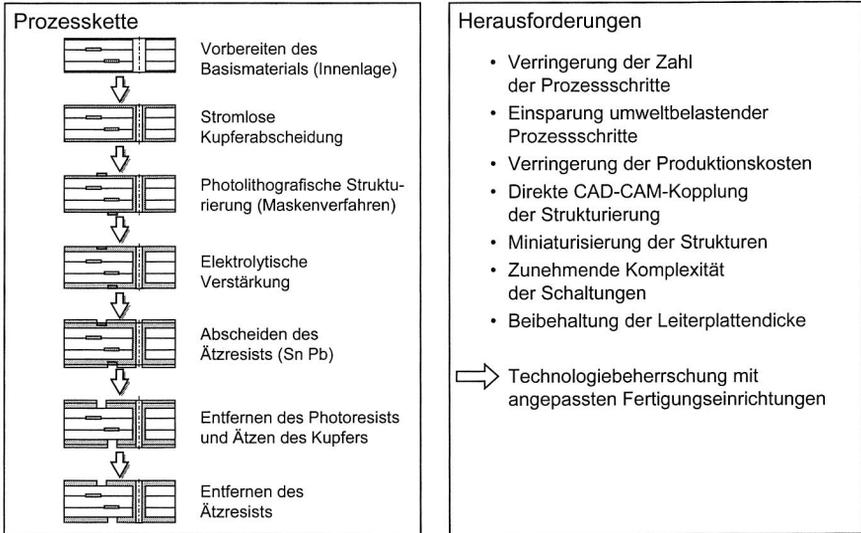


Bild 3: Prozesskette und Herausforderungen für die Schaltungsträgerherstellung (Substraktivverfahren am Beispiel der äußeren Lagen einer vierlagigen Leiterplatte, nach [51])

Diese Verfahrensfolge ist für die zukünftigen Herausforderungen nur bedingt geeignet. Diese umfassen die Forderungen nach umweltfreundlichen Herstellverfahren und größerer Stückzahlflexibilität sowie den fortschreitenden Miniaturisierungstrend.

Für die Strukturierung ist eine Reihe nasschemischer Prozesse erforderlich: So wird zunächst die Oberfläche vollflächig verkupfert und danach die Stellen, an denen das Leiterbild kein Kupfer aufweist, mit einem lichthärtenden Film abgedeckt. Im nächsten Schritt erfolgt eine elektrolytische Verstärkung des Kupfers an den nicht abgedeckten Stellen. Daraufhin wird das zukünftige Leiterbild mit einer Zinn-Blei-Schicht abgedeckt. In anschließenden Ätzprozessen wird zunächst das nicht abgedeckte Kupfer geätzt und danach die Zinn-Blei-Schicht entfernt [51]. Hierbei werden eine Reihe umweltschädlicher Chemikalien verwendet; gleichzeitig entstehen etliche gefährdende Substanzen, die anschließend entsorgt werden müssen. Im Zuge der Sensibilisierung für die Umweltgefährdung, die sich z. B. im geplanten Verbot von Blei im Endprodukt äußert (vgl. [75]), sind Verfahren zu entwickeln, die eine deutliche Entlastung ermöglichen.

Darüber hinaus gewinnt bei der Strukturierung die Laser-Direktbelichtung (Laser Direct Imaging, LDI) gegenüber der Maskenbelichtung auf Grund der hohen Kosten für die Maskenerstellung an Bedeutung. Hierdurch ergibt sich eine Reihe an Vorteilen, etwa die direkte Übernahme von CAD-Daten, die Beherrschung sehr kleiner Strukturen und

die Erhöhung der Komplexität der Schaltung [99]. Diese Möglichkeiten müssen auch von neu zu entwickelnden Verfahren und Maschinen ausgeschöpft werden.

Eine weitere Herausforderung stellt der Miniaturisierungstrend dar [90], der im folgenden Abschnitt ausführlich diskutiert wird. Ein Aspekt hiervon ist die Erhöhung der Zahl der Leiterbahnlagen. Da die Höhe des Schaltungsträgers durch die Gestaltung des Gerätes begrenzt ist, darf eine Erhöhung der elektrischen Komplexität der Schaltung nicht zum Ausufern der Höhe führen. Ein Ansatz, der hier verfolgt wird, ist der sequentielle Aufbau der äußeren Lagen (Sequential Build Up, SBU) und die Erhöhung der Verdrahtungsdichte bei Leiterplatten (HDI, High Density Interconnection) [43].

2.1.2 Flachbaugruppenherstellung (SMD-Bestückung)

Im Anschluss an die Schaltungsträgerherstellung erfolgt die Flachbaugruppenfertigung. Hier stellt die Bestückung oberflächenmontierter Bauelemente (SMDs) die am weitesten verbreitete Prozesskette dar [153]. Ihre Arbeitsschritte sind in Bild 4 zusammengefasst:

	Auftrag der Verbindungsmedien 	Bestücken der Bauelemente 	Reflow-Löten 
Arbeitsschritt	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbildung formstabiler Lotdepots mit definiertem Volumen • Verformung des Lotes 	<ul style="list-style-type: none"> • Individuelle Handhabung jedes Bauelements • Aufsetzen der Bauelemente auf die Lotdepots 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufschmelzen und anschließendes Erstarren der Lotdepots • Wärmeübergang durch Fluid in die Baugruppe
Aufgabenfelder	<ul style="list-style-type: none"> • Formveränderungen beim Abziehen der Schablone • Einflüsse durch Lagerung, Umweltbedingungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoch automatisierter Arbeitsschritt • Haupteinfluss durch Automaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenspiel von Wärmeübertragung und Phasenwechsel • Temperaturprofile von Ofen, Produkt und Fluid abhängig

Bild 4: Grundlegende Arbeitsschritte der SMD-Bestückung und exemplarische Problemfelder

Der Auftrag der Verbindungsmedien erfolgt meistens durch Schablonendruck, daneben ist bei kleineren Losgrößen auch das Dispensieren verbreitet. Beim Schablonendruck wird die Lotpaste von einem Rakel durch die Öffnungen der Schablone auf die Leiterplattenanschlüsse gedrückt. Anschließend wird die Schablone abgehoben und die nächste Leiterplatte bedruckt.

Dieser Prozessschritt gilt als derjenige, der statistisch die meisten Defekte verursacht [66]. Die Geometrie und die Oberflächenbehandlung der Schablone sowie die Materialdaten der Lotpaste bestimmen die Haftung der Lotpaste an der Schablone und damit die Gefahr der Verschmutzung. Diese Unsauberkeit kann zu einem fehlerhaften Auftrag führen und damit die Qualität der Baugruppe nachhaltig beeinträchtigen [141]. Daneben spielen die Materialdaten der Lotpaste eine entscheidende Rolle, die wiederum von Temperatur, Luftfeuchte, Lagerungsbedingungen und -dauer, der Zeit bis zum Löten etc. beeinflusst werden [45]. Da der Pastendruck letztendlich eine Umformung mit sehr hohen Umformgraden darstellt, bei der darüber hinaus die Werkstoffdaten fast nicht zu erfassen sind, ist eine analytische Beschreibung des Prozesses kaum möglich. Dies gilt in verstärkter Form für das Dispensieren. Es bleibt nur die experimentelle Ermittlung der optimalen Prozessparameter, die dann von der Maschine möglichst exakt zu reproduzieren sind. Dazu ist diese auf Spielfreiheit und hohe Bewegungsgenauigkeit auszulegen, wie in [102] am Beispiel eines Kleindruckers gezeigt wird. Auf Grund der Bedeutung dieses Arbeitsschrittes für die Prozesskette muss es das Ziel sein, die anderen, einfacher zu erfassenden Prozesse absolut sicher zu beherrschen, um es dem Maschinenbediener zu ermöglichen, sich auf diesen qualitätskritischen Prozess zu konzentrieren.

Die Platzierung der elektronischen Bauelemente auf dem Lotdepot ist dadurch gekennzeichnet, dass jedes Bauelement einzeln von einer Bereitstellungsposition auf die Zielposition auf dem Schaltungsträger gesetzt werden muss. Dabei werden sowohl die Position der Leiterplatte als auch die Orientierung der Bauelemente vor dem Platzieren mit Bilderkennungssystemen erfasst und entsprechend korrigiert. Dieser Arbeitsgang beeinflusst vor allem die Arbeitsgeschwindigkeit einer Fertigungslinie. Da die Abmessungen der Bauelemente stetig kleiner werden, besteht die Herausforderung für die Zukunft in der gleichzeitigen Erhöhung von Arbeitsgenauigkeit und -geschwindigkeit. Diese Aufgabe ist im Bereich der Maschinenentwicklung angesiedelt und ist durch die hier verfügbaren, rechnergestützten Werkzeuge effektiv zu unterstützen.

Die dauerhafte Verbindung von Bauelementen und Schaltungsträger wird durch das Reflowlöten hergestellt. Dabei wird die bestückte Flachbaugruppe im Lötöfen über die Schmelztemperatur des Lotes erwärmt. Hierbei ist zu beachten, dass an jedem Lotpunkt ein vollständiges Aufschmelzen erreicht wird, gleichzeitig muss aber eine thermische Schädigung des Bauelements vermieden werden. Dies erfordert insbesondere eine homogene Temperaturverteilung unter flächigen Bauelementen (area arrays), wie Ball Grid Array (BGA) oder Chip Size Package (CSP).

Dazu muss der Ofen ein gleichmäßiges Temperaturprofil entlang seiner Breite stabil gewährleisten. Hier spielen Einflüsse wie die Luftströmung im Ofen sowie der Wärmeaustausch über die Transportkette und an die Umgebung eine Rolle. Für den Lötprozess ist das Temperaturprofil, das die Leiterplatte beim Durchlauf durch den Ofen erfährt, entscheidend [10]. Für seine Einstellung sollten idealerweise die Daten des Ofens aus der Entwicklung direkt übernommen werden können.

2.1.3 Resultierende Herausforderungen

Die Schilderung der Prozessketten zeigt, dass gerade der Bereich der Elektronikproduktion vor großen Herausforderungen in Bezug auf Miniaturisierung, Umweltverträglichkeit und Funktionsintegration steht. Diese Situation erfordert leistungsfähige Fertigungseinrichtungen. Die Planung dieser Systeme wird ohne angepasste Werkzeuge kaum zu bewältigen sein. Daneben sollten die Elektronikproduzenten auf die für sie relevanten Daten der Maschinenentwicklung zugreifen können, um eine beschleunigte Technologieplanung durchzuführen.

2.2 Entwicklungstendenzen in der Elektronikproduktion

Eine Studie einer namhaften Unternehmensberatung zu den Zukunftsperspektiven des Maschinen- und Anlagenbaus¹ [120], [85] identifiziert fünf wesentliche Tendenzen, die die Entwicklung der Wirtschaft in den nächsten Jahren maßgeblich beeinflussen werden. Davon sind für den Bereich der Elektronikproduktion und ihrer Fertigungseinrichtungen drei von Bedeutung. Dies sind die beschleunigte Dynamik des Wandels, das Zusammenwachsen bisher getrennter Technologien und die Verbindung von wirtschaftlichem Erfolg und Schonung der natürlichen Ressourcen. Bild 5 fasst diese Trends zusammen und zeigt die daraus resultierenden Herausforderungen.

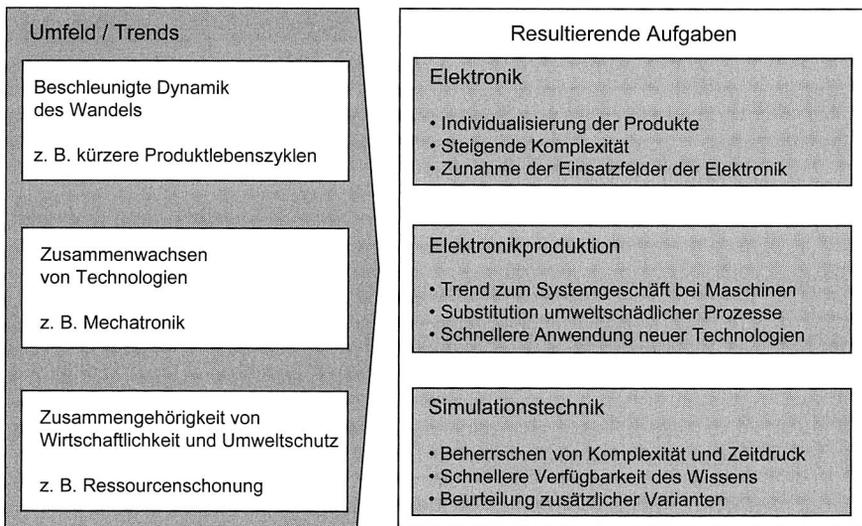


Bild 5: Megatrends mit Einfluss auf die Entwicklung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion (Trends nach: [85], [120])

¹ Die Studie wurde primär für das Bundesland Bayern erstellt. Ein Ergebnis der Studie ist, dass die Aussagen für alle Industrieregionen Deutschlands und Westeuropas Gültigkeit haben.

Die Aussagen der Studie werden durch die Ergebnisse der Arbeitskreise des Sonderforschungsbereichs "Produktionssysteme in der Elektronik" bestätigt [17], [72].

2.2.1 Zukünftige Anforderungen an die Produktion elektronischer Baugruppen

Der Gesamtmarkt für elektronische Produkte betrug im Jahr 2001 in Deutschland 23 Milliarden Euro [109], was eindrucksvoll die volkswirtschaftliche Bedeutung dieser Branche zeigt. Sie erschließt dabei neue Anwendungsgebiete, was vor allem durch die Zuwachsraten in den Bereichen Automobil sowie Energietechnik und Mess-, Steuer- und Regeltechnik deutlich wird, die auch von der negativen konjunkturellen Entwicklung 2001 nicht beeinflusst wurden [109]. Damit stellt sie eine Schlüsseltechnologie für die Zukunft dar. Durch die vielfältigen Einsatzfelder ergibt sich jedoch auch eine Individualisierung der Produkte und damit die Herausforderung, spezifische Kundenwünsche umzusetzen. Dies beinhaltet auch die Integration mechanischer und elektrischer Funktionalität, etwa bei der Technologie der räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträger (3D-MID) [31]. Ein Ansatzpunkt zur Erzielung von Economies of scale bei Produkten in Standardtechnologie ist die Fremdvergabe an Bestückdienstleister, die dann über ein ausreichendes Produktionsvolumen verfügen [25], [150]. Sowohl bei einer in-house Fertigung als auch bei der Fremdvergabe muss also eine flexible Fertigung möglich sein, die ein variantenreiches Produktspektrum beherrschen kann. Daneben müssen hochvolumige Produkte wie Mobiltelefone auf sog. Rennerlinien produziert werden. Gerade in diesem Sektor herrschen kurze Produktlebenszyklen vor, was zwei wettbewerbsverschärfende Effekte nach sich zieht: Zum einen werden Produkteigenschaften, die als Differenzierungsmerkmale verwendet wurden, sehr schnell selbstverständliches Allgemeingut; zum anderen muss ein neues Produkt sehr rasch am Markt verfügbar sein, um die Entwicklungs- und Investitionskosten wieder einzuspielen [85], [120].

Die fortschreitende Miniaturisierung erfordert eine stetige Anpassung und Optimierung der Prozesse und Maschinen. So ist bereits die für Widerstände und Kondensatoren verwendete Bauelementform 0201 mit Abmessungen von 0,6 mm x 0,3 mm kaum noch mit bloßem Auge identifizierbar. Sie erforderte bei der Einführung erhebliche Anstrengungen, wie die Veröffentlichungen namhafter Bestückautomatenanbieter zeigen ([100], [64], [169], [78]). Bei den zukünftig geplanten Bauelementformen 01005 und kleiner wird dies noch verstärkt der Fall sein [48]. Gleichzeitig sind aber alternative Ansätze wie elektrisch aktive Leiterplatten [176] oder Integration der passiven Bauteile auf dem Halbleiter für wenig stückzahlintensive Anwendungen nur bedingt geeignet [148].

Bei der sog. HDI-Technologie werden für die Schaltungsträger Strukturbreiten der Leiterzüge von 100 µm gefordert [168], [88]. Diese Technologie erfordert höchste Genauigkeit bei der Erzeugung des Leiterbildes. Hierfür ist im Moment die Abbildung von Masken auf lichtempfindliche Schichten die vorherrschende Technologie. Da bereits eine beschädigte oder fehlende Verbindung die Funktion der gesamten Baugruppe beeinträchtigen kann, wird erheblicher Aufwand zur automatischen Kontrolle (AOI) der Masken und der Leiterplatten betrieben [167]. Eine personengebundene Inspektion ist

auf Grund der Komplexität der Schaltungen und des geforderten Durchsatzes nicht mehr sinnvoll [111], [83]. Durch eine direkte CAD-CAM-Kopplung, wie sie in der mechanischen Fertigung üblich ist, ist bei der Strukturierung ein deutliches Optimierungspotential vorhanden. Dies wird durch Direktbelichtungsverfahren erreicht [6]. Für die weitere Miniaturisierung werden die Kontaktierungen zwischen den einzelnen Lagen der Leiterplatte als Micro-Vias (μ -via) ausgeführt [41]. Hierbei werden diese Verbindungen zwischen den einzelnen Lagen der Leiterplatte nicht mehr durch eine definierte Randstruktur begrenzt. Vielmehr werden sie innerhalb der Leiterbahn oder der Leiterplattenanschlussflächen realisiert. Bei einer Strukturbreite von $50\ \mu\text{m}$ bedeutet das, dass der Durchmesser der Vias $15\ \mu\text{m}$ beträgt. Dies ist nicht mehr mit spanenden Verfahren möglich; die vorherrschende Technologie ist das Laserbohren [56], [133].

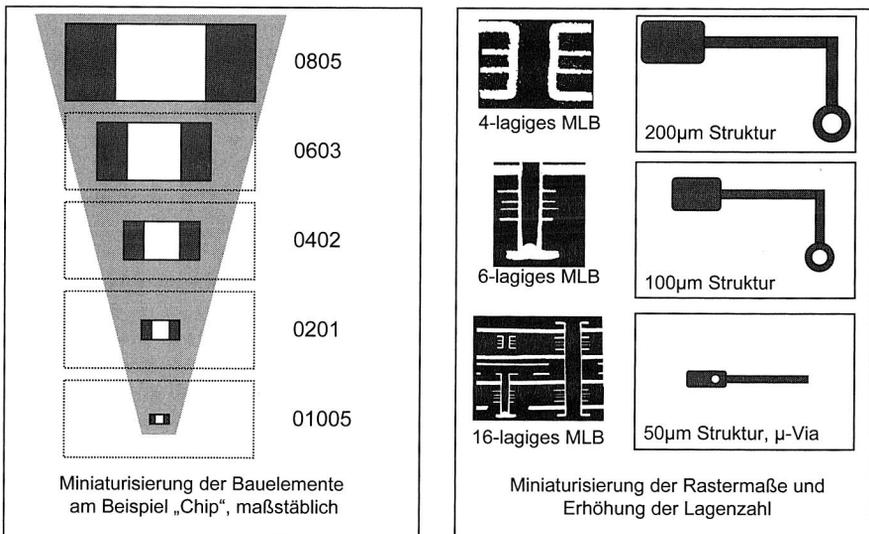


Bild 6: Miniaturisierung bei Bauelementen und Schaltungsträgern (maßstäblich bzgl. der relativen Größe)

2.2.2 Aufgaben für die Entwicklung von Fertigungseinrichtungen

Neben den im vorherigen Abschnitt geschilderten Anforderungen an die Elektronikproduktion muss sich die Entwicklung von Fertigungseinrichtungen den Herausforderungen des Maschinenbaus stellen, die im Folgenden näher beschrieben werden. Dabei sind neben den allgemeinen Forderungen nach hoher Verfügbarkeit und Kosteneffizienz [57] auch die technologiespezifischen Randbedingungen zu beachten.

Fertigungsmaschinen

Von zukünftigen Generationen von Fertigungsmaschinen für die Elektronikproduktion wird gefordert, den Herausforderungen des Miniaturisierungstrends durch eine Erhö-

hung der Arbeitsgenauigkeit zu begegnen. Gleichzeitig sind die Arbeitsgeschwindigkeit und die Verfügbarkeit weiter zu steigern (Bild 7). Diesen Anforderungen wird in anderen Bereichen des Maschinenbaus, etwa bei Werkzeugmaschinen und Handhabungsgeräten, durch den Aufbau als Parallelkinematik oder den Einsatz von Linearmotoren begegnet (vgl. [159]). Die höhere Leistungsdichte, die damit erreicht wird, führt zum einen zu einer Erwärmung der Maschine, zum anderen zur Anregung von Schwingungen. Diese müssen durch konstruktive Maßnahmen oder durch Kompensation in der Maschinensteuerung beherrscht werden [50], [165].

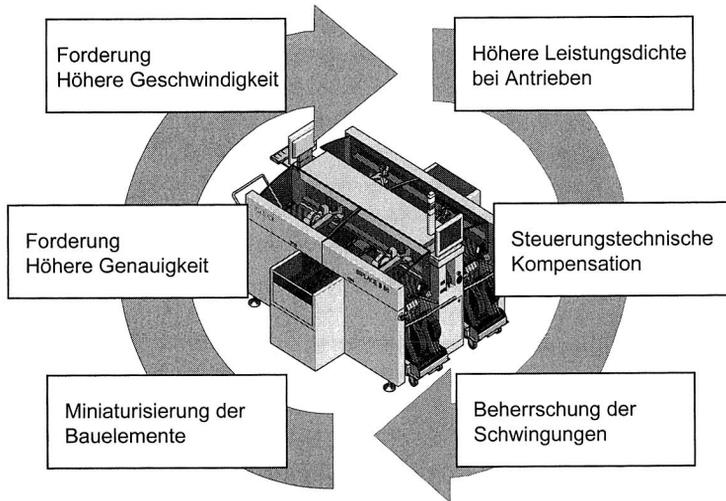


Bild 7: *Aktuelles Spannungsfeld der Maschinenentwicklung*

Fertigungssysteme

Nur durch die geeignete Integration der Maschine in das fertigungstechnische Umfeld ist es möglich, ihr Potential voll auszuschöpfen. Dabei sind für den Einsatz zwei prinzipielle Szenarien möglich: Zum einen kann die neu entworfene Maschine in einem bereits vorhandenen fertigungstechnischen Umfeld eingesetzt werden. Dieses ist durch bereits vorhandene Fertigungseinrichtungen geprägt. Zur Absicherung von Investitionsentscheidungen ist es hier wesentlich, das Zusammenspiel von Neuentwicklungen im existierenden Umfeld bereits bei der Entwicklung beurteilen zu können.

Zum anderen kann die neue Maschine Teil einer umfangreichen Investition sein, bei der etwa eine neue Fertigungslinie aufgebaut wird. Hier kann es für den Maschinenhersteller wettbewerbsentscheidend sein, als Komplettanbieter aufzutreten [85]. Darüber hinaus wird zunehmend die Leistungsfähigkeit einer neuen Fertigungsanlage bereits in der Planungsphase mit Hilfe der Simulation analysiert und es werden Optimierungspotentiale aufgezeigt [157], [89].

2.3 Notwendigkeit einer simulationsgestützten Planung

Während in den vorhergehenden Abschnitten die Herausforderungen und Ansprüche an eine zukunftsfähige Elektronikproduktion dargestellt wurden, zeigt dieser Abschnitt die Potentiale der Planung am digitalen Modell auf. Diese Potentiale werden anschließend in einer Systematik des Simulationseinsatzes zusammengefasst.

2.3.1 Potentiale des Simulationseinsatzes

Die Anforderungen an zukünftige Produktionssysteme in der Elektronikproduktion werden immer anspruchsvoller, wie in Abschnitt 2.2 gezeigt wird. Es werden Arbeitsgenauigkeiten und –geschwindigkeiten gefordert, die mit überschlägigen Abschätzungen auf der Basis stark vereinfachter Annahmen nicht mehr zu gewährleisten sind. Vielmehr ist der Entwickler von Fertigungsmaschinen genauso wie der Planer von Fertigungsprozessen auf effektive Hilfsmittel zur Beherrschung seiner komplexen Aufgabe angewiesen. Dies umfasst rechnergestützte Werkzeuge zur Beherrschung des mechatronischen Zusammenspiels von Maschinenmechanik, -elektronik, -software, Fertigungsprozess und Produktionsumfeld [144].

Mit dem Einsatz der Simulationstechnik können bereits am CAD-Modell des Fertigungssystems Untersuchungen durchgeführt werden, für die sonst aufwändige Experimente an einem Prototypen notwendig wären. Außerdem können Ergebnisse ermittelt werden, die messtechnisch kaum zugänglich sind. Dadurch ermöglicht es die Simulationstechnik, die Zeit für die Realisierung neuer Anlagen deutlich zu verkürzen. Darüber hinaus können technische Änderungen an einer Maschine [172] oder dispositive Änderungen beim Materialfluss schnell überprüft werden. Auf der Basis der Simulationsergebnisse werden dann Optimierungsmöglichkeiten deutlich und damit eine Verkürzung der time to market ermöglicht. Weitere Vorteile der Simulation bestehen darin, mehrere Gestaltungsvarianten bei geringem Arbeitsaufwand pro Variante zu beherrschen. Daneben kann das Verhalten realer Systeme auf einen Benutzereingriff überprüft werden, ohne dass in den Betrieb eingegriffen werden muss.

Damit erweitert sich der Anwendungsbereich der Simulation von der Entwicklung und Planung um die Begleitung der Realisierung, etwa bei unterschiedlichen Ausbaustufen [128]. Darüber hinaus können Simulationsmodelle ein wettbewerbsentscheidendes Differenzierungsmerkmal sein, das eine innovative Fertigungseinrichtung mit einer originären Dienstleistung (vgl. [120]) verbindet, etwa durch den Funktionsnachweis für den Vertrieb (vgl. [128]) oder die begleitende Planung im operativen Betrieb.

Für die hier betrachteten Aufgaben, wie die Entwicklung von Maschinen, Planung von Prozessen und die Integration in das fertigungs- und materialflusstechnische Umfeld, sind die Simulationstechnologien relevant, die unter dem Oberbegriff der "maschinen-nahen Simulation" zusammengefasst werden. Dies umfasst die Simulation der Maschinenkinematik, -dynamik, der Steuerung, des Prozesses und der materialflussbezogenen Abläufe innerhalb der Fertigungsmaschine und in ihrem direkten Umfeld [129]. Da-

rüber hinaus gewinnt die Betrachtung des thermischen Verhaltens von Maschinen an Bedeutung [32].

Die obigen Ausführungen zeigen, dass der Einsatz der Simulation ein signifikanter Beitrag zur Erreichung der anspruchsvollen Ziele für Fertigungseinrichtungen in der Elektronikproduktion sein kann. Gleichzeitig ist zu beachten, dass für einen erfolgreichen Einsatz eine abgestimmte Vorgehensweise sowie Kenntnis der Simulationstechnologie entscheidend ist.

2.3.2 Systematik der Planungsaufgaben für die Elektronikproduktion

Als Grundlage für die Entwicklung einer Vorgehensweise zur simulationsgestützten Planung in der Elektronikproduktion dient die Systematisierung der Planungsaufgaben. Diese lassen sich, wie in Bild 8 gezeigt, nach ihrer Nähe zum Fertigungsprozess in die vier Ebenen Prozess, Maschine, Linie und Anlage gliedern [155].

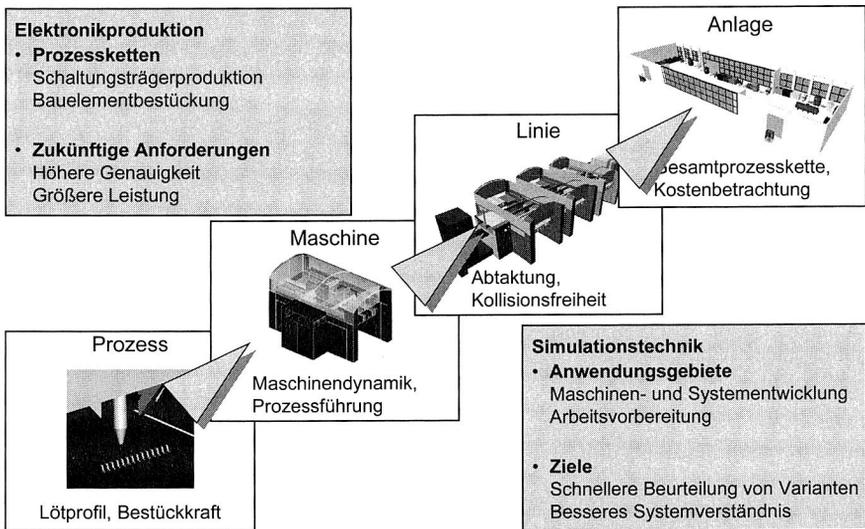


Bild 8: Detaillierungsebenen für die Planung in der Elektronikproduktion

Die Betrachtung des Fertigungsprozesses zielt darauf ab, mit einer vorhandenen oder neu zu entwickelnden Fertigungseinrichtung optimale Parameter bzgl. Qualität, Reproduzierbarkeit und Durchsatz zu erzielen. Ein Beispiel hierfür ist die Einstellung des Temperaturprofils beim Reflowlöten mit einem Konvektionsofen. Die Prozesssicht kann jedoch auch bei der Betrachtung der Maschine eine Rolle spielen, etwa bei der Berücksichtigung der Aufsetzkraft bei der Entwicklung eines Bestückautomaten.

Auf der Ebene der Fertigungsmaschine ist zwischen der Maschinenentwicklung und dem operativen Betrieb zu unterscheiden. Bei der Entwicklung steht die konstruktive

Auslegung, etwa der Maschinendynamik, im Vordergrund. Hier sind besondere Fertigungsmaschinen mit hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit, wie Bestückautomaten [34] oder Leiterplattenbohrmaschinen [59] zu nennen. Dagegen ist beim Betrieb das Hauptaugenmerk die Unterstützung der arbeitsplanenden Tätigkeiten, z. B. der Offline-Programmierung zur Ableitung von Steuerungsprogrammen [24], [61].

Die Aufgaben auf der Ebene von Fertigungslinien umfassen Problemstellungen wie die Aufteilung der Arbeitsinhalte auf die einzelnen Maschinen und damit die Abtaktung. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Sicherstellung der Kollisionsfreiheit, etwa bei Fertigungsanlagen für die Exotenbestückung mit Industrierobotern [179]. Diese Aufgaben sind nicht auf die Arbeitsvorbereitung beschränkt, sie müssen vielmehr bereits bei der Entwicklung von Maschinenreihen berücksichtigt werden. So ist z. B. sicherzustellen, dass die Arbeitsgeschwindigkeit hoch genug ist, um eine typische Systemlast in der geforderten Zeit zu bearbeiten.

Mit der Simulation auf der Anlagen- oder Fabrikebene kann das Verhalten des gesamten Fertigungssystems betrachtet werden. Dies umfasst meist mehrere Linien, die etwa entsprechend der Produkte oder der Verbindungstechnologie konfiguriert werden. Auf dieser abstrakten Ebene sind die Ermittlung der Ausbringung oder der Durchlaufzeit typische Fragestellungen. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Ermittlung der Kosten bei der Einführung einer neuen Technologie.

3 Simulationsunterstützung für Planungsaufgaben in der Produktionstechnik

Die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Planungsstufen vom Fertigungsprozess bis zur Linie werden nun detailliert an Hand der eingesetzten Simulationstechniken dargestellt. Dabei werden neben den Grundgedanken und den Anwendungsfeldern auch beispielhafte Einsatzmöglichkeiten dargestellt.

Dazu wird in den folgenden Abschnitten zunächst die Simulationstechnik von anderen rechnergestützten Werkzeugen in Maschinenentwicklung und Fertigungsplanung abgegrenzt. Anschließend werden die relevanten Simulationstechniken dargestellt und ihre Einsatzmöglichkeiten für die vier Detaillierungsstufen aus Bild 8 diskutiert.

3.1 Stellung der Simulation innerhalb der rechnergestützten Planung

3.1.1 Begriff der Simulation

Die Vielzahl der Softwarewerkzeuge zur Unterstützung von Planungs- und Entwicklungsaufgaben in der Produktionstechnik wird häufig unter den Oberbegriffen CAE (Computed Aided Engineering) oder auch CAx zusammengefasst. Dies umfasst im engeren Sinne Werkzeuge zur Modellierung von Geometrie (CAD) und zur numerischen Simulation. Daneben werden auch Anwendungen zum Datenmanagement oder zur Visualisierung wie Virtual Reality in diesem Begriff eingeschlossen. Für die Ableitung einer simulationsgestützten Planung wird daher zunächst der Begriff der Simulation festgelegt.

Die VDI-Richtlinie 3633 definiert Simulation wie folgt:

„Simulation ist die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“
[128]

Diese Definition beinhaltet den etymologischen Ursprung des Wortes Simulation von lat. simulare, nachbilden [142]. Diese Nachbildung der realen Welt dient dazu, Ergebnisse zu erreichen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Dies bedeutet, dass mit Hilfe der Simulation das Verhalten eines technischen Systems erfasst wird und dadurch unterschiedliche Systemzustände eingestellt und beurteilt werden können.

Um die Simulation von anderen Modellierungswerkzeugen abzugrenzen, wird der Bezug auf einen dynamischen, d. h. zeitveränderlichen Vorgang, eingeführt. Allerdings werden hierdurch auch statische bzw. quasi-statische Betrachtungen ausgeschlossen. Dies sind z. B. statische Analysen mit der Methode der Finiten Elemente oder die stationäre Erwärmung im thermischen Gleichgewicht. Da gerade letztere Aufgaben einen nicht unwesentlichen Teil der Planungs- bzw. Entwicklungsaufgaben in der Produktionstechnik ausmachen, erscheint diese Ausgrenzung als nicht zufriedenstellend. Es ist

daher erforderlich, im Rahmen der Betrachtungen dieser Arbeit den Begriff der Simulation nach der Definition der VDI-Richtlinie 3633 um die Methoden der Berechnung folgendermaßen zu erweitern:

„Simulation ist die Nachbildung eines dynamischen Prozesses oder eines näherungsweise statischen Zustands in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

3.1.2 Stellung der Simulation in der betrieblichen Informationslogistik

Gemäß der vorgeschlagenen Definition der Simulation werden bekannte Eingangsinformationen in Ergebnisinformationen transferiert (Bild 9). Dies bedeutet insbesondere, dass die Simulation selbst keine neuen Daten erzeugt und dass die Qualität der Eingangsdaten ganz erheblichen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse hat.

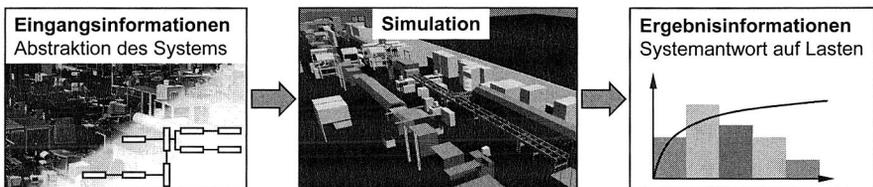


Bild 9: Eingangs- und Ausgangsinformationen der Simulation als Black Box

Die Ermittlung der benötigten Eingangsinformationen ist ein Arbeitsschritt, der in erheblichem Maße Ressourcen und Arbeitszeit binden kann [23]. Gerade deswegen ist bei der Datenerhebung besondere Sorgfalt erforderlich, damit die einmal ermittelten Daten auch für weitere Simulationsmodelle verwendet werden können. Durch die Wiederverwendung von Modellen und Ergebnissen werden dann sowohl zuverlässige Eingangsdaten gewährleistet als auch der Aufwand zu Datenakquisition reduziert.

Nach der Durchführung der ersten Simulationsexperimente stehen Ergebnisdaten zur Verfügung. Diese sind zu validieren, indem das Verhalten eines vergleichbaren realen Systems erfasst und dem des Simulationsmodells gegenübergestellt wird. Dies ist so lange zu wiederholen, bis das Modell das reale System mit ausreichender Genauigkeit widerspiegelt; eine vollständige Übereinstimmung ist auf Grund von Messfehlern und Vereinfachungen bei der Modellbildung nicht realistisch [128]. Sobald ein validiertes Modell verfügbar ist, können Simulationsexperimente durch Variation von Parametern durchgeführt werden. Als Ergebnisse stehen dann detaillierte Daten über das Systemverhalten zur Verfügung, die entsprechend dem Ziel der Simulationsstudie zu interpretieren sind. Die beste gefundene Lösung wird anschließend umgesetzt.

Die geschilderte Methodik ist in Bild 10 vereinfacht als Kreislauf dargestellt. Sie ist in der abstrakt geschilderten Weise insofern allgemeingültig, als sie für die im Folgenden geschilderten Simulationstechniken für die rechnergestützte Planung in der Produkti-

onstechnik anzuwenden ist. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der erweiterten Definition aus Abschnitt 3.1.1. Die relevanten Simulationsarten umfassen die Prozesssimulation mit der Methode der Finiten Elemente, die Simulation der Maschinendynamik und des thermischen Verhaltens der Fertigungsmaschine, die 3D-Kinematiksimulation zur Maschinenentwicklung, Offline-Programmierung und Linienplanung sowie die Ablaufsimulation zur Simulation des Materialflusses in einer Fertigungsanlage.

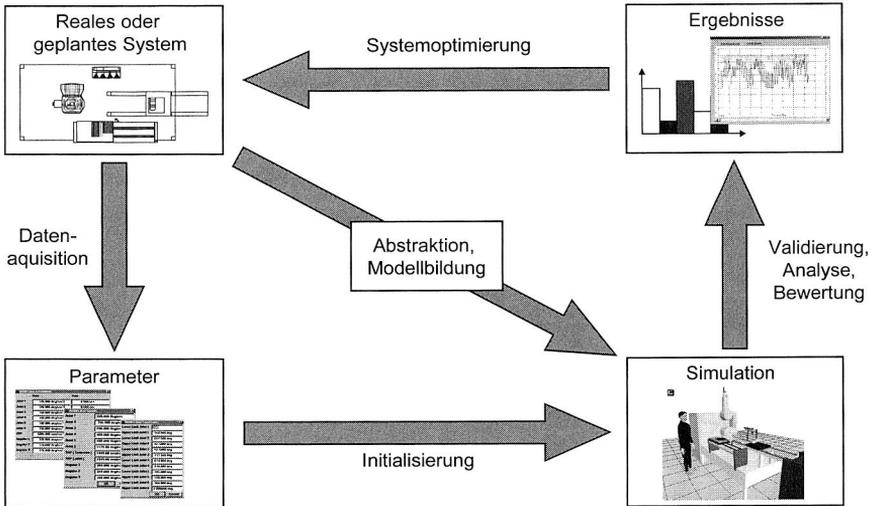


Bild 10: Ablauf einer Simulationsstudie nach [37], [155] ohne Validierungs- und Optimierungsschleifen

3.2 Simulation von Fertigungsprozessen

In Fertigungsprozessen werden Gestalt, Gefüge, Oberflächenzustand oder stofflicher Zusammenhalt eines Werkstücks gezielt verändert. Die Simulation verfolgt auf dieser Ebene das Ziel, den Einfluss verschiedener Prozessparameter zu erfassen und darauf aufbauend eine Optimierung der Prozessführung zu ermöglichen. [128]

Der Einsatz der Prozesssimulation ist insbesondere für mehrstufige, komplexe Prozessketten sinnvoll, die ohne Rechnerunterstützung nicht mehr sicher zu beherrschen sind. Darüber hinaus ist der beachtliche Aufwand für die Datenbeschaffung und problemspezifische Anpassung des Simulators für größere Stückzahlen oder komplexe Bauteile gerechtfertigt. Beispiele für Prozesssimulationen finden sich in vielen Bereichen der Produktionstechnik, etwa in der Umformtechnik [30], der Zerspanung [175], [177], dem Gießen [3], [52] oder der Oberflächentechnik [131]. Zur Simulation von Fertigungsprozessen werden vor allem zwei Typen von Simulationswerkzeugen verwendet. Dies sind zum einen Simulatoren auf der Basis analytisch-mathematischer Modelle und zum anderen auf der Basis der Methode der Finiten Elemente.

Für die Verfügbarkeit eines Simulators, der auf einem analytischen Modell des Prozesses basiert, ist eine geschlossene Beschreibung der Einflüsse von Eingangsgrößen auf das Prozessergebnis die Grundvoraussetzung. So weit diese verfügbar ist, sind die entsprechenden Simulatoren sehr schnell, teilweise ist sogar eine Animation parallel zur Simulation möglich. Somit können umgehend Erkenntnisse über die Prozessgestaltung gewonnen und die Prozessführung angepasst werden. Die Anwendung dieser Simulationstechnik ist am weitesten in der Zerspanung verbreitet und dient dort zur Bahnoptimierung. Ziel ist es, die Prozessgrößen wie Zustellung und Vorschub so zu wählen, dass unerwünschte Schwingungen vermieden werden oder die gewünschte Spanart anfällt [175]. Hierfür ist eine mikroskopische Betrachtung der Spanentstehung nicht erforderlich, es genügt in diesem Fall, die Einflüsse aus Werkzeug, Prozessparametern, Werkstück und Aufspannung auf der Basis von Messungen und vorliegender Erfahrung hinsichtlich der Prozesskenngrößen zu beurteilen. Dies kann z. B. über Methoden der linearen Algebra geschehen.

3.2.1 Einsatz der FEM in der Prozesssimulation

Die Methode der Finiten Elemente (FEM) ist eine Simulationstechnik, die sehr allgemein einsetzbar ist. Sie entstand in der 1960er Jahren zur Berechnung von Stabwerken. Ihr Anwendungsbereich hat sich seitdem erheblich erweitert und umfasst heute nahezu alle Aufgabenstellungen, die auf sich auf Verformungs- bzw. Umformfragestellungen oder Potentialprobleme zurückführen lassen [162]. Dazu gehören elastoplastische, thermoelastische und -plastische Vorgänge, Erwärmungs- und Abkühlvorgänge sowie die Berechnung der Eigenfrequenzen in der Maschinendynamik.

Der Grundgedanke der FEM besteht darin, das Kontinuum des betrachteten Werkstücks oder Bauteils in einzelne, sich nicht überschneidende Teilbereiche, sog. Finite Elemente, aufzugliedern. Jedes dieser Elemente besitzt eine endliche Anzahl an Knotenpunkten, an denen eine Näherungslösung für die Knotenverschiebung berechnet wird. Der Ablauf einer FE-Simulation gliedert sich in die drei Phasen Modellierung (Preprocessing), Gleichungslösung (Solving) und Ergebnisinterpretation (Postprocessing), wie in Bild 11 dargestellt.

Bei der Modellierung ist zunächst festzulegen, welche Ziele mit der FE-Simulation verfolgt werden, entsprechend sind die Grenzen des Simulationsmodells zu ziehen. Anschließend sind die relevanten Geometrien zu hinterlegen und gemäß dem Simulationsziel aufzubereiten. Bei der Prozesssimulation beinhaltet dies u. a. Rohteil und Werkzeug, bei der Maschinenauslegung (vgl. Abschnitt 3.3) die entsprechende Baugruppe. Bei der Wahl des Detaillierungsgrades ist zu beachten, dass eine zu starke Vereinfachung unzureichende Ergebnisse liefern kann, während eine zu große Detaillierung Ressourcen verbraucht, ohne nennenswert bessere Ergebnisse zu liefern [42]. Weitere wichtige Eingangsinformationen der Simulation sind die Werkstoffdaten, die in der Prozesssimulation i. d. R. nicht konstant sind, sondern Funktionen anderer Größen, z. B. Funktionen der Temperatur sind. Die Parameter der Prozessführung werden in Form äußerer Lasten und Randbedingungen eingebracht. Beispiele hierfür sind Prozesskräfte

te, Temperaturen, Abkühlkurven oder Einspannungsbedingungen. Diese Phase wird vom Anwender interaktiv am Rechner durchgeführt und ist entscheidend für die Qualität der Ergebnisse.

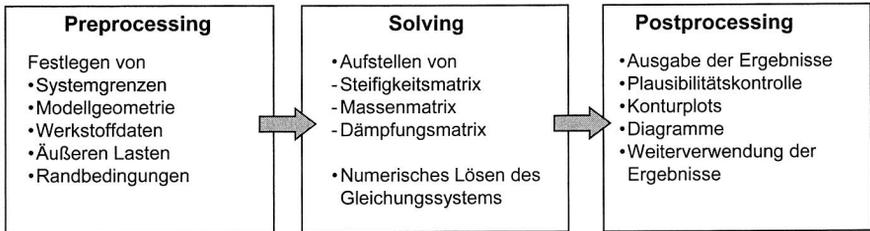


Bild 11: Prinzipieller Ablauf einer FE-Analyse

Im nächsten Schritt werden die Modelldaten an den Solver übergeben, der die eigentliche Berechnung durchführt. Im Solver werden auf der Basis der Elementformulierungen die Matrizen für das lineare Gleichungssystem erstellt. Dies umfasst die Steifigkeits-, Massen- und Dämpfungsmatrizen. Anschließend wird das Gleichungssystem gelöst. Bei dynamischen, d. h. zeitabhängigen Problemstellungen, wie bei der Prozesssimulation, sind die Ausgangswerte für jeden Zeitschritt zu bestimmen. Hier stehen prinzipiell zwei Solver-Technologien für die Zeitintegration zur Verfügung: Zum einen die weit verbreiteten impliziten Solver, die auch in general-purpose FEM Programmen eingesetzt werden, und zum anderen explizite Solver. Implizite Solver werten das Gleichungssystem zum zunächst noch unbekanntem, folgenden Zeitschritt aus. Die Lösung der Gleichungen zu diesem Zeitpunkt wird dann iterativ ermittelt. Dabei geht der Solver davon aus, dass die Gradientenmatrizen annähernd konstant sind und nicht für jeden Zeitschritt neu berechnet werden müssen. Unter dieser Voraussetzung wird jeder Zeitschritt korrekt berechnet. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die aufwändige Berechnung der Matrizen nur einmal, am Anfang der Simulation erfolgt. Treten während eines Zeitschritts Diskontinuitäten auf, etwa das Anlegen eines Teils an einer Wand oder eine starke Temperaturänderung, ist die Annahme konstanter Gradientenmatrizen nicht mehr erfüllt und die Matrizen müssten neu berechnet werden. Dies wird bei einigen kommerziell verfügbaren Solvoren als Option angeboten. Falls dies allerdings zu häufig auftritt, ist der Geschwindigkeitsvorteil nicht mehr gegeben und es besteht sogar die Gefahr der numerischen Instabilität. In diesem Fall bieten sich explizite Solver an, die nur auf der Basis der vorangegangenen Zeitschritte die Gleichungen für den folgenden Zeitschritt berechnen. Zwar verlangen diese Solver eine sehr feine zeitliche Auflösung um stabil zu arbeiten, sie bieten jedoch bei hochgradig nichtlinearen Problemen den Vorteil, ohne Iterationen auszukommen. Die meisten FEM-Werkzeuge für die Prozesssimulation verwenden aus diesem Grund explizite Solver [98], [138], [178].

Dem Lösen der Systemgleichungen schließt sich die Auswertung der Ergebnisse an. Hier sind die Ergebnisse zunächst auf Plausibilität zu prüfen. Dies beinhaltet den Vergleich mit bereits vorhandenen Ergebnissen und Messungen oder die Durchführung von

Variantenrechnungen. Anschließend können die Ergebnisse in Konturplots und Diagrammen dargestellt oder spezielle Ergebnisse an relevanten Positionen oder Zeitpunkten numerisch ausgewertet werden. Aus den Simulationsergebnissen werden dann Rückschlüsse für eine Optimierung der Prozessführung gezogen.

3.2.2 Nutzung von Prozessdaten für die Maschinenentwicklung

Ein wesentlicher Punkt für die Auswertung der Prozesssimulation ist die weitere Verwendung der Ergebnisse für die Maschinenentwicklung. Das folgende Bild 12 zeigt dies am Beispiel einer Exzenterpresse für die Massivumformung. Diese Anwendung wurde im Rahmen des Arbeitskreises "Werkzeuge und Methoden der Prozesssimulation" des Bayerischen Forschungsverbundes Simulationstechnik FORSIM erarbeitet².

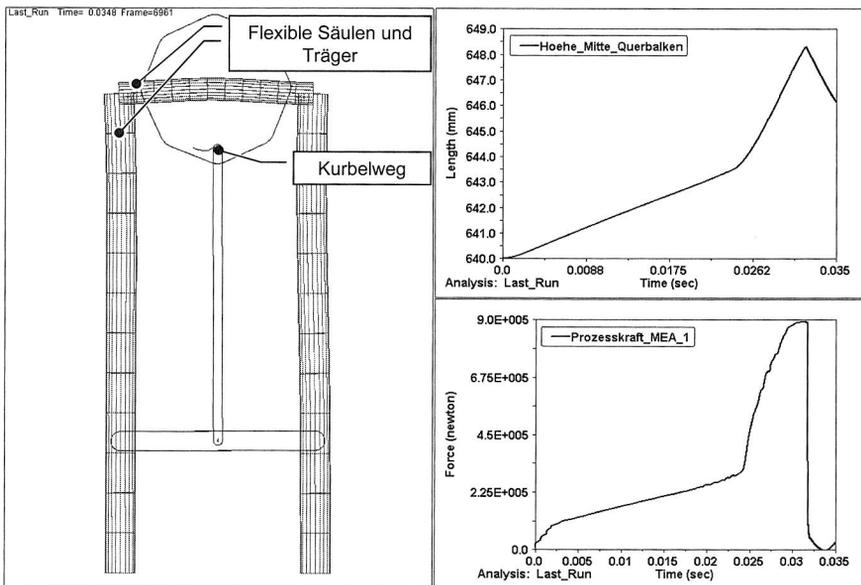


Bild 12: Übernahme von Daten der Prozesssimulation (Diagramm rechts unten) in die Mehrkörpersimulation zur Ermittlung der Nachgiebigkeit eines Pressengeräts während des Umformvorgangs

Der in Bild 12 rechts unten dargestellte Kraftverlauf der Prozesssimulation wird in das konzeptionelle Mehrkörpermodell einer Presse als zeitabhängige Last eingeführt. Während der Umformung bewegt sich die Kurbel um eine Achtel Umdrehung. Der ideale Verlauf des oberen Kurbelbolzens ist ein Kreissegment. Auf Grund der im Modell hinterlegten Flexibilität der Säulen und des oberen Querbalckens weicht die tatsächliche

² Der Verlauf der Prozesskraft wurde von Dipl.-Ing. Ralf Völkl, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Erlangen, zur Verfügung gestellt.

Bahn deutlich von dieser Idealkurve ab. Das rechte obere Diagramm in Bild 12 gibt den Weg des Kurbellagers nach oben an, es ist eine Verformung von 8 mm abzulesen, die auch in der Animation deutlich zu erkennen ist. Dieses Ergebnis deutet auf eine zu geringe Steifigkeit sowohl der Säulen als auch des oberen Querbalkens der Presse hin.

Für die Flachbaugruppenproduktion sind v. a. zwei Prozesse von großer Bedeutung:

- Die Bestückung der elektronischen Bauelemente auf den Schaltungsträger hat einen deutlichen Einfluss auf die Qualität der produzierten Baugruppe.
- Das Reflowlöten der Bauelemente ist ein Prozessschritt, der bei der Auslegung eine Vielzahl an Experimenten an der Produktionsmaschine erfordert.

Für diese beiden Aufgabenstellungen wird in den Kapiteln 7 und 8 jeweils ein simulati-
onsgestützter Planungsansatz für die betreffende Fertigungseinrichtung ausgeführt.

3.3 Simulation der Maschinendynamik mit FEM und Mehrkörpersimulation

3.3.1 Aspekte der Maschinendynamik

Die erhöhten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen sind aus Sicht der Maschinenentwicklung durch höhere Arbeitsgeschwindigkeit und leistungsfähige Antriebskonzepte zu erreichen. Hierdurch werden größere Beschleunigungen und Geschwindigkeiten in der Maschine realisiert, die andererseits zu Schwingungen führen.

Es ergibt sich somit die Aufgabenstellung, trotz größerer mechanisch-dynamischer Lasten eine verbesserte Genauigkeit zu gewährleisten. Dadurch gewinnt die Analyse der Maschinendynamik erheblich an Bedeutung. Die dynamische Auslegung betrachtet dabei neben einzelnen bewegten Teilen auch Funktionsbaugruppen und die Gesamtmaschine. Diese unterschiedlichen Stufen müssen auch durch abgestimmte Simulationswerkzeuge unterstützt werden. Die wesentlichen Aspekte der Maschinendynamik umfassen vier Teilbereiche, die in Bild 13 dargestellt sind:

Den Ausgangspunkt stellt der in der Maschine ablaufende Fertigungsprozess dar. Die entscheidenden Größen sind die Anforderungen an die Prozessführung und die Rückwirkungen auf die Maschine. Hierbei ist zu erfassen, welche der prinzipiellen Maschinenanforderungen wie Arbeitsgeschwindigkeit, Genauigkeit sowie Informations- und Energieumsatz im Vordergrund stehen. Während beispielsweise bei einer Umformmaschine der Energieumsatz im Werkstück im Vordergrund steht, ist er bei einem Bestückautomaten gegenüber der geforderten Genauigkeit und Geschwindigkeit nahezu vernachlässigbar.

Das Schwingungsverhalten von Bauteilen und Baugruppen hat entscheidenden Einfluss auf die Arbeitsgenauigkeit einer Maschine. Durch Berechnung der Eigenfrequenzen kann beurteilt werden, ob eine Struktur durch Schwingungen in der Maschine angeregt

wird. Diese werden z. B. durch die Antriebe verursacht, etwa durch Anfahr- und Abbremsmanöver. Ein Beispiel für eine hochfrequente Anregung sind Oberschwingungen des Antriebsmoments durch die Phasenanschnittsteuerung von Frequenzumrichtern.

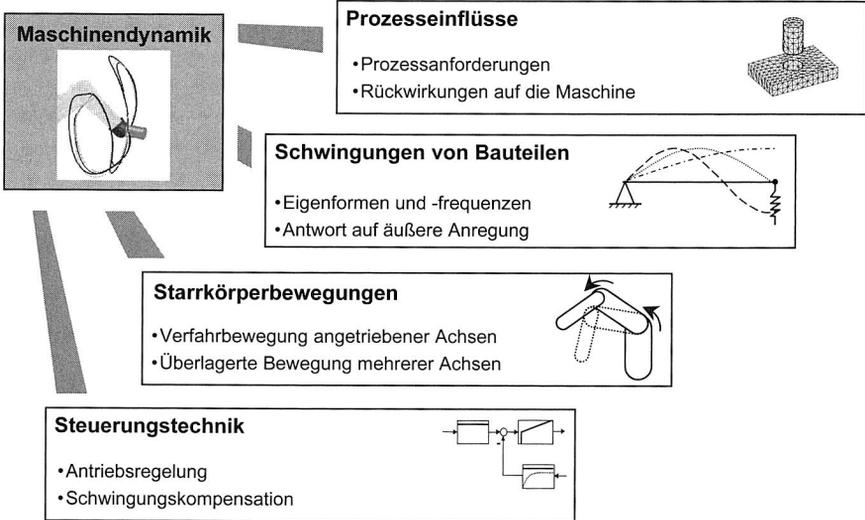


Bild 13: Teilaspekte der Maschinendynamik von Fertigungsmaschinen

Durch die Ermittlung der Eigenform kann schon am CAD-Modell der Maschine der Einfluss der Eigenfrequenz beurteilt werden [173]: So ist die Biege- oder Torsionsschwingung eines tragenden Bauteils sehr viel bedeutender als die eines peripheren Flansches. Die Ermittlung der Eigenfrequenzen ist jedoch für die dynamische Beurteilung meist nicht ausreichend, da sie keine Aussage darüber liefert, welche Schwingungen tatsächlich im Betrieb auftreten. Hierfür ist die Dämpfung entscheidend, die von der Frequenz abhängig ist und von den Koppelstellen bestimmt wird [170]. Sie muss durch Versuche, etwa an ähnlichen Strukturen, bestimmt werden. Mit diesen Daten wird anschließend das Antwortverhalten der Struktur auf eine dynamische Anregung ermittelt. Hierfür sind zwei Verfahren weit verbreitet: Zum einen die Analyse im Frequenzbereich und zum anderen im Zeitbereich. Erstere liefert das Antwortverhalten in Form eines Frequenzgangs, d. h. eine relative Schwingungsamplitude als Funktion der anregenden Frequenz. Hiermit lässt sich beurteilen, ob eine signifikante Schwingung in einem interessanten Frequenzbereich auftritt. Dies ist etwa bei Zerspanungsmaschinen interessant, da die Anregungsfrequenzen des Zerspanprozesses a priori bekannt sind. Für ein Handhabungsgerät ist darüber hinaus der Zeitbereich von großem Interesse, da durch das umfangreiche Bewegungsprogramm unterschiedlichste Frequenzen angeregt werden können, die nur schwer vorherzusagen sind. So treten etwa bei einem Knickarmroboter während eines Handhabungsvorgangs unterschiedliche Achsstellungen und damit Massen- und Steifigkeitsverteilungen auf. Die unterschiedlichen Stellungen der Seg-

mente zueinander wird durch die Betrachtung der Starrkörperbewegungen und der Steuerungstechnik erfasst. Hierfür kommt der Mehrkörpersimulation wesentliche Bedeutung zu.

3.3.2 Zentrale Stellung der Mehrkörpersimulation für die Maschinendynamik

Das Bewegungsverhalten der Maschine, d. h. die Starrkörperbewegung von Maschinenbauteilen und –baugruppen, hat entscheidenden Einfluss auf die Maschinendynamik [147]. Zum einen stellen Genauigkeit und Geschwindigkeit von Positionierbewegungen ein wesentliches Leistungsmerkmal dar. Zum anderen werden durch diese Bewegungen Schwingungen angeregt, wie oben dargestellt. Eine beispielhafte Fragestellung aus der Elektronikproduktion ist die maximale Beschleunigung, mit der ein Bestückautomat verfahren kann, während er ein Bauelement mit einem Sauggreifer festhält [18]. Für die Analyse dieses Bewegungsverhaltens ist die FEM i. d. R. ungeeignet, da sie die Starrkörperbewegungen für eine Vielzahl von Knoten mit hohem numerischen Aufwand berechnet. Dieser wird durch den Einsatz der Mehrkörpersimulation erheblich verringert.

In der Mehrkörpermodellierung werden Bauteile auf die Größen Masse, Trägheitstensor sowie Kraftangriffspunkte reduziert. Darüber hinaus stehen Modellierungselemente für äußere Kräfte und Randbedingungen zur Verfügung. Dies sind zum einen ideale Gelenke (in der Terminologie der Mehrkörpersimulation: holonomische Randbedingungen), z. B. Drehgelenk, Schubgelenk oder Kugelgelenk, und zum anderen vorgegebene Bewegungen der Freiheitsgrade des Gelenks. Normalerweise gehen Mehrkörpersysteme von ideal starren Körpern aus. Daher ist bei der Modellierung zu beachten, dass nicht mehr Randbedingungen vergeben werden als Freiheitsgrade im System existieren. Erweiterungen dieser Systeme ermöglichen es, flexible Körper zu integrieren, vgl. z. B. [119], [134]. Damit ist es auch möglich, statisch überbestimmte Systeme, z. B. dreifach gelagerte Träger und Wellen auch bzgl. des Kraft- und Momentenflusses korrekt zu modellieren. Da die Integration eines flexiblen Körpers einen erheblichen Mehraufwand sowohl bei der Modellierung als auch bei der Berechnung nach sich zieht, werden nur die Bauelemente als flexibel modelliert, bei denen eine signifikante Schwingungsanregung oder Verformung auftritt. Ein beispielhaftes Mehrkörpersystem zeigt Bild 14.

Die Mehrkörpersimulation basiert auf der Implementierung der Bewegungsgleichungen nach Euler-Lagrange oder nach dem Hamilton'schen Prinzip. Ihre Durchführung entspricht weitgehend der in Bild 11 dargestellten Vorgehensweise für die FEM. Auch hier sind die drei Phasen Preprocessing, Solving und Postprocessing zu unterscheiden. Auf Grund der Zeitintegration der Mehrkörpersimulation ist es jedoch möglich, die Animation des Modells parallel zur Berechnung zu betrachten.

Die Mehrkörpersimulation wird in der Produktionstechnik vor allem für die Maschinenentwicklung eingesetzt, um bewegungsabhängige Kräfte an Werkzeugmaschinen und Handhabungsgeräten zu analysieren. In Mehrkörpersimulationsmodellen können belie-

bige Abhängigkeiten zwischen Kräften und anderen messbaren mechanischen Größen hinterlegt werden. Einige Beispiele hierfür sind:

- Geschwindigkeitsabhängige Reibung zur Nachbildung des Stick-Slip-Effekts,
- Wegabhängige Kräfte zur Modellierung von Kontakten,
- Zeitabhängige Kraftgrößen zur Modellierung von nicht im Modell detailliert hinterlegten Einflüssen, z. B. aus der elektrischen Antriebstechnik [143].

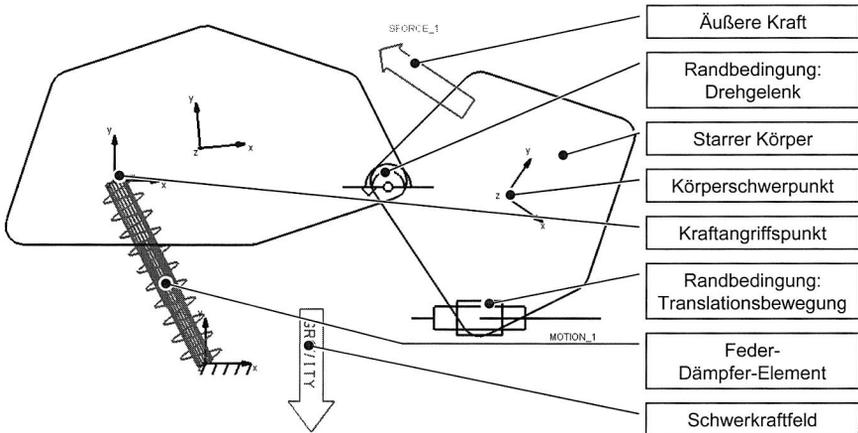


Bild 14: Beispielhaftes Mehrkörpersystem (vgl. [67])

Gerade die Modellierung anwendungsspezifischer Kräfte bietet ein erhebliches Potential. So ist es möglich, in einem Mehrkörpermodell einer Maschine beliebige Antriebskräfte zu hinterlegen und dieses dann zur Auslegung einer Antriebsregelung zu verwenden. Die Voraussetzung hierfür ist eine hinreichend gute Übereinstimmung des Modells mit dem realen System, die durch entsprechende Validierung sicherzustellen ist.

Für die Auslegung von Regelungen werden meist sog. CACE-Simulatoren (Computer Aided Control Engineering, Blocksimulatoren) verwendet, in denen eine systemtheoretische Bibliothek häufig benötigter Elemente zur Verfügung steht (z. B. Verzögerungsglieder, schaltende Elemente). Um dem Steuerungsentwickler ein Arbeiten in seiner gewohnten Umgebung zu ermöglichen, wird das Mehrkörpersimulationsmodell als nicht-linearer Block in den Blocksimulator übertragen, wie in Bild 15 gezeigt. Dort wird dann die Antriebsregelung ausgelegt. Durch Rückübertragung der Simulationsergebnisse in die Mehrkörpersimulation lässt sich die Animation des Bewegungsverhaltens in der Mehrkörpersimulation beobachten [136]. Damit ist eine wesentlich effektivere Validierung der Einstellungen möglich als ausschließlich durch die Diagramme im Blocksimulator.

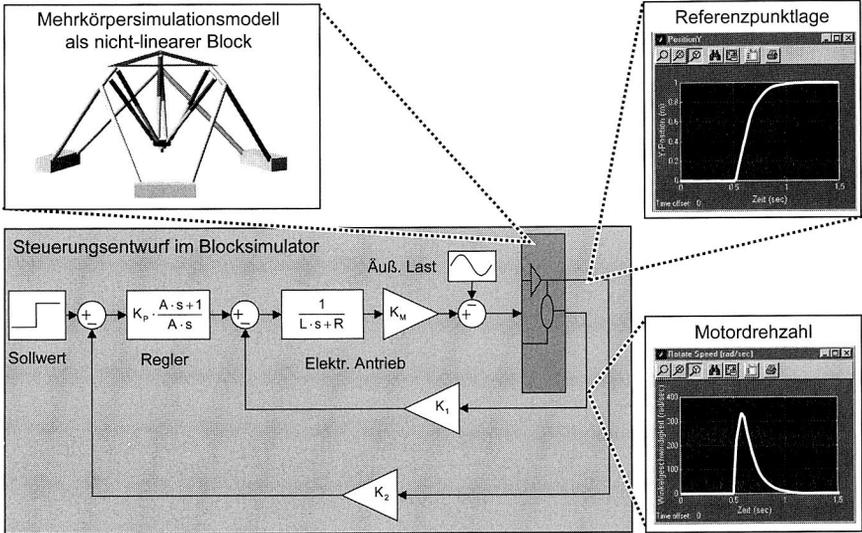


Bild 15: Kopplung von Mehrkörper- und CACE-Simulation zur Auslegung der Antriebsregelung

3.4 Simulation der Erwärmung und der thermischen Verformung von Maschinenkomponenten

Die erhöhten Anforderungen an die Arbeitsgeschwindigkeit führen zum Einsatz leistungsfähigerer Antriebe. Dies sind etwa die Verwendung von Motoren mit größerer Leistung oder die durchgängige Anwendung drehzahlveränderbarer elektrischer Antriebe. Daneben ist ein zunehmender Einsatz von Linearmotoren zu verzeichnen. Auf Grund dieser Entwicklung gewinnt die Betrachtung der von den Antrieben abgegebenen Verlustleistung erheblich an Bedeutung.

Da in einer Fertigungsmaschine über einen Bearbeitungszyklus hinweg keine elektrische Energie in signifikanter Höhe gespeichert wird, wird die gesamte Eingangsleistung dissipiert und in Wärme umgewandelt. Bei aufgenommenen Leistungen im zweistelligen Kilowatt-Bereich und geschlossener Bauweise treten erhebliche, an verschiedenen Punkten der Maschine lokal unterschiedliche Erwärmungen auf. Dieses räumliche Temperaturfeld verursacht in der Folge eine thermische Verformung von Bauteilen, wodurch die Arbeitsgenauigkeit beeinträchtigt wird. Die thermisch induzierte Verformung ist dem Schwingungsverhalten überlagert. Bild 16 fasst diese Wirkungskette schematisch zusammen.

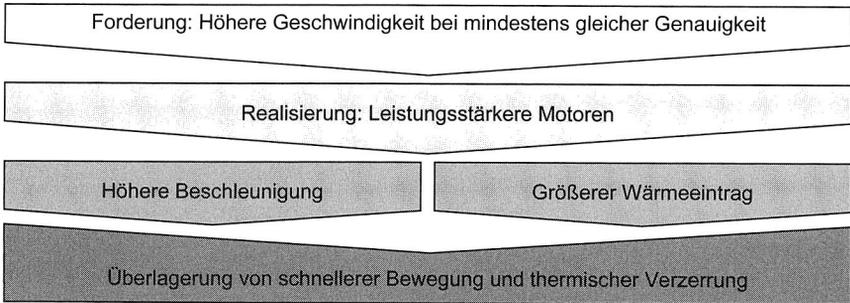


Bild 16: Auswirkungen erhöhter Anforderungen an die Arbeitsgeschwindigkeit

3.4.1 Mechanismen und Modellierung des Wärmetransports

In der technischen Thermodynamik werden prinzipiell vier Mechanismen der Wärmeübertragung unterschieden: Die Wärmeleitung in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen, der Übergang von Festkörpern in Fluide, die sog. Konvektion, sowie die Strahlung und Wärmeübergang beim Phasenübergang [74].

Die Wärmeleitung ist der vorherrschende Transportmechanismus in Festkörpern und an deren direkten Kontakten. Dabei stellt die korrekte Abbildung des Kontakts zweier Festkörper eine entscheidende Aufgabe dar. Hier spielen die absolute Größe und Beschaffenheit der Kontaktfläche eine bedeutende Rolle: Während dies bei makroskopischen Körpern, etwa Motoren, relativ gut abgebildet werden kann, können bei mikroskopischen Systemen, etwa elektronischen Bauteilen, schon kleine Abweichung ein unbrauchbares Modell zur Folge haben. Wichtige Größen sind in diesem Zusammenhang die Kenntnis der tatsächlichen Kontaktfläche sowie der Oberflächenaufbau aus Schutzschichten, Lacken oder Verschmutzungen.

Die Konvektion bezeichnet den Wärmeübergang zwischen Festkörper und umgebendem Fluid. Hier wird unterschieden, ob sich die Strömung des Fluids auf Grund einer von außen eingepprägten Geschwindigkeit, z. B. durch einen Lüfter (erzwungene Konvektion) oder durch den Dichteunterschied zwischen warmem und kaltem Fluid einstellt (freie Konvektion). Für die freie Konvektion, bei der die Strömungsgeschwindigkeit der Gravitation entgegen gerichtet ist, spielt die Bauteilorientierung eine wesentliche Rolle. So ist beim senkrecht stehenden Motor aus Bild 17 der unten liegende Teil weniger stark erwärmt als der oben liegende. Dies liegt daran, dass von unten frische, d. h. kalte, Luft zugeführt wird, während die Luft im oberen Teil schon erwärmt ist.

Bei der erzwungenen Konvektion ist der Wärmeübergang wesentlich stärker ausgeprägt, da der konvektive Wärmeübergang signifikant von der Anströmgeschwindigkeit des Fluids abhängt: Während bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten nur ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha_k = 3 \dots 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ erreicht wird, beträgt er bei erzwungener Konvektion, etwa durch einen Lüfter, ca. das Zehnfache [74]. Die erzwungene Konvek-

tion kann nicht nur durch gezielte Förderung des Mediums mit Ventilatoren, sondern auch durch die Bauteilbewegungen entstehen.

Der Wärmetransport durch Strahlung ist für Fertigungsmaschinen, die in geschlossenen Räumen aufgestellt werden, meist vernachlässigbar. Die Temperaturen, die für einen nennenswerten Energiestrom nötig wären, werden bei weitem nicht erreicht. Ähnliches gilt für den Phasenübergang, d. h. Kondensation oder Erstarrung. Dieser Mechanismus ist bei Dampfphasenlötöfen der bestimmende Wärmeübergangsmechanismus für die Erwärmung der Lötstelle. Bei der Betrachtung der thermischen Stabilität einer Maschine ist er irrelevant.

Die Mechanismen, die für das thermische Verhalten von Fertigungsmaschinen von Interesse sind, sind in Bild 17 zusammengefasst.

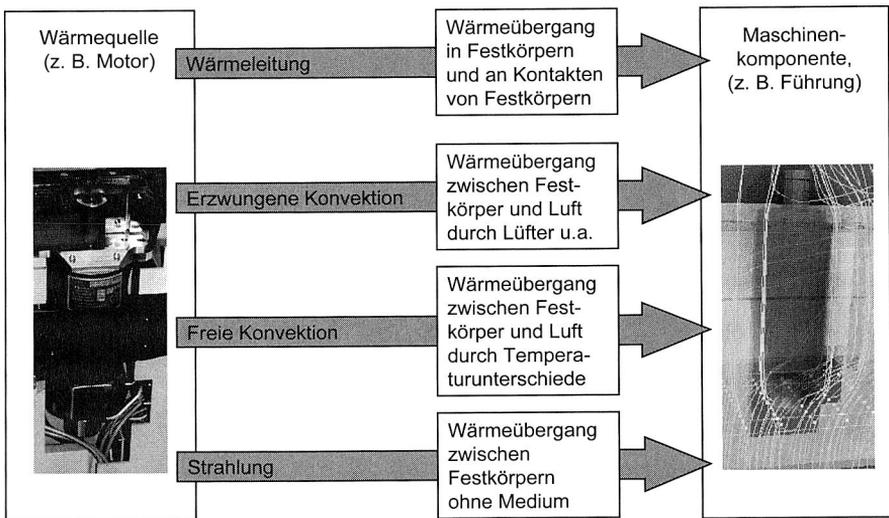


Bild 17: Prinzipiell relevante Wärmetransportmechanismen in Fertigungseinrichtungen am Beispiel eines Antriebsmotors

Bei Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion entsteht die Wärme an den verschiedenen Maschinenkomponenten und nicht im Prozessraum. Im Gegensatz dazu nehmen bei Werkzeugmaschinen in der spanenden Metallbearbeitung die Späne einen signifikanten Teil der Antriebsleistung als Wärme auf. Sie müssen daher gezielt aus der Maschine gefördert werden, um einen undefinierten Wärmeeintrag in das Werkzeug oder das Maschinengestell zu vermeiden.

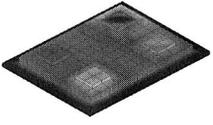
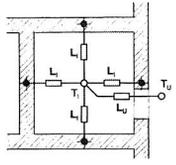
	FE-Simulation	CFD-Simulation	Simulation mit Knotenpunktmodellen
			
Grundprinzip	Berechnung der Temperatur über Potentialproblem	Gekoppelte Berechnung des Strömungs- und Temperaturfelds	Elektrisches Ersatzmodell mit thermischen Widerständen und Kapazitäten
Eingangsdaten	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-CAD-Daten • Werkstoffdaten • Thermische Lasten • Thermische Randbedingungen • Wärmeübergangszahl gegen Umgebung 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-CAD-Daten • Werkstoffdaten • Thermische Lasten • Thermische Randbedingungen • Daten des umgebenden Fluids 	<ul style="list-style-type: none"> • Thermische Kapazitäten und Widerstände d. Maschine • Thermische Lasten • Umgebungstemperatur
Ergebnisdaten	Temperaturen und andere thermische Größen an allen Festkörpern	Temperaturen, Wärmeübergangskennzahlen an allen Festkörpern und im Fluid	Temperaturen an den Knoten, Wärmeströme in den Verbindungen
Hauptvorteil	Wiederverwendung von Modellen der Festigkeitsrechnung	Umfassende Ergebnisse auf Basis der Entwicklungsdaten	Schnelle Berechnung
Hauptnachteil	Konvektiver Wärmeübergang nur sehr aufwändig abzubilden	Sehr lange Berechnungszeiten	Sehr hohes Abstraktionsniveau und schwierige Ermittlung der Modellparameter
Anwendungsfelder	Einfache Geometrien bei konstantem Wärmeübergangskoeffizient ins Fluid	Alle thermischen Aufgabenstellungen	Wenige Messstellen bei bekannten Wärmeübergangsparametern

Tabelle 1: Simulationswerkzeuge für die Ermittlung des Temperaturfelds (Knotenpunktmodell aus [55])

Für die Simulation des thermischen Verhaltens einer Maschine ist es erforderlich, die geschilderten Mechanismen korrekt abbilden zu können. Darüber hinaus wird eine möglichst direkte Übernahme der Maschinendaten aus der Entwicklung gefordert sowie eine schnelle Berechnung der Ergebnisse. Im Bereich der Produktionstechnik sind drei Simulationstechniken etabliert, die in Tabelle 1 gegenübergestellt sind. Neben der Si-

mulation mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente sind dies die Methode der rechnergestützten Fluidodynamik (Computational Fluid Dynamics, CFD) und die Simulation mit Knotenpunktmodellen.

Bei der „klassischen“ FEM wird die Wärmeleitungsaufgabe auf ein Potentialproblem reduziert. Dies bedeutet, dass das Fluid, das einen Festkörper umgibt, nicht geometrisch modelliert wird. Die Wärmeabgabe an das Fluid wird nur über die a priori Eingabe eines Wärmeübergangskoeffizienten hinterlegt. Damit ist es z. B. fast nicht möglich, die gegenseitige Beeinflussung zweier Wärmequellen, die nur durch eine dünne Luftschicht getrennt sind, korrekt abzubilden. Dies ist die Stärke der Computational Fluid Dynamics (CFD). Hier werden die Volumina von Festkörpern und des umgebenden Fluids geometrisch korrekt abgebildet und eine gekoppelte Berechnung von Temperatur- und Strömungsfeld durchgeführt. Diese sehr aufwändige Berechnung verursacht erhebliche CPU-Zeiten. Dieser Nachteil war die Motivation für die Entwicklung der Knotenpunktsimulatoren. Hierbei wird ein elektrisches Ersatzschaltbild der Baugruppe verwendet, das alle möglichen Wärmepfade mit ihrer Kapazität und ihrem Widerstand enthält. Die Voraussetzung für diese Modellbildung ist eine sehr weitreichende Abstraktion und die Verfügbarkeit sehr guter Daten über alle Wärmepfade [55]. Dies ist nur durch eine aufwändige Erfassung und Abstraktion der Querschnitte, Oberflächen, Verbindungstopologie und der Werkstoffe zu erreichen.

Für die vorliegende Arbeit wird die Anwendung der CFD-Simulation gewählt. Hierfür sind folgende Gründe ausschlaggebend: Die genauen Wärmepfade waren nicht bekannt, wie es bei der Neuentwicklung einer Fertigungsmaschine i. d. R. der Fall ist und es war nötig, die Überlagerung mehrerer benachbarter Wärmequellen zu betrachten. Außerdem konnte auf diese Art und Weise direkt auf die CAD-Daten zugegriffen werden, was die Modellierung erheblich beschleunigt.

3.4.2 Simulation der Erwärmung mit der CFD

Mit der CFD-Simulation wird die Temperaturverteilung an relevanten Baugruppen einer Fertigungseinrichtung unter Berücksichtigung der Konvektion ermittelt. Die physikalische Grundlage hierfür stellen die gekoppelten Gleichungen für die skalaren Größen Temperatur, Druck und Energie sowie für den Geschwindigkeitsvektor dar. Dies sind die Kontinuitätsgleichung, die Navier-Stokes-Gleichungen (Momentengleichungen), die Energiegleichung sowie die Turbulenzformulierung [84]. Damit sind für jeden Punkt bzw. jedes Teilvolumen im Fluid mindestens sieben Größen aus nichtlinearen, miteinander gekoppelten Gleichungen zu berechnen. CFD-Solver arbeiten daher iterativ. Beim verwendeten Solver CFXDesign bedeutet dies, dass auf der Basis von angenommenen Anfangswerten die Strömungsgeschwindigkeiten, die Druckverteilung, die Energiegleichung und die Turbulenzformulierung berechnet werden. Schließlich werden für die in diesem Iterationsschritt ermittelte Situation die Stoffeigenschaften gemäß ihrer nichtlinearen Formulierung angepasst. Dies wird solange wiederholt, bis eine hinreichende Konvergenz erreicht ist [84]. Bei diesem iterativen Vorgehen werden an die Numerik erhebliche Anforderungen gestellt. Das häufig verwendete Newton-Verfahren

etwa konvergiert nur dann gut, wenn die Näherungslösung hinreichend nah an der tatsächlichen Lösung ist (vgl. z. B. [19]). Zur Beschleunigung der Berechnung ist es bei nur schwach gekoppelten Problem möglich, die Strömungs- und die Temperaturberechnung nacheinander durchzuführen. Dadurch wird eine sehr gute Näherung ermittelt, wobei die Berechnungsdauer signifikant geringer ist.

Als Simulatorekern ist bei der CFD-Simulation vor allem die Methode der Finiten Volumen (FVM) verbreitet, allerdings sind auch Finite Elemente Codes verfügbar. Bei der FVM wird die betrachtete Region in endlich kleine, kubische Volumina eingeteilt, über deren Flächen ein Energie- und Stoffaustausch erfolgen kann. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass meist eine einheitliche - und daher sehr kleine - Kantenlänge erforderlich ist. Dieser Nachteil wird bei FEM-Implementierungen umgangen; auch neuere Entwicklungen bei FVM Programmen ermöglichen eine gute Abbildung der Geometrie mit fortgeschrittenen Volumengeometrien (z. B. [97]).

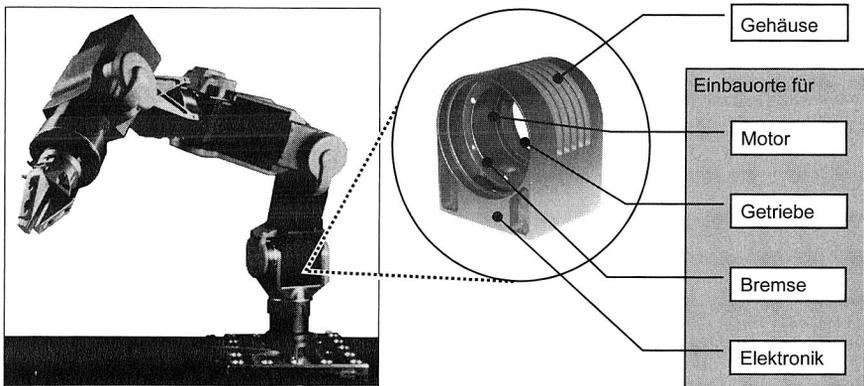


Bild 18: Subsystem eines Leichtbauroboters für die Simulation des thermischen Verhaltens (Foto des Roboters aus: [93])

Das Vorgehen zur Durchführung einer thermischen Analyse wird im Folgenden am Beispiel des in Bild 18 gezeigten Robotergelenks eines Leichtbauroboters beschrieben. Es handelt sich hierbei um das erste Robotergelenk, das alle in der kinematischen Kette folgenden mit bewegen muss. Es weist damit die größte Antriebsleistung und die höchste thermische Belastung auf.

Für die Durchführung der Simulation werden vier Phasen unterschieden: Die Vorbereitung der Analyse, die Modellierung, die numerische Berechnung (das sog. Solving) sowie die Auswertung der Ergebnisse, wie in Bild 19 dargestellt.

Bei der Vorbereitung der Analyse sind das Ziel der Simulationsstudie und die Systemgrenzen festzulegen. Entsprechend bestimmt sich der Abstraktionsgrad bei der Modellbildung. Die Erfassung der Simulationsparameter beinhaltet die Stoffwerte der Bau-

gruppen, des Fluids sowie der relevanten Lasten und Umgebungsbedingungen. Da der numerische Aufwand bei der CFD sehr hoch ist, kommt diesem Schritt besondere Bedeutung zu. Die betrachtete Baugruppe umfasst das erste Gelenkgehäuse, in das ein Elektromotor, ein Übersetzungsgetriebe sowie eine elektromechanische Bremse integriert sind. Unmittelbar an den betrachteten Körper schließt sich die Achselektronik an. (Bild 18). Das Ziel in diesem Beispiel ist es, die Temperaturen am Gehäuse zu ermitteln und für eine Untersuchung der thermischen Verzerrung verfügbar zu machen.

Im Rahmen der Modellierung erfolgt die Diskretisierung der CAD-Geometrie und die Zuweisung der Daten. Außerdem werden Lasten und Randbedingungen grafisch interaktiv hinterlegt. Ein wesentlicher Punkt bei der Modellierung ist die Minimierung der benötigten Elemente (FEM) bzw. Zellen (FVM), wobei gleichzeitig eine möglichst hohe Qualität der Vernetzung sicherzustellen ist.

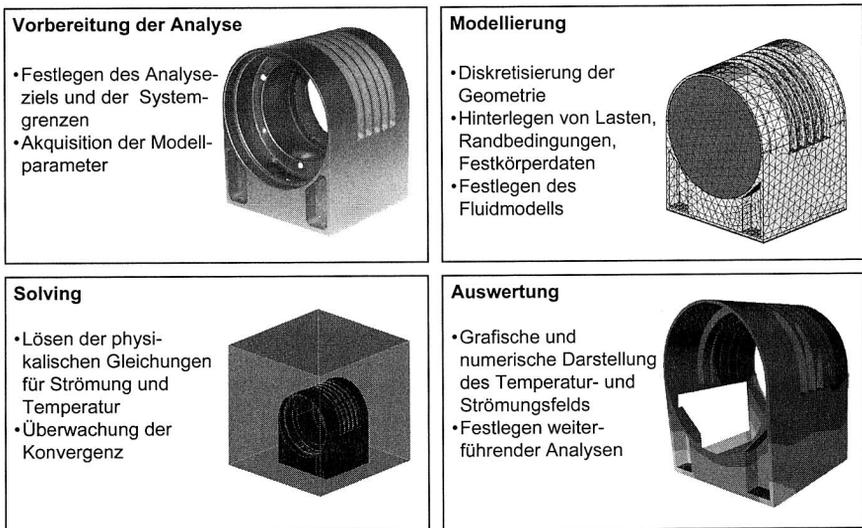


Bild 19: Ablauf einer CFD-Simulation am Beispiel des Robotergelenks aus Bild 18

Das anschließende Solving wird vom Rechner ohne Benutzereingriff durchgeführt. Beim hier betrachteten Fall, in dem das Strömungsfeld durch freie Konvektion dominiert wird, wird zunächst eine reine Temperaturfeldberechnung durchgeführt. Das so ermittelte Temperaturfeld stellt dann eine gute Anfangslösung für die gekoppelte Berechnung von Strömung und Temperatur dar. Die wichtige Aufgabe des Anwenders ist Beobachtung der Konvergenz und damit die Festlegung, ab wann ein Rechenlauf als hinreichend auskonvergiert anzusehen ist. Dies geschieht durch Beurteilung des Residuenplots, der bei Erreichen der Konvergenz eine flache Kurve darstellt. Falls hier Schwingungen auftreten, kann dies ein Hinweis sein, dass die Strömung instationäre Anteile umfasst. In

wie weit diese tatsächlich auftreten oder durch ungenügende Modellbildung verursacht sind, muss ebenfalls vom Anwender beurteilt werden.

Für die Auswertung stehen heute sehr leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung. Dies reicht von Diagrammen über Falschfarbdarstellungen bis hin zur Anbindung von Virtual Reality Installationen [46]. Im Anschluss an eine Berechnung ist das weitere Vorgehen festzulegen. Hier spielt zum einen die Validierung der Ergebnisse eine wichtige Rolle. Zum anderen sind die Weiterverwendung der Daten, z. B. für die Analyse des Verzerrungsfeldes oder die thermische Optimierung des Systems wichtige Punkte.

3.4.3 Ermittlung der thermischen Verzerrung mit der FEM

Die Erwärmung von Maschinenkomponenten führt zu einer thermisch induzierten Verformung. Dies wiederum kann eine Abweichung zwischen der von der Maschinensteuerung angenommenen Position zur tatsächlichen Ist-Position des Werkzeugreferenzpunkts führen. Dieser Effekt wird im Folgenden als thermische Verlagerung bezeichnet. Die thermoelastische Verformung führt dann zu einer thermischen Verlagerung, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Es sind Maschinenkomponenten betroffen, die zumindest mittelbaren Einfluss auf die Lage des Werkzeugreferenzpunkts haben.
- Die thermische Verformung wird nicht durch geeignete Maßnahmen, etwa regelmäßiges Anfahren von Referenzpunkten, kompensiert.

Der zeitliche Verlauf der Verlagerung wird als thermische Drift bezeichnet.

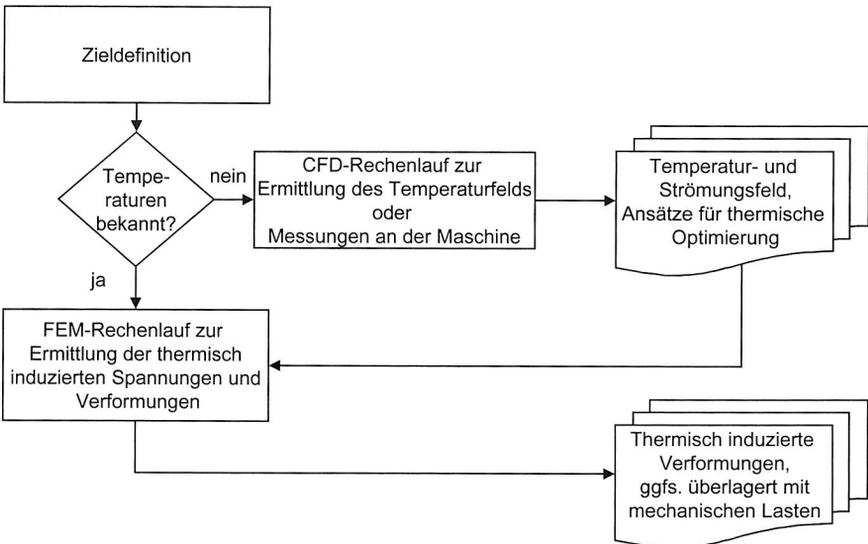


Bild 20: Allgemeines Schema zur Ermittlung der thermischen Verzerrungen

Die Analyse der thermoelastischen Verformung geschieht mit Hilfe der FEM. Hierfür müssen die Temperaturen an den Knoten des Modells bekannt sein. Diese können auf zwei Wegen ermittelt werden, die in Bild 20 dargestellt sind. Zum einen können punktuelle Messwerte aus experimentellen Untersuchungen verwendet werden, zum anderen können die Daten aus der CFD-Simulation übernommen werden. Daneben sind die Lagerungsbedingungen entscheidend für das Berechnungsergebnis. Diese sind so zu wählen, dass die wechselseitige Beeinflussung der Knotenverschiebungen an angrenzenden Bauteilen korrekt abgebildet wird. Das bedeutet auch, dass Bauteile, die in einer Baugruppe integriert sind, bei der Verformungsberechnung gemeinsam zu betrachten sind.

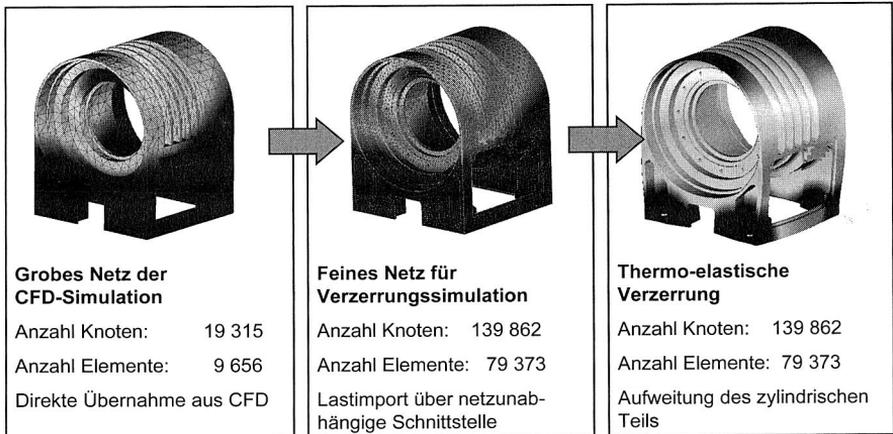


Bild 21: Übergabe der thermischen Lastdaten aus der CFD an die FEM am Beispiel des Robotergelenks aus Bild 18

Den Ausgangspunkt für die Ermittlung der thermischen Verzerrung bildet das Netz der CFD-Simulation. In dieser Modellierung wurden geometrische Details, die für die Ermittlung der Temperatur nicht von Belang sind, weggelassen. Dies beinhaltet im betrachteten Beispiel Fasen, Rundungen oder die Bohrungen am vorderen Flansch. Dieses Netz wird direkt aus der CFD-Simulation ausgegeben. Für die strukturmechanische Betrachtung wird ein wesentlich feineres Netz benötigt, das in Bild 21, Mitte, dargestellt ist. Dies liegt zum einen daran, dass die genannten zusätzlichen Geometrielemente abgebildet werden. Zum anderen sind hohe, fehlerhafte Spannungsgradienten in einem Element zu vermeiden. Das Ergebnis dieses Transfers ist ein FE-Modell, das unmittelbar für die Berechnung der thermoelastischen Verzerrung verwendet werden kann, es sind noch die Randbedingungen zu ergänzen. Die Verformung, die sich auf Grund der thermischen Lasten für das Robotergelenk ergibt, ist in Bild 21 rechts dargestellt. Es ist eine deutliche Aufweitung des oberen Hohlzylinders zu erkennen, gleichzeitig wird die Achse dieses Zylinders parallel von den Einspannpunkten weg verschoben. Dieses Verhalten ist insofern nicht kritisch, als ein linearer Offset sehr einfach von der Maschi-

nensteuerung zu kompensieren ist. Sein Wert wird mit der dargestellten Simulation ermittelt.

3.5 Simulation von Maschinen und Linien mit der 3D-Kinematiksimulation

Die dreidimensionale Kinematiksimulation ermöglicht es, Bewegungen beliebiger kinematischer Ketten zu analysieren und grafisch darzustellen [128]. Dazu werden die geforderten Bewegungen interaktiv modelliert und es wird vorgegeben, ob eine Bahnbewegung oder eine Punkt-zu-Punkt-Bewegung gefordert wird. Typische Fragestellungen sind Analysen des Arbeitsraumes, Kollisionsvermeidung sowie die Abtaktung mehrerer Arbeitsstationen. Nach Abschluss der Planung können automatisch die Steuerungsprogramme für die betrachteten Maschinen abgeleitet werden (Offline-Programmierung). Im Gegensatz zur Mehrkörpersimulation (vgl. Abschnitt 3.3.2) berücksichtigt die 3D-Kinematiksimulation i. d. R. keine dynamischen Effekte. Dies bedeutet, dass die Wirkung von Kräften bzw. der Einfluss von Massen und Trägheiten nicht in das Modell eingeht.

Die 3D-Kinematiksimulation wird daher angewandt, wenn diese Einflüsse entweder nicht relevant sind oder in einem späteren Planungsstadium detailliert betrachtet werden. Damit umfassen die Einsatzgebiete vor allem die Zellenplanung und Offline-Programmierung in der Fertigungsvorbereitung. Daneben wird sie auch in der Maschinenentwicklung für die Erstellung eines funktionellen Demonstrationsmodells angewandt (Bild 22).

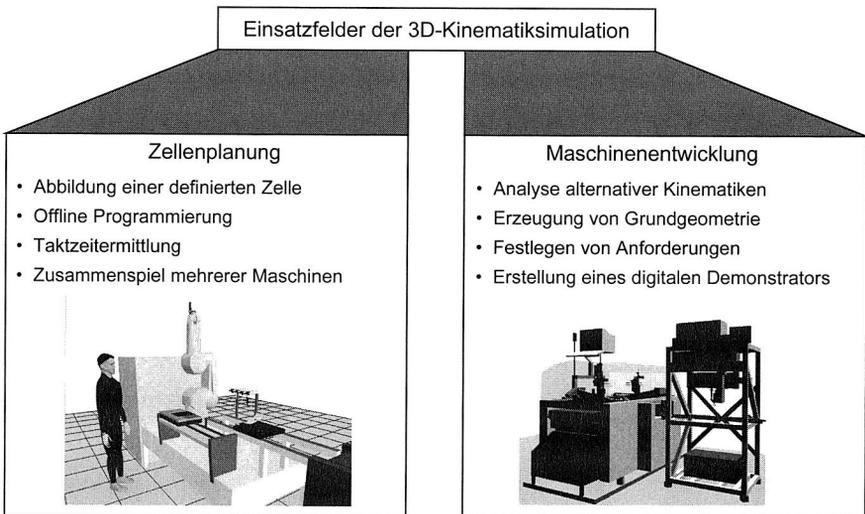


Bild 22: Einsatzfelder der 3D-Kinematiksimulation in Maschinenentwicklung und -betrieb

3.5.1 Planung von Fertigungszellen und Offline-Programmierung

Das hauptsächliche Anwendungsgebiet für die 3D-Kinematiksimulation stellt die Planung und Offline-Programmierung von Fertigungszellen dar. Sie wird eingesetzt, um Untersuchungen bezüglich des eingesetzten Handhabungsgerätes sowie dem Zusammenspiel von Handhabungsgerät und Zellenperipherie durchzuführen. Eine zentrale Aufgabe des Kinematikmoduls ist die Berechnung von Roboterstellungen (Achskoordinaten), um eine vorgegebene Position und Orientierung (Pose) des Robotereffektors (z.B. Greifer) einzustellen [128]. Hierbei werden vom Simulator auch die Bearbeitungszeiten der eingesetzten Maschinen und der Peripheriegeräte berechnet. Außerdem werden bei der Planung von Fertigungszellen Erreichbarkeits- und Kollisionskontrollen durchgeführt und somit Einbauräume und Montagepfade abgeleitet. Diese Daten werden auch für die Erstellung des Layouts von Fertigungszellen verwendet.

Für die Unterstützung der Planung stehen leistungsfähige Module zur Verfügung. Dies beinhaltet Bibliotheken von Robotern und Peripheriegeräten, in denen alle relevanten Informationen enthalten sind, wie Geometrie, zulässige Wege und Winkel der einzelnen Achsen sowie maximale Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Darüber hinaus sind Technologiemodule für häufig von Robotern durchgeführte Fertigungsschritte verfügbar, etwa für das Lackieren, Schweißen oder Fräsen. Diese stellen Regeln zur Verfügung, deren Einhaltung vom Simulationssystem überprüft wird. Beispiele hierfür sind Strategien für das Anfahren von Eckpunkten oder maximale bzw. minimale Geschwindigkeiten des Werkzeugreferenzpunkts [7].

Nach der Erarbeitung eines geeigneten Layouts und Ablaufs werden die Steuerungsprogramme für die einzelnen Geräte erzeugt [12]. Für diese Offline-Programmierung ist es entscheidend, dass die Geometrie des Simulationsmodells mit der realen Zelle übereinstimmt. Im Betrieb dient das Simulationsmodell dazu, Änderungen an der realen Anlage zu planen und schnell in die Fertigung einführen zu können. Hierfür dient auch die direkte Kopplung der 3D-Kinematiksimulation mit der Maschinensteuerung [70], [24]. Die geschilderten Schritte geschehen meist interaktiv, gerade im Bereich der Bahnplanung und Offline-Programmierung sind auch vollautomatische Systeme verfügbar [13].

Fragestellungen, die sehr maschinenbezogen sind, etwa die Rüstoptimierung von Bestückautomaten auf vorgegebenen Linien, sind schneller mit mathematischen Optimierungsverfahren wie in [149] vorgestellt, zu behandeln. Die 3D-Kinematiksimulation weist hier lediglich den Nutzen einer besseren Visualisierung auf, der gerade in der Ausbildung entscheidend sein kann [16].

3.5.2 Entwicklung der Maschinenkinematik

In der Maschinenentwicklung dient die 3D-Kinematiksimulation dazu, unterschiedliche Konzepte für die Relativbewegung der Bauteile zu untersuchen. Dieser Bereich ist prinzipiell auch mit der Mehrkörpersimulation abzudecken, wobei allerdings die 3D-Kinematiksimulation einige zusätzliche Möglichkeiten eröffnet. Hierzu gehören die automatische Berechnung des erreichbaren Arbeitsraumes für ein Handhabungsgerät [38]

und die Nutzung von Bibliotheken für die Peripherie. Darüber hinaus ist die Untersuchung von Kollisionen und Sicherheitsabständen einfacher möglich, da nur geometrische und kinematische Interferenzen analysiert werden. Numerisch aufwändige Kontaktberechnungen, wie in der Mehrkörpersimulation, werden vermieden. Außerdem ist es mit der 3D-Kinematiksimulation vergleichsweise einfach, ein realitätsnahes Arbeitsprogramm zu hinterlegen.

Die so erarbeitete Grundstruktur einer Maschine kann anschließend in ein CAD-System übernommen werden und dient dann als Grundlage für die weitere Entwicklung. Außerdem kann die Funktionalität der 3D-Kinematiksimulation, Taktzeiten zu berechnen, genutzt werden. Damit lassen sich die Anforderungen an die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der einzelnen Achsen ableiten. Dadurch steht eine verlässliche Basis für Auswahl- und Dimensionierungsrechnungen zur Verfügung.

Somit ist mit Hilfe der 3D-Kinematiksimulation eine wesentliche Beschleunigung bei der Analyse, etwa von Arbeitsraum, Taktzeiten oder Realisierbarkeit von Fertigungsmaschinen und -zellen zu erreichen, bei denen die Bewegung von Werkstück, Werkzeug oder zu fügenden Teilen (z. B. bei [18]) im Vordergrund steht. Das erstellte Simulationsmodell dient als Demonstrator für die geplante Funktionalität und stellt damit schon nach sehr kurzer Entwicklungszeit die wesentlichen Eigenschaften der zu entwerfenden Maschine dar. Dieses Modell kann anschließend auch zur Unterstützung des Vertriebs für die Präsentation bei einem potentiellen Kunden eingesetzt werden.

3.6 Ablaufsimulation zur Planung des Materialflusses

Die Simulation des Materialflusses in Fertigungssystemen geschieht meist mit der ereignisdiskreten Ablaufsimulation. Die Ablaufsimulation wird bei der Untersuchung komplexer Fertigungssysteme angewendet, wenn das zeitdynamische Prozessverhalten relevant ist, d. h. das Zusammenspiel einer Vielzahl Produktionsmaschinen zu betrachten ist. Die Prozessdynamik beinhaltet ferner die Nutzung von einer Ressource für unterschiedliche Produkte oder Prozesse und die sich daraus ergebenden Ressourcenkonflikte. Außerdem werden zufällige Ereignisse wie Störungen und geplante Einflüsse, wie Schichtpläne, berücksichtigt.

Die Ablaufsimulation betrachtet ein Fertigungssystem auf einem sehr hohen Abstraktionsniveau, vgl. Bild 23. Hierfür werden die einzelnen Fertigungsmaschinen auf Systemelemente reduziert. Dies sind z. B. Einzelbearbeitungsstationen, Parallelstationen, Puffer oder Förderstrecken, die durch wenige charakteristische Kenngrößen bzw. Verteilungen dieser Kenngrößen beschrieben werden. Dazu zählen vor allem die Bearbeitungs-, Rüst-, Lade und Entladezeiten sowie die Störhäufigkeit und die Reparaturdauer. Dem so erstellten Modell des Fertigungssystems wird eine Systemlast, d. h. eine zeitliche Abfolge von Aufträgen, vorgegeben. Für jedes der zu fertigenden Produkte wird ein Arbeitsplan hinterlegt, der die Losgröße sowie die Reihenfolge der Arbeitsschritte und die in Frage kommenden Maschinen angibt.

Mit Hilfe der Ablaufsimulation können alternative Szenarien bzgl. der Ressourcenzuteilung, der Auftragspriorität oder für unterschiedliche Technologien untersucht werden. Im letzteren Fall sind die Bausteine des Modells entsprechend der Technologie zu parametrieren. Schließlich wird aus den Ergebnissen der Simulation das Leistungsverhalten des betrachteten Fertigungssystems abgeleitet sowie die logistischen Kenngrößen wie Durchlaufzeiten oder Auslastungsgrade ermittelt. Typische Fragestellungen, die mit Hilfe der Ablaufsimulation untersucht werden, umfassen die Analyse der Kapazitätsgrenzen, die Dimensionierung von Einzelstationen wie Bearbeitungsmaschinen oder Puffern oder die Überprüfung der Steuerungsstrategie [128].

Die Ablaufsimulation ermöglicht es auf Grund des hohen Abstraktionsniveaus, den betrieblichen Auftragsdurchlauf schneller im Modell als in der Realität zu untersuchen (Zeitraffereffekt). Gerade für komplexe Fertigungssysteme, für die keine mathematischen Modelle verfügbar sind, bietet sich die Ablaufsimulation an. Dies umfasst Produktionssysteme, die unverkettet sind oder als verkettete Systeme viele Verzweigungspunkte aufweisen.

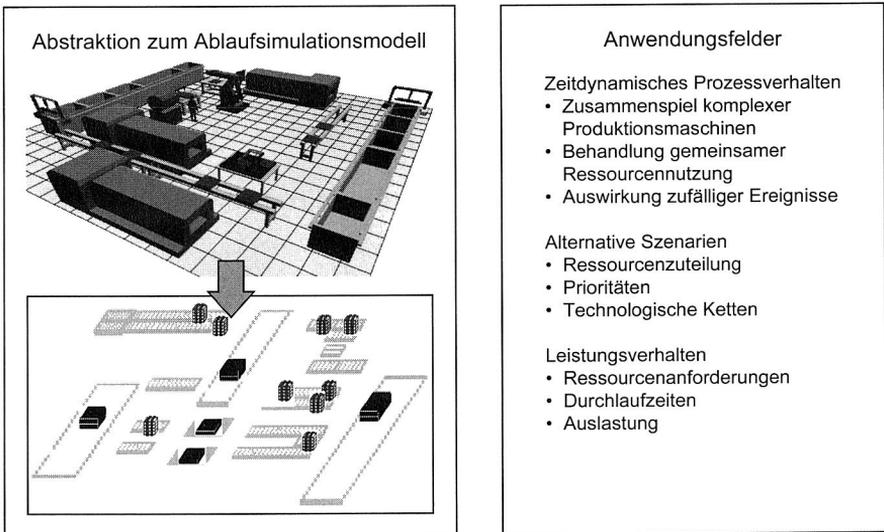


Bild 23: Abstraktion des Fertigungssystems und Anwendungsfelder beim Einsatz der Ablaufsimulation (nach [128], [139], [155])

Ein wesentlicher Punkt beim Einsatz der Ablaufsimulation ist die Verfügbarkeit einer zuverlässigen Datenbasis. Dies betrifft vor allem neu zu beschaffende Fertigungsmaschinen, da hier keine Erfahrungswerte vorliegen. Da bei Simulationsanwendern gerade die Datenbeschaffung als ein wesentliches Anwendungshemmnis angesehen wird [145], ist ein Datenaustausch mit der Maschinenentwicklung von großer Bedeutung.

Hier ist eine Datenübergabe zu erreichen, die sowohl das Interesse des Maschinenherstellers auf Vertraulichkeit des inneren Aufbaus der Maschine als auch dem Informationsbedürfnis des Anwenders Rechnung trägt. Ein Beispiel hierfür sind Logikbausteine, die direkt in das Ablaufsimulationsmodell integriert werden [155].

3.7 Zusammenwirken der Simulationstechniken auf unterschiedlichen Planungsebenen

Die in diesem Kapitel vorgestellten Simulationstechniken ermöglichen es, nahezu alle Aspekte der Produktionstechnik mit Rechnerunterstützung zu begleiten [146]. Hierdurch bietet sich ein erhebliches Potential, die anspruchsvollen Planungsaufgaben, gerade im Bereich der Elektronikproduktion mit der vom Markt geforderten Qualität und Geschwindigkeit zu erfüllen. Zur Nutzung dieses Potentials ist ein abgestimmter Einsatz der einzelnen Simulationstechniken erforderlich.

Entlang der Detaillierungsebenen Prozess, Maschine, Linie und Anlage (vgl. Bild 8) ergeben sich die Einsatzschwerpunkte der einzelnen, in diesem Kapitel diskutierten Simulationstechniken, die in Bild 24 zusammengefasst sind. Dabei ist für die Ebene der Maschine zwischen der Entwicklung und dem Betrieb zu unterscheiden.

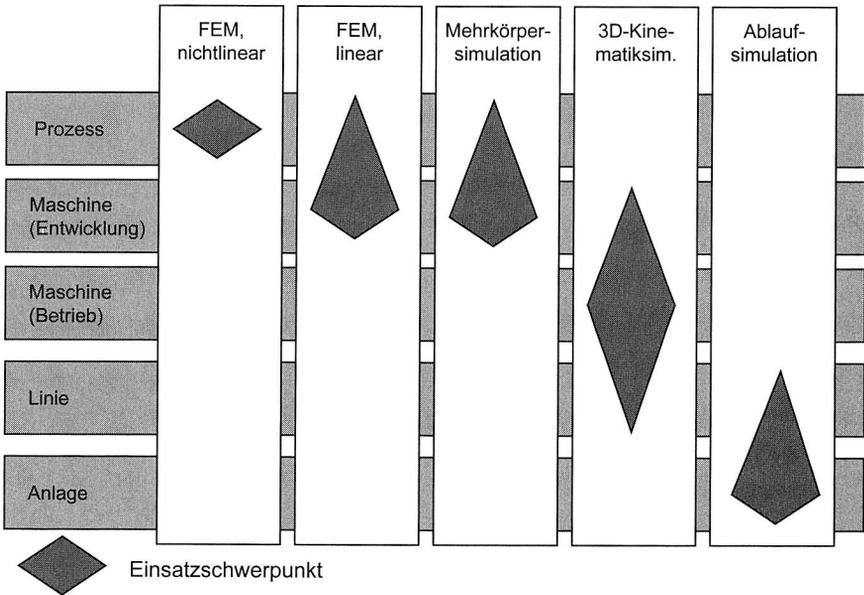


Bild 24: Einsatzschwerpunkte der Simulationstechniken für unterschiedliche Abstraktionsebenen

Im Bereich der Prozessentwicklung werden vor allem Simulationstechniken auf der Basis der Finiten Elemente eingesetzt, da die FEM sich zu einem vielfältigen Werkzeug für die Untersuchung der unterschiedlichsten physikalischen Vorgänge entwickelt hat. Insbesondere die nichtlinearen Solver ermöglichen es, die anspruchsvollen Aufgabenstellungen auf der Ebene der Fertigungsprozesse zu erfassen. Neben der FEM werden bei Prozesssimulationen, insbes. bei der spanenden Fertigung, Simulatoren auf der Basis empirischer oder analytischer Modelle eingesetzt [128]. Für die Elektronikproduktion ist dies jedoch auf Grund des Fehlens solcher Beschreibungen nicht von weiterreichender Bedeutung.

Für die Maschinenentwicklung stehen vor allem die lineare FEM und die Mehrkörpersimulation zu Verfügung. Dabei dient die FEM zur Berechnung elastischer Verformungen, die aus statischen, dynamischen oder thermischen Lasten herrühren. Die Ermittlung dieser Lasten geschieht durch Messungen an Prototypen oder durch weitere Simulationen. Dabei spielt etwa die CFD zur Ermittlung des Temperaturfeldes eine wesentliche Rolle. Mit Hilfe der Mehrkörpersimulation wird das dynamische Bewegungsverhalten erfasst und damit die Brücke zur Maschinensteuerung geschlagen. Sowohl die FEM als auch die Mehrkörpersimulation gewinnen durch die zunehmende CAD-Integration und Verfügbarkeit spezieller Module an Effizienz.

Für die Aufgaben beim Betrieb von Fertigungsmaschinen und -zellen werden - je nach Aufgabe - die 3D-Kinematiksimulation und die Ablaufsimulation eingesetzt. Dabei dient die 3D-Kinematiksimulation zur Feinplanung und Ableitung von Steuerungsprogrammen. Die Ablaufsimulation wird hingegen zur Abtaktung und Ermittlung des Kapazitätsbedarfs eingesetzt.

Im Bereich der Anlagen- und Logistikplanung dominiert die Ablaufsimulation zur Ableitung von Steuerungsstrategien und zur Sicherstellung der Ausbringung. Daneben kann sie die Einführung einer neuen Technologie wirksam unterstützen.

Die geschilderten Werkzeuge ermöglichen eine Vielfalt an Nutzeffekten, die von der Beherrschung des Fertigungsprozesses bis hin zur Layoutplanung einer komplexen Fertigungsanlage reichen. Allerdings stellen die einzelnen Simulatoren häufig Insellösungen dar. Um das Potential der simulationsgestützten Planung auszuschöpfen, ist eine durchgängige Verknüpfung erforderlich [185]. Dazu wird in den folgenden Kapiteln eine strukturierte Vorgehensweise erarbeitet und zu einer CAE-Umgebung erweitert.

4 Vorgehensmodell zur durchgängigen simulationsgestützten Planung

Die Planung von Fertigungseinrichtungen ist ohne den Einsatz rechnergestützter Werkzeuge nicht mehr denkbar [160]. Mit den im vorhergehenden Kapitel vorgestellten, leistungsfähigen Simulationswerkzeugen können nahezu alle Aspekte der Planung rechnergestützt durchgeführt werden. Der Einsatz der Simulation erfüllt jedoch oft nicht die Erwartungen der Anwender, insbesondere werden mangelnde Durchgängigkeit und hoher Einarbeitungsaufwand beklagt [145]. Es ist daher erforderlich, einen konzeptionellen Rahmen für ein optimales Zusammenspiel der einzelnen Simulationstechniken entlang der Entstehungs- und Lebensphasen einer Fertigungseinrichtung zur Verfügung zu stellen [161].

4.1 Planungsaufgaben für Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

Das zu entwerfende Vorgehensmodell umfasst alle Planungsaufgaben entlang des Produktlebenszyklus, die die Fertigungseinrichtung betreffen. Dies reicht vom ersten Konzept über die Maschinen- und Anlagenplanung bis hin zur Unterstützung des operativen Betriebs in der Elektronikproduktion. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass die Rechnerunterstützung nicht bei der Fertigung der Einrichtungen endet, sondern auch die Betriebsphase geeignet mit Ergebnissen der Maschinenentwicklung unterstützt, etwa bei der Erstellung von Fertigungsunterlagen und NC-Programmen. Darüber hinaus lässt sich durch die Ableitung von Diagnosewissen aus den Entwicklungsdaten eine deutliche Steigerung der Verfügbarkeit erreichen.

4.1.1 Produktlebenszyklus von Fertigungseinrichtungen - Gesamt-szenario der integrierten Planung

Der Produktlebenszyklus eines technischen Systems wie einer Fertigungseinrichtung, umfasst nach VDI 2221 die Phasen der Aufgabendefinition, der Entwicklung bzw. Konstruktion, der Fertigung, der Übergabe an den Anwender, des Gebrauchs sowie der Demontage (Bild 25). Dabei werden in einzelnen Schritten jeweils Teilergebnisse erarbeitet, die in der Folge den Ausgangspunkt für die weitere Produktentstehung bzw. den Gebrauch darstellen [124].

Den Anfang bildet die Aufgabendefinition. Hier wird auf der Grundlage der technischen Spezifikationen bzw. Anforderungen eine Systemvorstudie erarbeitet, die die grundlegenden Wirkprinzipien und die Grobstruktur des technischen Systems enthält. Auf der Basis dieser Informationen, die in Form von CAD- oder Simulationsmodellen bzw. als technische Dokumente vorliegen können, erfolgt die Systementwicklung. Hier werden in zunehmender Detaillierung die Funktionen mechanischen und elektrischen bzw. elektronischen Baugruppen sowie informationstechnischen Systemen zugeordnet.

Die anschließenden Phasen der Produktion der Fertigungseinrichtung sowie der Einführung und des Betriebs werden durch die Festlegungen der Entwicklung determiniert. Es ist daher nötig, diese Informationen unter Beachtung der Geheimhaltungsinteressen des Anbieters der Fertigungseinrichtung auch dem Elektronikfertiger in geeigneter Form zugänglich zu machen. Dies ist im Bereich der Roboterprogrammierung bereits weit verbreitet. Hier werden von Simulationsanbietern Bibliotheken der Handhabungsgeräte sowie Parametersätze zur Verfügung gestellt, die alle für die Offline-Programmierung und Zellenplanung nötigen Informationen des Roboters beinhalten (vgl. z. B. [101]).

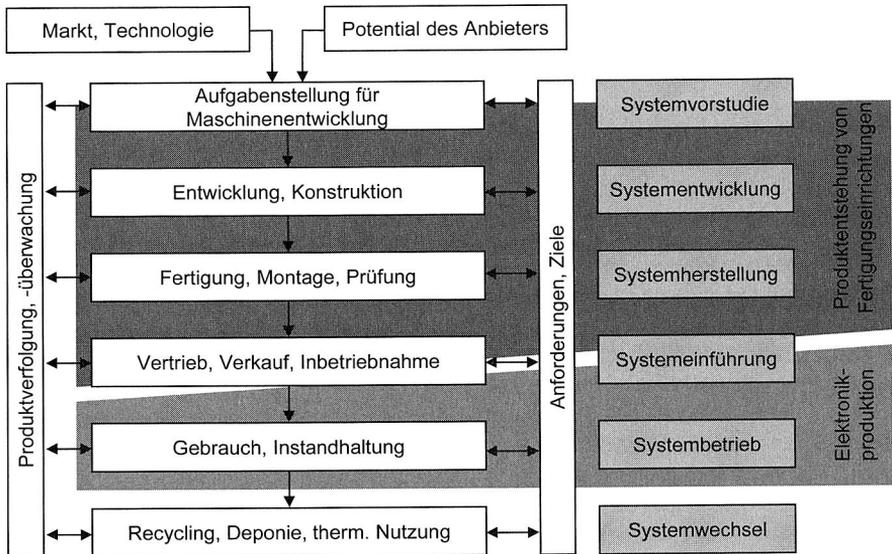


Bild 25: Erweiterte Darstellung der Produktentstehungs- und Lebensphasen nach VDI 2221 für Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion ([29], [124], [126])

Das Bild 25 zeigt deutlich die zentrale Stellung der Entwicklung / Konstruktion [124] innerhalb der Produktentstehungs- bzw. Lebensphasen. Diese liegt darin begründet, dass in diesem Bereich:

- die maximale Leistungsfähigkeit und die Kosten der Fertigungseinrichtung festgelegt werden, und dass
- die größte Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit zu beeinflussen, beim gleichzeitig höchsten Grad an zu beherrschender Komplexität vorliegt.

Aus diesen Gründen liegt ein Schwerpunkt der Methodik zur durchgängigen simulationsgestützten Planung im Bereich der Maschinenentwicklung. Hier sind verschiedene konstruktionsmethodische Ansätze verfügbar, die z. T. vom zu entwerfenden technischen System abhängen (eine Übersicht findet sich z. B. in [29]). Alle Methodiken wei-

sen inhaltliche und methodische Übereinstimmungen sowie einen ähnlichen Aufbau auf, der drei bzw. vier prinzipielle Arbeitsschritte unterscheidet. Diese umfassen die Definition des Entwicklungsziels, das Erarbeiten eines Lösungsprinzips sowie dessen Detaillierung und Fertigstellung. Von diesen Ansätzen wird im Folgenden die Methodik der VDI-Richtlinie 2221 [124] weiterverfolgt, da sie die wohl am weitesten verbreitete darstellt. Außerdem sind in das dort vorgestellte Schema die Gedanken der anderen Schulen in erheblichem Maß eingeflossen.

Die Anerkennung dieser Vorgehensweise zeigt sich auch bei der Entwicklung der Systematik zur Planung von Arbeitssystemen nach REFA. Diese wandelte sich von einer eigenständigen, allgemeingültigen Methodik mit der Betonung der Entwicklung alternativer Lösungsansätze [115] zu einer speziellen Anwendung der Methodik der VDI 2221 für die Feingestaltung von Arbeitssystemen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf Arbeitsplätzen mit signifikantem Anteil personeller Arbeit [114]. Die Verwandtschaft zur VDI 2221 zeigt sich besonders deutlich an der Äquivalenz der verwendeten Fachbegriffe und des beinahe identischen Ablaufschemas.

Für die durchgängige rechnergestützte Planung der Elektronikproduktion ist die Methodik der VDI 2221 um Elemente zu erweitern, die diesen speziellen Anforderungen genügen. Dabei fließen insbesondere der zunehmende Konkretisierungsgrad während der Entwicklung sowie die durchgängige Nutzung simulationsgestützter Werkzeuge ein. Dies beinhaltet den Entwurf geeigneter Einsatzschemata sowie die Bereitstellung entsprechender Schnittstellenmodule zwischen den verwendeten Simulationsprogrammen. Darüber hinaus ist eine effektive Unterstützung der Interdependenzen von technologischen, maschinenbaulichen und informationstechnischen Zielen umzusetzen.

4.1.2 Phasen der Produktentwicklung nach VDI 2221

Die Entwicklung eines technischen Systems gliedert sich nach VDI 2221 in die vier Phasen des Planens, Konzipierens, Entwerfens und Ausarbeitens. Sie umfassen sieben Aufgaben von der Klärung der Aufgabenstellung über die Detailfestlegung bis zur Erstellung der technischen Dokumentation (Tabelle 2).

Die erste Phase der Produktentwicklung wird in der VDI 2221 als Planen³ bezeichnet. Hier sind vor allem die Anforderungen an das technische System festzulegen. Dies geschieht meist in Form einer technischen Dokumentation, der Anforderungsliste, die anschließend allen Beteiligten zu Verfügung gestellt wird.

Auf dieser Basis werden in der nächsten Phase, dem Konzipieren, die Funktionsstrukturen der Maschine festgelegt und für jede dieser Strukturen prinzipielle Lösungen erarbeitet. Diese werden anschließend in realisierbare Module gegliedert. Hierfür werden

³ Dies ist vom Begriff der Planung, wie er bisher im Kontext der durchgängigen rechnergestützten Planung verwendet wurde, zu unterscheiden. Im Folgenden wird daher grundsätzlich zwischen dem Planen und der Planung unterschieden: Unter der Planung wird, wie bisher, die Gesamtheit der Aufgaben verstanden, die für die Realisierung und den effektiven Betrieb einer Fertigungseinrichtung erforderlich sind. Dagegen bezeichnet das Planen nur die erste Phase der Produktentwicklung nach VDI 2221. Aus Gründen der Konsistenz wird auch für die anderen Phasen das substantivierte Verb verwendet.

konzeptionelle Werkzeuge, wie Schaltpläne, Blockdarstellungen, Prinzipskizzen oder grobe maßstäbliche Zeichnungen eingesetzt. Gerade in dieser Phase ist der Einsatz der Simulationstechnik vielversprechend.

Phase	Aufgabe	Arbeitsergebnis
Planen	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Anforderungsliste
	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	Funktionsstrukturen
Konzipieren	Suche nach Lösungsprinzipien	Prinzipielle Lösungen
	Gliedern in realisierbare Module	Modulare Strukturen
	Gestalten der maßgebenden Module	Vorentwürfe
Entwerfen	Gestalten des gesamten Produkts	Gesamtentwurf
Ausarbeiten	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben	Produktdokumentation

Tabelle 2: Aufgaben und Ergebnisse der Phasen der Produktentwicklung nach VDI 2221 [124]

- Durch Simulationsstudien lassen sich bereits sehr frühzeitig unterschiedliche Lösungsansätze beurteilen, etwa beim Entwurf der Maschinenkinematik bzw. –dynamik. Dies kann bereits erste Parameterstudien beinhalten, z. B. bei der Festlegung von Gelenkpunkten und Wandstärken.
- Da in dieser frühen Phase relativ wenig Geometrie festgelegt wird, sind die in CAE-Systeme integrierten Solid-Modellierer meist ausreichend. Gleichzeitig ist meist eine Rückführung von Geometrie in ein CAD-Programm möglich.
- Ein Simulationsmodell enthält, im Gegensatz zu einem Textdokument, eine Topologie der relevanten Baugruppen in elektronischer Form, die von anderen Simulationsprogrammen und von CAD-Programmen direkt als Eingangsdaten verwendet werden kann. Die Voraussetzung hierfür ist ein geeignetes Datenmanagement, etwa in der Form eines EDM / PDM-Systems oder eines Simulationsdatenmanagements [15], [155]. Dieses Potential ist sowohl beim Entwurf mechanischer als auch elektronischer Baugruppen im Sinne des Simultaneous Engineering gegeben.
- Die Konzeptentwicklung für die vollständige Fertigungseinrichtung oder für Baugruppen bezieht Spezialisten aus unterschiedlichen Fachgebieten ein. Hier kann ein

Simulationsmodell bzw. die Animation von Simulationsergebnissen einen wertvollen Beitrag für die Kommunikation und Lösungsfindung beitragen.

In der folgenden, arbeitsintensiven Phase des Entwerfens erfolgt die Ausgestaltung der Bauteile und Baugruppen. Hier sind neben der Funktionserfüllung auch die Fertigbarkeit, Kosteneffizienz etc. zu beachten. Die Simulation kann in diesem Stadium vor allem zur Absicherung des Entwurfs eingesetzt werden. Da der Konkretisierungsgrad stetig steigt, sind auch die Annahmen für die Modellierung immer zuverlässiger. Für dieses Anwendungsfeld setzen sich immer mehr solche Simulationsprogramme durch, die direkt in das CAD-System integriert sind. Beispielhafte Fragestellungen sind die Gestaltung von Rippen, um eine möglichst hohe Steifigkeit zu erzielen [22].

Die letzte Phase, das Ausarbeiten, umfasst die endgültige Feingestaltung von Bauteilgeometrien bzw. die definitive Auswahl von Parametern der Steuerung. Da nun alle für die Produktion der Fertigungseinrichtung relevanten Informationen verfügbar sind, kann ein Prototyp hergestellt werden, um die Leistungsfähigkeit nachzuweisen. Für diese Aufgabe gewinnt der Einsatz von Simulation, das sog. Virtual Prototyping, zunehmend an Bedeutung, da die Kosten für den Bau physikalischer Prototypen deutlich verringert werden können. An diesem Punkt fließen dann alle Entwicklungsergebnisse und -modelle zusammen.

Auf Grundlage der Ergebnisse des virtuellen Prototypen werden dann Verbesserungen am mechatronischen Entwurf der Fertigungseinrichtung abgeleitet und umgesetzt. Dabei lassen sich gegenüber dem physikalischen Prototypenbau deutliche Zeit- und Kostenvorteile realisieren. Darüber hinaus werden die Fertigungs- und Inbetriebnahmeunterlagen für die Produktion der Fertigungseinrichtung erstellt. Ein wesentlicher Punkt ist es, die hierfür relevanten Daten dem Elektronikfertiger für dessen rechnergestützte Planung zur Verfügung zu stellen.

Auf der Basis des Vorgehens nach VDI 2221 ist damit ein Schema für die durchgängige simulationsgestützte Entwicklung von Fertigungseinrichtungen skizziert. Diese wird im Folgenden für die spezifischen Anforderungen der Fertigungseinrichtungen in der Elektronikproduktion spezifiziert.

4.1.3 Entwicklungsziele für Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

Den Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Fertigungseinrichtung bildet die Analyse der Anforderungen. Hier gehen vor allem die umzusetzende Technologie und die geforderte Leistungsfähigkeit ein. In Kapitel 2 wurden folgende Anforderungen identifiziert, die für alle Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion zutreffen (vgl. Bild 7): Der Trend zu Miniaturisierung und steigender elektrischer Komplexität erfordert eine sehr hohe Arbeitsgenauigkeit und -geschwindigkeit. Dagegen sind die bewegten Massen gering bis sehr gering. Auch die Anforderungen an Energieumsatz treten in den Hintergrund (etwa im Gegensatz zu einer spannenden oder umformenden Werkzeugmaschine). Hier sind nur in peripheren Technologien, etwa beim Einpressen von Kontaktstiften, nennenswerte Anforderungen vorhanden.

Entsprechend dem Prozessschritt sind darüber hinaus spezifische Forderungen an den jeweiligen Maschinentyp zu berücksichtigen. So stehen etwa bei einem Bestückautomaten die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit im Vordergrund, während bei einer Anlage zur Laserdirektbelichtung vor allem eine sehr hohe Genauigkeit der Bahnbewegung gefordert wird. Bei Lötöfen und Schablonendruckern wird vor allem eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Fertigungsbedingungen, etwa der Relativbewegung von Werkstück und Schablone beim Drucker [95], gefordert.

In der folgenden Tabelle 3 sind diese Zielgrößen zusammen mit den jeweils bestimmenden Einflüssen zusammengestellt. Hier sind vor allem die Maschinendynamik, die die maximal realisierbare Arbeitsgeschwindigkeit festlegt, und das thermische Verhalten, das einen signifikanten Einfluss auf die geforderte Arbeitsgenauigkeit von einigen 10 µm ausübt, zu nennen. Daher kommt für die betrachteten Aufgaben vor allem den numerischen Simulationstechniken eine zentrale Rolle zu.

Relevante Zielgröße	Beispielhafte Fertigungseinrichtung	Bestimmender Einfluss	Anwendbare Simulationstechnik
Genauigkeit und Geschwindigkeit der Bewegung	Bestückautomat, Laserdirektbelichter, mechanische Leiterplattenbohrmaschine	Maschinendynamik und Steuerung	FEM, Mehrkörpersimulation, CACE
		Thermisches Verhalten	CFD, FEM
Konstanz der Maschine (Reproduzierbarkeit der Einstellung)	Schablonendrucker, Reflow-Ofen	Statisches Verhalten, thermisches Verhalten	FEM, Mehrkörpersimulation
Energieumsatz	Presse für Kontaktstifte	Statische Steifigkeit, Energieumsatz	FEM, Mehrkörpersimulation

Tabelle 3: Auswahl von Entwicklungszielen für die Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion mit den dazugehörigen Einflussgrößen und zur Analyse anwendbare Simulationstechniken

Die genannten Simulationswerkzeuge sind meist als Einzelsoftware konzipiert, erst allmählich setzen sich integrierte, durchgängige Lösungen durch. Dies bedeutet, dass eine Abwägung unterschiedlicher Einflüsse nur aufwändig möglich ist. So werden etwa entsprechend der Forderung nach einer höheren Arbeitsgeschwindigkeit leistungsfähige Antriebe eingesetzt, die eine hohe Dynamik gewährleisten. Hiermit ist jedoch auch eine erhebliche Wärmeabgabe an die Umgebung verbunden. Damit gewinnt z. B. die integrierte Analyse des thermischen und dynamischen Verhaltens erhebliche Bedeutung.

4.1.4 Notwendigkeit eines erweiterten Vorgehensmodells

Die technologischen Randbedingungen der Elektronikproduktion zeigen, dass vor allem vier Teilbereiche für die Leistungsfähigkeit einer Fertigungseinrichtung entscheidend

sind: Dies sind die Maschinendynamik, das thermische Verhalten und damit auch die Gestaltung der tragenden und bewegten Bauteile sowie die Steuerungstechnik. Die fortschreitende Detaillierung im Produktentstehungsprozess führt dabei zu immer stärkeren Interdependenzen zwischen diesen Gestaltungsfeldern. Diese sind nur durch eine geeignete methodische und simulationstechnische Anbindung in der Geschwindigkeit zu beherrschen, die von der technologischen Entwicklung vorgegeben ist.

Es wird daher für die identifizierten Arbeitsfelder eine Methodik entworfen, die sich in ihrer Grundstruktur an der Vorgehensweise der VDI 2221 anlehnt. Diese ist allerdings dahingehend zu erweitern, dass

- eine singuläre Sicht auf einzelne Bauteile durch eine Durchgängigkeit ersetzt wird, die eine Bauteilentwicklung unter Berücksichtigung gegenseitiger Abhängigkeiten ermöglicht;
- ein iteratives Vorgehen durch Simulationseinsatz auf ein Minimum reduziert und dieses simulationstechnisch verbessert unterstützt wird;
- dem mechatronischen Produktaufbau, d. h. der zunehmenden Bedeutung der Steuerungstechnik zur Kompensation von thermischer Drift, mechanischen Schwingungen oder Positionierfehlern im System Werkzeug-/Werkstück Rechenschaft getragen wird;
- technologiespezifische Informationen datentechnisch geeignet angebunden werden, etwa durch die konsequente Weiterverwendung bereits vorhandener Simulations- und CAD-Modelle;
- eine echte Durchgängigkeit der Simulationsmodelle zwischen unterschiedlichen Werkzeugen für unterschiedliche Problemstellungen realisiert wird, etwa durch konsequente Nutzung parametrischer Modellierungsansätze.

4.2 Vorgehensmodell für eine durchgängige simulationsgestützte Planung

Das Vorgehen für die durchgängige simulationsgestützte Planung umfasst zwei wesentliche Punkte: Zum einen die Sicht auf die einzelnen Effekte und zum anderen ihre Interdependenzen. Dabei wurden vier relevante Arbeitsfelder identifiziert, die nun mit dem Simulationseinsatz für die einzelnen Phasen der Planung, vom Planen über das Konzipieren und Entwerfen bis hin zum Ausarbeiten, unterstützt werden. Diese sind das thermische Verhalten, die Maschinendynamik, die Steuerungstechnik und die Bauteilgestaltung. Dabei fließen die zunehmende Detaillierung und Zuverlässigkeit der Eingangsdaten ebenso ein wie die wachsende Vernetzung und Interdependenz der einzelnen Arbeitsfelder. Bild 26 fasst diese Überlegungen zusammen:

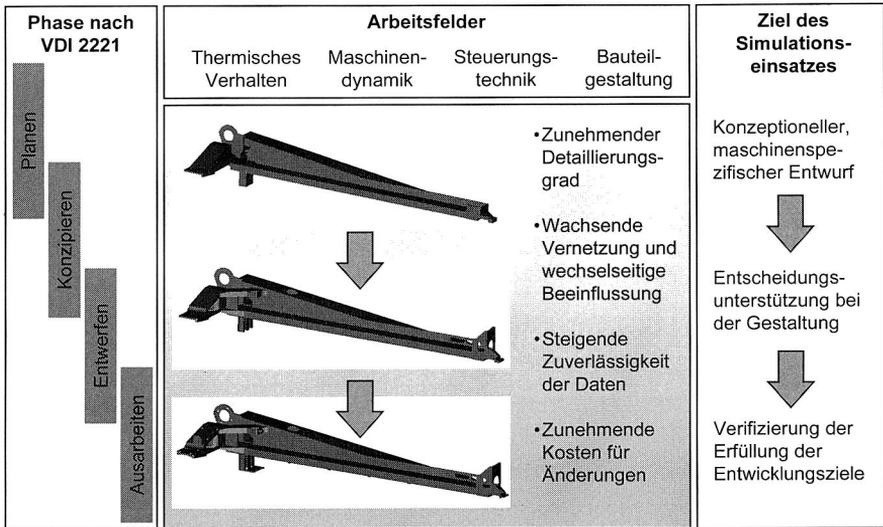


Bild 26: Einsatzfelder und Ziele des entwicklungsbegleitenden Simulationseinsatzes (nach [22], [124])

4.2.1 Simulationsergebnisse als Meilensteine der Planung

Im Sinne eines wirksamen Projektmanagements dienen Simulationsmodelle und die damit erzielten Ergebnisse als Meilensteine für den Abschluss der einzelnen Planungsphasen. Am Ende des Entwerfens steht eine Funktionsstruktur (vgl. Tabelle 2) für die betrachtete Fertigungseinrichtung. Diese Aufgabe wird von einem Simulationsmodell wahrgenommen, das als Funktionsdemonstrator dient. Die fortschreitende Konkretisierung in der Phase des Entwerfens ermöglicht es, eine technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225 [125] durchzuführen. Hier fließen aus der Simulation u. a. die Arbeitsgeschwindigkeit und die erreichbare Genauigkeit ein. Den Abschluss der durchgängigen simulationsgestützten Planung bildet die Ableitung eines virtuellen Prototypen, d. h. eines Modells, das alle für die Funktionalität der Maschine relevanten Einflüsse beinhaltet und damit detaillierte Aussagen über die Leistungsfähigkeit ermöglicht. Schließlich werden aus diesem Modell Informationen für den Maschinenbetrieb abgeleitet und dem Nutzer für dessen Planungs- und Simulationssysteme zur Verfügung gestellt.

Funktionsdemonstrator

Im Laufe des Entwerfens werden für die einzelnen von der Fertigungseinrichtung wahrzunehmenden Aufgaben Funktionsblöcke entworfen, deren Funktionalität in der Simulation überprüft wird. Hier kommen vor allem die 3D-Kinematiksimulation und die Mehrkörpersimulation zum Einsatz. Das Ziel des Simulationseinsatzes ist es, so früh wie

möglich eine Aussage über das Verhalten einer Lösungsvariante im betrieblichen Einsatz treffen zu können (Bild 27).

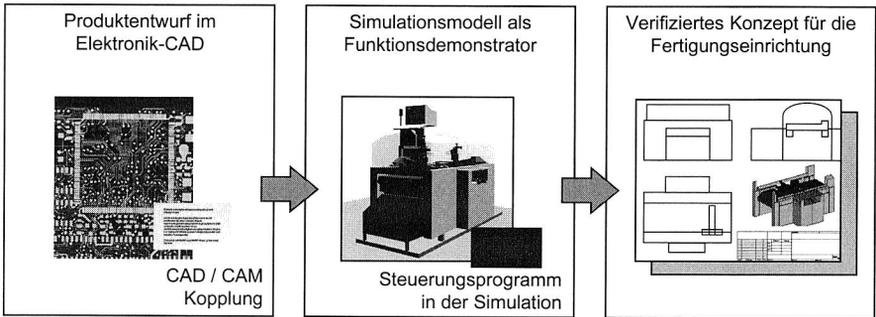


Bild 27: Nutzung des Simulationsmodells als Funktionsdemonstrator

Die direkte Übernahme von Produktdaten aus dem EDA (Electronic Design Automation, Elektronik-CAD) ermöglicht es, den Funktionsdemonstrator direkt an realistischen Produktdaten zu überprüfen. Hierfür werden die im Standardumfang des EDA verfügbaren CAD/CAM-Schnittstellen genutzt. Auf der Seite der Simulation ist einmalig ein entsprechender Prozessor für die Datenkonvertierung zu programmieren, der auch für weitere Entwicklungsaufträge verwendet werden kann. Auf der Basis der Simulationsergebnisse werden Design Rules (DRC) und Manufacturing Rules (MRC) für Produkte abgeleitet, die mit dieser Fertigungseinrichtung produziert werden sollen.

Mit dieser ersten, virtuellen CAD/CAM-Kette wird verifiziert, dass das Konzept die Anforderungen erfüllt und anschließend verabschiedet werden kann. Nach der Auswahl der weiter verfolgten Funktionsstruktur(en) stellt dieser Funktionsdemonstrator einen Meilenstein im Entwicklungsprozess dar, der auch zur Kommunikation mit Kunden und nicht-technischen Bereichen, etwa im Vertrieb, genutzt wird. Eine weitergehende Anwendung ist die Integration des konzeptionellen Kinematikmodells in das Ablaufsimulationsmodell der Fertigung bei potentiellen Kunden. Dies wird bereits von am Markt verfügbaren Simulationsumgebungen als Funktionalität angeboten (z. B. [105]).

Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Nachdem für den Entwurf einer Fertigungseinrichtung eine hinreichend detaillierte und stabile Datenbasis vorliegt, wird dieser bzgl. seiner Leistungsfähigkeit und der verursachten Kosten bewertet. Dies kann erst geschehen, wenn die wesentlichen Merkmale bzgl. der Realisierbarkeit und der damit verbundenen Kosten hinreichend genau erarbeitet wurden. Für diese Betrachtung wird die Methodik der technisch-wirtschaftlichen Bewertung nach VDI 2225 [125] angewendet.

Hierbei werden auf der Basis der Anforderungen, die in der Phase des Planens aufgestellt wurden, Erfüllungsgrade für die Anforderungen festgelegt. Dabei wird eine fünfstufige Skala verwendet, die in Tabelle 4 zusammengefasst ist. Dabei ist für jede Anforderung

derung festzulegen, ab welchem Erfüllungsgrad die entsprechende Stufe der Skala erreicht wird. Um die unterschiedliche Bedeutung und das Zusammenspiel von Kriterien zu berücksichtigen, ist eine Gewichtung der einzelnen Anforderungspunkte, etwa mit der Methodik der Nutzwertanalyse [184], erforderlich.

Annäherung an die ideale Verwirklichung	
sehr gut (ideal)	4 Punkte
gut	3 Punkte
ausreichend	2 Punkte
gerade noch tragbar	1 Punkte
unbefriedigend	0 Punkte

Tabelle 4: Punktbewertungsskala für die technische Bewertung nach VDI 2225 [125]

Für den Aspekt der wirtschaftlichen Bewertung ist die in der VDI 2225 vorgeschlagene Methodik zu erweitern: In der Richtlinie werden nur die Herstellkosten des Konstruktionsobjekts berücksichtigt. Für die Betrachtung einer Fertigungseinrichtung ist dieser Ansatz jedoch nicht ausreichend, da neben den Herstellkosten, die in die Maschinenfixkosten eingehen, weitere signifikante Kostenarten auftreten. Dies umfasst etwa die Betriebsstoff- und Energiekosten sowie die zum Betrieb erforderlichen personellen Ressourcen. Hier ist eine Berücksichtigung der dynamischen Anteile, etwa der Maschinenauslastung oder von Wartungszeiten, wie bei [183] vorgeschlagen, zu integrieren.

Der Einsatz der Simulation dient an diesem Meilenstein dazu, technische und monetäre Rohdaten für die Bewertung zur Verfügung zu stellen. So ist es möglich, die Arbeitsgeschwindigkeit und -genauigkeit sowie deren relevante Einflussgrößen zu quantifizieren und somit unterschiedliche Szenarien zu betrachten. Auf Grund des fortgeschritteneren Planungsstandes stehen auch bereits hinreichend zuverlässige Daten über Zukaufteile sowie die Herstell- und Betriebskosten zur Verfügung. Diese Daten dienen zur Ermittlung der technischen und der wirtschaftlichen Wertigkeit. Dabei ist die technische Wertigkeit das Verhältnis der gewichteten Punktzahlen für alle technischen Kriterien zur maximal erreichbaren Summe (ideale Fertigungseinrichtung). Die wirtschaftliche Wertigkeit ist definiert als das Verhältnis von realen Kosten der betrachteten Variante zu idealen Kosten, die auf der Basis von Marktanalysen vergleichbarer Produkte ermittelt werden. Für die Abwägung zwischen technischen und wirtschaftlichen Zielen dient die Definition der Stärke der betrachteten Alternative [125]. In dieser Arbeit wird das geometrische Mittel von technischer und wirtschaftlicher Stärke verwendet, da es im Gegensatz zum arithmetischen Mittel die Ausgewogenheit des Entwurfs wesentlich stärker betont.

In Bild 28 ist ein Stärkediagramm als Ergebnis der technisch-wirtschaftlichen Bewertung dargestellt. Dabei erscheint ein technisch und wirtschaftlich ideales Produkt in der obe-

ren rechten Ecke. Die Hyperbeln schließen Felder gleicher Stärke in 10%-Schritten ein. Die eingezeichneten Punkte bezeichnen die Positionierung der vorhandenen Maschine, von zwei alternativen Fertigungseinrichtungen sowie der neu geplanten Maschine.

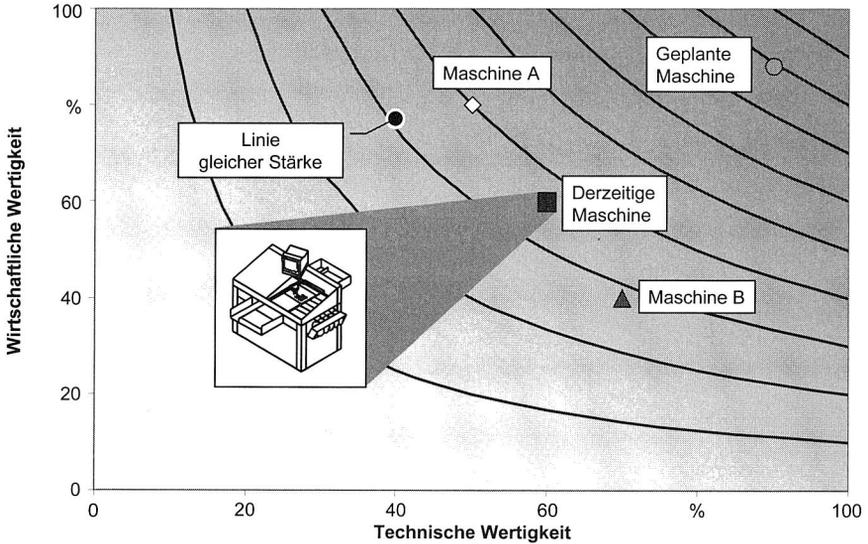


Bild 28: Stärkediagramm für die technisch wirtschaftliche Bewertung alternativer Maschinen auf der Basis von Simulationsergebnissen

Virtueller Prototyp

Das Ergebnis der durchgängigen rechnergestützten Entwicklung von Fertigungseinrichtungen stellt die Erstellung eines virtuellen Prototypen dar, d. h. eines Simulationsmodells, das alle für die Beurteilung der Anforderungen relevanten Einflüsse integriert und auch deren Wechselwirkungen und Abhängigkeiten korrekt wiedergibt. Im Fall der Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion umfasst dies die in Bild 29 aufgeführten Teilbereiche der Mechanik, insbes. der Maschinendynamik, des thermischen Verhaltens, der Technologie sowie der Steuerungstechnik. Die Erstellung eines virtuellen Prototypen erfordert eine effiziente Verdichtung der bis zu diesem Punkt erarbeiteten Simulationsmodelle und -ergebnisse. Dies beinhaltet zum Beispiel die Frage, für welche Bauteile die thermische Verzerrung einen signifikanten Einfluss auf die Arbeitsgenauigkeit aufweist oder bei welchen Teilen die Flexibilität und damit das Schwingungsverhalten von Bedeutung ist.

Der einmal erstellte, virtuelle Prototyp verringert den Aufwand für den Aufbau physikalischer Prototypen erheblich, da Schwachstellen schneller erkannt und Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden können. Darüber hinaus werden durch die integrierte

Simulation Effekte erkennbar, die aus der Überlagerung der unterschiedlichen physikalischen Effekte resultieren, und die andernfalls erst im Betrieb bemerkt worden wären.

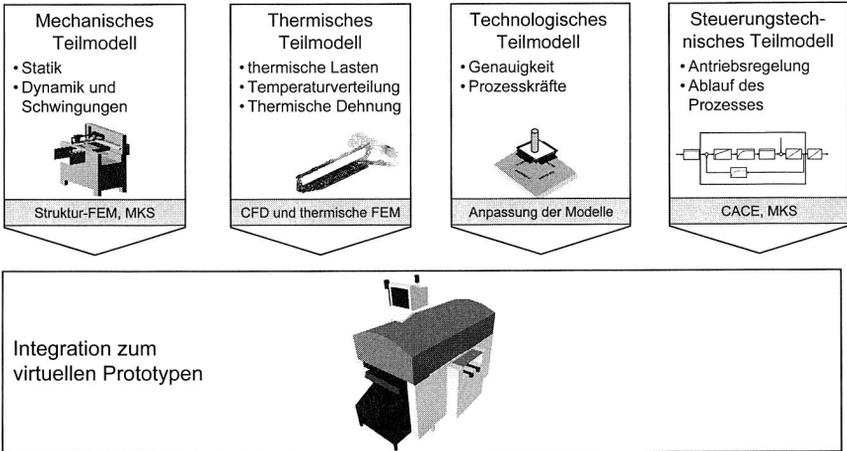


Bild 29: Integration der Teilbereiche zu einem virtuellen Prototypen (nach [32])

Am virtuellen Prototypen können darüber hinaus Strategien für die Einstellung der Antriebsregelung bei der Inbetriebsetzung getestet werden und es kann Diagnosewissen schon vor der Montage der ersten Serie akquiriert werden. Hierbei können Effekte, die an einer Maschine ggfs. erst nach einiger Laufzeit auftreten, etwa der Drift eines Messsystems oder die Schädigung mechanischer Baugruppen, direkt modelliert und ihr Einfluss erfasst werden. Dies bietet auch die Möglichkeit, direkt aus dem Simulationsmodell Wartungspläne für eine Neukonstruktion abzuleiten.

Daten und Modelle für Maschinenbetrieb

Auf der Basis des virtuellen Prototypen werden Modelle und Informationen für den Fertigungsbetrieb abgeleitet und somit die Durchgängigkeit über die Entwicklung und Konstruktion der Fertigungseinrichtung hinaus realisiert. Hier werden neben numerischen Werten zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit u. a. die Daten für die Kinematiksimulation beim Maschinenbetreiber abgeleitet. Diese Daten sind so zu erstellen, dass eine Rückführung von Informationen wie Lasthistorien zum virtuellen Prototypen möglich ist. Dadurch können Kundenanfragen, etwa nach höherer Arbeitsgeschwindigkeit oder Traglast sehr effektiv bearbeitet werden. Ein weiterer Anwendungsfall ist die Ableitung von Modellen für die Ablaufsimulation, die der Maschinenbetreiber zur Abtaktung seiner Linie einsetzt.

4.2.2 Simulationsgestütztes Vorgehen für einzelne Arbeitsfelder

Das simulationsgestützte Vorgehen für die vier Arbeitsfelder aus Bild 26 wird im Folgenden geschildert. Aus dieser effizienten, durchgängigen Methodik werden dann Anforderungen an die Softwareumgebung abgeleitet.

Maschinendynamik

Die simulationsgestützte Entwicklung der Maschinendynamik beginnt mit der Festlegung der prinzipiellen Kinematik der betrachteten Fertigungseinrichtung. Dies beginnt z. B. bei der Frage, ob eine lineare Kinematik mit rotatorischen oder translatorischen Achsen oder eine Parallelkinematik als Tripod bzw. Hexapod gewählt wird. Darüber hinaus wird die Position der Gelenkpunkte festgelegt. Bereits bei diesem konzeptionellen Entwurf kann die Simulation nutzbringend eingesetzt werden: So sind durch Parametervariation in der Mehrkörper- bzw. Kinematiksimulation der Arbeitsraum und die angreifenden Kräfte zu analysieren und Optimierungspotentiale abzuleiten (Bild 30).

In der Folge werden dann die Bauteile, die die Kinematik realisieren, ausgestaltet. Hierbei wird die Simulation eingesetzt, um Eigenfrequenzen zu ermitteln. Dies ist sowohl für das Gesamtsystem als auch für einzelne Bauteile wichtig, da hierdurch die maximal erreichbare Dynamik festgelegt wird. Dabei kommt neben der Mehrkörpersimulation die FE-Simulation zum Einsatz. Hier ist auch die überlagerte Betrachtung von Starrkörperbewegung und Schwingungsverhalten wichtig, um das Verhalten der realen Maschine möglichst frühzeitig zu beherrschen. Im Sinne der Durchgängigkeit gewinnen automatische Geometrieoptimierer als Kopplung zwischen beiden Simulationstechniken zur Feinoptimierung einer Bauteilstruktur bzgl. eines vorgegebenen Last- und Bewegungskollektivs an Bedeutung [1]. Nach dem Abschluss der Gestaltung werden die erarbeiteten Ergebnisse dem Benutzer zur Verfügung gestellt, etwa in Form von zulässigen Verfahrensgeschwindigkeiten oder als vorkonfigurierte Modelle eines Kinematiksimulationsystems.

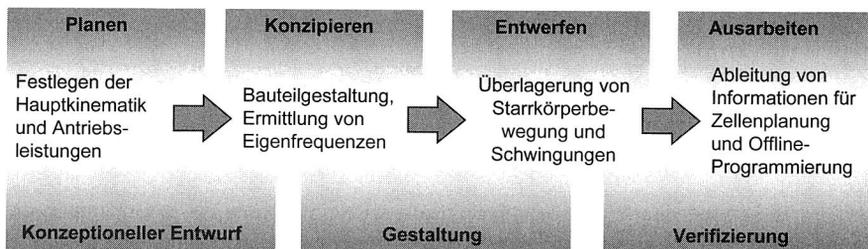


Bild 30: Vorgehen zur simulationsgestützten Betrachtung der Maschinendynamik

Steuerungstechnik

Der Entwurf der Antriebsregelung und der Störungskompensation beginnt analog zur Entwicklung der Maschinendynamik mit der Festlegung der grundsätzlichen Struktur,

d. h. der Regelungsalgorithmen. Um eine Antriebsregelung für die Fertigungseinrichtung entwerfen zu können, ist es nötig, das Systemverhalten der Regelungsstrecke zur Verfügung zu haben. Da dies die systemtheoretische Beschreibung der Maschinendynamik ist, kann diese Aufgabe erst starten, wenn die Kinematik der Maschine festgelegt wurde. Außerdem ist eine überschlägige Dimensionierung der angetriebenen Bauteile notwendig, da hierdurch die zu bewegenden Massen und Trägheiten festgelegt werden. Sobald diese Informationen verfügbar stabil sind, kann das Verhalten der Regelungsstrecke, d. h. des mechatronischen Antriebssystems, am Simulationsmodell untersucht werden. Hierfür werden die Mehrkörpersimulation und CACE-Systeme, die auch über eine direkte Kopplung miteinander verbunden sein können, eingesetzt. Besondere Bedeutung hat die Analyse im Frequenzbereich, da hiermit aussagekräftige Ergebnisse bei endlichem numerischen Aufwand erzielt werden.

Anschließend werden Regelungsparameter ausgewählt, die einen schnellen und stabilen Betrieb der Fertigungseinrichtung gewährleisten. Hierfür werden Simulationen sowohl mit CACE-Systemen als auch mit der Mehrkörpersimulation durchgeführt. Dies kann entscheidend sein, da eine Kopplung verschiedener Simulationssysteme oder eine automatische Modellübertragung i. d. R. eine Vereinfachung der Modelle erfordern. Den Abschluss der Steuerungsentwicklung bilden Parameterstudien. Dabei werden unterschiedliche Zustände der Maschine modelliert, die etwa durch Fertigungstoleranzen oder unterschiedliche Umgebungs- und Aufstellbedingungen verursacht sein können. Hiermit wird zum einen nochmals die Stabilität der Steuerung validiert und zum anderen werden Parametersätze für die Inbetriebnahme der Maschine beim Kunden generiert.

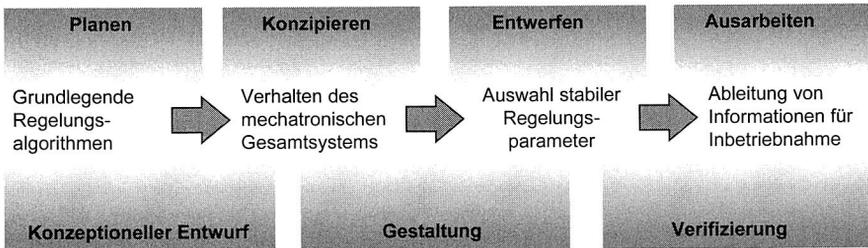


Bild 31: Vorgehen zur simulationsgestützten Betrachtung der Steuerungstechnik

Im anschließenden operativen Betrieb beim Kunden können die Bewegungsdaten erfasst werden und anschließend an die Entwicklung der Maschinendynamik bzw. der Maschinensteuerung übergeben werden. Durch die Rückführung dieser Daten in die Modelle werden sehr schnell reale Lastkollektive erarbeitet und stehen für folgende Maschinengenerationen zur Verfügung. Darüber hinaus kann bei Lastfällen, die über die Spezifikation hinausgehen, sehr schnell geprüft werden, ob diese mit der vorhandenen Fertigungseinrichtung noch möglich sind, oder ob eine Gefährdung von Maschine, Bediener oder Werkstück gegeben ist. Ein Beispiel hierfür ist die Freigabe eines Roboters für eine höhere Nutzlast bei angepasster Bewegungsdynamik (Bild 31).

Thermisches Verhalten

Mit dem Einsatz immer leistungsfähigerer Antriebe, etwa durch die verstärkte Verwendung von Linearmotoren (z. B. bei Bohrautomaten für die Leiterplattenherstellung, [118]) nimmt der Wärmeeintrag in die Fertigungseinrichtung erheblich zu [28]. Bei den gleichzeitig geforderten Genauigkeiten ist eine Beherrschung der Erwärmung und des daraus resultierenden thermischen Verzugs erforderlich. Diese Aufgabe ist bereits beim konzeptionellen Entwurf zu berücksichtigen.

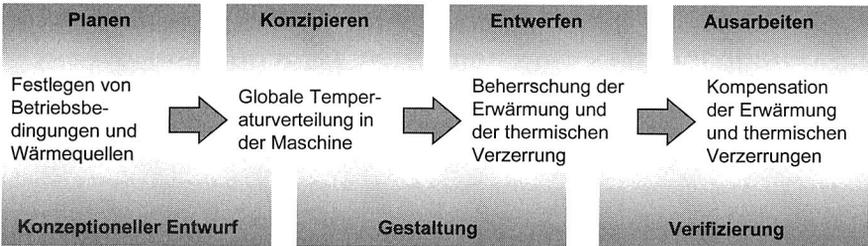


Bild 32: Vorgehen zur simulationsgestützten Betrachtung des thermischen Verhaltens

Dabei ist es nicht immer möglich, durch einfache Konstruktionsregeln, etwa der Forderung nach einer möglichst peripheren Lage der Leistungselektronik, das Erwärmungsverhalten zu beherrschen. Vielmehr wird durch den Einsatz der CFD-Simulation mit den groben Daten aus der frühen Entwicklungsphase die globale Temperaturverteilung ermittelt. Dies ist möglich, da die CFD-Simulation ohnehin für eine effiziente Berechnung eine gezielte Vereinfachung der Geometrien von Festkörpern erfordert. Mit den Ergebnissen dieser Simulation werden dann Wärmeströme analysiert und Maßnahmen zur Verringerung der thermischen Belastung abgeleitet. Dies kann die gezielte Anordnung von Lüftern oder die Lageoptimierung von Blechen zur gezielten Abfuhr von erwärmter Luft durch Ausnutzung der freien Konvektion sein. Darüber hinaus dienen die Temperaturen zur Ermittlung der thermischen Verzerrung relevanter Bauteile. Der Einsatz der FE-Simulation unterstützt hier in erheblichem Maß das Verständnis für die Konstruktion und zeigt Verbesserungsmöglichkeiten auf. Gleichzeitig wird für unterschiedliche Stadien der Erwärmung die entsprechende thermische Verlagerung ermittelt. Dieser funktionale Zusammenhang wird in der Maschinensteuerung hinterlegt und dient als Grundlage für die thermische Kompensation (Bild 32).

Bauteilgestaltung

Die Bauteilgestaltung geschieht mit 3D-CAD Systemen von einem groben Entwurf bis zum endgültigen Modell, aus dem die Fertigungsunterlagen abgeleitet werden. Hierbei kann auch eine Unterstützung durch sog. Topologieoptimierungsprogramme erfolgen. Dabei wird das Bauteil mit einem FE-Präprozessor vernetzt und die von außen wirkenden Kräfte und Momente modelliert. Der Topologieoptimierer berechnet in einem iterativen Prozess den Spannungszustand im Bauteil und entfernt alle Elemente im Inneren,

deren Spannung unterhalb eines Grenzwerts liegt. Auf diese Art und Weise können sehr schnell Rohentwürfe für eine Bauteilgestalt abgeleitet werden, die bzgl. der analysierten Last optimal sind. In den fertigen Entwurf müssen anschließend noch Überlegungen bzgl. anderer Lastfälle und der Fertigungs- und Montagegerechtigkeit einfließen. Gerade die Aufgabe der Bauteilgestaltung zeigt, dass ein erhebliches Maß an gegenseitiger Abhängigkeiten und Beeinflussungen bei den Arbeitsfeldern in der Entwicklung vorliegt. Die Durchgängigkeit ist nicht nur innerhalb dieser Felder nötig, die eingesezte Software muss auch einen Datenaustausch zwischen ihnen ermöglichen.

4.3 Durchgängigkeit der integrierten Vorgehensweise

Das grundsätzliche Ziel der durchgängigen Simulationsunterstützung ist es, den Aufwand für die Datenerhebung und Modellierung zu minimieren und damit eine verbesserte und beschleunigte Planung zu ermöglichen. Das folgende Bild 33 verdeutlicht den qualitativen Anstieg der gegenseitigen Beeinflussung während der Entwicklung. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass ab der Phase des Konzipierens der maximale Grad der Interdependenz vorliegt, wie in Abschnitt 4.2.2 dargestellt.

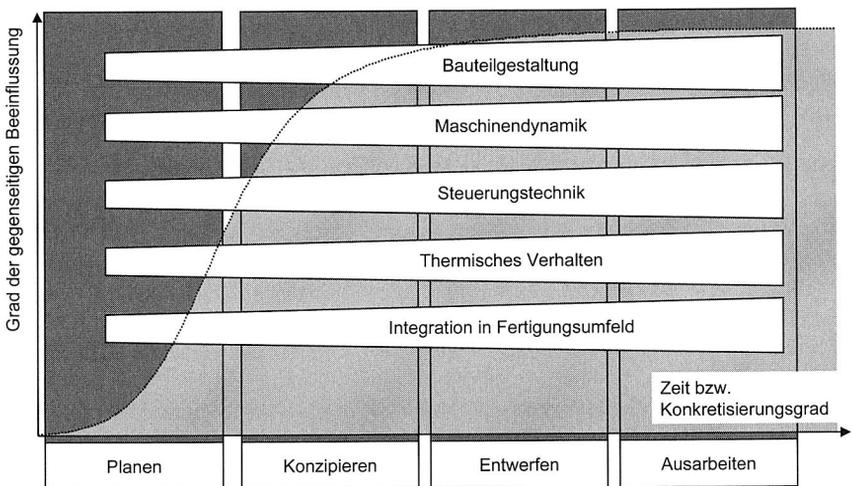


Bild 33: Zunehmender Grad der gegenseitigen Beeinflussung beim Fortschreiten der Planung

Gerade dieses hohe Maß an wechselseitiger Beeinflussung und Abhängigkeit stellt einen Ansatzpunkt für den Simulationseinsatz dar: Da diese Komplexität schon sehr früh eintritt und manuell kaum zu beherrschen ist, lässt sich durch den abgestimmten Einsatz der Simulation ein signifikanter Nutzen erschließen. Dazu ist eine integrierte Gestaltung, sowohl der einzelnen Baugruppen der Fertigungseinrichtung, als auch von Maschine und Prozess, vorzusehen und die Ergebnisse der einzelnen Gestaltungsfelder aufeinander abzustimmen. Im Lauf der Maschinenentwicklung und Fertigungspla-

nung werden die jeweiligen Gestaltungszonen, wie oben beschrieben, detailliert, woraus ein erhebliches Anwachsen der maschinenbeschreibenden Daten resultiert. Es ist daher erforderlich, bereits am Anfang geeignete Schnittstellen und Systemgrenzen festzulegen. Dies betrifft zum einen die funktionale Sicht, etwa die mechanische Verbindung zweier Konstruktionselemente, als auch die effektbezogene Sicht, etwa auf das thermische Verhalten einer Baugruppe oder der Gesamtmaschine.

Neben der Bearbeitung der Gestaltungsfelder der Maschinenentwicklung sind prozessbestimmende Größen, wie maximal zulässige Geschwindigkeiten oder erforderliche Abkühlzeiten zu berücksichtigen. Auch diese werden im Simulationsmodell hinterlegt und unterstützen damit die Planung.

5 CAE-Umgebung für die durchgängige Planung

Die Umsetzung des Vorgehensmodells zur durchgängigen rechnergestützten Planung erfolgt softwaretechnisch in Form einer CAE-Umgebung. Diese nutzt die Funktionalität leistungsfähiger und anerkannter Simulationswerkzeuge und realisiert darüber hinaus deren durchgängige Verbindung durch Prozessoren zur Aufbereitung von Simulationsdaten. Damit werden die Nutzungsmöglichkeiten der verwendeten Simulatoren erheblich erweitert. Schwerpunkte bilden hierbei die durchgängige Berücksichtigung thermischer Verzerrungen auf Bauteil- und Baugruppenebene und die effiziente Handhabung dynamischer Lasten.

5.1 Gesamtarchitektur der CAE Umgebung

Der Datenfluss innerhalb der Simulation beginnt mit der Erstellung der Geometrie in einem 3D-CAD-System. Auf diese Daten greifen danach alle CAE-Werkzeugen zu. Dafür stehen weit verbreitete Geometrieschnittstellen, wie IGES [82] oder STEP [104] AP 203/214, zur Verfügung [62]. Die Geometriedaten sind entsprechend dem Ziel der Simulationsstudie aufzubereiten, d. h. so zu vereinfachen, dass eine effiziente Berechnung bei der geforderten Genauigkeit erreicht wird. Der Grad der Vereinfachung variiert in Abhängigkeit von der Simulationstechnologie, dem Ziel der Analyse und dem Fortschritt der Entwicklung.

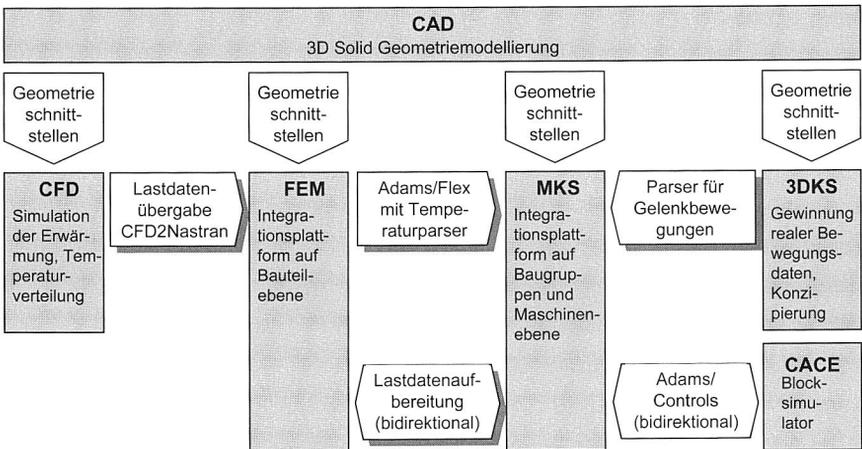


Bild 34: Zusammenwirken der Einzelbausteine der CAE-Softwareumgebung mit den in der vorliegenden Arbeit realisierten Schnittstellen (schattiert) und kommerziell verfügbaren Schnittstellen (nicht schattiert)

Die Simulationstechnologien werden durch die Nutzung weit verbreiteter, kommerzieller Programme zur Verfügung gestellt. Dabei ist die Grundvoraussetzung für die Durch-

gängigkeit eine sehr hohe Qualität der Simulationsmodelle. Für die FE-Simulation wird auf den Solver MSC / Nastran und den Präprozessor Femap, bei der CFD-Simulation auf CFDesign (Blue Ridge Numerics), bei der Mehrkörpersimulation auf MDI bzw. MSC / Adams⁴, bei der CACE auf Matlab Simulink und bei der Kinematiksimulation auf Demia / Igrid zurückgegriffen. Die Verwendung des FE-Präprozessors Femap bietet die Vorteile, dass eine vollständige Dokumentation des textbasierten Femap-Neutral-Formates verfügbar und ein Pre- und Postprocessing für eine Vielzahl verbreiteter FE-Solver möglich ist.

Die einzelnen Simulationstechniken bzw. -programme stellen jedoch größtenteils Inselösungen dar. So ist es nur sehr eingeschränkt möglich, die Ergebnisse eines Simulationslaufs in ein anderes Simulationswerkzeug als Lasten bzw. Randbedingungen für eine weiterführende Analyse zu übernehmen. Eine Ausnahme bildet hier die Anbindung von Mehrkörper- und CACE-Simulation mit Adams / Controls. Ein wesentlicher Punkt zur Umsetzung des in Kapitel 4 dargestellten Vorgehensmodells war daher die Implementierung geeigneter Kopplungsprogramme. Dies wird auch durch die Ergebnisse der Simulationsstudie [145] unterstrichen, wonach fast zwanzig Prozent der Simulationsanwender an dieser Stelle Verbesserungen wünschen.

Die CAE-Umgebung in Bild 34 stellt daher Schnittstellenmodule zur Verfügung, die als eigenständige Programme umgesetzt wurden. Dies gibt dem Anwender die Möglichkeit, gezielt die relevanten Daten für den folgenden Simulationsschritt auszuwählen und entsprechend aufzubereiten. Die realisierten Module stellen zwei Integrationsplattformen für ein umfassendes virtuelles Prototyping zur Verfügung: Auf der Bauteilebene integriert das FE-Modell die Temperaturlasten sowie die mechanischen statischen und dynamischen Lasten in unterschiedlichen Lastfällen und Ergebnisreihen. Neben dieser sehr detaillierten Betrachtung von Einzelteilen wird mit dem Mehrkörper-Modell eine Integrationsplattform auf der Baugruppen- und Maschinenebene geschaffen. Diese beinhaltet ebenfalls Flexibilität und thermische Lasten, wenn auch in reduzierter Detaillierung. Darüber hinaus werden Starrkörperbewegungen als Standardfunktionalität der Mehrkörpersimulation integriert. Damit wird schließlich die Anbindung zur Steuerungsauslegung in der CACE und zur Kinematiksimulation ermöglicht.

Da alle Schnittstellenprozessoren auf ASCII-Dateien aufsetzen, kann eine Anbindung an eine dem Stand der Technik entsprechende Datenhaltung sehr einfach umgesetzt werden. So erlaubt die geschilderte softwaretechnische Umsetzung die einfache Anbindung an PDM-Systeme (Produktdatenmanagementsysteme), um Medienbrüche bei der Bearbeitung unterschiedlicher Aufgaben durch die einzelnen Bearbeiter zu vermeiden. Außerdem können die im Folgenden beschriebenen Architekturen und Konzepte aufgegriffen werden: Dies beinhaltet z. B. den Datenbus, der in den iViP⁵-Clustern Infrastruktur Prozessmanagement und Infrastruktur Datenmanagement erstellt wurde. Durch das dort verfolgte Konzept einer Anbindung über Wrapper und PDM Enabler [79] ist ein

⁴ MDI (Mechanical Dynamics Inc) wurde im Mai 2002 von MSC Software übernommen. Die verwendeten Versionen 11 und 12 wurden noch als MDI Adams ausgeliefert.

⁵ iViP Integrierte virtuelle Produktentwicklung, bmb+f Leitprojekt von 1998 bis 2002

Zusammenspiel der CAE-Architektur aus Bild 34 mit den iViP-Klienten sehr schnell realisierbar. Damit ergibt sich auch die Möglichkeit, den Ansatz der integrierten Installationsplanung aus Matcap⁶ zu nutzen [71]. Im Gegensatz zum dortigen Weg, der neutral bzgl. der eingesetzten Simulationssoftware ist, sind bei der hier vorgestellten Architektur direkte Schnittstellen zu weit verbreiteten Produkten vorhanden, womit die Architektur sofort verfügbar und einsetzbar ist. Ähnliches gilt für die Struktur aus dem SFB 336⁷, die auf ERP (Enterprise Resource Planning) Systemen und PDM aufsetzt [14].

Für eine Integration der in der vorliegenden Arbeit umgesetzten CAE-Umgebung in diese Systeme ist allerdings eine erhebliche Erweiterung nötig. So ist neben der konsistenten Datenverwaltung, die die Konzepte gewährleisten, auch die Semantik der Modelle und die Durchgängigkeit von Ergebnissen und Modellen sicherzustellen. Dazu wäre es erforderlich, die in dieser Arbeit entwickelten Prozessoren und Schnittstellen in die Datenhaltungsprogramme zu integrieren.

Eine weitere, wichtige Möglichkeit der datentechnischen Integration ist das in Forsim⁸ erarbeitete Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten [156], das bereits in seiner Entwicklung auf die in Bild 34 dargestellte CAE-Umgebung abgestimmt wurde. Dazu wurden die Themenkomplexe Datenerzeugung und Weiterverwendung methodisch einander angepasst und die Modelle der CAE-Umgebung in das Datenschema des dortigen Referenzmodells integriert.

5.2 Übergabe von Temperaturlasten aus der CFD an die Strukturmechanik-FEM

Eine wesentliche Herausforderung für Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion ist die Beherrschung des thermischen Verhaltens. Dafür ist es erforderlich, die Temperaturverteilung an relevanten Bauteilen zu ermitteln, was mit der CFD-Simulation geschehen kann. Diese Temperaturwerte werden anschließend an die FEM zur strukturmechanischen Berechnung der thermischen Verzerrung übergeben.

Hierbei stellt sich die Aufgabe, für unterschiedlich starke Vereinfachungen der Geometrie und verschieden feine Netze die Temperaturdaten so exakt wie möglich zu übertragen. Hierfür wurde ein Übergabeparser erarbeitet, der auch sehr große Netze effizient handhaben kann. Die Übergabeschnittstelle ist für den Finite Elemente CFD-Code CFDesign und den Präprozessor Femap (Nastran for Windows von MSC Software) umgesetzt. Da für die Strukturmechanik die Temperaturverteilung in der umgebenden Luft irrelevant ist, werden alle Fluidelemente vor der Übergabe gelöscht. Dadurch wird die Datenmenge minimiert, die von der Schnittstelle zu handhaben ist. Dem Prozessor liegt der folgende Algorithmus zu Grunde (Bild 35): Zunächst werden alle Knoten und Elemente des CFD-Quellmodells und des Strukturmechanik-Zielmodells in eine interne

⁶ BriteEuram Projekt Machine Tools with Computer Aided Prototyping (MATCAP), 1996-99

⁷ Sonderforschungsbereich 336: Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung, TU München

⁸ Bayerischer Forschungsverbund Simulationstechnik, 1999-2003, gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung

Datenbank übernommen. Diese Datenbank beinhaltet die geometrischen Zusammenhänge sowie alle Temperaturwerte des Quellmodells. Anschließend wird jedes Element des Quellmodells daraufhin überprüft, ob sich ein Knoten des Zielmodells in ihm befindet. Dazu wird der es umgebende Quader berechnet. Danach wird für jeden Knoten dieses Zielmodells geprüft, ob er in diesem Quader liegt. Wenn dies der Fall ist, besteht die Möglichkeit, dass er auch im Element liegt. Dies wird anschließend durch die Berechnung des Höhenwinkels für diesen Knoten bzgl. aller Flächen des Tetraeders überprüft. Ist auch diese Bedingung erfüllt, so liegt der Zielknoten im Quellelement. Dann wird die Temperatur an diesem Zielknoten aus den Werten an den Knoten des Quell-Elements mit Hilfe seiner Ansatzfunktion berechnet. Das Werkzeug kann auf Grund der Verwendung des Höhenwinkels und der Ansatzfunktion im derzeitigen Implementierungsstand Tetraedernetze unterschiedlichster Komplexität und Formulierung einlesen. Das Ausgangsnetz kann eine beliebige Elementstruktur aufweisen (Tetraeder, Hexaeder, Schalenelemente mit linearer oder quadratischer Ansatzfunktion). Damit ist es z. B. möglich, aus einem Volumennetz Temperaturlasten auf ein Schalennetz zu übertragen, bei dem die Geometrie auf die Mittelflächen reduziert wurde.

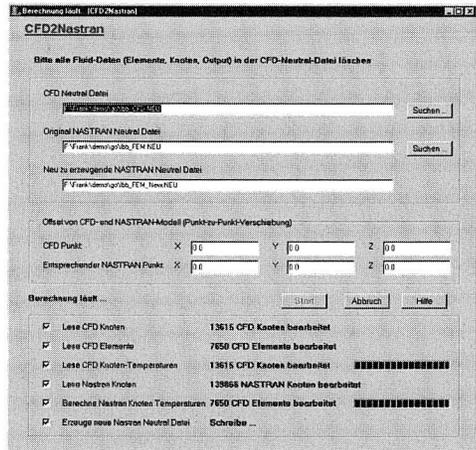
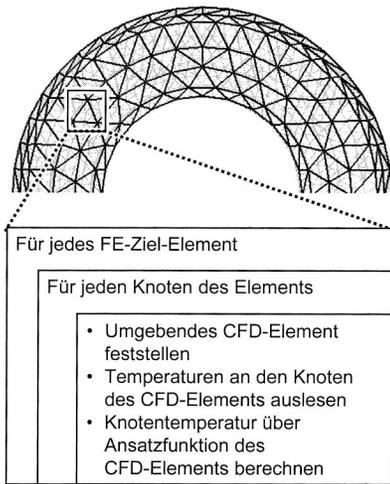


Bild 35: Algorithmus und Prozessor CFD2Nastran⁹ zur Übergabe von Temperaturen aus einem groben CFD-Netz (schwarz) an ein feines FE-Netz (grau)

Im Anschluss an die Übergabe der Temperaturen sind vom Anwender Randbedingungen im FE-Modell festzulegen, die der Lage und Fixierung des Bauteils im betrachteten Fall entsprechen. Das Ergebnis der anschließenden Berechnung ist die thermische Verzerrung unter der thermischen Last bei den vorgegebenen Lagerungsbedingungen.

9 Die Realisierung der Temperaturübergabeschnittstelle geschah in Zusammenarbeit mit Dr. Yiping Shi.

Diese Übergabeschnittstelle wurde beispielsweise verwendet, um für das Robotergerlenk aus Bild 19 die Temperaturen vom CFD-Modell an ein Netz für die strukturmechanische Berechnung der thermoelastischen Verzerrung zu übergeben. In Bild 35 ist auf der linken Seite die Überlagerung der beiden Netze für dieses Bauteil gezeigt. Das Ergebnis der Übergabe ist für dieses Beispiel in Bild 21 dargestellt.

5.3 Zusammenwirken von Mehrkörpersimulation und FEM

Die Aufgabenstellung beim Zusammenwirken von Mehrkörpersimulation und FEM umfasst zwei Teilgebiete: Zum einen sind die Informationen des FE-Modells, das die Integration auf der Bauteilebene bildet, an das Mehrkörpermodell zu übergeben, das damit zur Integrationsplattform auf der Baugruppen- und Maschinenebene wird. Zum anderen sind zusätzliche Ergebnisse der Mehrkörpersimulation, d. h. die Lasten auf Grund der Starrkörperbewegungen, an den Koppelstellen wieder in die FEM zurückzuführen. Dadurch wird eine Analyse der Spannungen mit realistischen Lastdaten erreicht.

5.3.1 Integration von Bauteilflexibilität und FE-Lasten in die MKS

Für die Integration der Flexibilität von Bauteilen in die Mehrkörpersimulation wird in der CAE-Umgebung das Werkzeug Adams/Flex [123] zusammen mit dem FE-Solver Nastran verwendet. Dieses basiert auf dem Gedanken, die Eigenfrequenzen und -formen mit dem FE-Modell eines Bauteils zu berechnen und anschließend eine modale Reduktion durchzuführen, um die benötigte Speicher- und Prozessorleistung in der Mehrkörpersimulation zu minimieren. Die Umsetzung in Adams/Flex hat jedoch einige Nachteile: So ist es erforderlich, die DAT-Eingangsdatei für den Nastran Solver, die vom Präprozessor Femap erstellt wird, entsprechend der Größe des FE-Netzes, der betrachteten Kraftangriffspunkte und des gewünschten Detaillierungsgrades anzupassen. Dieser manuelle Eingriff ist äußerst fehlerträchtig. Daher wird eine header-Datei verwendet, die eine allgemeingültige Schablone bereitstellt. Die Schnittstelle ergänzt diese dann automatisch um die modellspezifischen Anweisungen.

Die Erweiterung zum Prozessor Nastran2Adams¹⁰ umfasst außerdem die Einführung der thermischen Lasten auf den flexiblen Körper als sog. modale Lasten, wie in Bild 36 dargestellt. Diese ermöglichen es, an einem flexiblen Körper eine von der Maschinendynamik unabhängige Verformung einzuführen. Dazu wird ein Kraftfeld erzeugt, dessen Wirkung zu der des Temperaturfeldes äquivalent ist und vom FE-Solver bereits bei der thermoelastischen Berechnung mit berechnet wurde. Dieses umfasst für jeden Knoten sechs Größen und ist in der Femap-Neutraldatei enthalten. Darüber hinaus benötigt Adams/Flex eine Anweisungsdatei (mnfx.alt) für den verwendeten FE-Solver Nastran, der die modale Reduktion durchführt. Aus diesen Eingangsdaten wird dann im Batch-Rechenlauf ein sog. modales Neutralfile (MNF) erzeugt, das den flexiblen Körper in der Mehrkörpersimulation repräsentiert und direkt in Adams eingelesen wird. Dort können die thermischen Lastfälle "auf Knopfdruck" zugeschaltet werden.

¹⁰ Die Realisierung von Nastran2Adams geschah in Zusammenarbeit mit Dr. Yiping Shi.

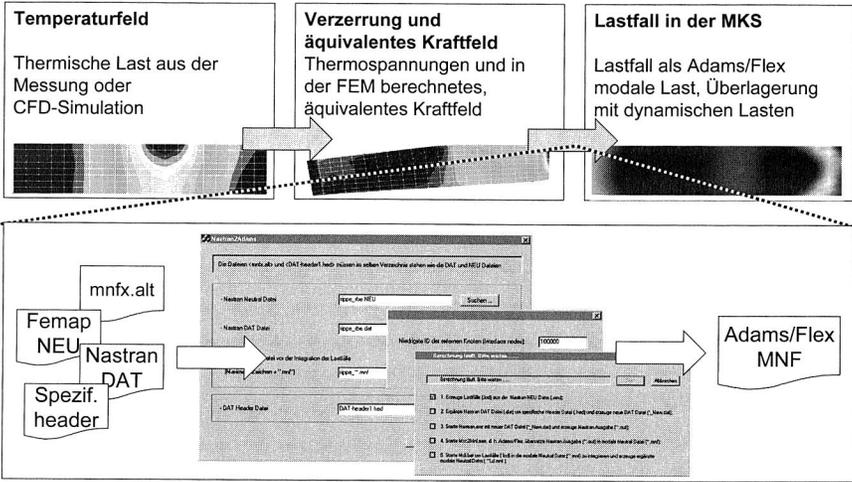


Bild 36: Integration von Bauteilflexibilität und thermischer Lasten in die Mehrkörpersimulation mit Adams/Flex und der Erweiterung Nastran2Adams

5.3.2 Aufbereitung von Lastdaten aus der MKS für die FEM

Für die detaillierte Analyse des Schwingungsverhaltens oder die Ermittlung des genauen Verzerrungszustandes bei einer überlagerten thermischen und dynamischen Beanspruchung sind die an einem Bauteil angreifenden Kräfte, Momente und Körperlasten aus der Mehrkörpersimulation in die FEM zurückzuführen.

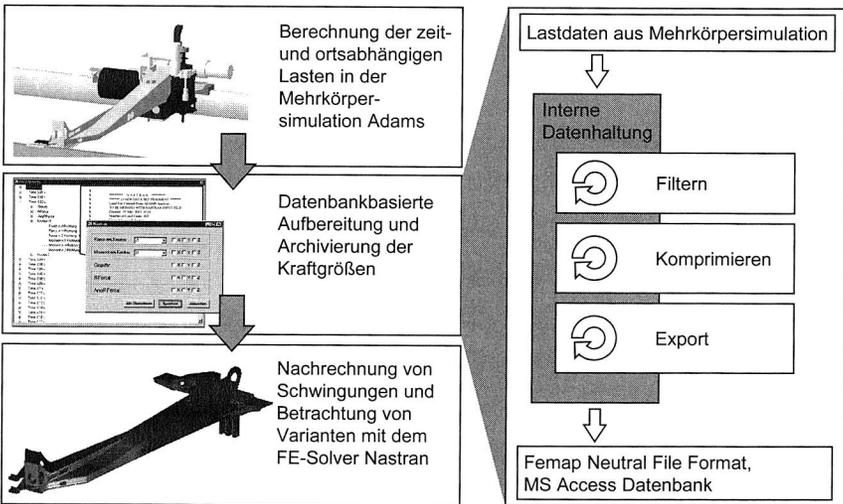


Bild 37: Funktionalität der Schnittstelle zur Lastdatenübergabe von der Mehrkörpersimulation an die FEM

Dieser Schnittstellenprozessor dient allerdings nicht nur zur Datenübergabe, eine wesentliche Anforderung besteht darin, nur einen ausgewählten (relevanten) Teil der Lastverläufe auszuwählen. Außerdem ist es möglich, numerische Fehler aus dem Funktionsverlauf zu filtern. Diese können z. B. dadurch auftreten, dass die zeitliche Diskretisierung beim erstmaligen Auftreten des Kontakts nicht fein genug war. Außerdem können Funktionsverläufe, die einen numerischen Nullwert aufweisen (z. B. minimale Schwingungen um sehr geringe Mittelwerte, wenn vergleichbare Lasten um mehrere Größenordnungen größer sind) gelöscht werden. Die entsprechend aufbereiteten Daten werden anschließend im Neutralformat des Präprozessors abgelegt und können somit direkt in das übrige Modell integriert werden. Des Weiteren können die Daten in eine Microsoft Access Datenbank ausgeleitet werden, um anschließend weitergehende Analysen durchführen zu können, etwa die Bestimmung eines Frequenzspektrums.

Für die Filteralgorithmen kann ausgenutzt werden, dass die Eingangswerte der Mehrkörpersimulation immer den selben zeitlichen Abstand (konstante Abtastrate) aufweisen. Da dies auch bei einer digitalen Messwerterfassung der Fall ist, kann die Schnittstelle prinzipiell auch für diesen Anwendungsfall erweitert werden.

Dazu beinhaltet die Schnittstelle drei Algorithmen zum Filtern und einen zum Komprimieren der Daten. Einen Überblick über die Möglichkeiten zur Datenmanipulation gibt Bild 38:

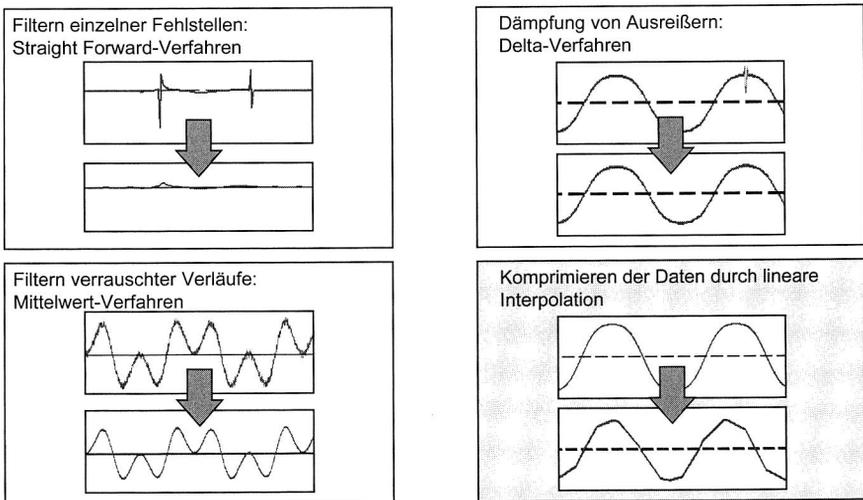


Bild 38: Filter- und Komprimieralgorithmen der Adams - Femap-Schnittstelle

Das Straight-Forward-Verfahren (Bild 39) wird eingesetzt, um sprunghafte Änderungen in ansonsten glatten Verläufen zu eliminieren. Ihm liegt der folgende Algorithmus zu Grunde: Als erster Schritt werden die Differenzen der Werte zwischen paarweise aufeinander folgenden Punkten berechnet und mit einem vom Anwender vorgegebenen

Grenzwert verglichen. Ist der Betrag der ersten betrachteten Differenz kleiner als die angegebene Schwelle, so wird dieser Vorgang mit dem nächsten Wert im Feld fortgesetzt. Überschreitet der betrachtete Wert den Grenzwert, so wird eine Markierung auf diesen Punkt gesetzt und der Vergleich fährt mit den folgenden Werten fort. Sobald eine der folgenden Differenzen wieder kleiner als der Grenzwert ist, wird der entsprechende Wert ebenfalls markiert. Anschließend werden alle Werte zwischen den Markierungen durch eine interpolierte Gerade ersetzt.

Dieses Verfahren eignet sich vor allem für kontinuierliche Funktionsverläufe, die einige wenige signifikante Fehlstellen besitzen. Dabei werden Schwingungen nicht vollständig ausgeblendet, da nur die Bereiche, die durch eine übermäßige Änderung der Steigung hervortreten, überbrückt werden. Somit erreicht man eine signifikante Dämpfung der Amplitude, die zur Stabilität der FE-Berechnung beiträgt. Die Höhe der Dämpfung lässt sich den maximal zulässigen Differenzwert zweier Punkte vorgeben.

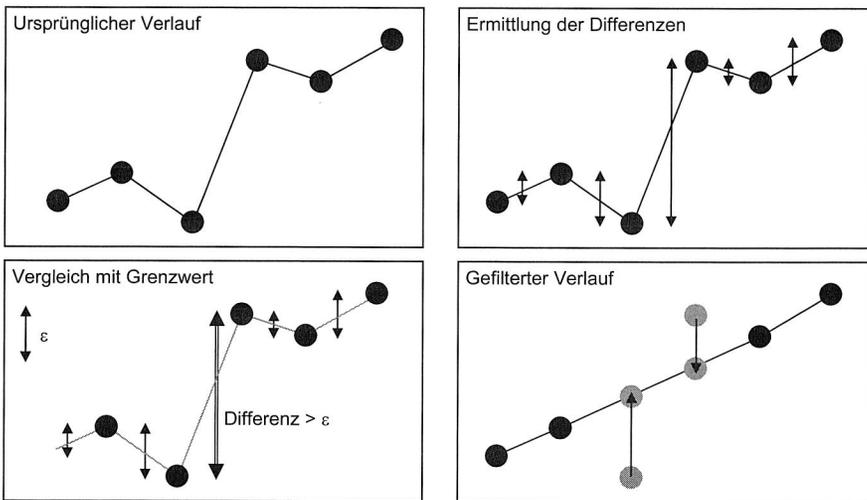


Bild 39: Filteralgorithmus des Straight-Forward-Verfahrens

Das adaptive Delta-Verfahren (Bild 40) zeichnet sich dadurch aus, dass keine starre, vorgegebene Differenzschwelle verwendet wird, wie es beim Straight-Forward-Verfahren der Fall ist. Vielmehr wird der Verlauf der betrachteten Kurve berücksichtigt, indem der globale Durchschnitt aller Werte-Differenzen als Kriterium dient. Dieser wird mit den Differenzen der einzelnen Werte verglichen. Sobald eine Differenz größer als der Mittelwert ist, könnte dies einen Ausreißer anzeigen. Der entsprechende Wert wird als Startpunkt eines Intervalls von 14 Punkten markiert. In diesem Intervall wird der lokale Differenzendurchschnitt ermittelt und dieser mit jeder Differenz verglichen. Ist eine Differenz größer als dieser lokale Mittelwert, so wird der zugehörige Punkt als Anfangspunkt A markiert. Sobald eine der folgenden Differenzen im Intervall wieder kleiner als der lo-

kale Mittelwert ist, wird der entsprechende Punkt als Endpunkt E markiert. Anschließend werden Anfangs- und Endpunkt durch eine Gerade verbunden. Im Prozessor ist dieser Algorithmus so umgesetzt, dass eine vom Anwender festgelegte Toleranz für den Unterschied zwischen der Wertedifferenz und dem Mittelwert berücksichtigt wird.

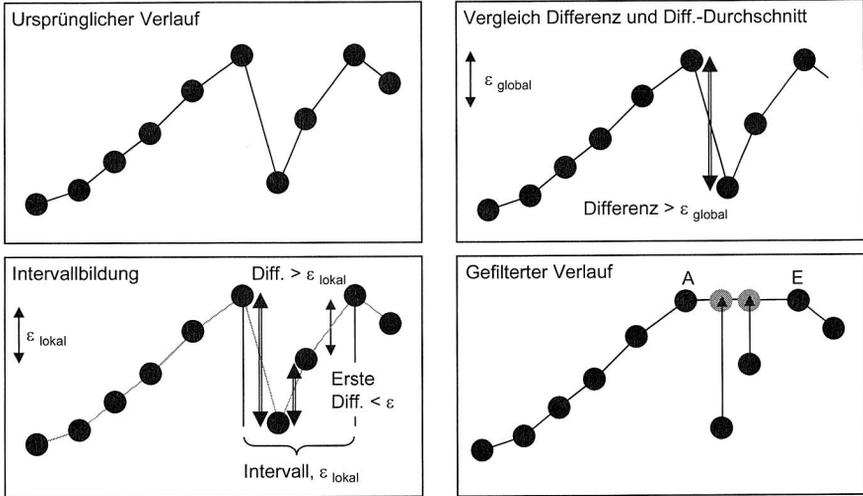


Bild 40: Filteralgorithmus des Delta-Verfahrens

Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber dem Straight-Forward Verfahren besteht darin, dass auch bei stärker variierenden Kraftverläufen lokale Fehler identifiziert werden können, da der Vergleichswert für jedes lokale Intervall neu berechnet wird. Das Anwendungsfeld des Delta-Verfahrens liegt, bedingt durch die lokale Schwellenbildung, vor allem bei sinusförmigen Funktionsverläufen. Dies schließt die Überlagerung mehrerer Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz mit ein.

Für den Fall, dass einem Funktionsverlauf ein Rauschen überlagert ist, wurde das Mittelwertverfahren (Bild 41) entwickelt. Dieser Filter arbeitet nach dem folgenden Prinzip: Die Kurve wird in gleich lange Intervalle unterteilt, deren Länge der Anwender festlegt. In jedem dieser Intervalle wird der Mittelwert der Funktionswerte gebildet. Dieser wird als neuer Funktionswert in der Mitte des Intervalls eingeführt und mit dem Mittelwert des vorhergehenden Intervalls durch eine Gerade verbunden. Den Zeitpunkten, die zwischen den Intervallmitten liegen, werden Funktionswerte entsprechend einer interpolierten Geradengleichung zugewiesen. Für das Anfangs- und Endintervall wird die entsprechende Geradengleichung über die halbe Intervalllänge extrapoliert und so dem Anfang und dem Ende des Wertebereichs Werte zugewiesen.

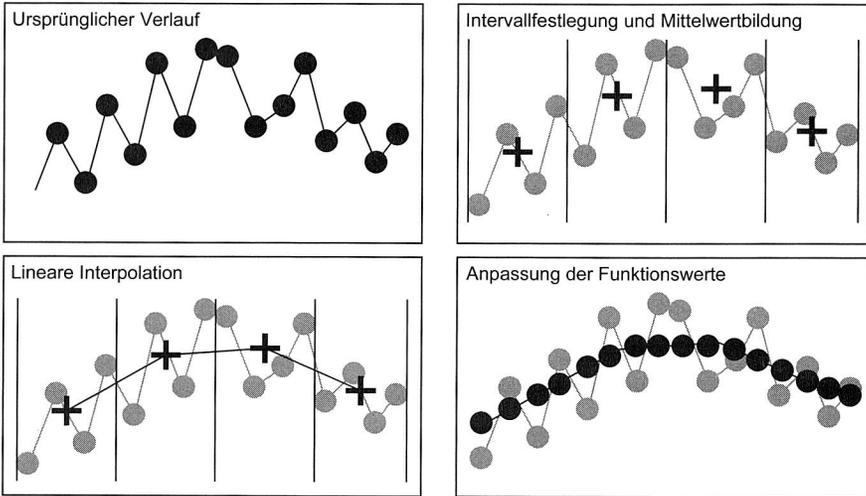


Bild 41: Filteralgorithmus des Mittelwertverfahrens

Durch die Verdichtung der Werte wird eine deutliche Verringerung der Datenmenge erreicht. Dabei ist es das Ziel, den Verlauf durch Geradenstücke zu interpolieren. Der realisierte Algorithmus (Bild 42) ermittelt dazu für jeden Abschnitt die Steigung der Kurve. Diese wird mit der des folgenden Abschnitts verglichen. Falls dessen Steigung um weniger als den Toleranzwert von der vorherigen abweicht, wird der Verlauf durch eine Gerade ersetzt. Ist dagegen der Unterschied größer als der Toleranzwert, so ist hier keine Komprimierung möglich.

Im Gegensatz zu den Filterroutinen, bei denen alle Zeitschritte erhalten bleiben und nur die Werte ersetzt werden, werden bei der Komprimierung Punkte physikalisch gelöscht. Dadurch wird eine Verringerung der Datenmenge erreicht. In der Praxis ist eine Verringerung der Datenmenge um bis zu 90 % realistisch, insbesondere wenn die Eingangsdaten eine sehr feine zeitliche Diskretisierung aufweisen. Die Verdichtung bedingt, dass nicht mehr für jeden Zeitpunkt ein vollständiger Tupel an Lastwerten vorhanden ist. Insbesondere ist die Annahme äquidistanter Werte, auf der die Filteralgorithmen aufsetzen, nicht mehr gewährleistet. Die Komprimierung sollte daher grundsätzlich der letzte Schritt der Datenaufbereitung sein.

Um unerwünschten Effekten vorzubeugen, werden nach jeder Datenmanipulation die Funktionsverläufe der geänderten Daten im Vergleich zu den Originaldaten angezeigt. Die Übernahme der neuen Werte in die Datenbank muss vom Anwender bestätigt werden. Für die anschließende FE-Simulation ist zu beachten, dass sich der betrachtete Körper auf Grund der geänderten Kräfte nicht mehr im dynamischen Gleichgewicht befindet. Dies ist durch geeignete Maßnahmen bei der Modellierung, wie z. B. der Wahl einer entsprechenden Einspannbedingung zu berücksichtigen.

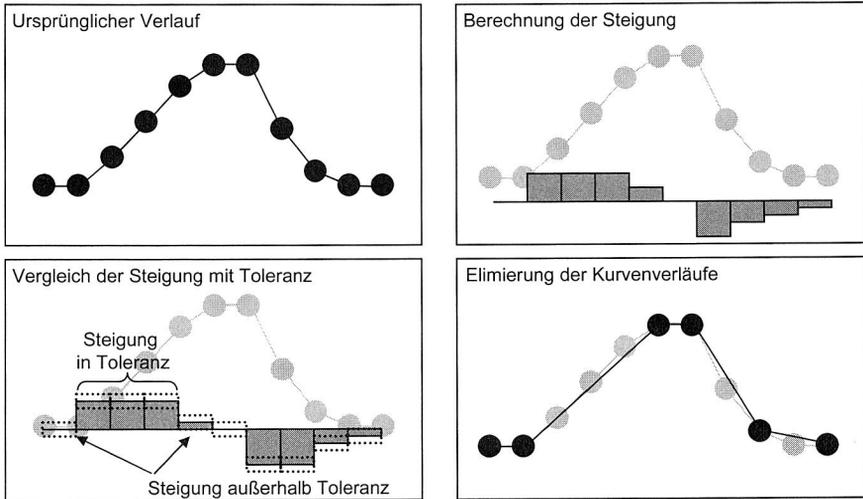


Bild 42: Algorithmus zur Komprimierung

5.4 Kopplung der Offline-Programmierung in der 3D-Kinematiksimulation mit der Dynamiksimulation in der MKS

Nach dem Abschluss der Entwicklung der Fertigungseinrichtung stehen die entsprechenden Maschinendaten für die Zellenplanung und Off-line-Programmierung beim Betreiber zur Verfügung. Diese Aufgaben werden typischerweise mit der 3D-Kinematiksimulation unterstützt. Hiermit werden jedoch keine dynamischen Effekte wie Schwingungen oder Elastizitäten berücksichtigt. Gleichzeitig stellen aber die hier erstellten Bewegungsprofile die tatsächlichen Lasten für die Fertigungseinrichtung dar.

Diese Lücke wird durch eine direkte Schnittstelle zwischen der 3D-Kinematiksimulation Delmia Igrip und der Mehrkörpersimulation Adams geschlossen, die in Bild 43 dargestellt ist: Den Ausgangspunkt bilden die in der 3D-Kinematiksimulation hinterlegten Bewegungen, etwa durch die Vorgabe nacheinander anzufahrender Punkte im Arbeitsraum. Hierfür berechnet die 3D-Kinematiksimulation die Bewegungsgrößen, d. h. Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Wege bzw. Winkel der einzelnen Achsen. Diese Simulationsergebnisse werden an die Mehrkörpersimulation als ASCII-Datei übergeben. Dabei wird für jedes Gelenk des Mehrkörpermodells die Bewegungsgröße des 3D-Kinematikmodells als zeitabhängige Randbedingung (sog. motion constraint) hinterlegt. Hierbei hat der Anwender festzulegen, welche Bewegungsgröße zu übergeben ist. Dies kann zu Gunsten der Stabilität des Rechenlaufs die Beschleunigung oder zur Sicherstellung einer sehr hohen Bahngenaugigkeit der Weg bzw. Drehwinkel sein. Die übergebene Datei ist so aufgebaut, dass sie direkt nach dem Einlesen die entsprechende

Randbedingung erzeugt. Im anschließenden Rechenlauf ermittelt die Mehrkörpersimulation die Gelenkkräfte und Antriebsmomente.

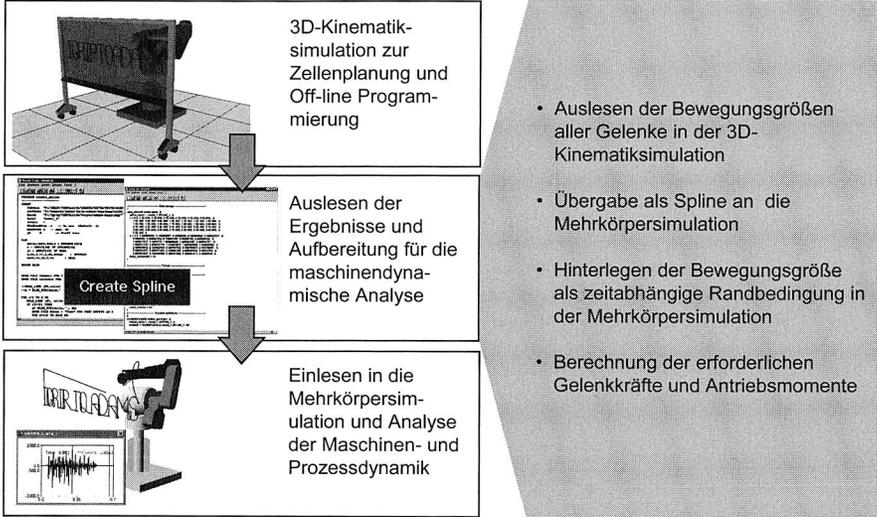


Bild 43: Schnittstelle zur Aufbereitung von Simulationsergebnissen der 3D-Kinematiks simulation in die Mehrkörpersimulation

Die Schnittstelle wird eingesetzt, wenn dynamische Effekte bei der Handhabung von Bedeutung sind: Diese können zum einen das Handhabungsgerät betreffen, etwa wenn eine größere Beschleunigung oder höhere Traglasten am Simulationsmodell getestet werden sollen. Damit ist es möglich, bei der Betreuung einer Fertigungseinrichtung eine schnelle und zuverlässige Aussage über die Erweiterbarkeit einer Anlage zu treffen. Im Sinne eines Regelkreises repräsentiert dies einen Arbeitsschritt zur Optimierung des Maschinenentwurfs. Zum anderen bietet sich die Datenübergabe an, wenn der Fügeprozess signifikante dynamische Anteile aufweist. Dies kann etwa bei der Verarbeitung biegeschlaffer Teile, etwa von Dichtungen, der Fall sein. In diesem Fall ist auch das Werkstück in der Mehrkörpersimulation abzubilden. Außerdem kann überprüft werden, ob bei einer Steigerung der Verfahrensgeschwindigkeiten die Haltekräfte des Greifers noch ausreichend sind oder ob die Gefahr besteht, dass das Werkstück in eine unkontrollierte Bewegung gerät. Die Gefahr des Bauteilabwurfs besteht etwa bei Bestückautomaten [18], [61].

Im Anschluss an die Mehrkörpersimulation sind weitere Analysen entsprechend der CAE-Umgebung in Bild 34 möglich. Außerdem können die so ermittelten Antriebsmomente für die Berechnung der aufgenommenen Motorleistung und damit für die Simulation des thermischen Verhaltens als Grundlage für die Parametrierung der Wärmequellen herangezogen werden.

5.5 Einsatz der durchgängigen CAE-Umgebung in einem beispielhaften Szenario

Im folgenden Abschnitt wird die durchgängige Werkzeugkette für das (fiktive) Beispiel eines Sechs-Achs-Knickarmroboters, an den sehr hohe Anforderungen bzgl. der Verfahrgeschwindigkeit und –genauigkeit gestellt werden, vorgestellt. Anwendungsfelder, in denen dies eine Rolle spielt, sind die Bestückung von Bauelementen, das Entlöten von Bauelementen, die Laserdirektstrukturierung oder das Bohren von Vias [59]. Dabei wird die verknüpfte Entwicklung von Maschinendynamik, thermischem Verhalten und Steuerungsentwicklung in der CAE-Umgebung (vgl. Bild 34) detailliert dargestellt. Der Einfluss der Technologie beschränkt sich hier auf Grund des fiktiven Charakters des Beispiels auf die Forderung hoher Genauigkeit und Geschwindigkeit.

5.5.1 Erstellung des konzeptionellen Mehrkörpermodells

Der erste Schritt nach der Festlegung der Funktionsstruktur der Fertigungseinrichtung als Sechs-Achs-Knickarmroboter besteht darin, die funktionsrelevanten Abmessungen zu definieren. Dies umfasst die Abstände der einzelnen Gelenke voneinander sowie ihre Drehwinkel. In diesem Schritt wird bereits der Arbeitsraum festgelegt. Gleichzeitig wird eine erste überschlägige Dimensionierung der bewegten Segmente und der Antriebe auf der Basis der geforderten Traglast und Beschleunigung des Werkzeugreferenzpunkts (TCP) durchgeführt.

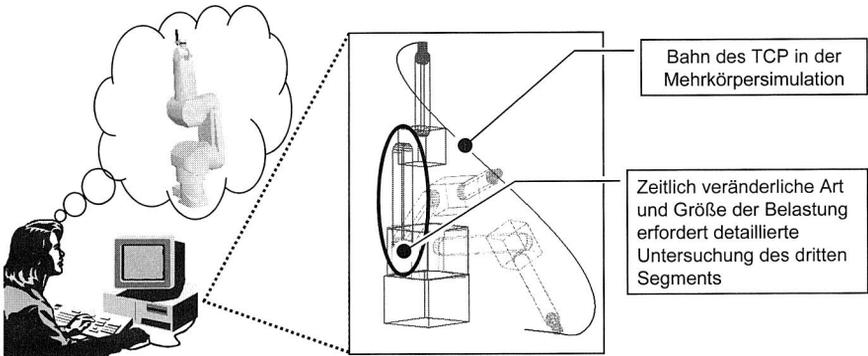


Bild 44: Erstellung des konzeptionellen Mehrkörpersimulationsmodells

Für die Konzipierung wird die Mehrkörpersimulation eingesetzt und ein konzeptionelles Modell mit der groben Geometrie der einzelnen Segmente erstellt. Dies ist ein Starrkörpermodell mit idealen Gelenken, das sehr schnell berechnet werden kann. Die Grundlage hierfür bilden die Ergebnisse der überschlägigen Berechnung. Das dazugehörige Modell ist in Bild 44 dargestellt. Mit ihm werden anschließend erste Analysen durchgeführt, etwa die Festlegung der zulässigen Achsdrehwinkel sowie die Untersuchung typischer Verfahrensbewegungen der Fertigungseinrichtung. Die Ergebnisse beinhalten die

erforderlichen Antriebsmomente und die damit erzielbaren Verfahrensgeschwindigkeiten. Somit ermöglicht die Verwendung des konzeptionellen Mehrkörpermodells eine erhebliche Beschleunigung der Auslegung und der Durchführung einer Machbarkeitsstudie.

Auf der Basis der Ergebnisse der Mehrkörpersimulation wurde das dritte Segment für den betrachteten Anwendungsfall als ein Bauteil identifiziert, das detailliert zu untersuchen ist, da es mit einer zeitlich veränderlichen Biegelast beaufschlagt wird und sich zu Anfang und Ende der Bewegung in Strecklage befindet (Bild 44). Die Anwendung der CAE-Umgebung für die Bauteilentwicklung geschieht deshalb am Beispiel dieses Bauteils. Sie ist in Bild 45 zusammengefasst. Die Gestaltung basiert dabei auf den Ergebnissen des konzeptionellen Mehrkörpersimulationsmodells.

5.5.2 Integrierte simulationsgestützte Bauteilentwicklung

Den Ausgangspunkt bilden dabei die Ergebnisse der konzeptionellen Studie im Mehrkörpersimulationsmodell. Dies schließt die Abstände der Gelenke und die benötigten Antriebskräfte sowie die angreifenden Massen- und Gelenkkräfte ein. Die Gestaltung beginnt mit den Funktionsflächen, z. B. den Lagerschalen. Daran schließt sich die Analyse und darauf aufbauende Optimierung des dynamischen und thermischen Verhaltens dieses Bauteils an. Dies ist von besonderer Bedeutung, da aus Montagegründen eine halboffene Schale gewählt wurde.

Die Ermittlung der Eigenfrequenzen zeigt, dass die erste Eigenform bei 220 Hz eine Torsion des gesamten Segments und eine Aufwölbung der beiden Kreisschalen darstellt, was als nicht akzeptabel eingestuft wird. Als Abhilfe wird eine Verrippung in der Mitte des Segments vorgeschlagen und anschließend wieder eine Berechnung der Eigenfrequenzen durchgeführt. Damit wird eine deutliche höhere erste Torsionsfrequenz von 697 Hz erzielt. Dieser Vorschlag aus der Simulation wird anschließend in der Konstruktion umgesetzt. Anschließend ist das thermische Verhalten zu überprüfen. Dazu werden die Temperaturen aus einer CFD-Simulation herangezogen, wobei das FE-Netz aus der dynamischen Analyse übernommen werden kann. Die Simulation ergibt ein deutliches Temperaturmaximum in den kreisförmigen Aufnahmen für die Lager, Motoren und Getriebe (vgl. Bild 45 Mitte). Die anschließende Berechnung der thermischen Verzerrung zeigt, dass diese Erwärmung eine Verwölbung des Segments verursacht. Dadurch kann die Arbeitsgenauigkeit beeinträchtigt werden und es ist eine steuerungstechnische Kompensation erforderlich.

Dieses Beispiel des Wechselspiels von Bauteilgestaltung und Simulation zeigt deutlich die Beschleunigung der CAE-Kette durch die durchgängige simulationsgestützte Planung. Es wird hiermit möglich, zu wesentlich detaillierteren Erkenntnissen über das Verhalten des Bauteils zu gelangen und so eine deutliche Steigerung der Qualität zu realisieren. Gleichzeitig werden die Ergebnisse der Bauteilentwicklung an die Entwicklung in den anderen Gestaltungsfeldern, etwa die Steuerungsentwicklung weitergegeben. Hier wird bereits das mechatronische Gesamtsystem im Zusammenspiel von Bauteilen, Mechanik, Steuerungstechnik und thermischem Verhalten getestet.

Zum Abschluss der Gestaltung werden geometrische Details, die nur noch minimale Auswirkungen auf das thermische Verhalten oder die Eigenfrequenzen haben, wie Bohrungen für die Abdeckung oder Kanäle für die Stromkabel, hinterlegt. Hierbei spielen vor allem Fragen der Fertigungsgerechtigkeit eine Rolle. Außerdem wird die Geometrie für das Modell der Roboterbibliothek abgeleitet.

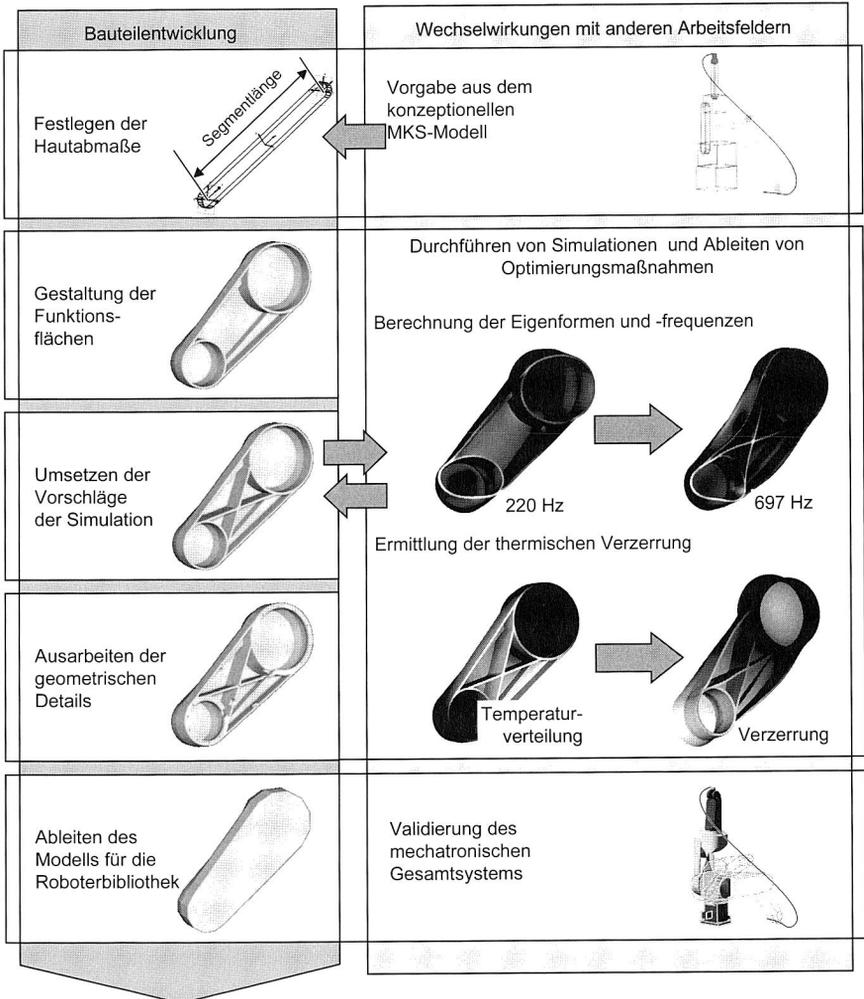


Bild 45: Durchgängige, simulationsgestützte Entwicklung eines Robotersegments

5.5.3 Simulation des Schwingungs- und Bewegungsverhalten

Die Simulation des Schwingungs- und Bewegungsverhaltens erfordert das Zusammenspiel von FEM und Mehrkörpersimulation. Dieses ist in Bild 46 dargestellt. Der Ausgangspunkt ist der optimierte Entwurf des dritten Segments. Dieses CAD-Modell wird im Preprocessor des FE-Systems automatisch vernetzt [60]. Mit der erweiterten FEM-MKS-Schnittstelle (vgl. Bild 36) wird das Segment als flexibler Körper an die Mehrkörpersimulation übergeben, wo Analysen von typischen Bewegungsprofilen durchgeführt werden. Hier zeigt sich bereits, welche Eigenformen für die Genauigkeit relevant sind. Damit wird der Bedarf an einer Versteifung des Bauteils identifiziert. Die Lasthistorie aus der Mehrkörpersimulation wird an den Prozessor zur Aufbereitung von Lastdaten übergeben. Hiermit werden konstante Verläufe identifiziert und die für das Entwicklungsziel entscheidenden Zeitabschnitte ausgewählt, aufbereitet, verdichtet und an die FEM übergeben. Für spätere, weitergehende Analysen wird die Lasthistorie in einer Datenbank abgelegt. Schließlich wird in der FEM eine Berechnung im Zeitbereich durchgeführt. Das Ergebnis ist die Schwingung des Ansatzpunktes des dritten Gelenks gegenüber dem des zweiten. Dieser Verlauf ist für einen Anfahrvorgang in Bild 46 ganz rechts dargestellt. Als Ergebnis werden die Steifigkeit des Bauteils beurteilt und die anteiligen Einflüsse von Bauteil und Koppelstellen quantifiziert.

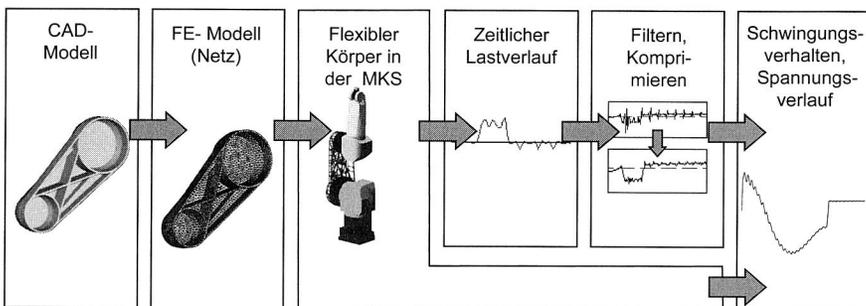


Bild 46: Zusammenspiel von FEM und Mehrkörpersimulation für die Bauteilauslegung bzgl. des Schwingungs- und Bewegungsverhaltens

5.5.4 Auslegung der Antriebsregelung

Für die Auslegung der Antriebsregelung ist es erforderlich, die zu regelnde Strecke möglichst genau zu identifizieren. Dabei werden, analog zum experimentellen Vorgehen [65], zwei Identifikationsmöglichkeiten genutzt. Dies ist zum einen die Sprungantwort, d. h. die Antwort auf einen Einheitssprung der Eingangsgröße und zum anderen die Sinusantwort, d. h. die Antwort des Systems auf ein sinusförmiges Eingangssignal (Bild 47). Hiermit lässt sich das Bode-Diagramm, d. h. der Phasen- und der Frequenzgang, ableiten.

Beim hier betrachteten Roboter wurden zwei Varianten des Mehrkörpermodells berechnet: Das dritte Segment wurde sowohl als starrer und einmal als flexibler Körper betrachtet. Als Eingangssignal dient das Antriebsdrehmoment am zweiten Gelenk. Bei der Anregung mit dem Einheitssprung von 100 Nm zeigt sich die in Bild 47 oben dargestellte Sprungantwort. Es ist eine abklingende Schwingung zu erkennen, die auf die Elastizität des Bauteils zurückzuführen ist. Aus der Anstiegssteigung und dem Abklingverhalten ist bereits eine Identifizierung möglich. Dies wird durch die Ermittlung des in Bild 47 unten dargestellten Bode-Diagramms noch vereinfacht. Es zeigt sich darüber hinaus ein erheblicher qualitativer Unterschied im Frequenz- und Phasengang zwischen der starren Modellierung und bei Berücksichtigung der Flexibilität.

Die Auslegung der Antriebsregelung erfolgt auf der Basis dieser Daten der Strecke, wobei das Verhalten des Roboters in einem angepassten, nicht-linearen Block gekapselt werden kann und damit die Rechenzeiten für den Antriebsentwurf erheblich reduziert werden. Bei der Verifizierung des Gesamtsystems am virtuellen Prototypen wird eine Kopplung von Mehrkörpersystem und Blocksimulator verwendet, wie sie mit dem Modul Adams/Controls zur Verfügung steht.

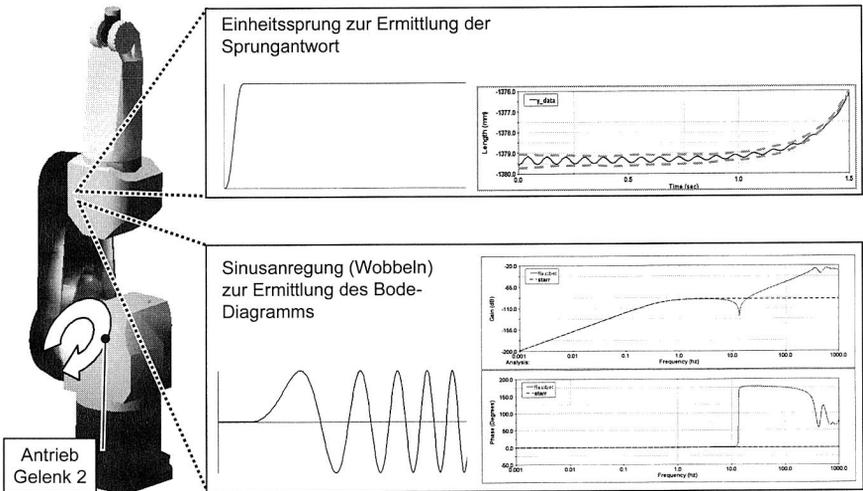


Bild 47: Systemidentifikation in der Mehrkörpersimulation

5.5.5 Simulationsgestützte Beherrschung der thermischen Verzerrung

Die Simulation des thermischen Verhaltens beginnt mit der Ermittlung der Temperaturverteilung am dritten Segment, die mit der CFD-Simulation durchgeführt werden kann. Im hier betrachteten Fall ist es ausreichend, das dritte Segment isoliert zu betrachten. Dies ist zulässig, da der Roboter nicht gekapselt ist und somit ein unmittelbarer Wärmeaustausch an die umgebende Luft stattfindet. Außerdem ist im Betrieb ein signifi-

kanter Bewegungsumfang zu erwarten. Bei der Festlegung der Systemgrenzen und Randbedingungen ist dann zu berücksichtigen, dass von den angrenzenden Bauteilen eine nicht zu vernachlässigende Wärmemenge abgegeben wird, und dass die Temperatur an den Koppelstellen a priori unbekannt ist. Dazu wird für die Modellierung der Wärmeleistung vereinfachend angenommen, dass die Wärmeabgabe der Antriebe in den Gelenken in alle Raumrichtungen gleich ist. Bei einem Würfel, der dieses Gelenk umgibt, wird demnach jede Fläche von einem Sechstel der gesamten Wärmeleistung durchflossen. Dieser Wert wird an den Verbindungsstellen der Segmente als Last in der CFD-Simulation hinterlegt.

Die so ermittelte Temperatur wird an die FE-Simulation des Gelenks übergeben, in der die Berechnung der thermischen Verzerrung erfolgt. Hiefür wird die in Abschnitt 5.2 vorgestellte Schnittstelle verwendet. Im hier betrachteten Fall interessiert vor allem die Verlagerung des zweiten Gelenkpunkts bzgl. des ersten. Dazu wird eine statische Berechnung der Bauteilverzerrung bzgl. des fest eingespannten ersten Gelenkpunkts durchgeführt. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Bild 48 zehnfach überzeichnet dargestellt. Eine entscheidende Aussage bei der Ermittlung der thermischen Verzerrung ist die Auswirkung auf den Werkzeugreferenzpunkt (TCP). Hier interessiert vor allem, ob nur eine lineare Verlängerung vorliegt, die sehr einfach durch eine Korrektur des Sollwerts der Antriebsregelung kompensiert werden kann, oder ob eine komplexe Verformung vorliegt.

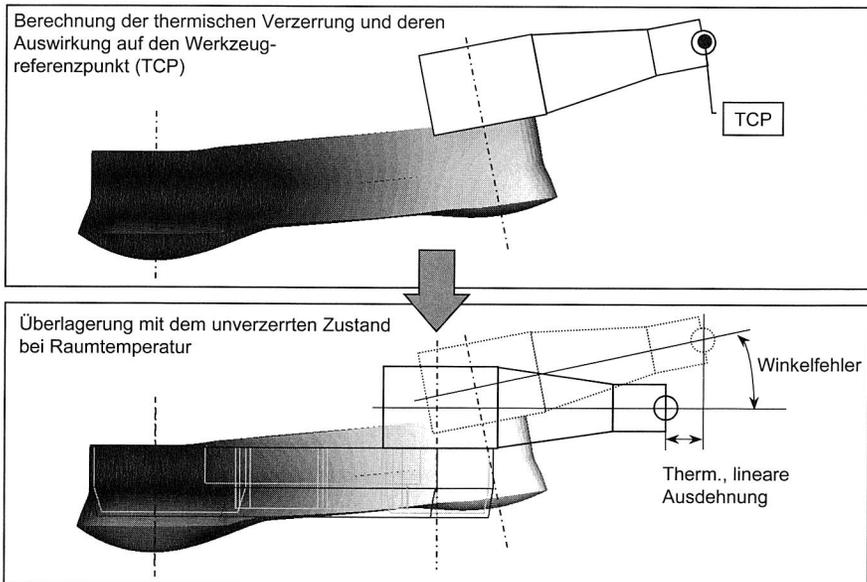


Bild 48: Simulationsgestützte Ermittlung der thermischen Verzerrung des dritten Segments (Verformung zehnfach überzeichnet)

In Bild 48 ist bei der Überlagerung mit dem unverzerrten Zustands bei Umgebungstemperatur ein deutlicher Winkelfehler zu erkennen. Als Ergebnis dieser Berechnung wird eine Änderung der Konstruktion des Segments vorgeschlagen. Da dies in diesem Beispiel aus konstruktiven Gründen nicht möglich ist, ist eine genaue Analyse des Einflusses auf die Verlagerung des Werkzeugreferenzpunkts erforderlich, der über vier weitere Gelenke angebunden ist. Dies beinhaltet die Analyse der Verzerrung bei unterschiedlichen Lastprofilen und damit unterschiedlicher, in die Gelenkpunkte eingebrachter Wärmeleistungen.

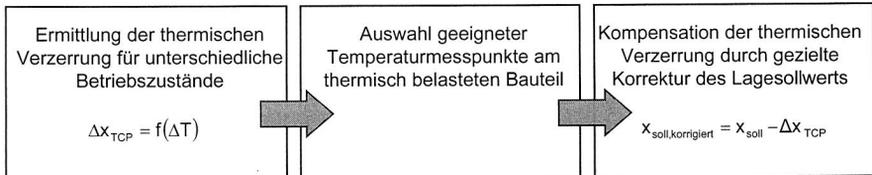


Bild 49: Grundprinzip der thermischen Kompensation

Für die Realisierung einer thermisch kompensierten Fertigungseinrichtung ist anschließend ein funktionaler oder systemtheoretischer Zusammenhang zwischen der Temperaturverteilung und der Verlagerung des Werkzeugreferenzpunktes zu ermitteln. Dabei ist es entscheidend, Messpunkte zu identifizieren, deren Temperatur direkt mit der Verlagerung korreliert. Die entsprechende Funktion ist anschließend zu identifizieren und ihre Umkehrung in den Lagesollwertkreis der Maschinensteuerung zu integrieren [47].

5.5.6 Rückkopplung von Daten aus dem Betrieb an die Maschinenentwicklung

Nach Abschluss der Feingestaltung und Parametrierung von Bauteilen und Maschinensteuerung werden die Daten für die simulationsgestützten Planungsaufgaben beim Betreiber abgeleitet. Hierbei spielt vor allem die 3D-Kinematiksimulation eine wesentliche Rolle. Für die Ableitung eines Modells, das in einer Bibliothek abgelegt wird, sind die folgenden Informationen relevant:

- Vereinfachte Hüll-Geometrie der einzelnen Bauteile und -gruppen für Layoutplanung und Kollisionsuntersuchungen
- Struktur der kinematischen Kette
- Maximal zulässige Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Wege / Winkel der einzelnen Achsen und des Werkzeugreferenzpunktes.

Auf Grund des weit gefächerten Einsatzbereiches der 3D-Kinematiksimulation, der von der Planung einer neuen Fertigungslinie bis zur Offline-Programmierung (vgl. [24], [61]) reicht, ist der Rücktransfer dieser Daten ein wesentlicher Aspekt der durchgängigen Planung entlang des Lebenszyklus.

Darüber hinaus kann sich beim Einsatz neuer Technologien die Frage ergeben, ob die zusätzlichen Anforderungen mit der vorhandenen Fertigungseinrichtung erfüllt werden können. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 50 dargestellt. Hier wurde in der 3D-Kinematiksimulation eine Pick- und Place-Bewegung geplant. Nunmehr wird eine erhebliche Steigerung der Traglast gefordert. Dazu werden die Gelenkwinkel als Funktionen der Zeit aus der 3D-Kinematiksimulation exportiert und an das Mehrkörpersimulationsmodell, die virtuelle Maschine beim Entwickler, übergeben. Dort findet dann eine Simulation unter Berücksichtigung der Flexibilität statt. Dabei zeigt sich ein deutliches Überschwingen bei der Berücksichtigung der Bauteilflexibilität (rechts oben in Bild 50). Für die zusätzliche geforderte Leistungscharakteristik des Roboters wäre also eine konstruktive Anpassung des dritten Segments erforderlich. Außerdem werden in der Mehrkörpersimulation die Antriebsmomente ermittelt, die für die vorgegebene Bewegung erforderlich sind. Die Daten aus der Mehrkörpersimulation fließen anschließend direkt in die CAE-Umgebung ein, wo sie für die Überprüfung des Steuerungskonzepts oder, wie in Bild 50 dargestellt, für die Nachrechnung von Bauteilen auf der Basis realer Betriebsdaten dienen können.

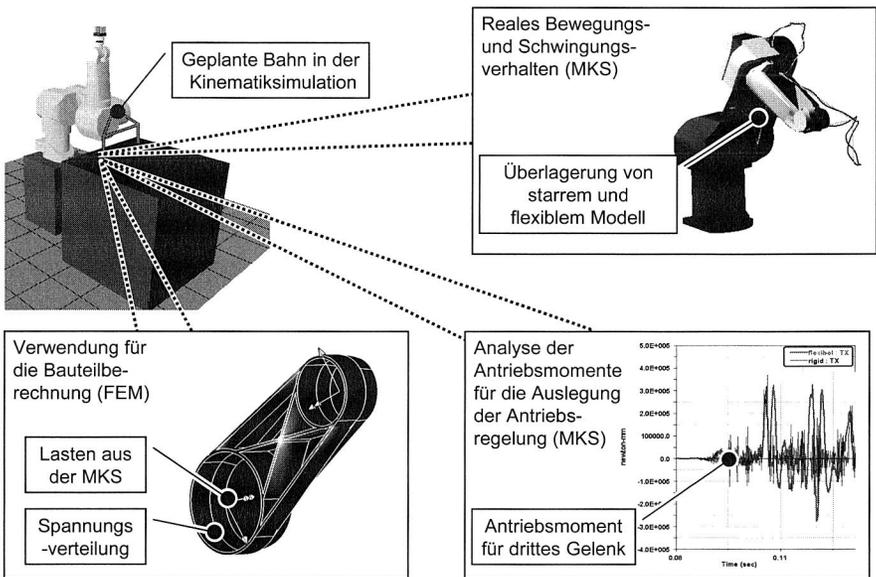


Bild 50: Nutzung von Planungsdaten der 3D-Kinematiksimulation in der Maschinenentwicklung

Aufbauend auf der Anwendung der CAE-Umgebung für die durchgängige, simulationsgestützte Planung am (fiktiven) Beispiel eines Roboters stellen die folgenden Kapitel 6 bis 8 Planungsaufgaben vor, bei denen jeweils der adäquate Teil der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik und der in Bild 34 gezeigten CAE-Umgebung zum Einsatz kommt.

6 Technologiebasierte Neuplanung einer Anlage zur Laserdirektstrukturierung von Leiterplatten

Im folgenden Kapitel werden die Methodik und die CAE-Umgebung angewendet, um parallel zur Entwicklung des Fertigungsprozesses die dazugehörige Fertigungsumgebung zu projektieren. Diese sehr frühzeitige Anwendung wird am Beispiel eines Fertigungssystems für die Herstellung von SBU-Leiterplatten in einem Additivverfahren dargestellt. Hierzu werden zunächst das Verfahren sowie seine Anforderungen an die Fertigungsumgebung diskutiert. Dabei zeigt sich, dass insbesondere die Laserdirektstrukturierung detailliert zu betrachten ist. Das Ziel dieser Planungsaufgabe stellt das Systemkonzept dar, für das ein Simulationsmodell als Funktionsdemonstrator (vgl. Abschnitt 4.2.1) erstellt wird. Dieser Anwendungsfall wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Projekt PRIME¹¹ durchgeführt.

6.1 Technologisches und produktionstechnisches Umfeld

Die in PRIME verfolgte Technologiekette ist ein volladditives Verfahren zur Herstellung der äußeren Lagen von SBU-Leiterplatten. Es umfasst die in Bild 51 dargestellten, maßgeblichen Prozessschritte Auftragen des Katalysators, Aktivieren des Katalysators durch Laserdirektbelichtung und damit Definition des Leiterbildes sowie stromlose Kupferabscheidung bis zu Sollstärke. Anschließend erfolgt nach einem Prüfschritt das Oberflächenfinish (z. B. Nickel-Gold und Lötstopplack) oder es wird eine weitere Lage hinzugefügt.

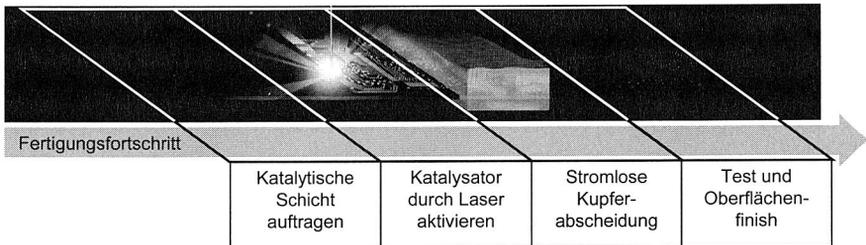


Bild 51: Grundprinzip der volladditiven Leiterplattenherstellung mit Laserdirektbelichtung

In die Planung der Fertigungsanlage gehen vor allem zwei Punkte ein: Zum einen die Parameter des Prozesses, die in experimentellen Untersuchungen an Laboraufbauten gewonnen werden und zum anderen die Anforderungen des produktionstechnischen Umfelds. Letzteres beinhaltet u. a. Fragen der zu erreichenden Arbeitgeschwindigkeit und der sie beeinflussenden Größen, des Automatisierungsgrades, der informations-

¹¹ PRIME - Program for Re-engineering and Innovating Printboard Manufacturing and Equipment, Brite Euram Projekt, 09/1998 – 08/2002; Projektpartner: MBDA Europe, Shipley Europe Plc., Coates Electrophotographics, Cimulec, Elbasa S.A., Bayerisches Laserzentrum gGmbH, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen.

technischen Anbindung sowie die Spezifikation des herzustellenden Produkts und die Gegenüberstellung mit potentiell konkurrierenden Technologien, insbesondere der weit verbreiteten subtraktiven Prozesskette, die im Weiteren als Referenz dient.

Ausgangssituation in der Leiterplattenfertigung

Die subtraktive Prozesskette zur Herstellung von Leiterplatten umfasst eine Vielzahl von Produktionsschritten, wie an Hand von Bild 3 gezeigt wurde. Im industriellen Auftragsdurchlauf stellt die tatsächliche Bearbeitungszeit nur den geringsten Teil der Durchlaufzeit eines Auftrags dar, Warte- und Liegezeiten nehmen den bei weitem längsten Teil ein. Dies stellt insbesondere für die Fertigung von hochintegrierten, mehrlagigen Leiterplatten ein Problem dar, da die meisten Prozessschritte mehrfach durchlaufen werden. Dadurch warten vor einer Fertigungsstation mehrere Lose von Halbfabrikaten auf die weitere Bearbeitung. Die subtraktive Prozesskette weist darüber hinaus eine große Zahl nasschemischer Schritte auf, die durch eine erhebliche Umweltbelastung gekennzeichnet sind. Hier sind besonders die Schritte zum Ätzen des Kupfers und zum Entfernen des Ätzresists (Zinn oder Zinn-Blei) zu nennen. Darüber hinaus stellt die Verwendung von Masken zur Belichtung einen erheblichen Nachteil bzgl. der Variantenflexibilität dar; aus diesem Grund ist der zunehmende Einsatz photosensitiver Filme mit Laserdirektbelichtung festzustellen.

Technologische Innovationen der neuen Prozesskette

Die Kerninnovation der Prozesskette ist die direkte Strukturierung des katalytischen Substrats durch Laseraktivierung. Hierfür ist eine geeignete Materialentwicklung erforderlich, da die katalytische Substanz direkt in das Schaltungsträgersubstrat eingebracht wird. Die Kupferabscheidung erfolgt vollständig stromlos, im Gegensatz zur subtraktiven Prozesskette, bei der nur eine Schicht von einigen Mikrometern Dicke abgeschieden wird und anschließend eine elektrolytische Verstärkung erfolgt. Dies erfordert eine deutliche Beschleunigung der Abscheidungsgeschwindigkeit. Damit ist ersichtlich, dass für die Prozesskette eine optimale Abstimmung der Materialentwicklung und der Lasertechnik entscheidend ist. Die Planung der Fertigungseinrichtung für diese Technologie hat tiefgreifende Unterschiede gegenüber der subtraktiven Prozesskette zu berücksichtigen. Die Arbeitsschritte der technologiebasierten Neuplanung, die parallel zur Entwicklung der Technologie erfolgt, konzentrieren sich damit vor allem auf die Maschine zur Laserbearbeitung, die nach Möglichkeit auch zum Laserbohren der μ -Vias einsetzbar sein soll. Hierfür ist eine Spezifikation der CAD/CAM Datenstruktur, des Maschinenkonzepts und der Einbindung in das produktionstechnische Umfeld zu erstellen.

6.2 Grundsätzliches Vorgehen für die Planung

Die globalen Ziele bzgl. Zeit, Produktqualität und Kosten werden zunächst in quantifizierbare Größen gegliedert. Dabei wird die Methodik der Nutzwertanalyse verwendet, um eine unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Kriterien abbilden zu können (Abschnitt 4.2.1). Mit diesen Randbedingungen erfolgt die Analyse kommerziell verfügbarer Maschinen und Komponenten.

Darauf aufbauend erfolgt das Konzipieren der Maschine zur Laserdirektbelichtung, wobei das fertigungstechnische Umfeld mit berücksichtigt wird, sowohl bzgl. seiner Anforderungen, etwa der Bearbeitungszeit, als auch der Anforderungen der Maschine an die Struktur des Fertigungssystems und der Auftragsverteilung. Auf dieser Basis ist dann das geeignetste Konzept auszuwählen. Bild 52 fasst diese Bottom-up-Methodik zusammen.

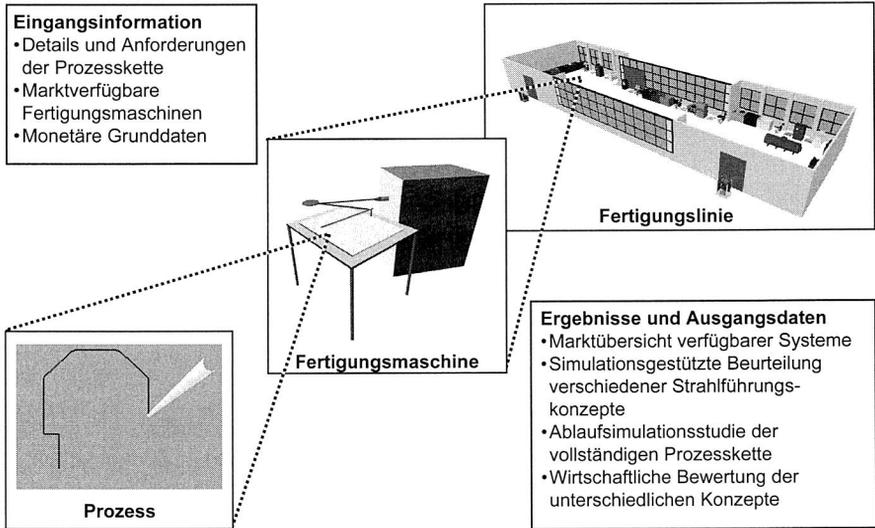


Bild 52: Planungssystematik auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen für die technologiebasierte Neuplanung einer Maschine zur Laserdirektbelichtung

Diese Arbeitsschritte werden durch den Einsatz der 3D-Kinematiksimulation für die Maschinenentwicklung und der Ablaufsimulation für die Betrachtung des Gesamtsystems unterstützt. Dabei werden die wechselseitigen Beeinflussungen von Maschinenentwicklung und Fertigungssystemplanung deutlich. Die Ergebnisse der Ablaufsimulation dienen außerdem als Eingangsdaten für die Ermittlung der Herstellungskosten.

6.3 Zielsystem der technisch-wirtschaftlichen Bewertung

Das übergeordnete Ziel ist es, durch den Einsatz innovativer Materialien und Bearbeitungstechnologien eine Verbesserung der fertigungstechnischen Kenngrößen wie Durchlaufzeit, Kosten und Flexibilität zu erzielen. Hierfür wird in einem umfassenden Reengineeringansatz die gesamte Prozesskette überprüft und an die Herausforderungen aus der Miniaturisierung, dem Kostendruck sowie den verkürzten Produktlebenszyklen angepasst [2]. Zur Erreichung dieser Ziele werden folgende Ansätze gewählt:

- Verringerung der Zahl der Prozessschritte durch leistungsfähige Prozesse und Fertigungseinrichtungen und dadurch Reduzierung der Produktionskosten

- Verminderung der Umweltbelastung durch Substitution nasschemischer Schritte
- Erhöhung der Flexibilität durch Direktbelichtung und CAD/CAM Kopplung

Der zu erreichende Qualitätsstandard ist durch die Strukturfeinheit und die Ausbringung der subtraktiven Prozesskette vorgegeben. Um eine quantifizierbare Bewertung der Erreichung der Ziele vornehmen zu können, ist zunächst ein geeignetes Zielgrößensystem zu entwerfen. Dies geschah zusammen mit zwei Leiterplattenfertigern im PRIME Projekt. Es zeigt sich, dass das unterschiedliche Produktspektrum dieser potentiellen Anwender einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Prioritäten ausübt. Leiterplattenhersteller B konzentriert sich auf die Prototypenherstellung sowie den Luftfahrt- und Verteidigungssektor, während Hersteller A seinen Schwerpunkt im Bereich der Telekommunikation hat.

Die identifizierten Kriterien gliedern sich zunächst in die fünf Hauptkategorien *Produkt*, *Produktion*, *Flexibilität*, *Umweltbelastung* und *bereits verfügbare Prozesskenntnisse*. Die Festlegung der relativen Bedeutung der einzelnen Kriterien erfolgt durch paarweise Abwägung, welches Kriterium wichtiger ist. Dieses Kriterium wird mit einem Zählpunkt gewichtet. Die prozentuale Bedeutung des Kriteriums ergibt sich nach der Durchführung aller paarweisen Vergleiche aus dem Quotienten der Zählpunkte des Kriteriums zu der Gesamtzahl aller Zählpunkte für alle Kriterien.

Neben den technischen Kriterien sind die Herstellkosten für die industrielle Einführung ausschlaggebend. Hierfür wird die Herstellung einer vierlagigen Leiterplatte in Subtraktivtechnik als Referenzprozess herangezogen.

6.3.1 Kriterien für die technische Bewertung

Bezüglich der technischen Kriterien wurden die Anforderungen, die das Produkt und seine Herstellung betreffen, als die bei weitem wichtigsten eingestuft. Die Flexibilität wurde insbesondere von Hersteller B als wichtig angesehen, wobei hier insbesondere die Variantenflexibilität entscheidend ist. Die ausschlaggebenden Kategorien Produkt und Produktion werden in weitere, messbare Einzelkriterien aufgegliedert und bzgl. ihrer Relevanz gewichtet. Das Zielkriteriensystem ist für die produktionsbezogenen Kriterien in Bild 53 dargestellt.

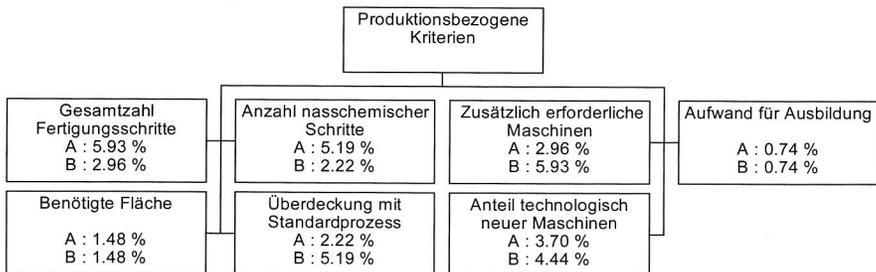


Bild 53: Relative Gewichtung der produktionsbezogenen Kriterien

Die Analyse der Relevanz, die die beiden Leiterplattenhersteller den Kriterien zumessen, zeigt, dass beide an vielen Punkten zu einer vergleichbaren Einschätzung gelangen: So ist die Anforderung bzgl. des Anteils technologisch neuer Fertigungseinrichtungen gleich hoch, die einer zusätzlichen Ausbildung des Personals als gleich unbedeutend gewichtet. Dies erklärt sich aus dem Gesamtumfeld der Leiterplattenfertigung, das ja durch die kurzen Produkt- und Technologielebenszyklen gekennzeichnet ist. Ähnliches gilt für den geforderten Amortisationszeitraum. Dagegen zeigen sich Abweichungen bei der Frage der Gesamtzahl und der Zahl der nasschemischen Fertigungsschritte sowie bei der Kompatibilität mit dem Standardprozess. Hier lassen die höheren Stückzahlen von Hersteller A größere Investitionen zu als bei B. Für die Einführung einer neuen Technologie sind diese Vorbehalte zu berücksichtigen.

Für jedes Kriterium ist nun festzulegen, wie die Werte des Kriteriums mit einem Erfüllungsgrad entsprechend Tabelle 4 korrelieren. Da im Folgenden der Schwerpunkt auf der Planung der Fertigungseinrichtung liegt, werden die in Tabelle 5 zusammengefassten Kriterien bzgl. der Produktion diskutiert:

		Bewertung (Punkte)				
		0	1	2	3	4
		unbefriedigend	gerade noch tragbar	ausreichend	gut	sehr gut (ideal)
Produktionsschritte	Gesamtzahl der Prozessschritte	>22	22 .. 19	18 .. 16	15 .. 11	< 11
	Anzahl nasschemischer Prozessschritte	>13	13 .. 10	9 .. 6	5	<5
Benötigte Fertigungseinrichtungen	Anzahl zusätzlich benötigter Maschinen	>3	3	2	2	1
	Aufwand für Ausbildung (benötigte Ausbildungszeit)	> 1 Monat	1 Monat .. 1 Woche	1 Woche	2 Tage	½ Tag
	Zusätzl. erforderliche Fläche	> 6 qm	4 ... 6 qm	4 qm ¹²	1,5 qm	< 1,5 qm
	Überdeckung mit Standardprozess: rel. Zahl d. Schritte, die sich nicht ändert	> 75 %	75 .. 80 %	80 .. 90 %	90.. 95%	> 95%
Einführungsriskien	Neu zu beschaffende Maschinen als Anteil der vorhandenen	> 30 %	20 .. 30 %	10 .. 20 %	5 .. 10 %	<5 %

Tabelle 5: Kriterien und Bewertungsstufen für die produktionsbezogenen Kriterien (vgl. Tabelle 4)

¹² Entspricht dem Flächenbedarf einer Maschine zur Direktbelichtung photosensitiver Filme

- Die Gesamtzahl der Prozessschritte beträgt bei der subtraktiven Prozesskette neunzehn, da eine Verringerung um 20 % angestrebt wird, beginnt der als „gut“ eingestufte Wertebereich bei fünfzehn einzelnen Schritten. Dabei werden nur Bearbeitungsschritte und keine Transport- oder Lageraktivitäten berücksichtigt.
- Als Referenz für den zusätzlich erforderlichen Flächenbedarf wird der einer kommerziellen Maschine zur Direktbelichtung photosensitiver Filme herangezogen.
- Die Anfangsinvestitionen für eine Fertigung nach dem volladditiven Verfahren werden auf die Kosten bezogen, die für die Fertigung von Leiterplatten in subtraktiver Technologie erforderlich sind. Diese Größe dient für die erste Phase als Referenz und wird in der späteren detaillierten wirtschaftlichen Untersuchung an die dann stabilere Datenlage angepasst.

6.3.2 Methodik für die wirtschaftliche Bewertung

Neben den technischen Fragen des geplanten Fertigungssystems und des darin zu fertigenden Produkts sind für die technologiebasierte Neuplanung vor allem die Herstellkosten des Produkts entscheidend. Hier gehen neben den reinen Materialkosten die Kosten für die Inanspruchnahme und Vorhaltung von Ressourcen wie Maschinen und Personal ein.

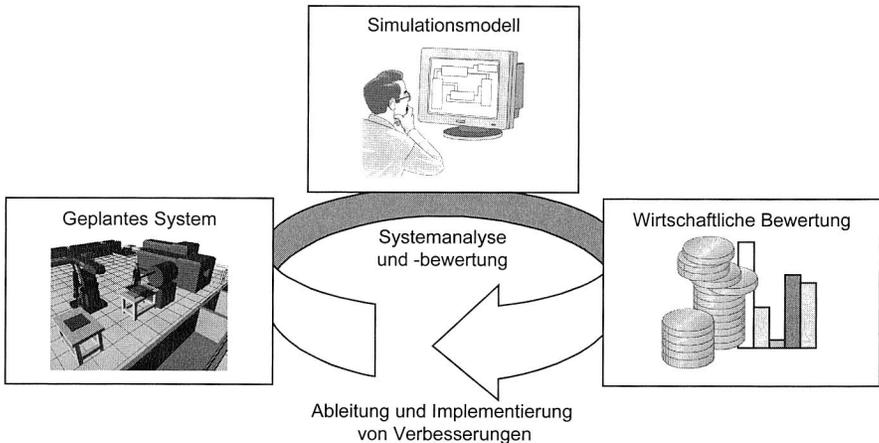


Bild 54: Methodik für die wirtschaftliche Bewertung (vgl. [183])

Zur Planung des Fertigungssystems werden die einzelnen Fertigungsmaschinen als black box betrachtet, die auf logistische und betriebswirtschaftliche Größen, wie z. B. Bearbeitungszeiten und Abschreibungen reduziert sind. Als Simulationswerkzeug wird hierfür die ereignisdiskrete Ablaufsimulation verwendet. In einem entsprechenden Simulationsmodell wird der Auftragsdurchlauf durch die Fertigung abgebildet. Hierbei werden die produktionstechnischen Anforderungen an die einzelnen Fertigungseinrichtungen, insbesondere die Laserdirektbelichtungsmaschine, identifiziert. Dies beinhaltet

zunächst die zulässige Vorbereitungs- und Prozesszeit, um zu verhindern, dass diese Maschine zum Engpass wird. Dieser Abwägung zwischen zu realisierendem Durchsatz und realisierbaren Anforderungen schließt sich die wirtschaftliche Bewertung des Fertigungssystems an. Hierfür wird das auf MS Access basierende Werkzeug Kotsim [39], [183] verwendet und an die Anforderungen dieser Aufgabenstellung angepasst. Mit den so ermittelten betriebswirtschaftlichen Kenndaten werden die Kostentreiber und damit die Optimierungspotentiale deutlich, die im weiteren Entwicklungsprozess umzusetzen sind. Diese iterative Methodik ist in Bild 54 zusammengefasst.

Für die Durchführung der wirtschaftlichen Bewertung sind die entsprechenden logistischen und betriebswirtschaftlichen Grunddaten erforderlich. Hierfür wird der in Bild 55 dargestellte Prozessbogen verwendet, der für jeden Prozessschritt die benötigten personellen, maschinellen, materiellen und energetischen Ressourcen erfasst und auch die Entsorgungskosten für umweltgefährdende und damit teuer zu entsorgende Abfälle berücksichtigt. Diese Daten werden soweit möglich in bereits existierenden Fertigungen erhoben. Falls dies nicht möglich ist, etwa für eine neu zu entwickelnde Maschine, werden Daten aus dem Simulationsmodell der technischen Entwicklung verwendet.

The diagram shows a 'Prozessbogen' (process sheet) with the following sections:

- Prozessschritt:** Includes a small table with columns for 'Material' and 'Menge (Einheit)'. Below it is an icon of a machine part.
- Fertigungseinrichtung:** Includes an icon of a machine.
- Personal:** Includes an icon of four people.
- Prozess-/Rüstzeit:** Includes an icon of a stopwatch.
- Material:** Includes an icon of a pile of material.
- Werkzeug, Vorrichtung:** Includes an icon of a drill bit.

The central 'Prozessbogen' form contains the following data entry areas:

- Prozessdaten:**
 - Material: Menge (Einheit), Kosten/Einheit
 - Prozessdauer: Min., Max., Mittel
 - Abwägung: min.
 - Arbeits: Menge (Einheit), Kosten/Einheit
- RESSOURCES:**
 - Berechnung prozessabhängiger Kosten:**
 - Hilfsstoffe: Menge, Einheit, Kosten/Einheit, Anz. Verbräuche
 - Energie: Menge, Einheit, Kosten/Einheit, Anz. Verbräuche
 - Instandhaltung: Kosten, Anz. Verbräuche
 - Werkzeuge: Einheiten, Anz. Verbräuche
 - Prozessabhängige Kosten, Ergebnisgrößen:**
 - Werkstoffkosten / %
 - Energiekosten / %
 - Werkzeugkosten / %
 - Maschinenkosten / %
 - Zusätzliche Kosten aus Maschinen-/Personalbögen:**
 - Maschinenlohnung
 - Maschinenbrennstoff
 - Personal
 - Anzahl
 - Personalbrennstoff

Below the main form are five additional categories with icons:

- Hilfsstoffe:** Icon of a spray gun.
- Zusatzstoffe:** Icon of a spray gun and a container.
- Entsorgung:** Icon of a recycling symbol.
- Energie:** Icon of a lightning bolt.
- Instandhaltung:** Icon of a wrench.

Bild 55: Datenerfassungsbogen für die Erfassung der wirtschaftlichen Grunddaten eines einzelnen Prozessschritts

Darüber hinaus werden die zur Bestimmung des Maschinen- und Personalstundensatzes erforderlichen Größen sowie allgemeine Grunddaten wie Energiekosten (Elektrizität und Druckluft) auf gesonderten Bögen erfasst. Zur Berechnung des Maschinenstundensatzes ist zunächst die jährliche Verfügbarkeit erforderlich. Diese wird gemäß dem

Schema aus [127] ermittelt, indem vom Betrachtungszeitraum (ein Jahr) die nicht geplante Zeit (Betriebsruhe), die Wartungszeit sowie die organisatorische und technische Ausfallzeit abgezogen werden. Die nicht belegte Zeit durch fehlende Auslastung ist ein Ergebnis der Simulation und wird dort direkt abgebildet. In die Kosten für die Maschinenstundensatzermittlung gehen neben den kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen die Kosten für Wartung und Instandsetzung, Energie, Werkzeuge sowie die Raumkosten ein [68]. Daneben können weitere Kosten hinterlegt werden, die im Ablaufsimulationsmodell nicht abgebildet werden und direkt der Ressource zuzuordnen sind. Dies betrifft u. a. Personal, das direkt einer Maschine zugeordnet ist, oder die Kosten für die zeitabhängige Wiederbefüllung mit Zusatzstoffen (z. B. bei den nasschemischen Bädern).

Die Auswertung erfolgt vor allem bzgl. der Herstellkosten des Produkts und der Identifikation der Kostentreiber. Diese Auswertung kann unter Berücksichtigung der Gemeinkosten oder unter deren Vernachlässigung erfolgen. Letzteres ist insbesondere dann sinnvoll, wenn die Opportunitätskosten für in der Simulation nicht in Anspruch genommene Ressourcen einen wesentlichen Teil der Gemeinkosten ausmachen, diese aber in der realen Umgebung durch andere Aufträge genutzt werden.

6.4 Fertigungstechnische Anforderungen der Prozesskette

Zur Ableitung der benötigten Fertigungseinrichtungen sind die einzelnen Schritte der Prozesskette im Detail zu betrachten. Die betrachtete SBU-Prozesskette, bei der die äußeren Lagen der Leiterplatte sequentiell aufgebaut werden, setzt auf einer bereits prozessierten Leiterplatte auf. Diese kann eine konventionell hergestellte Innenlage sein oder eine Leiterplatte, auf die bereits eine SBU-Lage aufgebracht wurde. Auf dieses Ausgangsprodukt wird das mit dem Keramikpulver gefüllte Harz aufgetragen und entsprechend der Glasübergangstemperatur ausgehärtet. Das Keramikpulver (Metalloxid- bzw. -nitrid) dient als Katalysator, da es durch photochemische Effekte reduziert werden kann und somit die stromlose selektive Kupferabscheidung des Leiterbilds ermöglicht [158].

Der nächste Prozessschritt ist das direkte Laserbohren der μ -Vias. Anschließend wird das Leiterbild, d. h. die Leiterbahnen und Anschlussflächen, direkt strukturiert. Das Substrat wird so an den Stellen aktiviert, an denen im folgenden Schritt die stromlose Kupferabscheidung stattfindet. Diese wird bis zu der Stärke fortgeführt, die für die Leiterbahn gefordert wird. Dadurch unterscheidet sich die Prozesskette von anderen Verfahren, bei denen nur eine dünne Schicht abgeschieden und anschließend elektrolytisch verstärkt wird. Auch hiermit werden zusätzliche Fertigungseinrichtungen und Transportaktivitäten eingespart. Im Anschluss an die Verkupferung kann die nächste Lage aufgetragen werden oder die Oberflächenveredelung erfolgen.

Eine Übersicht gibt Bild 56 am Beispiel der Außenlagen einer vierlagigen Leiterplatte:

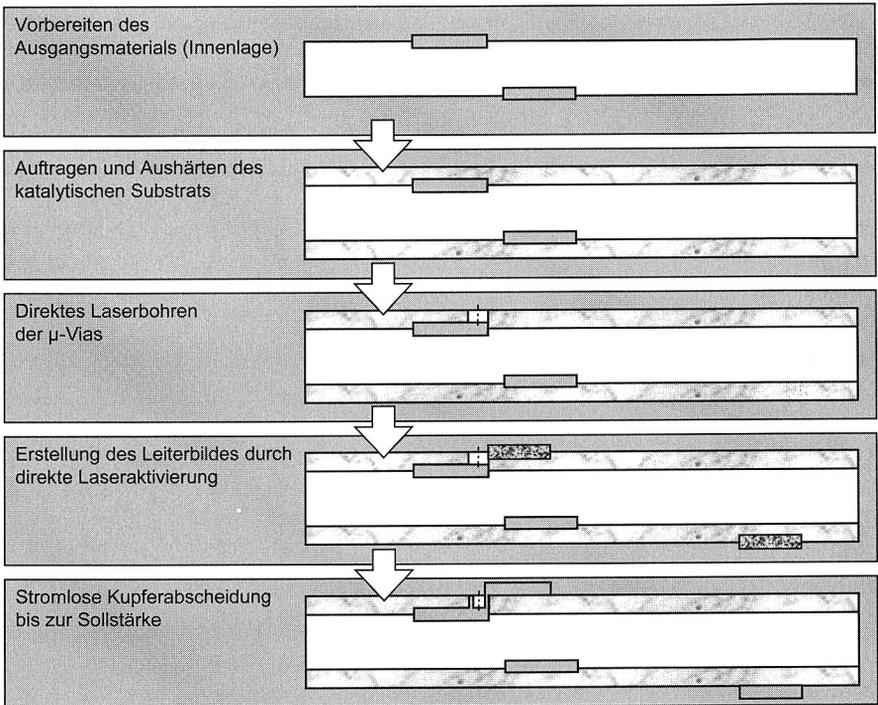


Bild 56: Detaillierte Prozesskette zur Laseraktivierung und stromlosen Kupferabscheidung auf katalytischem Substrat

Die für die einzelnen Fertigungsschritte benötigten Maschinen sind mit Ausnahme der Fertigungseinrichtung zur Laserstrukturierung am Markt verfügbar:

So können für den Auftrag des katalytischen Substrats doppelseitige Drucker (Schablonendrucker oder Siebdrucker) oder Maschinen zum Schichtgießen verwendet werden. Für das Aushärten des Substrats sind Durchlauföfen verfügbar.

Für das direkte Laserbohren von μ -Vias stehen Maschinen zur Verfügung, die mit frequenzverdreifachten Nd:YAG-Lasern bei 355 nm arbeiten. Damit ist im Gegensatz zum Bohren mit CO_2 -Lasern keine Kupferbegrenzung (Maskierung) um das zu erzeugende μ -Via nötig. Die stromlose Kupferabscheidung schließlich kann in denselben Anlagen vorgenommen werden, die schon bisher für die nasschemischen Prozesse verwendet werden. Gegebenenfalls ist hier eine Erweiterung der Kapazität erforderlich.

Diese Fertigungseinrichtungen fasst Bild 57 zusammen.

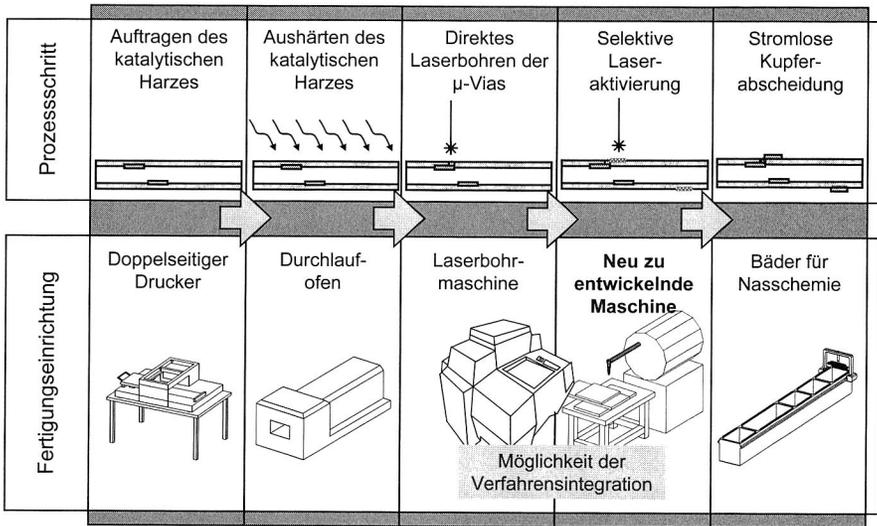


Bild 57: Prozessschritte und Fertigungseinrichtungen für die volladditive Prozesskette mit katalytischem Substrat

6.5 Konzipierung der Maschine zur Laserstrukturierung

Die Konzipierung der Fertigungseinrichtung zur Laserstrukturierung gliedert sich in drei Hauptarbeitspunkte: Zunächst werden kommerziell verfügbare Maschinen, die für ähnliche Aufgaben entwickelt wurden, analysiert. Anschließend werden in einem systemtechnischen Ansatz die relevanten Einzelkomponenten identifiziert, alternative Systemlösungen entwickelt sowie simulationsgestützt beurteilt. Schließlich wird die beste Lösung auf der Basis der Simulationsergebnisse ausgewählt und zur Realisierung vorgeschlagen.

6.5.1 Analyse marktgängiger Systeme zur Laserbearbeitung von Leiterplatten

Die am Markt verfügbaren Systeme zur Laserbearbeitung von Leiterplatten umfassen die Maschinen zum Laserbohren, insbesondere zur Herstellung von μ -Vias sowie Maschinen zur Laserstrukturierung von Leiterzügen. Beim Laserbohren ist zur Erfüllung der technologischen Aufgabe eine schnelle Positionierung in der Leiterplattebene und ein kurzer Laserpuls erforderlich. Damit unterscheidet sich die Aufgabe deutlich von der Laserstrukturierung, bei der eine definierte, gleichmäßige Bahnbewegung erforderlich ist. Diese Systeme können damit nicht durch eine einfache Anpassung für die neue Aufgabe umgerüstet werden.

Bei den Systemen zur Laserstrukturierung ist zwischen der Laserdirektbelichtung eines lichtempfindlichen Films und dem Laserabtrag, etwa einer Zinnschicht, zu unterscheiden.

den, da bei der Laserdirektbelichtung wesentlich geringere Laserleistungen benötigt werden. Das vorherrschende Prinzip bei der Laserdirektbelichtung besteht darin, dass der Laserstrahl zeilenweise über die Leiterplatte bewegt wird. Die Zeilenbewegung erfolgt über einen Polygonspiegel und die Vorschubbewegung über eine Linearachse. In diesen Maschinen kommen cw-Laser (etwa Argon-Ionen-Laser) zum Einsatz, die bei der relativ geringen benötigten Laserleistung sehr hohe Zeilengeschwindigkeiten von mehr als $200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ermöglichen [164].

Beispiele für diesen Maschinentyp sind die in [107], [94], [164], [87] beschriebenen Fertigungseinrichtungen. Für die hier betrachtete Prozesskette sind diese Maschinen auf Grund der geringen Laserleistung nicht geeignet. Das kinematische Grundprinzip, das eine sehr schnelle Bearbeitung, wenn auch bei geringer Laserenergiedichte, ermöglicht, wird im folgenden Schritt des Konzipierens wieder aufgegriffen.

Deutlich höhere Energien werden bei Maschinen zum Laserabtrag realisiert. In diesem Segment werden gepulste Laser eingesetzt und dadurch die erforderliche Energie zum Materialabtrag bereitgestellt. Die Interaktion von Leiterplatte und Laserstrahl wird über Spiegelsysteme und die XY-Bewegung eines Lineartisches realisiert. Diese Systeme ermöglichen es, unterschiedliche Materialien abzutragen. Das Spektrum umfasst Zinn und Lötstopplack [110] sowie Glas [108] bei direkt schreibenden Verfahren mit dem punktförmigen Laserstrahl eines Festkörperlasers. Eine Fertigungseinrichtung zum Abtragen mit dem rechteckigen Strahl eines Excimer-Lasers wird in [69] vorgestellt. Dort wird eine Maske verwendet, die die Konturen des Leiterbildes enthält. Diese Maske wird nach jeder Belichtung um die Abmessungen des Laserstrahls verfahren und so das Leiterbild definiert. Diese Maschine ist damit kein Direktbelichter im eigentlichen Sinne. Das Maschinenkonzept zeigt jedoch auf, dass mit einem Excimer-Laser nur dann wettbewerbsfähige Bearbeitungszeiten erzielt werden, wenn der rechtwinklige Strahlquerschnitt ausgenutzt wird.

Aus der Marktanalyse ergibt sich, dass für das entwickelte Verfahren keine adäquate Fertigungseinrichtung kommerziell verfügbar ist. Am nächsten kommt den Anforderungen die bei [110] beschriebene Maschine. Diese ist allerdings für den Materialabtrag vorgesehen, außerdem wird ein frequenzverdoppelter Nd:YVO₄-Laser bei 532 nm verwendet und nicht der frequenzverdreifachte Nd:YAG bei 355 nm. Das zu Grunde liegende Prinzip fließt beim Konzipieren der neuen Maschine ein. Darüber hinaus ist in dieser Phase zu untersuchen, welche der technologisch geeigneten Laserquellen (frequenzverdreifachter Nd:YAG- oder Excimerlaser) aus fertigungstechnischer Sicht das größere Potential bietet.

6.5.2 Identifikation der Gestaltungsbereiche

Eine Laserbearbeitungsmaschine besteht aus Subsystemen, die die einzelnen Funktionen: *Laserstrahl erzeugen*, *Laserstrahl formen*, *mit der Leiterplatte (Werkstück) interagieren* sowie *Gefährdung des Bedienpersonals verhindern*, bereitstellen.

Die Anforderungen der Technologieentwicklung an die Fertigungsmaschine zur Laserstrukturierung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Für die Aktivierung des

keramischen Katalysators ist eine Laserwellenlänge im UV-Bereich erforderlich, in den Experimenten wurden erfolgreich ein 248 nm Excimer-Laser und ein 355 nm frequenzverdreifachter Nd:YAG-Laser eingesetzt. Dabei ist die für die Aktivierung des Katalysators benötigte Leistungsdichte vergleichsweise hoch, die Aktivierung erfolgt unmittelbar unterhalb der Abtragsschwelle. Im Sinne der Minimierung von Maschinenwechseln und Rüstzeiten ist außerdem die Verfahrensintegration mit dem Laserbohren wünschenswert.

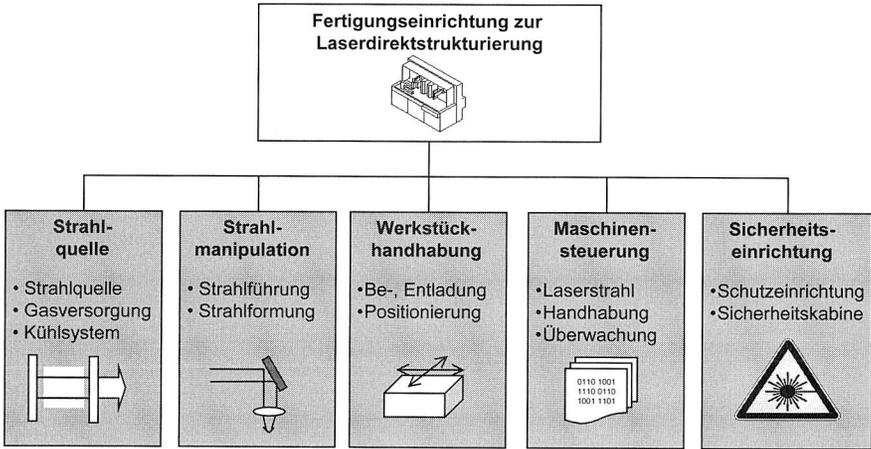


Bild 58: Hauptkomponenten einer Laserbearbeitungsmaschine [21]

Hierfür sind die in Bild 58 dargestellten Hauptkomponenten entsprechend der Bearbeitungsaufgabe auszuwählen und ggfs. zu gestalten.

Die primäre Erzeugung des Laserstrahls erfolgt in der Strahlquelle, wobei bei Gaslasern noch die Versorgung mit Gas als laseraktivem Medium sowie ggfs. eine Kühlung zu berücksichtigen sind. Die Strahlquelle stellt eine Komponente dar, die von spezialisierten Anbietern als Funktionsbaugruppe bezogen werden kann. Sie wird daher beim Konzipieren der Fertigungseinrichtung als black box betrachtet. Der Entwurf der Sicherheitseinrichtungen, insbesondere bzgl. des Lasers, hat in der Konzeptphase nur insofern Bedeutung, als eine vollständige Kapselung vorgesehen wird. Die sicherheitstechnische Feingestaltung der Fertigungseinrichtung erfolgt entsprechend der Methodik (vgl. Kapitel 4) in den Phasen des Entwerfens und Ausarbeitens.

Der Schwerpunkt der Arbeit beim Konzipieren umfasst die Realisierung der Wechselwirkung von Laserstrahl und Leiterplatte. Dies wird von der Strahlführung (für einen örtlich veränderbaren Laserstrahl) und der Werkstückhandhabung (bei bewegtem Werkstück) als elektro-mechanische Hardwarebaugruppen und der Maschinensteuerung als informationstechnische Maschinenkomponente realisiert. Die prinzipielle Aufgabe beim Konzipieren ist es, ein geeignetes Prinzip für die bahngesteuerte relative Bewegung von prozessierter Leiterplatte und Laserstrahl zu finden. Da dies prinzipiell eine kinemati-

sche und ablaufsteuerungstechnische Fragestellung ist, ist die 3D-Kinematiksimulation das geeignete Werkzeug zur anschließenden Analyse und Bewertung der unterschiedlichen Konzepte.

6.5.3 Entwicklung alternativer Konzepte für die Kinematik von Laserstrahl und Werkstück

Für die Kinematik der Strahlführung bei der Laserstrukturierung wurden vier alternative Konzepte entwickelt, die in Bild 59 zusammengefasst sind [33]. Eine vergrößerte Darstellung findet sich in den folgenden Abschnitten bei der Beschreibung der entsprechenden Simulationsmodelle.

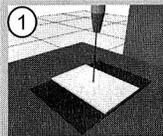
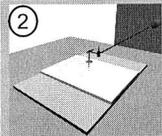
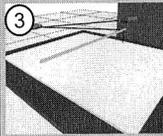
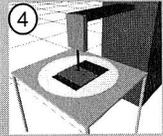
	XY-Tisch mit punktförmigem Strahl	Galvoscanner (plus XY-Tisch)	Rotierender Polygonspiegel	XYC-Tisch mit rechteckigem Strahl
				
Datenformat	Vektor	Vektor	Pixel	Vektor
Lasertyp(e)n	Nd:YAG (Excimer)	Nd:YAG	Nd:YAG	Excimer
Max. Geschwindigkeit bestimmt von	Tisch	Wiederholrate des Lasers	Wiederholrate des Lasers	Tisch
Max. Genauigkeit bestimmt von	Tisch	Galvoscanner	Zusammenspiel der Komponenten	Tisch
Max. Prozessfläche bestimmt von	Tisch	Scanner, Erweiterung durch Tisch	Länge: Tisch, Breite: Spiegel	Tisch

Bild 59: Alternative Konzepte für die Strahlführungskinetik zur Laserdirektstrukturierung [33]

Die einfachste Kinematik (Nr. 1 in Bild 59) beinhaltet einen ortsfesten, punktförmigen Strahl, unter dem die Leiterplatte in der Ebene bewegt wird. Diese Bewegung wird von einem ausreichend hoch auflösenden Lineartisch wahrgenommen. Dieser ist damit bestimmend für die realisierbare Geschwindigkeit, Genauigkeit und Prozessfläche. Die Genauigkeit und die Prozessfläche sind vergleichsweise einfach zu erhöhen, was jedoch auf Grund der größeren bewegten Massen die erzielbare Geschwindigkeit verringert. Dieses Prinzip eignet sich auf Grund des punktförmigen Strahls vor allem für den Nd:YAG Laser. Durch eine geeignete Maske und Projektionsoptik kann dieses Prinzip auch für einen Excimer-Laser verwendet werden. Hierbei wird das größte Potential des Excimer-Lasers, der große Strahlquerschnitt nicht ausgenutzt, während der Haupt-

nachteil gegenüber dem Nd:YAG Laser, die wesentlich geringere Pulsrate, voll zum Tragen kommt.

Um einen höheren Durchsatz zu realisieren, kombiniert das zweite Konzept aus Bild 59 den XY-Tisch mit einem System von Galvo-Scannern. Diese sind ein Paar Drehspiegel, die nach dem Galvanometerprinzip arbeiten. Ihre Achsen stehen aufeinander und auf der jeweiligen Strahlachse senkrecht. Sie gewährleisten eine sehr schnelle Bewegung des Strahls in einem begrenzten Arbeitsfeld [27]. Da der Excimer-Laser schon die geringere Geschwindigkeit des XY-Tischs nicht ausnutzen kann, eignet sich dieses Konzept ausschließlich für den Nd:YAG Laser. Dessen Wiederholrate bestimmt hier die maximal erreichbare Arbeitsgeschwindigkeit. Damit nutzt dieses Konzept die hohe Wiederholrate dieser Strahlquelle voll aus. Die maximal zur Verfügung stehende Prozessfläche entspricht durch die Kombination mit dem XY-Tisch der des ersten Konzepts. Dagegen wird die Arbeitsgenauigkeit durch die Galvo-Scanner bestimmt. Diese verursachen einen kissenförmigen Abbildungsfehler, der steuerungstechnisch zu kompensieren ist. Außerdem ist der Aufwand für die Justage nicht unerheblich. Damit legen sie die erzielbare Genauigkeit fest.

Bei den bisher vorgestellten Konzepten hängt die Arbeitsgeschwindigkeit direkt von der Komplexität des herzustellenden Schaltungsträgers ab, da das zu erstellende Schaltungsbild direkt abgefahren wird. Dies wird beim pixelorientierten Konzept drei aus Bild 59 vermieden. Hier fährt der Laserstrahl das Werkstück zeilenweise ab. An den Stellen, an denen keine Aktivierung erfolgen soll, wird der Laserstrahl durch eine Blende deaktiviert. Die Zeilenbewegung wird dadurch realisiert, dass der Laserstrahl von einem rotierenden Polygonspiegel abgelenkt wird. Der Zeilenvorschub erfolgt durch eine Linearachse. Die erzielbare Arbeitsgeschwindigkeit hängt von der Wiederholrate des Lasers ab, die die Zeilengeschwindigkeit festlegt. Der Arbeitsbereich ist in der Länge nur durch die Vorschubachse begrenzt, die Breite wird durch die optischen Komponenten vorgegeben. Die maximale Arbeitsgenauigkeit wird daher in Vorschubrichtung durch die Linearachse, quer dazu durch die Optik bestimmt.

Das vierte Konzept in Bild 59 wurde speziell für den Excimer-Laser entwickelt. Excimer-Laser emittieren einen rechteckigen Strahl, der je nach Anwendung beinahe quadratisch sein kann oder ein sehr hohes Seitenverhältnis aufweist. Daher ist der Excimer-Laser bei Maskenprojektionsmaschinen weit verbreitet. Für das hier zu entwickelnde Verfahren, das ja maskenlos arbeitet, werden daher typische Strukturen definiert, die als Vektordaten umgesetzt werden. Aus Gründen des Durchsatzes muss jede dieser Strukturen mit nur einem Puls strukturierbar sein. Die Struktur mit der größten Bedeutung ist eine rechteckige Leiterbahn bzw. ein Abschnitt davon. Die Leiterbahn entsteht dann durch Aneinandersetzen von einzelnen Stücken dieser Bahn, die jeweils mit einem Puls erzeugt wurden. Da auch hier eine ortsfeste Strahlquelle verwendet wird, ist es erforderlich, die Bewegung in der Ebene vom Tisch bereitzustellen. Dieser muss neben den beiden translatorischen Achsen eine Drehbewegung um die Hochachse ermöglichen und ist damit ein XYZ-Tisch (X-Achse, Y-Achse, C-Achse). Dieser zusätzliche Freiheitsgrad dient dazu, auch diagonale Leiterzüge aus rechteckigen Teilstücken

zusammensetzen. Der Drehtisch bestimmt die zu erreichende Arbeitsgeschwindigkeit und –genauigkeit sowie den zur Verfügung stehenden Arbeitsraum.

6.6 Simulationsgestützte Analyse der Maschinenkonzepte

Die geschilderten vier Konzepte werden als 3D-Kinematiksimulationsmodelle umgesetzt. An diesen wird das Verhalten des geplanten Systems analysiert, wobei die Bearbeitungszeit zentrale Bedeutung hat. Daneben interessiert, welche systematischen Einflüsse auf Genauigkeit und Geschwindigkeit aus dem jeweiligen Konzept herrühren. Die Verwendung der 3D-Kinematiksimulation bietet einen weiteren Vorteil: Für das Konzept, das anschließend in einen physikalischen Prototypen umgesetzt wird, kann direkt das entsprechende Simulationsmodell für die Offline-Programmierung verwendet werden.

6.6.1 CAM-Datenformate für die Simulation

Das Ziel der Simulation ist es, die einzelnen Konzepte aus Bild 59 einander gegenüberzustellen und den Einfluss unterschiedlicher Schaltungslayouts zu beurteilen. Dazu ist es nicht sinnvoll, das Schaltungsbild von Hand über Pfade mit nacheinander anzufahrenden Punkten zu teachen. Vielmehr sind die Maschinendaten automatisch in das Simulationsmodell einzulesen. Dies erfordert die Festlegung von entsprechenden Datenformaten. Bei der hier vorgenommenen Betrachtung ist zwischen Vektor- und Pixeldaten zu unterscheiden. Bei den Konzepten eins, zwei und vier aus Bild 59 wird ein Vektorformat benötigt. Das weit verbreitete Gerber-Datenformat [81] ist hier nicht verwendbar, da die verwendeten geometrischen Elemente nicht überschneidungsfrei angeordnet sind. Darüber hinaus sind diese Dateien nur in Ausnahmefällen bzgl. der Anzahl und Art der verwendeten Elemente optimiert. Sollen Eingangsdaten in diesem Format verwendet werden, so ist zunächst eine Umwandlung erforderlich, wie sie auch bei den in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Maschinen erfolgt. Für das Konzept zwei, bei dem ein Polygonspiegel eingesetzt wird, ist ein Pixelformat festzulegen.

Eng verbunden mit der Datenaufbereitung ist die Frage, welche Geometrielemente im Schaltungsentwurf zulässig sind, d. h. welche Restriktionen aus der Maschinengestaltung als Design Rules bzw. Manufacturing Rules bei der Produktentwicklung der Leiterplatten zu berücksichtigen sind.

Vektordatenformat

Für die Konzepte, die das Leiterbild direkt strukturieren, wird ein Vektordatenformat benötigt, das die einzelnen geometrischen Elemente eines Schaltungslayouts enthält (Bild 60). Dies sind vor allem die linienförmigen Leiterbahnen, die unterschiedlich orientiert sein können. Für die Tisch- bzw. Scannerbewegung ist die Information über die Orientierung entscheidend, da sie die anzutreibende Achse bestimmt. Darüber hinaus sind die Leiterplattenanschlussflächen (Pads) sowie die Kontaktierungen zwischen den Leiterplattebenen (Vias) zu strukturieren. Dies sind Strukturelemente, die nicht oder nur mit erheblichem Aufwand durch die selbe Bewegung wie die Leiterbahn erzeugt werden können. Die Art dieser Elemente hängt erheblich von der betrachteten Kinematik ab. Während beim XY-Tisch alle geometrischen Elemente in der selben Art und Wei-

se wie die Leiterbahnen erzeugt werden, sind bei der Kombination von Scanner und Tisch die kleinen Strukturen bevorzugt mit dem Scannerkopf zu bearbeiten. Beim Konzept vier für den Excimer-Laser sind schließlich alle Elemente mit Ausnahme gerader Linien gesondert zu betrachten. Hier wird eine Maske mit der zu erzeugenden Struktur in den Strahlengang eingeführt und so das Schaltungselement mit einem oder mehreren Pulsen belichtet. Darüber hinaus kann eine Änderung des Strahlquerschnitts erforderlich sein. Zu den betrachteten Elementen zählen die Kontaktflächen für die verwendeten Bauelementtypen und die Durchkontaktierungen (Vias) sowie bei Konzept vier alle bogenförmigen Leiterbahnelemente. Diese Strukturelemente sowie ihre Entsprechung in der Programmierung der 3D-Kinematiksimulation zeigt Bild 60.

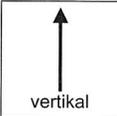
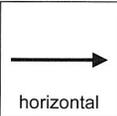
Strukturelement des Vektordatenformats	Entsprechende Offline-Programmierung
<p>Leiterzüge unterschiedlicher Länge und Breite</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>vertikal</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>horizontal</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>diagonal</p> </div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>① Bewegung des Tisches ② (und der Scannerspiegel)</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>④ Rechteckiger Strahl, Bewegung des Tisches</p> </div>
<p>Lands unterschiedlicher charakteristischer Abmessungen</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Pad</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Via</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Kreisbögen</p> </div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>① Bewegung des Tisches</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>② Bewegung der Scannerspiegel</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>④ Wechsel von Projektionsmasken</p> </div>

Bild 60: CAM-Datenformat für die Vektorstrukturierung und entsprechende Offline-Programmierung für die Maschinenkonzepte aus Bild 59

Das Vektordatenformat ist ein Textformat; es enthält die Anfangs- und Endpunkte der abzufahrenden Linien, sowie die Information, ob der Laser dabei strukturiert (aktiv ist). Für das Galvo-Scanner-Konzept wird des weiteren unterschieden, ob die Bewegung mit den Achsen des Tisches oder der Spiegel erfolgt. Im Fall des XYC-Tisches des Excimer-Lasers ist außerdem der Querschnitt des Laserstrahls und die Information, ob eine Projektionsmaske verwendet wird, zu implementieren.

Als Design bzw. Manufacturing Rules sind vor allem die Beschränkung auf möglichst eine Leiterbahnbreite, die weitestgehende Verwendung von μ -Vias, die keinen umgebenden Kreisring als Land benötigen sowie die Vermeidung gekrümmter Leiterzüge zu nennen. Außerdem ist die Anzahl unterschiedlicher Leiterplattenanschlussflächen zu minimieren.

Pixeldatenformat

Für das rasternde Konzept drei aus Bild 59 wird ein Pixelformat benötigt. Dieses teilt die Leiterplatte entsprechend der gewünschten Auflösung in einzelne Punkte (Pixel) ein. Da der Polygonspiegel eine gleichförmige, ununterbrochene Bewegung durchführt, enthält die Datei die Information, bei welchen Pixeln der Laserstrahl das Werkstück aktiviert und an welchen er nicht aktiv ist (z. B. über eine Blende). Hierfür wird das MS Windows Bitmap Format mit 1 Bit Farbtiefe verwendet. Dieses wird anschließend in ein internes Format umgewandelt, das die Information enthält, bei welchem Drehwinkel des Polygonspiegels der Laser zu aktivieren bzw. zu deaktivieren ist.

Bezüglich des Leiterplattendesigns ist zu fordern, dass die zu erzeugenden Strukturen deutlich größer sind als das Auflösungsvermögen der Maschine.

6.6.2 Punktförmiger Laserstrahl mit XY-Tisch

Die Kinematik für die Strukturierung mit einem XY-Tisch erfordert einen Tisch, der zwei unabhängig gesteuerte Linearachsen enthält, sowie den ortsfesten Laserstrahl.

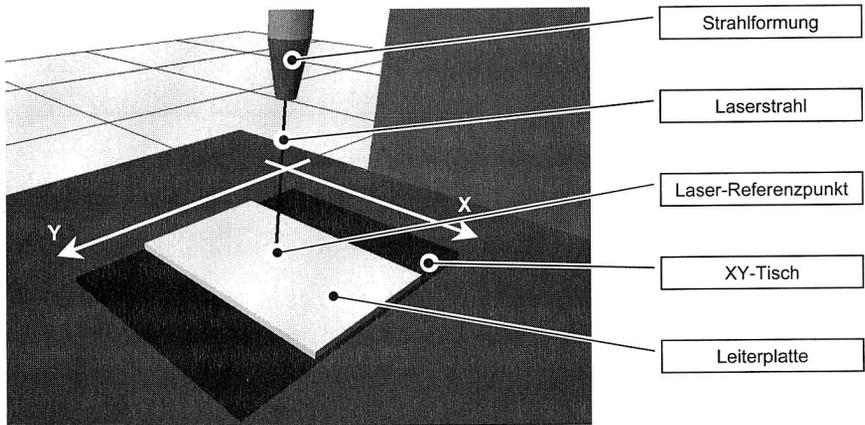


Bild 61: 3D-Kinematiksimulation des XY-Tisches

Das Simulationsmodell für dieses Konzept ist in Bild 61 dargestellt. Es beinhaltet die Bewegung der beiden Linearachsen, die mit zwei unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten verfahren werden, eine niedrigere für die Laserstrukturierung und eine höhere für die Tischpositionierung bei nicht aktivem Strahl.

Der Laserstrahl selbst wird in der 3D-Kinematiksimulation als ortsfestes, zylindrisches Werkzeug modelliert, dessen Referenzpunkt unmittelbar oberhalb der Leiterplatte liegt. Die Strukturierung der Leiterplatte wird durch die Verfolgung des Referenzpunkts (TCP-Trace) abgebildet. Das Aktivieren und Deaktivieren des Lasers geschieht in einer realen Maschine durch Einführen einer Blende in den Strahlengang. Es wird über das entspre-

chende An- und Ausschalten der Strahlgeometrie und der Pfadverfolgung des Referenzpunkts hinterlegt. Die hierfür benötigte Zeit wird im Modell als Wartezeit hinterlegt.

6.6.3 XY-Tisch mit Galvo-Scanner System

Das in Bild 62 dargestellte Konzept stellt eine Erweiterung des XY-Tisches um ein System aus Galvo-Scannern dar. Hierfür sind neben der Kinematik des Lineartisches die Scannerspiegel zu modellieren. Der Laserstrahl gelangt von der Quelle nacheinander auf die beiden Spiegel und von dort auf die Leiterplatte, die in der Ebene in X- und Y-Richtung beweglich ist. Dadurch werden wesentlich höhere Verfahrensgeschwindigkeiten für den Laserstrahl ermöglicht, als dies allein beim Lineartisch möglich ist. Im Gegenzug verfügen die Scanner nur über einen sehr begrenzten Arbeitsbereich [86].

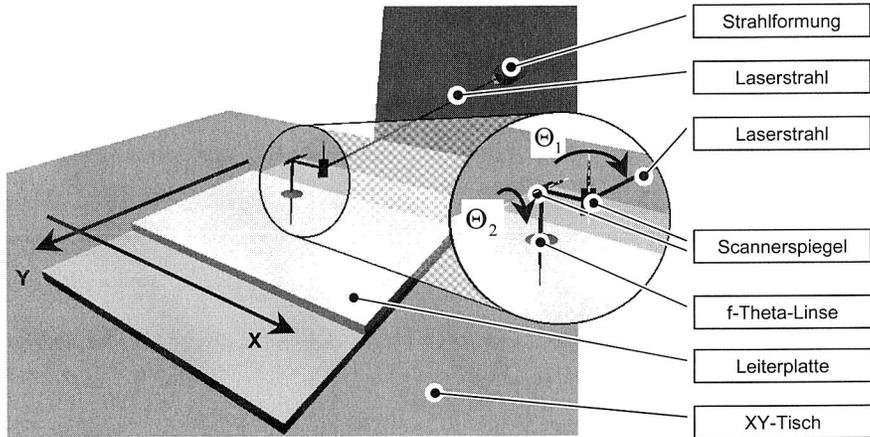


Bild 62: 3D-Kinematiksimulation des XY-Tisches mit Galvo-Scannern

Das Simulationsmodell baut auf dem des XY-Tisches auf und beinhaltet daher alle Komponenten, die bereits in Abschnitt 6.6.2 beschrieben wurden. Darüber hinaus ist die Kinematik der Spiegel und des Planfeldobjektivs (f-Theta-Linse) sowie der einzelnen Strahlstücke, die von ihnen abgelenkt werden, enthalten. Bei der Verfolgung des aktiven Laserstrahls wird weiterhin durch unterschiedliche Farben des TCP-Trace unterschieden, ob die erzeugte Struktur durch eine Bewegung des Tisches oder der Spiegel zu Stande kam. Dies kann entscheidend sein, da sich die Genauigkeit der Scanner von der des Tisches unterscheidet.

Das vergleichsweise geringe Arbeitsfeld des Scanners macht es erforderlich, den Arbeitsinhalt der Strukturierung zwischen den beiden, z. T. redundanten, Kinematiken aufzuteilen. Hierzu werden kleinere Strukturen, wie kurze Leiterbahnzüge oder Leiterplattenanschlussflächen, mit dem Scannersystem bei ruhendem Tisch bearbeitet. Längere Leiterbahnzüge werden durch die Bewegung des Tisches strukturiert. Um eine gleichmäßige Intensität des Lasers entlang der Bahn zu gewährleisten und damit Ein-

brennen oder Lücken zu vermeiden, ist eine überlagerte Bewegung der vier Achsen an solchen Übergangspunkten erforderlich. Hierzu ist im Modell die maximal zulässige TCP-Geschwindigkeit hinterlegt. Die Steuerung ist so ausgelegt, dass eine möglichst hohe Geschwindigkeit erreicht wird. Durch dieses Zusammenspiel wird gewährleistet, dass die Strukturierung mit einer Energiedichte innerhalb der geforderten Toleranz erfolgt.

Die f-Theta-Linse stellt bei dieser Strahlkinematik sicher, dass der Laserstrahl unabhängig von der Auslenkung der Spiegel senkrecht auf das Werkstück auftrifft. Hierbei tritt jedoch ein Abbildungsfehler, ein sog. Kissenfehler auf. Aus diesem Grund ist der Zusammenhang zwischen der Drehung der Spiegel und dem resultierenden Weg des Lasers auf der Leiterplatte nicht linear. Der Effekt dieses Fehlers ist in Bild 63 für die Teststruktur gezeigt, die auf dem in PRIME entwickelten Testlayout [2] (siehe auch Bild 66) die kleinste zu erreichende Struktur qualifiziert.

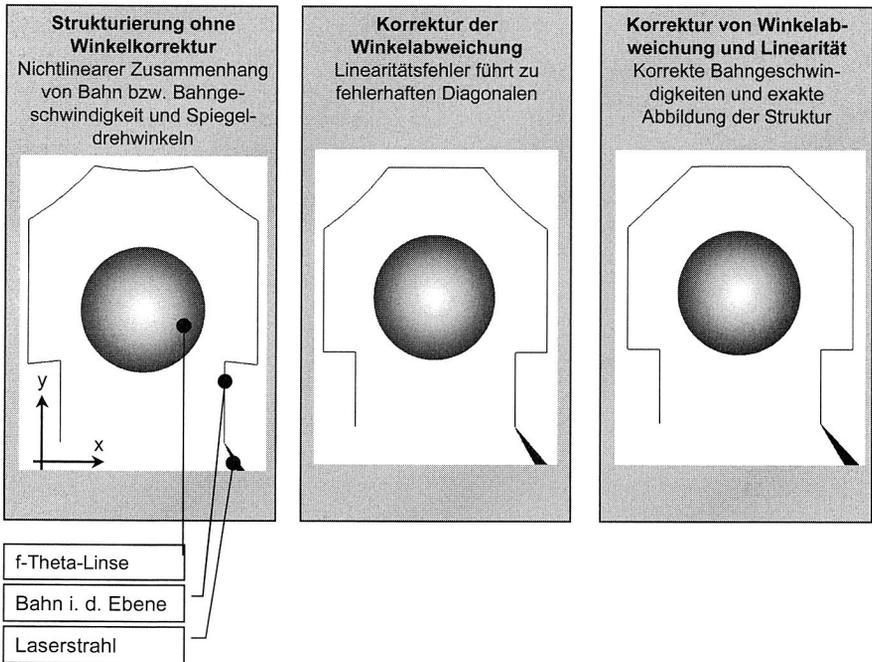


Bild 63: Einfluss des nichtlinearen Zusammenhangs der Spiegelwinkel und des Wegs in der Projektionsebene auf die erzeugte Struktur

Für die Kompensation dieser nicht akzeptablen Abweichung sind zwei Ursachen zu unterscheiden:

- Die Drehung des zweiten Spiegels erzeugt in der Linsenebene (und damit in der Leiterplattenebene) für den Auftreffpunkt des Strahls die Bahnkomponente in Y-

Richtung. Diese Komponente ist jedoch keine Gerade, sondern eine Hyperbel, sobald der erste Spiegel ausgelenkt ist. Dies zeigen die bogenförmigen horizontalen und diagonalen Bestandteile der Bahn in Bild 63 (rechts). Die Korrektur erfolgt durch eine Anpassung des Auslenkwinkels des ersten Spiegels.

- Vom Steuerprogramm werden der Kinematiksimulation für eine abzufahrende Linie der Anfangs- und der Enddrehwinkel übergeben. Diese interpoliert dann eine gleichmäßige Bewegung des anzusteuernenden Gelenks. Allerdings ist die Bewegung, die gleichmäßig erfolgen soll, nicht die des Spiegels, sondern des Strahlreferenzpunkts. Da diese translatorische Bewegung aber durch eine rotatorische Bewegung erzeugt wird, ist nicht gewährleistet, dass in jedem Fall auch die Geschwindigkeit des Lasers mit gleichmäßiger Geschwindigkeit erfolgt. Darüber hinaus ergibt sich ein Bahnfehler, wenn die gleichzeitige Bewegung beider Spiegel um unterschiedliche Winkel nötig ist, um eine Diagonale zu erzeugen (Bild 63, Mitte). Dies wird durch eine Anpassung der Drehwinkel der beiden Spiegel kompensiert.

Als Alternative zur Kompensation über die Maschinensteuerung bietet sich die Verwendung einer vergleichsweise teuren, sog. telezentrischen Planfeldoptik an [27]. Dieser Weg wird jedoch nicht weiter verfolgt, da eine steuerungstechnische Kompensation das bessere Aufwand-Nutzen-Verhältnis bietet. Die ausführliche Herleitung der in der 3D-Kinematiksimulation verwendeten Kompensationsformeln findet sich in Anhang A. Mit der Implementierung dieser Kompensationsformeln wird eine korrekte Abbildung des zu fertigenden Leiterbilds gewährleistet (Bild 63, rechts). Damit ist es möglich, mit dem Simulationsmodell sowohl die Bearbeitungszeiten zu ermitteln als auch die korrekte Umsetzung der EDA-Daten in der Maschine zu beurteilen.

6.6.4 Pixelbasiertes System mit Polygonspiegel und Linearachse

Bei den bisher betrachteten Konzepten fährt der Laserstrahl das Leiterbild direkt ab. Dadurch hängt die Bearbeitungszeit von der Komplexität des Schaltungsträgers, insbesondere der Gesamtlänge aller Leiterbahnen, ab. Dieser Nachteil wird beim pixelbasierten Verfahren vermieden. Hier fährt der Strahl die Leiterplatte zeilenweise ab, während diese mit konstantem Vorschub weiter bewegt wird. Dadurch wird die Bearbeitungszeit durch die Abmessungen der Leiterplatte und die gewählte Auflösung bestimmt. Die einzelnen Leiterbahnen werden bei diesem Konzept nicht mit einer kontinuierlichen und damit idealen Bewegung erstellt. Vielmehr werden bei jedem Durchgang des Lasers Punkte bzw. kurze Linienstücke erzeugt.

Für die Umsetzung des Strahlengangs in ein 3D-Kinematiksimulationsmodell (Bild 64) sind der rotierende Polygonspiegel, ein Umlenkprisma sowie die entsprechend abgelenkten Abschnitte des Strahls zu modellieren. Für den Zusammenhang zwischen der Winkelgeschwindigkeit des Spiegels und der Translationsgeschwindigkeit des Strahlreferenzpunkts auf der Leiterplatte gilt ähnlich wie in Abschnitt 6.6.3 ein nicht-linearer Zusammenhang. Dies führt bei ebenen Kantenflächen der Spiegel dazu, dass die äußeren Bereiche wesentlich schneller überstrichen werden als die inneren. Eine Kompensationsmöglichkeit ist die Verwendung von gewölbten Spiegelflächen. Daher sind im

Simulationsmodell keine Kompensationsalgorithmen zu hinterlegen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Modulation der Laserintensität.

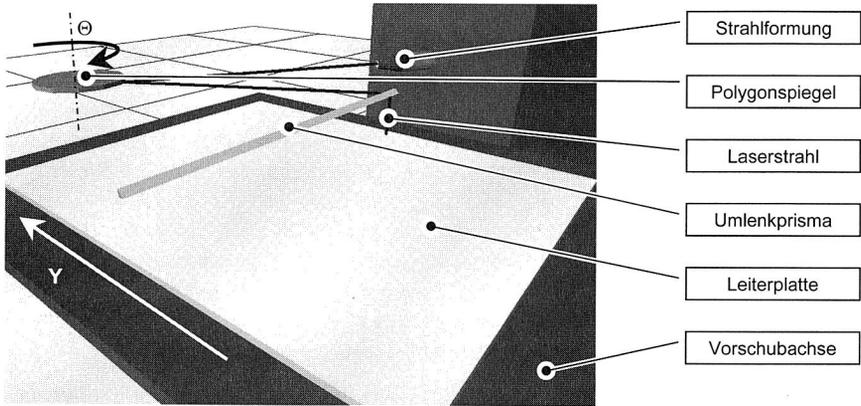


Bild 64: 3D-Kinematiksimulation des Polygonspiegelsystems

Am Markt verfügbare Maschinen zur Belichtung photosensitiver Filme verfügen über ein optisches System, das mit mehreren Strahlen gleichzeitig arbeitet. Dadurch wird die Bearbeitungszeit mit der Zahl der Strahlen linear geringer, da die Strahlen unabhängig voneinander sind. Auf Grund der hier benötigten Laserleistung ist dieses Konzept nur bedingt übertragbar. Die Parallelisierung mit zwei Laserstrahlen und damit Halbierung der Bearbeitungszeit erscheint beim Konzipieren jedoch technisch und wirtschaftlich primär machbar. Dies zeigen am Markt verfügbare Laserbohrsysteme, die zwei unabhängige Strahlquellen beinhalten [96].

6.6.5 Vektorbasierter Drehtisch für den Excimer-Laser

Der Excimer-Laser emittiert einen Strahl mit einem rechteckigen Querschnitt, dessen Fläche deutlich größer ist als die eines Festkörperlasers. Gleichzeitig ist die Wiederholrate deutlich geringer. Es ist daher für eine wirtschaftliche Fertigung nötig, mit jedem Puls eine möglichst große Struktur zu erzeugen. Beim hier betrachteten Konzept geschieht dies dadurch, dass der Strahl einem Teilstück der Leiterbahn in Breite und Länge entspricht. Der Leiterzug entsteht durch Aneinandersetzen der einzelnen Teilstücke. Unterschiedliche Orientierungen von Leiterstücken werden durch Drehen der Leiterplatte mit Hilfe des Drehtisches realisiert. Das Kinematiksimulationsmodell (Bild 65) enthält dazu eine rotatorische (C) und zwei translatorische (X, Y) Achsen für den Tisch. Die Strahlquelle ist ortsfest und entspricht in ihrer Geometrie dem rechteckigen Strahlquerschnitt.

Bereits bei der Modellerstellung ist zu erkennen, dass dieses Maschinenkonzept seine Stärken bei Leiterplattentypen hat, die viele lange Leiterzüge aufweisen. Sind dagegen nur kurze Leiterstücke mit einer großen Anzahl von Anschlussflächen zu strukturieren, ist das Maschinenkonzept anzupassen: Hier bietet es sich an, die immer wiederkehren-

den Grundstrukturen als Masken über ein Dreh- oder Linearmagazin in den Strahlengang einzuführen und so das Leiterbild aus Bausteinen zusammensetzen.

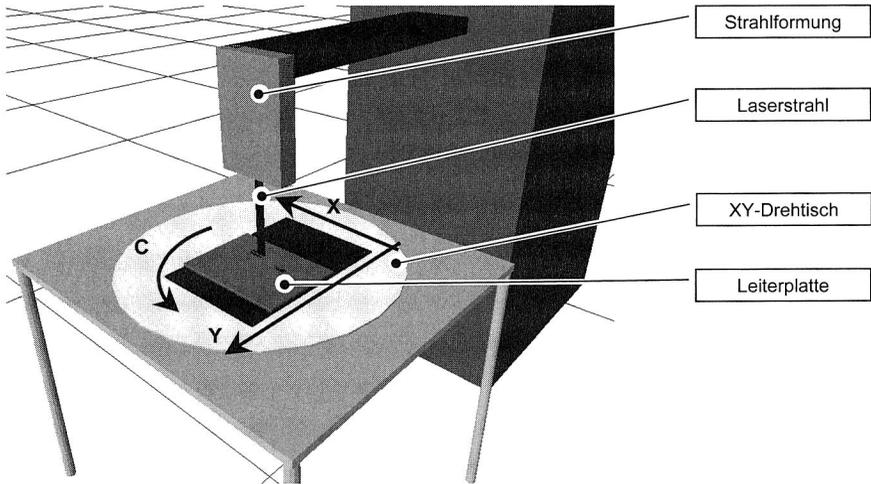


Bild 65: 3D-Kinematiksimulation des XYZ-Tisches für einen Excimer-Laser

6.6.6 Auswahl des geeignetsten Konzepts

Die erstellten Simulationsmodelle werden nun verwendet, um das Verhalten der einzelnen Maschinenkonzepte zu analysieren und gegenüberzustellen. Für die Auswahl der geeignetsten Kinematik sind die Bearbeitungszeiten, die in der Simulation ermittelt werden, das Hauptkriterium. Daneben werden auch die technologischen und produktionssystematischen Randbedingungen der einzelnen Konzepte berücksichtigt.

Parametrierung der Simulationsmodelle

Ein wesentliches Kriterium für die Auswahl des Maschinenkonzepts stellt die realisierbare Taktzeit dar, die mit Hilfe der 3D-Kinematiksimulationsmodelle ermittelt wird. Hierfür wird mit allen vier vorgestellten Modellen eine Struktur des Testdemonstrators, der in PRIME entwickelt wurde, abgefahren. Dieser Testdemonstrator (in Bild 66 rechts oben) beinhaltet alle Strukturen, die auf realen Leiterplatten zu realisieren sind. Für die simulationsgestützte Beurteilung der Bearbeitungsgeschwindigkeit wird die Struktur ausgewählt, die bzgl. dieses Parameters die kritischsten Anforderungen stellt. Dies ist die Struktur, die die maximal erreichbare Feinheit qualifiziert. Sie weist eine Leiterbahnbreite von $50\ \mu\text{m}$ und eine Gesamtlänge von 1,34 Metern auf. Der Schaltungsträger wurde entsprechend den Abmessungen des Testdemonstrators gewählt, er hat eine Größe von $220\ \text{mm} \times 310\ \text{mm}$. Den Aufbau des Demonstrators und den Simulationslauf mit der Ermittlung der Taktzeit zeigt Bild 66.

Die Parameter, die in der Simulation für die einzelnen Modelle verwendet wurden, sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Für den Festkörperlaser (Nd:YAG) wurde eine Wiederholrate von 20 kHz und ein Fokusdurchmesser von 50 µm angenommen. Dies sind Werte, die mit marktgängigen Strahlquellen problemlos zu erreichen sind (vgl. z. B. [121], [122]). Mit diesen Leistungsdaten der Strahlquelle kann die entsprechende Bearbeitungsmaschine eine Linie von 50 µm in einem Durchgang strukturieren. Für die Berechnung der Bearbeitungsgeschwindigkeit ist noch zu berücksichtigen, dass der Strahl eine annähernd gaußförmige Intensitätsverteilung aufweist. Um eine gleichmäßige Strahlintensität und damit Aktivierung entlang der bearbeiteten Linie zu gewährleisten, ist eine Überlappung der einzelnen, kreisförmigen Pulse erforderlich. Hier wird eine Überlappung von 50 % angenommen, wie sie in den technologischen Experimenten in PRIME vorlag. Mit diesen Annahmen ergibt sich eine maximale Geschwindigkeit des Strahls von $20\text{kHz} \cdot 50\mu\text{m} \cdot 50\% = 20 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{s}} \cdot 50 \cdot 10^{-3}\text{mm} \cdot \frac{50}{100} = 500 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$.

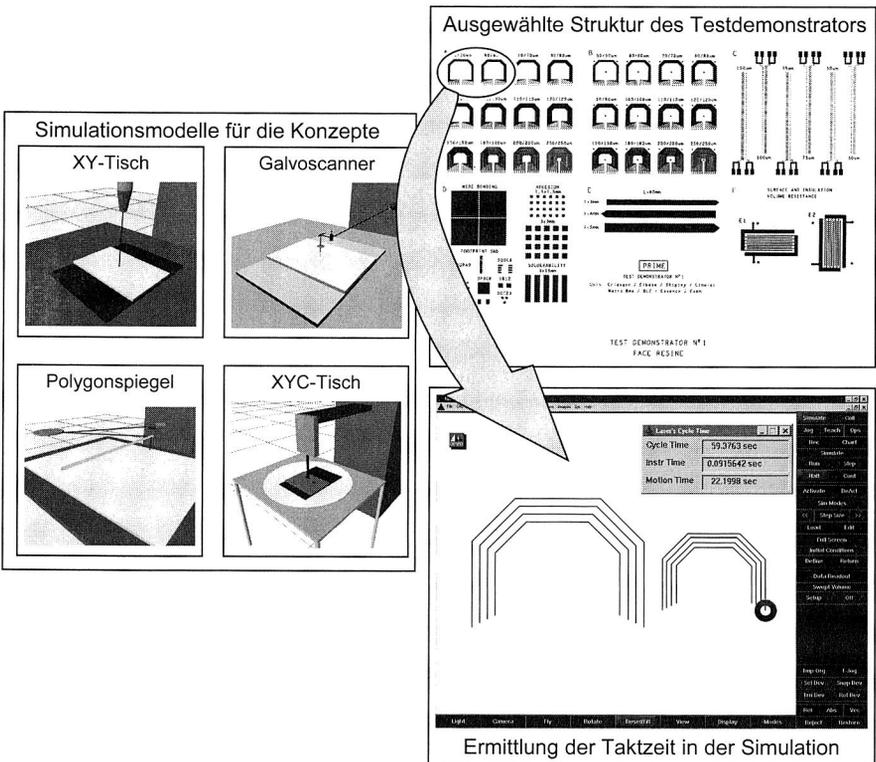


Bild 66: Ermittlung der Taktzeit in der 3D-Kinematiksimulation

Für den Excimer-Laser wurden ein rechteckiger Strahlquerschnitt von 50 µm x 2 mm und eine Wiederholrate von 200 Hz angenommen. Diese Werte werden von Strahl-

quellen im oberen Leistungsspektrum erreicht (vgl. z. B. [112]). Damit wird für den XY-Tisch mit dieser Strahlquelle eine Bearbeitungsgeschwindigkeit von einem Hundertstel des Festkörperlasers erreicht. Hier zeigt sich schon bei der Parametrierung, dass diese Kinematik für den Excimer-Laser wenig geeignet ist. Aus diesem Grund wurde ein Maschinenkonzept entwickelt, das die flächige Aktivierung von Leiterbahnteilstücken vorsieht.

Die Tabelle 6 fasst die Modellannahmen zusammen und gibt die auf dieser Basis in der Simulation ermittelten Bearbeitungszeiten an.

Konzept	XY-Tisch		Galvo-scanner	Polygon-spiegel	XYC-Tisch
	Nd:YAG	Excimer			
Lasertyp	Nd:YAG	Excimer	Nd:YAG	Nd:YAG	Excimer
Wiederholrate	20 kHz	0,2 kHz	20 kHz	20 kHz	200 Hz
Strahlquerschnitt	rund, Ø 50 µm	rechteckig, 50 µm x 2 mm	rund, Ø 50 µm	rund, Ø 50 µm	rechteckig, 50 µm x 2 mm
Überlappung	50 %	50 %	50 %	50 %	0%
Bearbeitungsgeschwindigkeit	500 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	5 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	500 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	500 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	nicht zutreffend ¹³
Bearbeitungszeit	38,3 sec	1h 4min	19 sec	45 min	90 sec

Tabelle 6: Parameter und daraus resultierende Bearbeitungszeiten bei den einzelnen Konzepten für die Teststruktur

Auswahl des Konzepts auf Basis der Simulationsergebnisse

Die kürzeste Bearbeitungszeit wird von dem Maschinenkonzept erzielt, das einen Lineartisch mit galvanometrischen Scannern kombiniert. Dieses Konzept weist auf Grund der hohen Geschwindigkeit der Spiegelablenkung auch eine geringere Empfindlichkeit gegenüber einer höheren Leiterbahnkomplexität auf. Eine Bearbeitungsstrategie kann hier darin bestehen, den zu bearbeitenden Bereich in Quadrate einzuteilen, die das maximale Scannerfeld als Ankreis beschränkt. Die Strukturen in diesen Bereichen werden anschließend mit dem Scannerkopf aktiviert, längere Linien durch eine Verfahrbewegung des Tisches.

Bei der Bearbeitungszeit, die für das System mit dem Polygonspiegel ermittelt wurde, ist für den Vergleich mit dem in Abschnitt 6.6.4 dargestellten System zu berücksichtigen, dass hier von einem Ein-Strahl-System ausgegangen wurde. Eine Teilung des Strahls in mehrere parallele, aber einzeln zu deaktivierende Teilstrahlen erscheint auf Grund der hohen benötigten Energiedichte nicht möglich. Somit ist maximal ein Doppel-

¹³ Für die flächige Strukturierung mit dem Excimer-Laser ist es nicht sinnvoll, eine wegbezogene Bearbeitungsgeschwindigkeit anzugeben. In die Simulation gehen die Wiederholrate und die Strahlfläche ein. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Simulation, da mit Abschätzungen kein Vergleich der einzelnen Konzepte bzgl. der Bearbeitungszeit für eine reale Leiterbahnstruktur möglich ist.

strahlensystem mit zwei Strahlquellen, analog zu [96] wirtschaftlich vertretbar. Allerdings ist selbst die dann halbierte Prozesszeit von über einer halben Stunde kaum noch akzeptabel.

Auch bei dem ohnehin schnellsten Konzept ist die Verwendung einer zweiten Strahlquelle und damit eines zweiten Scannerkopfs möglich. Hier ist keine Halbierung der Bearbeitungszeit zu erwarten, da die Bewegungen des Tisches und der Spiegel zu koordinieren sind. Dennoch ist eine deutliche Verringerung der Bearbeitungsdauer, mindestens um die Hälfte, realistisch. Somit ergeben sich für das Polygonspiegelkonzept keine Vorteile.

Falls aus technologischen Gründen die höhere Photonenenergie des Excimer-Lasers erforderlich ist, steht das Konzept eines Drehtisches unter Ausnutzung des rechteckigen Laserstrahls zur Verfügung. Dieses hat ein erhebliches Potential, falls möglichst lange Leiterzüge zu realisieren sind. So wurde ein weiteres Simulationsexperiment mit einem Strahl doppelter Länge und gleicher Breite durchgeführt (4 mm x 50 μ m). Die Bearbeitungszeit beträgt in diesem Fall nur noch 43 Sekunden und hat sich damit mehr als halbiert.

Fazit der Simulationsergebnisse

Für die Aktivierung des keramischen Katalysators ergibt die simulationsgestützte Analyse und Auswahl eine klare Präferenz des Konzepts, das einen XY-Tisch mit Galvo-Scannern und einen Nd:YAG-Laser vorsieht. Falls es aus technologischen Gründen nötig ist, auf die kürzere Wellenlänge des Excimer-Lasers zurückzugreifen, steht auch hier ein Maschinenkonzept zur Verfügung. Die Bearbeitungszeit ist hier allerdings erheblich von der Komplexität der Schaltung abhängig.

Die 3D-Kinematiksimulationsmodelle der beiden in Frage kommenden Konzepte stehen für die folgenden Phasen als Grundlage für die weitere Gestaltung der Maschine zur Verfügung. Darüber hinaus können sie zur Offline-Programmierung physikalischer Prototypen verwendet werden. Dabei sind technologische Erweiterungen am Modell vorzunehmen. Das beinhaltet eine Optimierung der Pfadplanung, die Vermeidung von Beschädigungen des Substrats durch den Anfahrpuls des Lasers sowie die Auswahl der geeigneten Strategie für Kurvenstücke.

6.7 Logistische und betriebswirtschaftliche Studie der Gesamtanlage

Die Taktzeiten, die in der 3D-Kinematiksimulation ermittelt wurden, werden im Folgenden mit den Anforderungen des Auftragsdurchlaufs durch das Fertigungssystem zur Leiterplattenherstellung abgeglichen (Bild 67). Hiermit werden das Kostenziel und die zu erreichende Bearbeitungszeit für die Maschine zur Laserdirektbelichtung identifiziert. Dazu wird ein Ablaufsimulationsmodell erstellt, das das Konzept der Fertigungsanlage abbildet und an dem das Verhalten der additiven Prozesskette mit dem der Standardprozesskette verglichen werden kann. Dies erfolgt sowohl bzgl. der logistischen Kenngrößen wie Ressourcennutzung und Durchsatz als auch der Kostenverursachung. In

diesem Schritt wird die Inanspruchnahme der einzelnen Maschine monetär bewertet und zusammen mit den Materialkosten zu den Herstellkosten einer Leiterplatte aggregiert. Für diese Kostensimulation [130] wird das Auswerteprogramm KostSim [183] verwendet.

Für die Erstellung des Modells und die Parametrierung der KostSim-Datenbank sind neben den Daten der einzelnen Fertigungseinrichtungen das Produktionsprogramm sowie die Struktur des Fertigungssystems zu hinterlegen. Diese spiegelt die prozesstechnische Abfolge der Fertigungsschritte wieder. Für die Erfassung der Daten wie Bearbeitungs- und Rüstzeiten der Maschinen, Materialverbrauch oder Wartungskosten wird das in Bild 55 vorgestellte Formblatt verwendet. Diese Daten werden sowohl für die subtraktive als auch die volladditive Prozesskette erfasst, um so einen Vergleich beider Prozessketten zu ermöglichen.

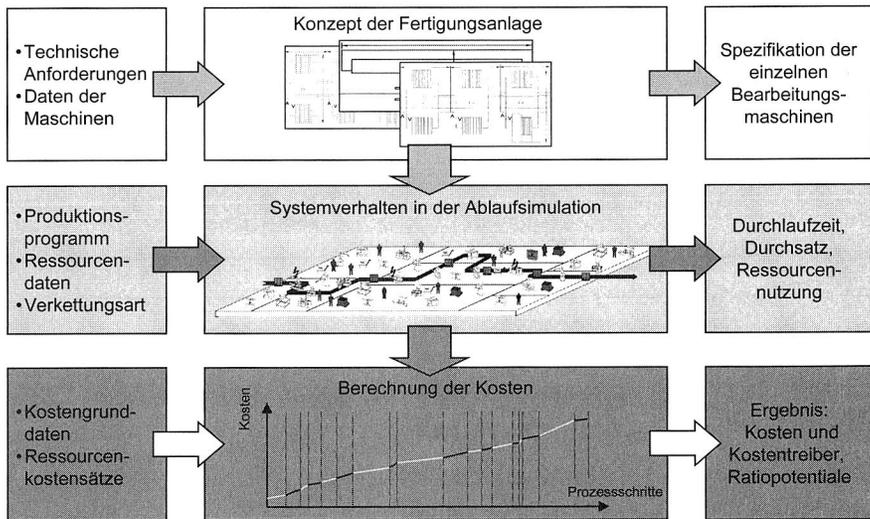


Bild 67: Integration von Anlagenkonzipierung, Ablaufsimulationsstudie und Kostenermittlung

Dabei gehen für die subtraktive Prozesskette die aktuellen Daten eines Leiterplattenherstellers aus dem PRIME-Projekt ein, während die Parameter der additiven Prozesskette auf den Daten der Prozessentwicklung beruhen. Die Bearbeitungszeit für die Maschine zur Laserstrukturierung wird als Ergebnis aus der 3D-Kinematiksimulation übernommen. Als Kosten für diese Maschine wird der Preis einer leistungsfähigen Maschine zum Laserbohren zu Grunde gelegt und angenommen, dass die neu zu entwickelnde Maschine 10 % teurer ist.

Für die monetäre Bewertung ist das Programm Kostsim für die Anforderungen der Leiterplattenherstellung zu parametrieren. Dies beinhaltet u. a. die korrekte Abbildung des mehrfachen Durchlaufens von Fertigungsstationen. KostSim liest nach dem Simulati-

onslauf das Ereignisprotokoll (sog. trace-file) ein und erstellt daraus die entsprechenden betriebswirtschaftlichen Auswertungen.

6.7.1 Ablaufsimulation der Fertigungsanlage

Ziel der Ablaufsimulationsstudie ist die Erfassung und Beurteilung der Durchlaufzeiten sowie der benötigten Kapazitäten. Dazu wird das folgende Szenario definiert, das eine typische Situation für die Einführung einer neuen Technologie darstellt. Als Produktionsprogramm wird angenommen, dass vierlagige Leiterplatten mit einer Oberfläche von $0,27 \text{ m}^2$ produziert werden. Dabei werden jeweils die gleiche Menge Leiterplatten nach beiden Verfahren hergestellt. Im Modell wird ein Arbeitszeitschema von zwei Schichten zu jeweils acht Stunden angenommen. Das dazugehörige Simulationsmodell¹⁴, das neben den Fertigungsschritten die Prüfschritte beinhaltet, zeigt Bild 68.

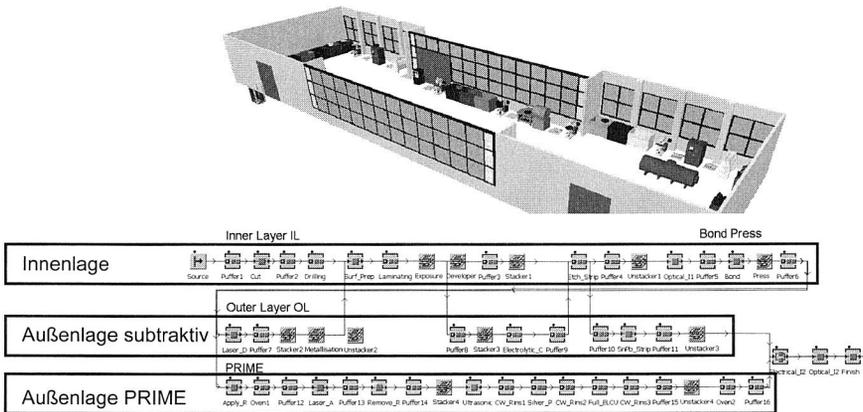


Bild 68: Anlagenlayout und dazugehöriges Ablaufsimulationsmodell für das Produktionsszenario

Für dieses Szenario werden die einzelnen Prozessschritte zu vier Hauptprozessen zusammengefasst:

- Die Herstellung der Innenlage ("Inner Layer IL" im Modell in Bild 68) geschieht in einer subtraktiven Prozesskette, die von kupferkaschiertem Basismaterial (z. B. FR4) ausgeht. Nach Durchlaufen dieser Fertigungsschritte und den anschließenden Prüfschritten steht ein prinzipiell verkaufsfähiges Produkt, eine zweilagige Leiterplatte zur Verfügung.
- Im Hauptprozess "Bond-Press" wird ein Haftvermittler auf die Innenlage aufgebracht und mit ihr verpresst.

¹⁴ Die Erstellung des Ablaufsimulationsmodells geschah in Zusammenarbeit mit Dr.-Ing. J. Wunderlich und Dipl.-Inf. M. Weber.

- Für die Herstellung der Außenlage werden die beiden alternativen Prozessketten für das subtraktive ("Outer Layer OL") und das volladditive Verfahren ("PRIME") von jeweils der Hälfte der Leiterplatten durchlaufen.

In der Ablaufsimulation wird ein Zeitraum von fünf Arbeitstagen simuliert, um eine statistisch ausreichende Datenbasis zu gewährleisten. Die Auswertung des Simulationslaufs zeigt, dass eine Bearbeitungszeit von zwei Minuten pro Leiterplatte für die Laserdirektstrukturierung bei der PRIME-Prozesskette den bestmöglichen Durchsatz gestattet. Eine Bearbeitungszeit von fünf Minuten führt bereits zu erheblichen Beständen in den Puffern und stellt damit die Obergrenze für die zulässige Bearbeitungszeit dar. In diesem Fall ist diese Maschine der Engpass der Linie. Eine Erhöhung der Kapazität durch eine zweite, baugleiche Maschine ist aus Gründen des zu tätigen Investments gerade bei der Einführung der Technologie nicht durchführbar, wie auch die Anforderungen der Leiterplattenfertiger zeigen (vgl. Bild 53).

Dagegen sind bei den übrigen Fertigungseinrichtungen bei der additiven Prozesskette keine Kapazitätsprobleme zu befürchten. Ein repräsentatives Beispiel hierfür ist die Auslastung beim Prozessschritt *Apply_R* für den Auftrag des katalytischen Harzes, die nur acht Prozent Bearbeitungszeit enthält. Weitere 33 % pausiert die Maschine während der nicht genutzten Nachtschicht, und 48 % der verfügbaren Zeit wartet sie auf zu bearbeitende Leiterplatten. Die übrigen elf Prozent ist sie blockiert, da die folgenden Maschinen die Leiterplatten, auf denen bereits das Harz aufgetragen ist, nicht aufnehmen können, da sie noch andere Werkstücke bearbeiten. Eine Nutzung dieser Kapazität ist etwa durch den Auftrag des Lötstopplacks, der hier nicht modelliert wurde, möglich. Dadurch werden allerdings auch Reinigungs- und Rüstzeiten verursacht.

Auch die Auslastung der Fertigungsmaschinen für die Herstellung der Außenlage in der subtraktiven Prozesskette ist vergleichsweise gering. Ein Grund hierfür besteht darin, dass die Daten des Modells aus einer Fertigung mit einem sehr hohen Anteil an Leiterplatten mit einer großen Zahl an Lagen (10- bis 16-fach MLB) stammen. Dies wäre im Modell dadurch zu hinterlegen, dass Leiterplatten pro zwei Außenlagen einmal die Prozessschritte und –maschinen für die Außenlage durchlaufen.

6.7.2 Kostensimulation auf Basis der Ablaufsimulation

Für die Ermittlung der Kosten der einzelnen Prozessschritte und damit des Endprodukts ist im vorliegenden Fall vor allem die Ermittlung der Maschinenstundensätze entscheidend. Da das Personal direkt den einzelnen Bearbeitungsstationen zugeordnet ist und Materialflusselemente, wie Flurförderzeuge, nicht relevant sind, können alle relevanten Kosten in den Maschinenstundensatz integriert werden, wie es am Beispiel des Harzauftrags in Bild 69 dargestellt ist. Zu den fixen Anteilen der hinterlegten Kosten gehören vor allem die kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen sowie die Instandhaltungskosten. Die variablen Anteile beinhalten die Energiekosten, den Stundensatz des zugeordneten Personals und die Werkzeugkosten. Daneben wird die Vorbereitung der Maschine berücksichtigt, wobei unterschieden wird, ob diese einmal täglich oder für jedes zu prozessierende Werkstück erfolgt. Auf die Modellierung von Störungen wird verzichtet, da die hierfür benötigten Informationen auf Grund des frühen Entwicklungssta-

diums noch nicht zur Verfügung stehen können. Aus dem Simulationslauf in der Ablaufsimulation wird die Auslastung für wertschöpfende Tätigkeiten übernommen. Dabei wird für die hier untersuchten Prozessketten nur die Bearbeitungsaktivität als wertschöpfend angesehen. Diese Auslastung geht direkt in den Maschinenstundensatz ein.

Die bereits diskutierte sehr geringe Auslastung der Maschine zum Harzauftrag führt in Bild 69 zu einem hohen Maschinenstundensatz. Darüber hinaus fallen erhebliche Opportunitätskosten für das Vorhalten von nicht ausgelasteter Kapazität an. Diese werden als Fertigungsgemeinkosten dem Hauptprozess "Außenlage PRIME" belastet. Für die Berechnung der Herstellkosten ist allerdings zu berücksichtigen, dass in der Simulation nur ein vierlagiges MLB als Beispielprodukt erzeugt wurde. Für die Herstellung von Leiterplatten mit einer höheren Zahl Lagen, für die der Prozess ja gedacht ist, wird die Kapazität der Fertigungseinrichtungen für die Außenlage wesentlich stärker genutzt. Die Verfügbarkeit der entsprechenden Kapazitäten wurde in Abschnitt 6.7.1 gezeigt.

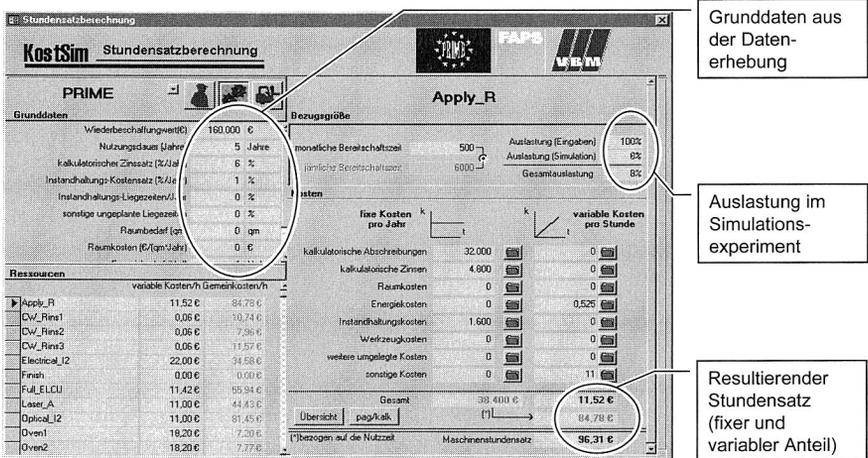


Bild 69: Maschinenstundensatzrechnung in KostSim für den Prozessschritt zum Auftrag des katalytischen Harzes (Apply_R) in der PRIME-Prozesskette

Aus diesen Überlegungen wird für die Aufstellung der Kostenzuwachskurve in Bild 70 nur die tatsächlich in Anspruch genommene Kapazität zu Grunde gelegt. Dabei zeigt sich, dass die additive Prozesskette sowohl bei den Kosten als auch bei der Durchlaufzeit Vorteile aufweist. Diese Zeitvorteile werden sich noch verstärken, wenn zusätzliche Wechselwirkungen und Nebenläufigkeiten im Simulationsmodell auftreten, etwa durch eine Erweiterung des zu Grunde gelegten Produktionsprogramms. Dieses führt zu einer größeren Zahl an Ressourcenkonflikten und damit zu längeren Wartezeiten der Werkstücke vor den Maschinen. Damit ist eine Prozesskette mit einer geringeren Anzahl an Schritten prinzipbedingt im Vorteil. Den längsten Prozessschritt stellt die volladditive Kupferabscheidung dar. Im Sinne der Verfahrensoptimierung ist der Steigerung der Abscheidungsrate Aufmerksamkeit zu schenken.

Bei der Analyse bzgl. der Kostentreiber zeigt sich, dass die Kosten insbesondere durch die Prüfschritte und den damit verbundenen Ausschuss erheblich erhöht werden. Dies trifft sowohl auf die Fertigung der Innenlage als auch der Außenlage bei beiden Prozessketten zu. Die Kostenvorteile der additiven (PRIME-) Prozesskette für die Herstellung einer Außenlage sind nur gering. Damit stellt die Annahme, die kombinierte Laserbearbeitungsmaschine für die Laserstrukturierung und Herstellung der μ -Vias sei 10 % teurer als die reine Laserbohrmaschine in der subtraktiven Prozesskette, quasi die obere Kostengrenze dar. Da diese Annahme auch für die Wartungskosten gilt, ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht der Einsatz des Festkörperlasers zu bevorzugen. Bei diesem fällt zum einen der Gasverbrauch weg, zum anderen weist die Laser-Röhre des Excimer-Lasers nur eine begrenzte Lebensdauer auf. Dies ist sicher auch für den nicht-linearen Kristall, der zur Frequenzverdreifung beim Nd:YAG-Laser nötig ist, der Fall. Allerdings sind hier eine höhere Lebensdauer und geringere Kosten der Fall, was beides die Instandhaltungskosten verringert.

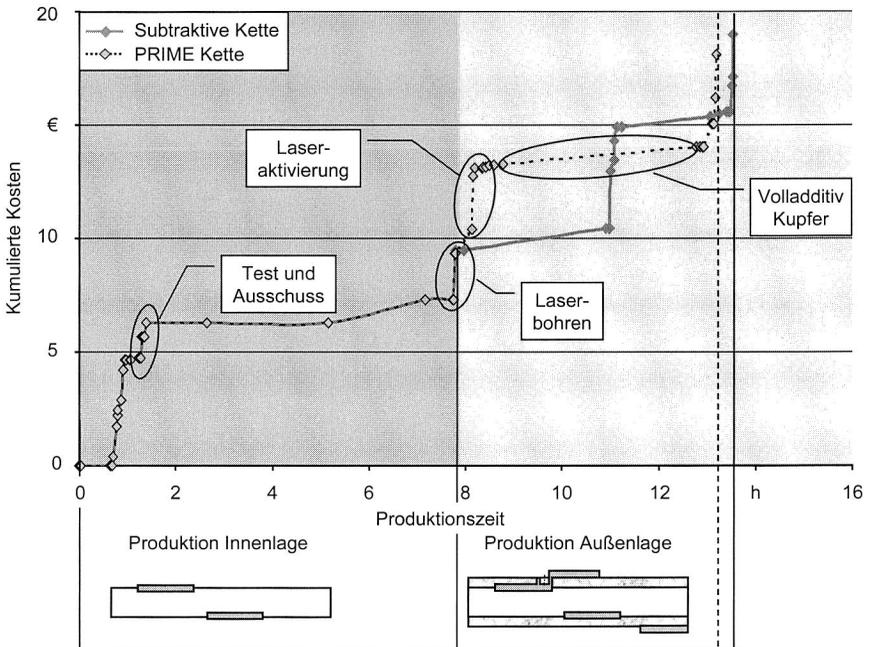


Bild 70: Gegenüberstellung der Kostenzuwachskurven und Kostentreiber nach dem subtraktiven und dem volladditiven (PRIME) Verfahren

6.8 Ergebnis der simulationsgestützten Konzipierung

Die in Kapitel 4 entwickelte Methodik zur durchgängigen simulationsgestützten Planung wurde bis zum Meilenstein des Funktionsdemonstrators angewendet, um eine Anlage

zur Laserdirektstrukturierung von Leiterplatten zu konzipieren. An diesem Punkt steht ein erfolgsversprechendes Anlagenkonzept als digitaler Funktionsdemonstrator zur Verfügung. Dieses wurde aus mehreren Varianten ausgewählt, so dass auch alternative Lösungen zur Verfügung stehen.

Für die als Kernpunkt identifizierte Maschine zur Laseraktivierung des keramischen Katalysators stehen die folgenden Anforderungen und Konzepte für das spätere Entwerfen und Ausarbeiten von Maschine und Prozess zur Verfügung:

- Es ist ein frequenzverdreifachter Nd:YAG-Laser vorzusehen, der über ein System aus Galvo-Scanner auf einen XY-Tisch abgelenkt wird. Dieses Konzept verspricht den höchsten Durchsatz und die geringsten Kosten. Darüber hinaus kann diese Maschine auch direkt zum Laserbohren von μ -Vias eingesetzt werden. Eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit kann, bei höheren Kosten für die Maschine, durch den Einsatz einer zweiten Strahlquelle und eines zweiten Scanner-Systems erreicht werden.
- Die Kosten für die neu zu entwickelnde Maschine sind an denen von Laserbohrmaschinen für μ -Vias zu orientieren. Dabei führen Maschinenkosten bis 10 % über denen einer Laserbohrmaschine noch zu einem Kostenvorteil der neuen Maschine und sollten nicht oder nur unwesentlich überschritten werden.
- Der neu entwickelte Prozess bietet zusammen mit der dazu gehörigen Fertigungsmaschine signifikante Vorteile bzgl. der Fertigung. Dies beinhaltet die Möglichkeit, wesentlich feinere Strukturen als mit dem Subtraktivverfahren realisieren zu können. Dadurch sind zusätzliche Anwendungen und Marktpotentiale erreichbar, die sich in zusätzlichen Erlösen äußern. Außerdem ermöglicht es das maskenlose Verfahren, wesentlich schneller auf Kundenwünsche zu reagieren und eröffnet auch damit neue Absatzmöglichkeiten.

7 Analyse des thermischen Verhaltens und der Maschinendynamik von Bestückautomaten

Mit der simulationsgestützten Analyse des thermischen und dynamischen Verhaltens wird das Ziel verfolgt, den Entwurf von Fertigungsmaschinen bzgl. Genauigkeit und Geschwindigkeit zu optimieren. Gemäß der entwickelten Systematik ist dies in der Phase des Entwerfens angesiedelt. Das Vorgehen wird im Folgenden an einem Bestückautomaten¹⁵ vorgestellt. Dabei werden von der System- und Anforderungsbeschreibung ausgehend die Arbeitsschwerpunkte abgeleitet. Anschließend werden die entsprechenden Teilmodelle erarbeitet und zum virtuellen Prototypen zusammengefasst, an dem schließlich die Einflüsse auf die Maschinenfähigkeit quantifiziert werden. Aus den Simulationsergebnissen werden Ansatzpunkte zur Optimierung aufgezeigt und Informationen für den Betrieb abgeleitet, z. B. für die Planung der Produktionslogistik.

7.1 Aufgabenstellung und Ausgangssituation

Die Zusammenfassung der Anforderungen an die Fertigungsmaschine und damit an die Simulation stellt den Ausgangspunkt für die Analyse dar. Dazu werden das Funktionsprinzip des betrachteten Systems sowie die wesentlichen Funktionsbaugruppen erfasst.

7.1.1 Anforderungen an die Entwicklung von Bestückautomaten

Die Anforderungen an Bestückautomaten werden vor allem durch den Miniaturisierungstrend in der Elektronik bestimmt. Bild 71 fasst diese Anforderungen zusammen:

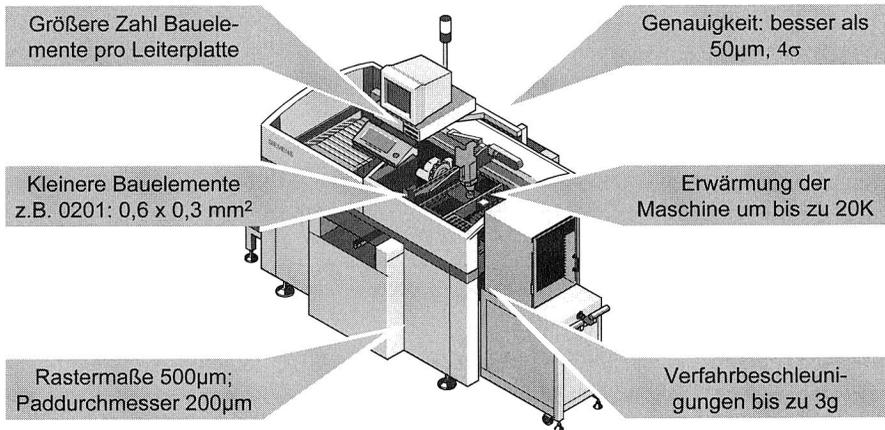


Bild 71: Herausforderungen bei der Entwicklung von Bestückautomaten

¹⁵ Die in diesem Kapitel geschilderten Simulationsstudien erfolgen für einen kommerziell verfügbaren Bestückautomaten auf der Basis von Entwicklungsdaten des Herstellers. Messungen an diesem Automaten dienen als Referenzwerte für die Validierung der Simulationsmodelle.

Dabei stehen insbesondere die Anforderungen an die Arbeitsgenauigkeit und -geschwindigkeit im Vordergrund. Hierfür sind insbesondere das thermische und das dynamische Verhalten von Bedeutung: Durch die steigende Anforderung an die Arbeitsgenauigkeit sind immer leistungsfähigere Antriebe nötig, die zusätzliche Wärme in die Maschine einbringen. Dadurch entsteht eine thermische Verzerrung, die angesichts der Anforderungen an die Arbeitsgenauigkeit nicht mehr vernachlässigbar ist. Diese ist dem dynamischen Verhalten überlagert. Wegen dieser gegenseitigen Beeinflussung von thermischem und dynamischem Verhalten ist eine integrierte Vorgehensweise erforderlich. Dabei sind die thermischen und dynamischen Effekte der Erwärmung, Verlagerung und Schwingung sowie Starrkörperbewegungen zunächst einzeln zu identifizieren und schließlich einander zu überlagern. Diese Superposition geschieht in einem Mehrkörpersimulationsmodell, da dies die beste Möglichkeit bietet, alle relevanten Einflüsse aus dem Schwingungsverhalten, der Antriebssteuerung sowie der Bauteileelastizität zu überlagern. Außerdem können in dieses Modell Lasten eingeführt werden, die von der Bewegung unabhängig sind.

7.1.2 Funktionsprinzip des betrachteten Bestückautomaten

Bei Bestückautomaten herrschen die drei kinematischen Grundstrukturen, die in Bild 72 dargestellt sind, vor. Das *Pick and Place* Prinzip stellt den Grundgedanken der SMD-Bestückung dar: Jedes Bauelement wird einzeln von der Bauelement-Bereitstellung aufgenommen und zur Bestückposition auf die Leiterplatte gebracht und dort abgesetzt. Je nach Bauelementtyp kann dabei eine optische Erfassung der Bauelementlage erfolgen. Bei diesem Prinzip wird der Bestückkopf verfahren, während die Leiterplatte ortsfest ist. Diese Kinematik wird bei hochgenauen Maschinen eingesetzt. Zur Erhöhung der Leistung können mehrere dieser Systeme parallel in einem Automaten arbeiten.

Höhere Bestückleistungen können durch Variationen der Kinematik erreicht werden. Dazu werden beim *Collect and Place* Prinzip mehrere Bauelemente aufgenommen, bevor der Bestückkopf zur Leiterplatte verfährt. Dadurch wird die Bewegungshäufigkeit der langsamsten Achse minimiert. Bei *Chipshootern* sind mehrere Bestückköpfe als Karussell angeordnet. Dabei bewegen sich sowohl die Bauelementbereitstellung in einer und die Leiterplatte in zwei Achsen. Mit diesen Systemen werden die höchsten Bestückleistungen erzielt. Der Hauptnachteil der Chipshooter ist die große Grundfläche.

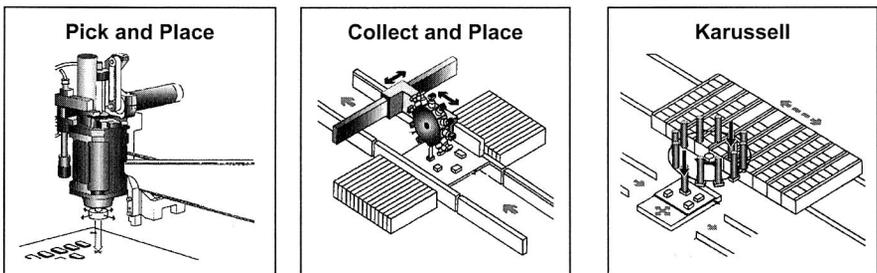


Bild 72: Kinematische Prinzipien von Bestückautomaten

Die folgenden Betrachtungen werden an einem Pick and Place Automaten durchgeführt, da mit diesem Prinzip die höchste Arbeitsgenauigkeit erreicht wird. Bild 73 zeigt die wesentlichen Baugruppen sowie die kinematischen Achsen. Beim Verfahren Y-Achse werden Portals und der Bestückkopf bewegt. Die X-Achse bewegt den Bestückkopf, während die Z- und C-Achse nur die Pinole und die Pipette im Bestückkopf verfahren bzw. rotieren. Der Antrieb erfolgt über Elektromotoren, die bei den linearen Achsen über Zahnriemen in eine Translationsbewegung umgesetzt wird.

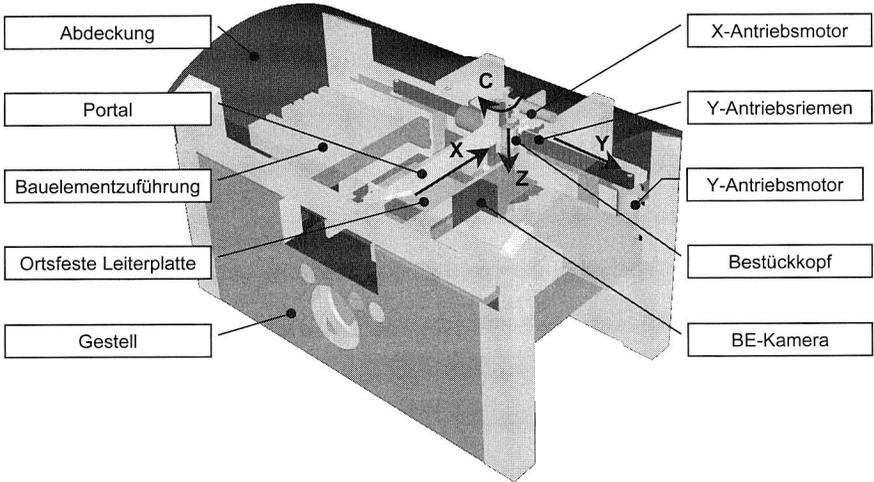


Bild 73: CAD-Modell der Hauptbaugruppen und Kinematik des untersuchten Automaten

7.1.3 Anforderungen an die Modellierung und Simulation

Die Punkte, die für die Modellierung, Simulation und anschließende Auswertung der Simulationsexperimente wesentlich sind, unterscheiden sich zum Teil signifikant von den Anforderungen aus dem Segment der spanenden oder umformenden Werkzeugmaschinen bzw. der Roboter und Handhabungsgeräte.

- In den translatorischen Freiheitsgraden werden hohe Beschleunigungen, typischerweise etwa das drei- bis fünffache der Erdbeschleunigung erzielt, um die hohen Bestückleistungen zu erreichen [36].
- An die Positioniergenauigkeit werden sehr hohe Anforderungen gestellt, z. T. besser als $50\ \mu\text{m}$ bei $4\ \sigma$. Im Gegensatz dazu ist bei Handhabungs- und Montagegeräten v.a. die Wiederholgenauigkeit entscheidend [18].
- Durch die kompakte Bauweise wird die von den Antrieben eingebrachte Wärme nur langsam an die Umgebung abgegeben. Alle relevanten Wärmequellen des Automaten sind innerhalb des von Abdeckungen eingeschlossenen Bearbeitungsraumes angeordnet. Dies ist insbesondere bei Industrierobotern nicht der Fall.

- Beim betrachteten kartesischen Bestückautomaten sind beinahe ausschließlich translatorische Bewegungen gegeben, die über Zahnriemen erzeugt werden. Durch den intermittierenden Kontakt an Zähnen und Lücken werden bei diesem Maschinenelement Schwingungen hervorgerufen.
- Entscheidend für die Qualität der produzierten Leiterplatte sind die Positioniergenauigkeit der kartesischen Achsen sowie der Bauelementdrehung.

7.2 Methodik und Umsetzung der integrierten Simulation

Zur Erfüllung der dargestellten Anforderungen wird im Folgenden die Erstellung eines übergreifenden Simulationsmodells dargestellt, das die dynamischen, thermodynamischen und technologischen Einflüsse und Randbedingungen zu einem „virtuellen“ Bestückautomaten integriert (Bild 74).

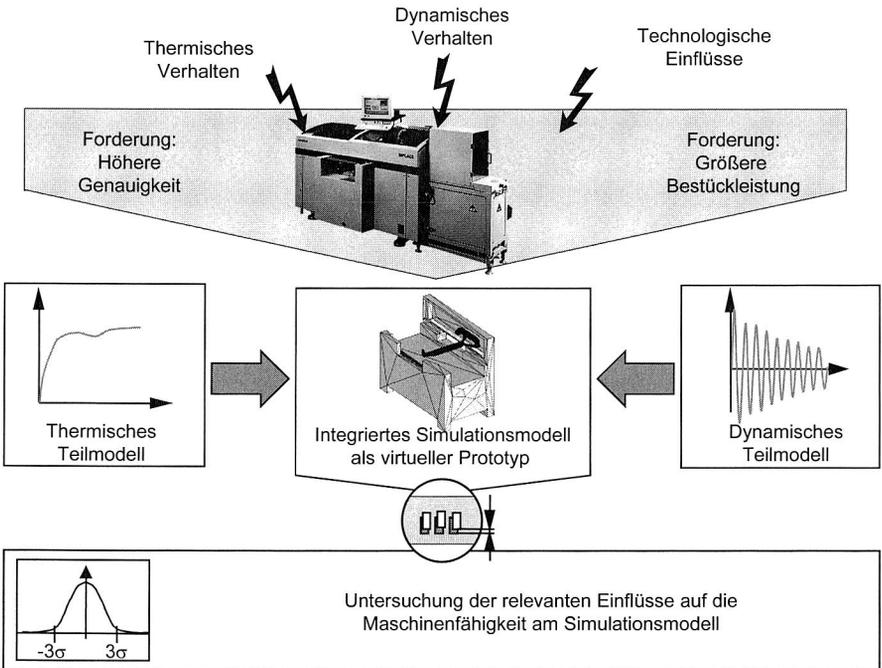


Bild 74: Integrierte Simulation des thermischen und dynamischen Verhaltens

Die Einflüsse, die nach Bild 29 die vier Kategorien Dynamik, Thermisches Verhalten, Steuerung und Technologie umfassen, werden zunächst in zwei getrennten Teilmodellen analysiert. Dabei werden die Dynamik und die Steuerungstechnik im einen, das thermische Verhalten im anderen Teilmodell betrachtet. Die Technologie geht als Parametrierung in beide Modelle ein. In die Simulationsmodelle werden alle Einflüsse, die

aus dem Verhalten des Automaten und aus dem Bestückprozess resultieren, hinterlegt. Dabei werden Umwelteinflüsse wie eine unterschiedliche Temperaturschichtung in der Fertigungshalle oder eine schiefe Aufstellung [170] zunächst nicht betrachtet.

Die beiden Teilmodelle werden anschließend zum virtuellen Prototypen zusammengefasst. An diesem Modell wird dann eine „virtuelle Maschinenfähigkeitsuntersuchung“ durchgeführt. Damit können bereits am Simulationsmodell Aussagen über die Genauigkeit und Leistungsfähigkeit der Maschine unter industriellen Betriebsbedingungen getroffen werden, ohne dass ein realer Prototyp vorhanden sein muss.

7.3 Simulation des thermischen Verhaltens

Die Simulation des thermischen Verhaltens verfolgt das Ziel, den Einfluss der Erwärmung auf die Bestückgenauigkeit des Automaten zu ermitteln. Hierfür wird ein zweistufiges Vorgehen gewählt: Zunächst werden die thermodynamischen Vorgänge der Erwärmung erfasst und anschließend wird mit diesen Ergebnissen die thermische Verzerung der Baugruppen ermittelt, die für die Bestückgenauigkeit entscheidend sind.

7.3.1 Modellbildung für die Simulation des Erwärmungsverhaltens

Zur Simulation des Wärmetransports in der Maschine sind die in Bild 17 dargestellten Wärmetransportmechanismen im Modell zu hinterlegen. Dabei spielen vor allem die Wärmeleitung und die Konvektion eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund wird, wie in Abschnitt 3.4.1 diskutiert, ein CFD-Simulationsmodell erstellt. Es enthält alle relevanten Wärmequellen, die in zwei Kategorien einzuteilen sind: Zum einen sind dies Wärmequellen, die direkt am Bestückkopf bzw. an der Leiterplatte angeordnet sind und bei denen schon geringe Wärmemengen einen Einfluss auf die Arbeitsgenauigkeit haben können. Dazu zählen u. a. die Antriebe und die Bildverarbeitung am Bestückkopf. Zum anderen sind die Quellen, die signifikante Wärmemengen abgeben und die außerhalb des unmittelbaren Prozessbereichs angeordnet sind, zu modellieren. Hier sind v. a. die Antriebsmotoren der Achsen oder die Leistungs- und Steuerungselektronik zu nennen. Diese Wärmequellen sind dafür verantwortlich, dass sich die Maschine insgesamt erwärmt, und dass durch ihre Anordnung ein Temperaturgradient innerhalb der Maschine entsteht. Durch die angesprochene kompakte, gekapselte Bauweise ist nur ein geringer Stoffaustausch mit der Umgebung vorhanden, so dass als Wärmesenken nur die freie Konvektion an der äußeren Verkleidung sowie gezielt angebrachte Lüfter zu nennen sind.

Der erste Arbeitsschritt für die Erstellung des CFD-Modells (Bild 75) ist die Übernahme und Vereinfachung der CAD-Geometrie des Bestückautomaten. Dabei sind die äußeren Bereiche der Maschine weniger relevant und können daher grober modelliert werden als der Bereich, in dem der Bestückprozess stattfindet. Um die Konvektion und die Wärmeleitung in der Luft mit zu berücksichtigen, sind neben der Geometrie der Baugruppen des Automaten alle Hohlräume als Luftvolumina im Modell zu hinterlegen. Außerdem ist die den Automaten umgebende Luft zu modellieren, um die Wärmeabga-

be an die Umgebung zu erfassen. Entsprechend den Anforderungen der CFD ist für die Luftvolumina ein qualitativ sehr hochwertiges Netz vorzusehen.



Bild 75: Arbeitsschritte zur Erstellung des thermischen Teilmodells zur Berechnung der Erwärmung

Für die Vereinfachung der Geometrie ist es nötig, Baugruppen, die eine komplexe innere Struktur aufweisen, als zylindrische oder quaderförmige Ersatzkörper zu hinterlegen. Dies betrifft z. B. Antriebsmotoren oder elektronische Baugruppen. Bei diesen werden entsprechend gemittelte Werte für die thermodynamischen Größen Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit angesetzt. Dabei kann für die Dichte und die Wärmekapazität jeweils der volumenbezogene Mittelwert als skalare Größe berechnet werden. Im Gegensatz dazu ist die Wärmeleitfähigkeit von der Art und Orientierung der Geometrie abhängig, durch die der Wärmestrom fließt. Für den betrachteten Automaten sind vier Fälle relevant, die in Tabelle 7 zusammengefasst sind: Der Wärmedurchgang kann durch einen zylindrischen oder quaderförmigen Körper erfolgen, wobei die Richtung des Wärmedurchgangs jeweils parallel oder senkrecht zu den Schichten erfolgen kann.

Ein Beispiel für einen zylindrischen Körper ist ein Gleichstrommotor: Die Wärme, die als Verlustleistung in der Läuferwicklung entsteht, passiert in radialer Richtung den Luftspalt, die Permanentmagnete des Stators und schließlich das Gehäuse. Dies stellt den Wärmedurchgang senkrecht zur Schichtung dar. Gleichzeitig kann die Wärme aber auch entlang des Läufers den Motor verlassen. Für eine Elektronikbaugruppe als quaderförmigem Körper gilt dies in ähnlicher Form: So ist ein Wärmedurchgang parallel oder senkrecht zur Leiterplattenebene möglich. Im CFD-Modell wird die Wärmeleitfähigkeit daher für diese Fälle als Vektor mit drei Komponenten hinterlegt.

		Wärmestrom \dot{Q}	Wärmeleitfähigkeit
Schichten senkrecht zum Wärmestrom	Quaderförmige Schichten		$\lambda_{\text{ges}} = \frac{r_n - r_0}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i - r_{i-1}}{\lambda_i}}$
	Hohlzylindrische Schichten		$\lambda_{\text{ges}} = \frac{\ln \frac{r_n}{r_0}}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\lambda_i}}$
Schichten parallel zum Wärmestrom	Quaderförmige Schichten		$\lambda_{\text{ges}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (r_i - r_{i-1})}{r_n - r_0}$
	Hohlzylindrische Schichten		$\lambda_{\text{ges}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (r_i^2 - r_{i-1}^2)}{r_n^2 - r_0^2}$

Tabelle 7: Wärmeleitfähigkeit für zusammengesetzte Körper in Abhängigkeit von der Richtung des Wärmedurchgangs (Herleitung in Anhang B)

Für Lüftungsgitter, die als geometrisches Modell sehr komplex sind und damit eine hohe Anzahl an Elementen benötigen, werden quaderförmige Ersatzkörper vorgesehen, für die die zusätzliche Eigenschaft eines Strömungswiderstandes nach [53] hinterlegt wird. Bereits in diesem Stadium sind außerdem Varianten zu berücksichtigen, die eine Veränderung der Geometrie beinhalten. Soll etwa der Effekt eines zusätzlichen Lüfters beurteilt werden, ist dessen Geometrie schon zu Beginn vorzusehen. Im ersten Experiment kann diese Stelle mit einer Festkörpereigenschaft hinterlegt werden, in einem Variantenexperiment dann mit einer Fluideigenschaft und der entsprechenden Charakteristik des Lüfters. Dabei ist es nicht erforderlich, die detaillierte Lüftergeometrie zu hinterlegen. Bei der Modellbildung ist außerdem zu berücksichtigen, dass das Portal während der Bestückung in Bewegung ist. Aus dieser Wechselwirkung von Festkörper und Fluid resultiert eine Bewegung der Luft, die das Portal umgibt. Da eine Implementierung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung nur mit extremem numerischen Aufwand zu realisieren ist, wird hier nur der wesentliche Effekt, die erhöhte Wärmeleitfähigkeit der Luft, abgebildet. Dazu wird den Fluid-Elementen, die unmittelbar an das Portal angrenzen, ein höherer Wert für diesen Parameter zugewiesen.

Im Anschluss an die Vernetzung der Geometrie sind die Lasten und Randbedingungen zu hinterlegen. Das umfasst die abgegebene Wärmeleistung der einzelnen Quellen. Diese wird aus der jeweiligen elektrischen Anschlussleistung, dem Wirkungsgrad und der Einschaltdauer ermittelt und gleichmäßig über alle Elemente der entsprechenden Geometrie verteilt. Daneben wird die Umgebungstemperatur für die äußerste Luftschicht vorgegeben. Weiterhin wird für die Betrachtung der Gesamtmaschine die äußerste Luftschicht als Wand hinterlegt. Falls nur ein Teilbereich der Maschine modelliert und simuliert wird, müssen auch hier geeignete thermische Randbedingungen gefunden werden. Diese können aus der Simulation des Gesamtsystems oder aus Messungen an einem realen System übernommen werden.

Der eigentliche Simulationslauf gliedert sich in zwei Phasen: Zunächst wird eine rein thermische Berechnung durchgeführt, die zu einem Temperaturgefälle im Modell führt. Auf Grund der Abhängigkeit der Dichte der Luft von der Temperatur kann dann in einem zweiten Schritt die gekoppelte thermische und strömungstechnische Berechnung erfolgen. Wird gleich zu Beginn die gekoppelte Berechnung gewählt, kann dies zu erheblichen Konvergenzproblemen führen.

Beim Postprocessing werden die ermittelten Werte mit Messwerten verglichen und das Modell so validiert. Dabei dient die Thermografie zur qualitativen Betrachtung der Temperaturverteilung, während durch Thermoelemente die Temperatur sehr genau an einigen Messpunkten quantitativ ermittelt wird. Die Simulation der vollständigen Maschine dient anschließend als Datenbasis für die Simulation von relevanten Teilbereichen sowie für die Ermittlung der thermischen Verzerrung.

7.3.2 Ergebnisse der Simulation des Erwärmungsverhaltens

Die Ergebnisse der CFD-Simulation der stationären Erwärmung des vollständigen Bestückautomaten sind in Bild 76 dargestellt. Links unten ist die globale Temperaturverteilung im Automaten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturmaxima (rot)

an den Antriebsmotoren auftreten, während die unteren Bereiche des Maschinenge-
 stellts thermisch unbelastet sind (blau). Für die Bestückgenauigkeit ist die Temperatur-
 verteilung entlang des in Bild 76 groß dargestellten Portals relevant. Von diesem Bauteil
 wird der Bestückkopf in X-Richtung geführt. Die größte Erwärmung tritt unmittelbar am
 Flansch des X-Achs-Motors auf. Dabei ist gut zu erkennen, dass neben der Wärmelei-
 tung ein erheblicher konvektiver Anteil zur Erwärmung des Portalfußes führt (Mess-
 punkte 7 bis 9). Außerdem ist bei Messpunkt 6 ein lokales Maximum zu erkennen. Dies-
 es resultiert aus der Wärmeabgabe des Bestückkopfs. Insgesamt sind deutliche Tem-
 peraturgradienten längs und quer des Portals zu erkennen. Die thermischen Verzer-
 rung, die aus diesem Temperaturfeld resultiert, kann daher nicht mit der Annahme einer
 homogenen Temperaturverteilung berechnet werden.

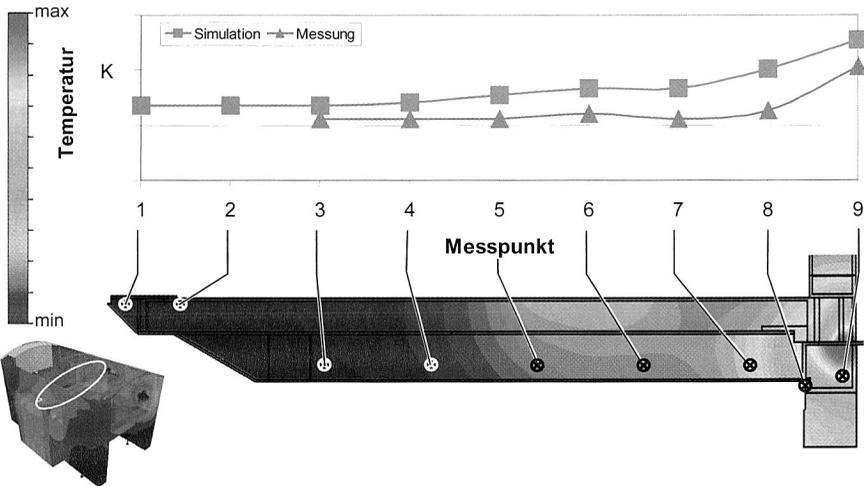


Bild 76: Simulierte und gemessene Temperaturverteilung entlang des Portals¹⁶

Die Gegenüberstellung von Messung und Simulation zeigt, dass der im Modell ermit-
 telte Temperaturverlauf genau die Form der mit Thermoelementen gemessenen Kurve
 aufweist. Allerdings ist ein geringer, konstanter Offset vorhanden. Dies lässt sich da-
 durch erklären, dass die im Modell hinterlegten Lasten insgesamt als zu hoch ange-
 nommen wurden. Der größte Unsicherheitspunkt ist hierbei die Dauer, in der die einzel-
 nen Wärmequellen tatsächlich die Nennleistung aufnehmen und damit die entspre-
 chende Wärmeleistung abgeben.

Auf der Basis der Simulation der Gesamtmaschine wird ein detaillierteres Modell für den
 Bestückkopf und die Lagerfassung der Leiterplatte erstellt. Dieser Bereich ist für die
 Bestückgenauigkeit entscheidend. Um den Speicherbedarf und die Berechnungsdauer
 zu minimieren, wird nur ein sehr kurzer Abschnitt des Portals in dieses Modell einbezo-

¹⁶ Die Temperaturachse ist aus Vertraulichkeitsgründen nicht beschriftet.

gen. Die angrenzenden Festkörper- und Luftvolumina werden über die entsprechenden Temperaturwerte angeschlossen. Dazu werden die Temperaturen an den Anschlussstellen aus dem Modell der Gesamtmaschine übernommen und entsprechend der Messungen korrigiert.

Das Ergebnis dieses Simulationslaufes ist in Bild 77 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich ein deutlicher Temperaturgradient zwischen der Kamera zur Erfassung der Leiterplattenlage und der Spitze der Pinole der Bestückkopfs einstellt. Die Korrelation der Falschfarbendarstellungen des Simulationsergebnisses und der Messung mit der Thermokamera bestätigt die Qualität der Simulation eindrucksvoll. Die Ergebnisse dieser Detailsimulation ergaben wichtige Anregungen für die Optimierung der konstruktiven Gestaltung dieses Bereichs sowie für Strategien zur steuerungstechnischen Kompensation der thermischen Drift.

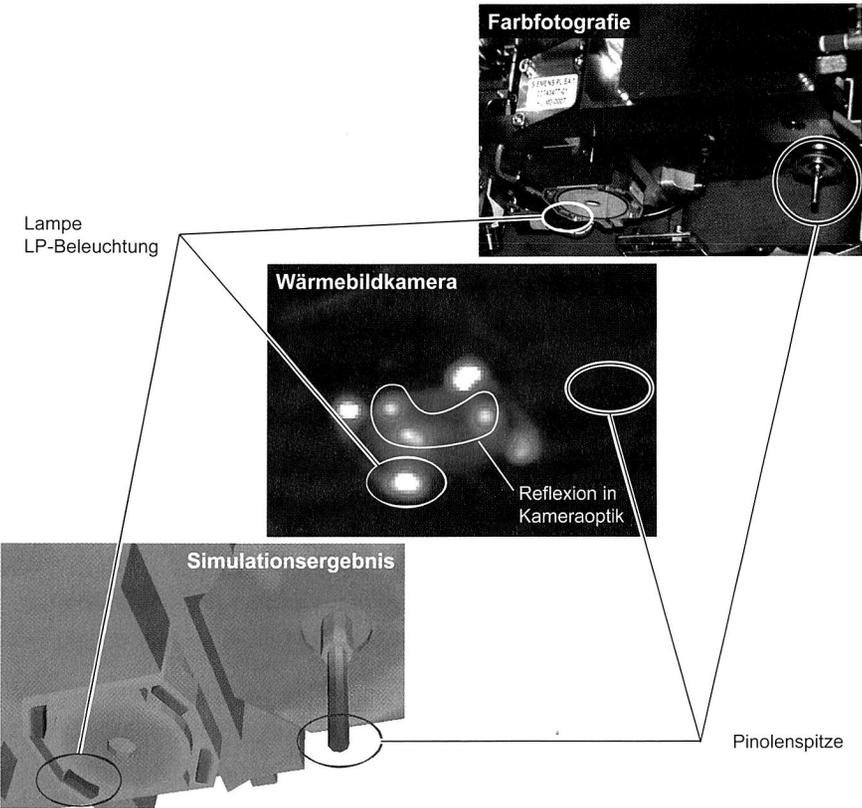


Bild 77: Lokale Temperaturverteilung an der Leiterplattenkamera und der Pinolenspitze¹⁷

¹⁷ Die Temperaturskalen sind aus Vertraulichkeitsgründen weggelassen.

Der Nutzen der CFD-Simulation der thermischen Erwärmung gegenüber der Messung an der Maschine besteht vor allem darin, dass ein konturscharfes Bild des gesamten interessierenden Bereichs ermittelt wird. Außerdem können die so ermittelten Temperaturen direkt für die Ermittlung der thermischen Verzerrung verwendet werden.

7.3.3 FE-Simulation der thermischen Verzerrung des Portals

Für die Berechnung der thermischen Verzerrung des Portals wird ein Dreiecks-Schalennetz verwendet. Der Vorteil dieser Diskretisierung gegenüber einem Tetraeder-Netz liegt in signifikant geringeren Rechenzeiten und Speicherbedarf für die Berechnung. Dadurch eignet sich das Netz, um sehr effizient Varianten bzgl. unterschiedlicher Wanddicken oder Lastfälle (Temperaturen und Auflagerbedingungen) zu berechnen.

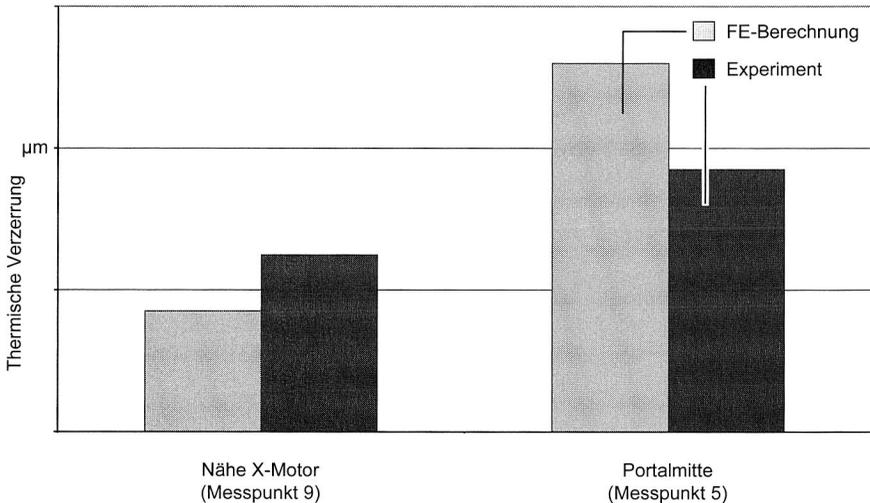


Bild 78: Verzerrung des Portals in X-Richtung im thermischen Gleichgewicht (zur Lage der Messpunkte siehe Bild 76)¹⁸

Für die Ermittlung der größten auftretenden thermischen Verzerrung sind die Temperaturen aus der Erwärmungssimulation im CFD-Modell des vollständigen Automaten (vgl. Bild 76) in das Schalennetz des Portals zu übertragen. Der Bestückkopf und seine Aufhängung werden in diesem Netz als Ersatzmassen hinterlegt. Für den Transfer der Temperaturen wird der in Abschnitt 5.2 beschriebene Prozessor CFD2Nastran verwendet. Zur Berechnung der thermischen Verzerrung ist jedoch nur die Temperaturdifferenz gegenüber der Raumtemperatur zu verwenden. Dies kann durch eine entsprechende Anpassung der Temperaturlasten geschehen. Alternativ können zwei Rechenläufe durchgeführt werden. Dabei wird zunächst die Verformung bei der in der CFD-Simulation ermittelten Temperaturverteilung berechnet. Anschließend wird eine Pseu-

¹⁸ Die Verzerrungsachse ist aus Vertraulichkeitsgründen nicht beschriftet.

do-Verformung bei Raumtemperatur berechnet und als Korrekturwert von der Verformung des ersten Simulationslaufs abgezogen.

Die so berechnete thermische Verzerrung in der Portallängsachse (X-Achse), die sich im Automaten im thermischen Gleichgewicht einstellt, ist in Bild 78 dargestellt. Zur Validierung der Simulation wurden die Daten der Bildverarbeitung für die Passmarkenerkennung (fiducials) während eines Dauerbestückversuchs aus der GEM-Schnittstelle ausgelesen. Diese sind ebenfalls in Bild 78 gezeigt. Der Vergleich zwischen Simulation und Experiment zeigt, dass die Simulation die thermische Verzerrung korrekt abbildet. So liegt der Unterschied am Messpunkt 9 im einstelligen Mikrometerbereich. Dies ist bereits die Größenordnung der Messunsicherheit.

Neben dem stationären Endwert der thermischen Verzerrung ist der transiente Verlauf von Interesse. Hierfür werden die Temperaturmesswerte aus Dauerbestückversuchen von [36], [61] in das Netz des Portals übertragen und für sechs Zeitpunkte eine stationäre Berechnung durchgeführt. Dies ist zulässig, da die Änderung der Temperatur langsam geschieht und damit ein quasi-stationärer Fall vorliegt. Dazu wurde zunächst auf der Basis der Temperaturen an den Messpunkten die Temperaturverteilung im Portal interpoliert, indem eine stationäre Wärmeleitungsrechnung durchgeführt wurde. Die so ermittelten Temperaturen dienen dann als Eingangsgrößen für die Berechnung der Verzerrung. Zur Validierung wird ein Dauerbestückversuch durchgeführt, bei dem die Verlagerung der Pipette mit Hilfe von Lasertriangulationssensoren während eines längeren Zeitraums erfasst wird [61], [36]. Diese Sensoren wurden für die Messung in die Leiterplattenaufnahme integriert. Bild 79 stellt die mit der FE-Simulation berechnete Verzerrung des Mittelpunkts des Bestückkopfs und die mit der Lasertriangulation gemessene Verlagerung dieses Punkts gegenüber.

Es ist zu erkennen, dass die in der Simulation ermittelte Verzerrung größer ist als die Verlagerung, die bei abgeschalteter Passmarkenerkennung gemessen wurde. Gleichzeitig sind die Kurven ähnlich, d. h. sie unterscheiden sich in der Skalierung. Die in der FE-Simulation ermittelte Kurve ist durchgehend um das 1,5-fache größer als die gemessene. Dies erklärt sich vor allem dadurch, dass die Messung bei [61], [36] relativ zur in der Maschine ruhenden Leiterplatte gemessen wurde. In der FE-Simulation wurde die thermische Verzerrung des Maschinengestells und des Leiterplattentransports aber nicht mit einbezogen. Diese Verzerrung erfolgt in der selben Richtung wie die des Portals, wodurch sich die gemessene Verlagerung des Bestückkopfs verringert. Eine Simulation mit den korrespondierenden Daten des Gestells konnte nicht durchgeführt werden. Der Grund hierfür besteht darin, dass wegen der Komplexität des Gestells eine sehr große Zahl Temperaturmesswerte erforderlich wäre. Mit der verfügbaren Ausrüstung ist dies allerdings nicht zu erfassen. Kleinere Quellen für die Abweichung sind die Tatsache, dass das Temperaturfeld nur an einigen Stützstellen bekannt ist und dazwischen als homogen angenommen wurde.

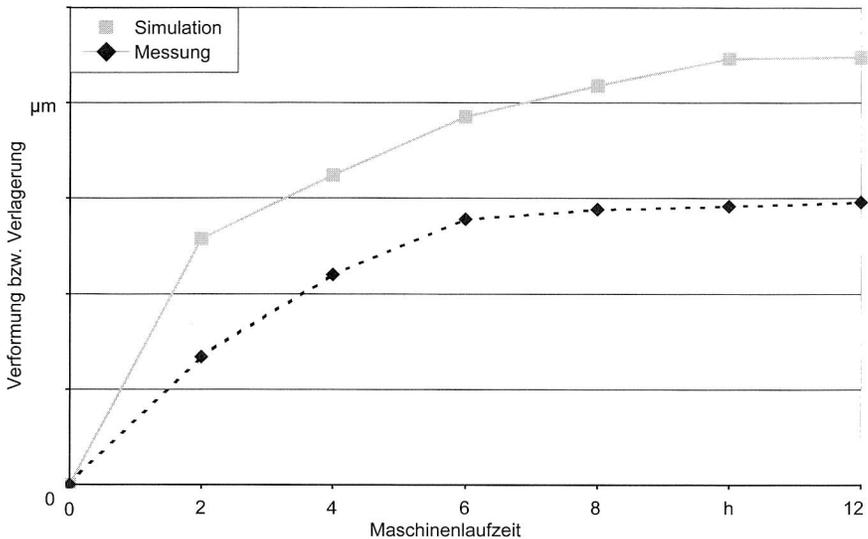


Bild 79: *Transiente Verformung aus der Simulation und gemessene Verlagerung in X-Richtung*¹⁹

Außerdem sind Effekte des Bestückkopfs und dessen Aufhängung nicht mit einbezogen. In einem folgenden Schritt wurden daher die Temperaturen und das Modell aus Bild 77 verwendet und für diesen Bereich eine thermoelastische Analyse durchgeführt. Damit wurden Effekte aufgezeigt, die erheblich zum Verständnis der thermischen Drift und ihrer Kompensation beigetragen haben.

7.3.4 Weitere Verwendung der Ergebnisse der Simulation des thermischen Verhaltens

Die Ergebnisse der simulationsgestützten Analyse des thermischen Verhaltens des betrachteten Bestückautomaten liefern wichtige Hinweise über die Mechanismen der thermischen Drift. Diese sind mit messtechnischen Mitteln kaum zu erfassen: So kann die thermische Verzerrung, die im zweistelligen Mikrometerbereich liegt, in der Maschine nur indirekt gemessen werden. Mit Hilfe der CFD-Simulation des Erwärmungsverhaltens wird für die gesamte Maschine oder für spezielle Teilbereiche und Baugruppen ein umfassendes Bild der Temperaturverteilung ermittelt. Dadurch lassen sich die Einflüsse der einzelnen Wärmequellen auf die Erwärmung des Gesamtsystems und von Teilbereichen beurteilen. Darüber hinaus können durch Variantenrechnungen die Auswirkungen konstruktiver Maßnahmen wesentlich schneller erfasst werden als an einem physikalischen Prototypen. Mit der FE-Simulation der thermischen Verzerrung wird die Verformung der einzelnen Bauteile erfasst. Damit werden die thermoelastischen Effekte, die der Drift zu Grunde liegen, erfasst und visualisiert. Darauf aufbauend lassen sich

¹⁹ Die Verformungsachse ist aus Vertraulichkeitsgründen nicht beschriftet.

Kompensationsalgorithmen für die Maschinensteuerung ableiten. Dazu wird an einer repräsentativen Stelle die Maschinen- bzw. Bauteiltemperatur erfasst und die Verzerungskurve, z. B. die in Bild 79 gezeigte, der Bahninterpolation als Korrekturgröße übergeben. Nach dem Abschluss der Gestaltung unter dem Gesichtspunkt der thermischen Stabilität werden die FE-Modelle derjenigen Bauteile in einen virtuellen Prototypen integriert, die für das thermische Verhalten entscheidend sind. Da der virtuelle Prototyp als Mehrkörpermodell erstellt wird, wird für die Kopplung der Modelle der in Abschnitt 5.3 vorgestellte Prozessor Nastran2Adams verwendet.

7.4 Simulation des dynamischen Verhaltens

Das dynamische Verhalten einer Fertigungsmaschine umfasst im Wesentlichen vier Teilaspekte: Die Starrkörperbewegungen der Bauteile, durch die sich die Massen- und Steifigkeitsverteilung ändert [76], das Schwingungsverhalten dieser Bauteile, die Elastizität und Dämpfung von Gelenken und Verbindungsstellen sowie schließlich die Antriebe und die Bahnsteuerung. Das Schwingungsverhalten lässt sich an Hand der Eigenfrequenzen der Bauteile beurteilen, die mit der FEM ermittelt werden. Für die Auslegung von Antriebsregelungen haben sich CACE-Werkzeuge etabliert und die Steifigkeit und Dämpfung von Gelenken und Bauteilverbindungen kann in der FEM und der Mehrkörpersimulation beurteilt werden. Zur Integration der vier Teilaspekte bietet sich die Mehrkörpersimulation an, da in ihr Bewegungen im Zeitbereich sehr einfach modelliert und auch Bauteile als flexible Körper hinterlegt werden können.

7.4.1 Modellierungselemente und -methoden für die Maschinendynamik

Das Teilmodell zur Analyse der Maschinendynamik des Bestückautomaten wird in der Mehrkörpersimulation erstellt. In dieses werden alle für die Pick und Place-Bewegung relevanten mechatronischen Komponenten wie die Antriebe und die von ihnen bewegten Bauteile integriert. Wesentliche Komponenten des Bestückautomaten, die im Dynamikmodell abzubilden sind, zeigt Bild 80.

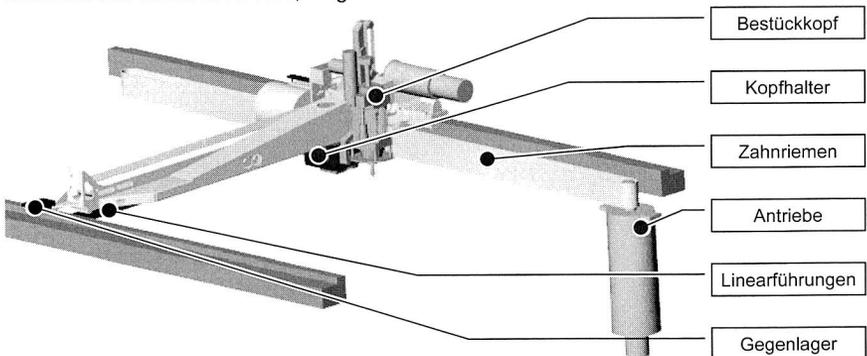


Bild 80: Wesentliche Modellierungselemente für die Dynamiksimulation

Den Ausgangspunkt für die Modellerstellung bilden die als CAD-Daten verfügbaren Geometrien der einzelnen, bewegten Bauteile. Für diese ist festzulegen, ob das Schwingungsverhalten einen relevanten Einfluss auf die erreichbare Arbeitsgenauigkeit hat. Sofern dies nicht ausgeschlossen werden kann, ist für diese Komponente eine Modalanalyse durchzuführen, wie in Abschnitt 7.4.2 am Beispiel des Portals gezeigt wird. Das Ziel bei der Modellerstellung für die Mehrkörpersimulation ist es, so wenige Körper wie möglich flexibel zu modellieren, um den Speicherbedarf und die Rechenzeit zu minimieren. Bei starr modellierten Körpern sind nur der Trägheitstensor und die Lage des Schwerpunkts sowie die dazu relative Lage der Kraftangriffspunkte zu modellieren. Hierfür ist eine stark vereinfachte Geometrie des entsprechenden Körpers ausreichend.

Das Zusammenspiel der Körper wird durch die zwischen ihnen wirkenden Kräfte und von den Gelenkbedingungen bestimmt. Bei der Modellierung des Bestückautomaten zeigt sich, dass für hinreichend genaue Simulationsergebnisse die Annahme ideal steifer Gelenke in vielen Fällen nicht sinnvoll ist. Hier sind Gelenkbedingungen durch Kräfte- und Momentenformulierungen zu ersetzen, was allerdings neben der gewünschten Verbesserung der Simulationsgenauigkeit zu aufwändigeren Berechnungen führt, vgl. [138]. Eine wesentliche Rolle spielen hierbei Kontaktformulierungen. Diese erlauben es, auch ein einseitiges Abheben eines Körpers zu modellieren, was z. B. mit einem ebenen Gelenk nicht möglich ist.

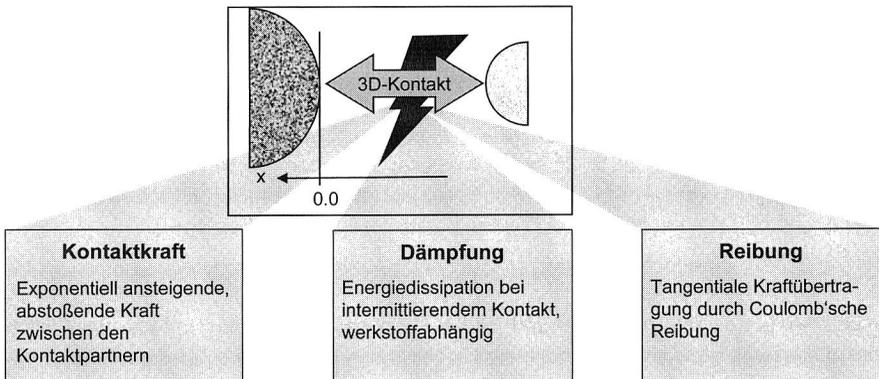


Bild 81: Parameter des Modellierungselements 3D-Kontakt

Für das Modell des Bestückautomaten werden bei einer nennenswerten Zahl von Gelenkbedingungen dreidimensionale Kontakte verwendet. Dieses Kraffelement erlaubt es, zwischen zwei Körpern eine abstoßende Kraft einzuführen, die Null ist, solange sich die Körper nicht berühren, d. h. solange $x > 0$ in Bild 81. Die Kontaktkraft stellt somit ein nicht-lineares Modellierungselement dar. Ein Beispiel für die Verwendung einer Kontaktkraft ist die Modellierung, die für das Gegenlager des Portals (vgl. Bild 80) gewählt wurde. Hier sind die abstoßende Kraft, die Schwingungsdämpfung durch die verwendete Materialpaarung sowie die Reibung entscheidend. Die korrekte Abbildung der Reibkraft, die der Bewegung entgegengerichtet ist, ist für die folgende Auslegung der

Antriebsregelung entscheidend. Die Verwendung von Kontakten eröffnet außerdem die Möglichkeit, Spiel bzw. Vorspannung in Lagern und an Führungen zu modellieren. Für die Modellierung von Spiel wird zwischen den Kontaktpartnern ein definierter Abstand hinterlegt. Soll eine Vorspannung implementiert werden, so wird eine definierte Durchdringung der beiden Geometrien vorgesehen. Auf Grund dieses erzwungenen Kontaktes entsteht eine abstoßende Kraft zwischen den beiden Körpern, die in der Höhe der Vorspannung entspricht.

Neben Gelenken und Berührungspunkten von Körpern werden die Antriebe modelliert. Dabei sind zwei Modellierungsansätze verfügbar: Zum einen kann die Bewegung eines angetriebenen Körpers vorgegeben werden und die Mehrkörpersimulation berechnet die dazu erforderliche Antriebskraft. Zum anderen wird in das Modell von außen ein Antriebsmoment eingespeist, für das dann die entsprechende Bewegung berechnet wird. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Auslegung einer Antriebsregelung in der Mehrkörpersimulation durchzuführen, indem das Antriebsmoment z. B. aus einem CACE-Simulator eingekoppelt wird.

7.4.2 FE-Simulation des Schwingungsverhaltens von Bauteilen

Das Ausschwingverhalten des Bestückautomaten wurde bei [61] als entscheidender Punkt für die Arbeitsgenauigkeit benannt. Um den Einfluss der einzelnen Bauteile auf das Schwingungsverhalten quantifizieren zu können, ist zunächst eine Modalanalyse der relevanten Komponenten durchzuführen. Dies wurde im Rahmen der Untersuchung des Automaten für das Portal sowie für weitere, genauigkeitsbestimmende Teile durchgeführt. Dabei ist eine Abwägung von gewünschter Genauigkeit und erforderlichem Aufwand zu treffen. Dies wird am Beispiel von vier beliebig ausgewählten Eigenfrequenzen des Portals deutlich, die an FE-Modellen mit unterschiedlich feiner Vernetzung ermittelt wurden. Wie in Bild 82 zu erkennen ist, führt die deutlich feinere Vernetzung mit ca. 300.000 Knoten kaum noch zu einer Verbesserung der Aussage.

An Stelle der numerisch aufwändigen Rechnung kann ein besserer Näherungswert für die tatsächliche Eigenfrequenz mit dem Extrapolationsverfahren nach Richardson ermittelt werden. Hierfür werden zwei FE-Modelle desselben Körpers mit unterschiedlich feinen Netzen erstellt. Die so ermittelten Eigenfrequenzen, die zu einer Eigenform gehören, werden in eine rein algebraische Formel eingesetzt. Diese liefert einen weiteren, besseren Näherungswert für den tatsächlichen Wert. Dieses Vorgehen bietet sich für die Modalanalyse besonders an, da die Eigenfrequenz eine quadratische Konvergenzordnung aufweist [58].

Die FE-Modelle der Bauteile, die einen entscheidenden Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Automaten ausüben, werden im Mehrkörpermodell flexibel hinterlegt. Dazu dient die erweiterte FE-Schnittstelle der Mehrkörpersimulation, die in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 beschrieben wird. Sie beinhaltet auch die Möglichkeit, die in der Mehrkörpersimulation ermittelten Lasten für den FE-Präprozessor aufzubereiten und so eine detaillierte Analyse des Schwingungsverhaltens der betrachteten Bauteile unter einer dynamischen Last zu analysieren.

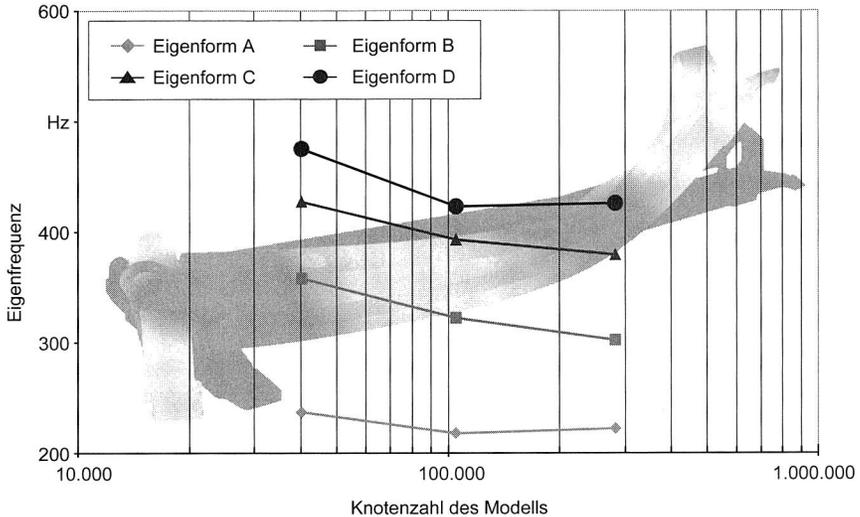


Bild 82: Einfluss der Netzqualität auf die berechnete Eigenfrequenz

7.4.3 Mehrkörpermodell zur Simulation des Bewegungsverhaltens

Das Mehrkörpermodell des Bestückautomaten gibt die kinematische Topologie der Maschine wieder. Dazu werden die einzelnen Bauteile des Automaten im CAD-System geeignet vereinfacht und in die Mehrkörpersimulation übernommen. Die Freiheitsgrade zwischen den einzelnen Körpern werden zunächst mit idealen Gelenken modelliert.

Hiermit ist es allerdings nicht möglich, redundante Randbedingungen korrekt abzubilden. Ein Beispiel hierfür ist eine zweifach gelagerte Welle, deren radialer Freiheitsgrad durch zwei Lagerstellen gefesselt wird. Um die Verteilung der Radialkraft auf beide Lagerstellen korrekt abzubilden, können Feder-Dämpfer-Elemente verwendet werden [163]. Diese weisen dann in radialer Richtung eine sehr hohe Steifigkeit auf, während sie um die Rotationsachse nur mit einer minimalen Steifigkeit parametrisiert werden. Da die hierdurch erreichte Verbesserung der Simulationsgenauigkeit mit einer Verringerung der Effizienz einhergeht, wird dies nur in den folgenden Fällen durchgeführt:

- Das Bauteil soll anschließend einer FE-Berechnung mit den in der Mehrkörpersimulation ermittelten Lasten unterzogen werden.
- Das Bauteil bzw. seine Lagerung hat entscheidenden Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit und es ist das Ziel des Simulationslaufs, seine Steifigkeit bzw. die seiner Verbindungsstellen zu dimensionieren.

Für die Parametrierung der Steifigkeit und Dämpfung von Gelenken und Verbindungsstellen können die Angaben von Lagerherstellern übernommen werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass diese Werte oft an Versuchsaufbauten ermittelt wurden, die nicht direkt der tatsächlichen Einbausituation entsprechen. Sie sind dann in Abstim-

mung mit den Herstellern für das tatsächliche Umfeld anzupassen. Außerdem ist bei Anwendungen mit sehr hohen Drehzahlen eine Abhängigkeit der Steifigkeit von der Drehzahl zu beachten [174].

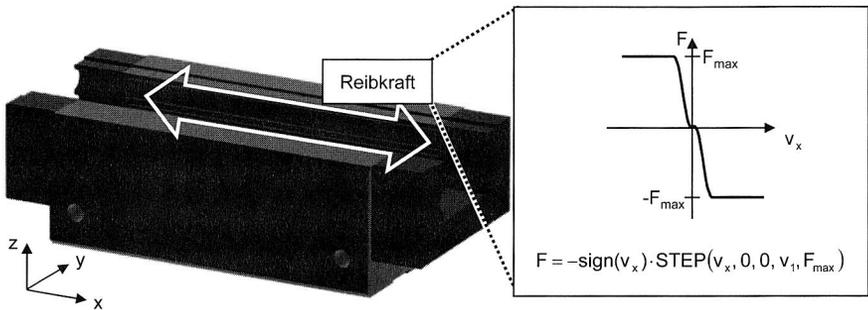


Bild 83: Ansatz für Reibkräfte am Beispiel der Linearführung der X-Achse

Neben den Bauelementen und den sie verbindenden Gelenken sind vor allem die wirkenden Kräfte im Mehrkörpermodell zu hinterlegen. Dies sind die Antriebskräfte, die von der Maschinensteuerung vorgegeben werden und die Reibkräfte. Für letztere wird folgender Ansatz gewählt (Bild 83):

Die Reibkraft ist grundsätzlich der Bewegung entgegen gerichtet. Die Vorzeichenabhängigkeit wird durch die Signum-Funktion realisiert. Außerdem wird durch die Step-Funktion ein hinreichend glatter Verlauf der Kraft gewährleistet, so dass numerische Probleme vermieden werden. Der Parameter v_1 der Step-Funktion, der die Geschwindigkeit angibt, ab der die maximale Reibkraft auftritt, wird so gewählt, dass ein steiler Anstieg der Reibkraft bzgl. der Verfahrgeschwindigkeit gewährleistet ist. Zur Verdeutlichung ist dieser Anstieg in Bild 83 weniger steil dargestellt als bei der Realisierung im Modell. Der gewählte Ansatz ist gerechtfertigt, da bei den verwendeten Lagern kein Stick-Slip-Effekt zu beobachten ist.

7.4.4 Einbettung einer Linearführung an einem flexiblen Körper

Ein Aspekt von besonderer Bedeutung ist die korrekte Anbindung der Aufhängung des Bestückkopfs an das Portal. Dieses ist als flexibler Körper modelliert, entlang dem der Bestückkopf als bewegliche Last verfahren wird. Eine solche Anwendung wird in der verwendeten Mehrkörpersimulation Adams nur sehr bedingt unterstützt.

Eine Modellierungsstrategie wird in [4] vorgeschlagen: Dazu wird der bewegte Körper an eine raumfeste Kurve angebunden, die der Kontur des flexiblen Körpers im Ruhezustand entspricht. Die Verformung der Führungskurve unter der bewegten Last wird durch eine komplexe Topologie von Kontaktkräften und Gelenkbedingungen realisiert. Dies hat jedoch den Nachteil, dass rotatorische Verschiebungen der Last durch Gelenke abgefangen werden, die mit dem Inertialsystem verbunden sind und somit nicht auf den flexiblen Körper wirken. Beim dort betrachteten Fall einer Straßenbrücke liefert dies

eine sehr gute Näherung, führt jedoch für den in diesem Kapitel betrachteten Bestückautomaten zu nicht hinnehmbaren Abweichungen.

Daher wird ein eigener Modellierungsansatz gewählt, der in Bild 84 dargestellt ist: Die Teilstücke der Führungsschiene zwischen den Schraubverbindungen mit dem Portal werden diskretisiert, d. h. in einzelne Elemente aufgeteilt. Diese werden an den Schraubverbindungen über starre Verbindungen mit dem Portal verbunden, während sie untereinander durch räumliche Feder-Dämpfer-Elemente (sog. Bushings) verbunden sind. Die Führung des Wagens in der Schiene wird von sechsdimensionalen Kräftelementen übernommen [35].

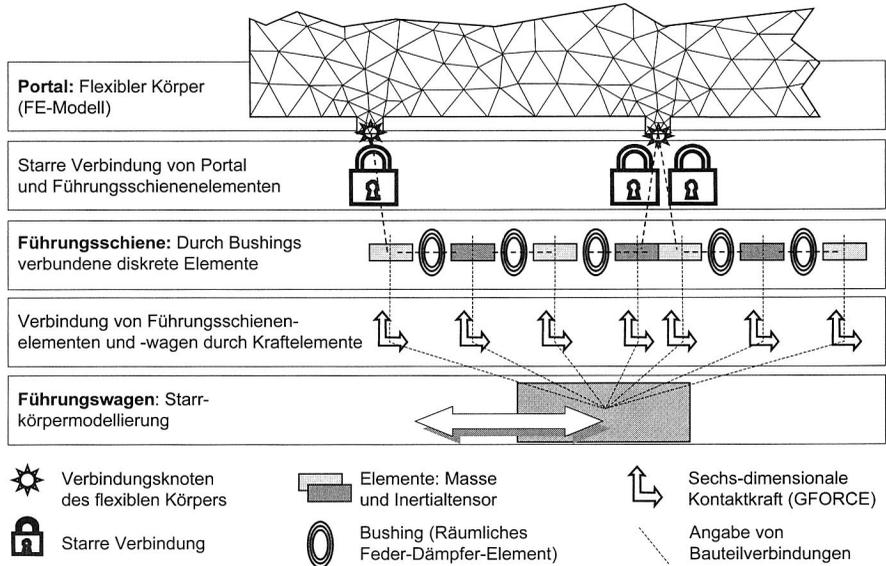
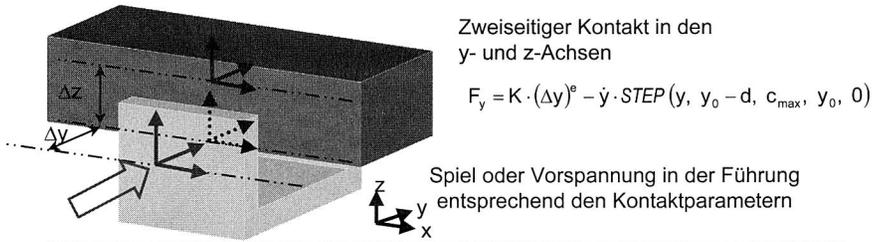


Bild 84: Topologie des Schiebegeräts an einem flexiblen Körper [35]

Diese Kräftelemente weisen in der Y- und Z-Richtung eine Kontaktformulierung auf, die in Adams intern aus zwei Termen zusammengesetzt ist: Ein Ausdruck steigt mit der Durchdringung exponentiell an während der zweite eine geschwindigkeitsabhängige Dämpfung nachbildet. Letzterer wird durch eine Step-Funktion realisiert, die die Dämpfung auf einen vom Anwender vorgegebenen Maximalwert begrenzt. Mit diesem Ansatz können sowohl Spiel als auch Vorspannung in der Linearführung durch einfache Parametervariation abgebildet werden. Für die rotatorische Führung wird ein Feder-Dämpfer-Ansatz in allen drei Drehfreiheitsgraden gewählt. Diese Definition wird in Bild 85 gezeigt.

Die Kräftelemente sind für jedes Element der Führungsschiene im Modell hinterlegt. Die Umsetzung geschieht durch die Übergabe der aktuellen Bewegungsgrößen des Führungswagens an die Programmierschnittstelle der verwendeten Mehrkörpersimulation. Dort wird das Element ermittelt, an dem sich der Führungswagen aufhält und dann nur

für dieses die Führungskräfte berechnet. Die Reibung wird mit dem in Bild 83 gezeigten Ansatz modelliert, auch dies geschieht abschnittsweise.



Feder-Dämpfer-Verhalten in den Rotationsachsen (Rx, Ry, Rz)

$$F = -K \cdot \alpha - C \cdot \dot{\omega}$$

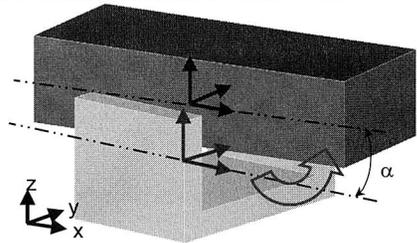


Bild 85: Abschnittsweise Definition der Kräfte zwischen Führungsschiene und -wagen für das Schiebegelenk am flexiblen Körper

Der Vorteil des geschilderten Modellierungsansatzes für die Führungsschiene der X-Achse besteht darin, dass nur Standardmodellierungselemente verwendet werden und eine sehr übersichtliche Topologie realisiert wird. Ihre Erstellung ist sehr leicht automatisierbar, da vom Benutzer lediglich die Feinheit der Unterteilung und die Parameter der Kräfte einzugeben sind. Dies beinhaltet nicht nur die Modellierung, sondern auch die automatische Ableitung der Unterroutine für den Solver.

Der beschriebene Ansatz ist zu verifizieren. Dazu werden in der Simulation die Auflagerkräfte an den Schraubverbindungen in Abhängigkeit vom Lastangriffspunkt ermittelt. Sie werden mit denen verglichen, die sich aus einer analytischen Rechnung für das zu Grunde liegende mechanische Modell ergeben. Dieses ist für jeden Abschnitt der Führungsschiene, der durch die Schraubverbindungen mit dem Portal begrenzt wird, ein beidseitig fest eingespannter Balken unter Punktlast. Für die Verifizierung wird auf die statische Berechnungsformel zurückgegriffen, die z. B. in [8] zu finden ist. Diese geht von einer ideal starren Einspannung aus. Für den Simulationslauf zur Verifizierung ist das Portal daher als starrer Körper anzusetzen. Außerdem ist die Verfahrbewegung sehr langsam, d. h. quasistatisch, durchzuführen.

Die Ergebnisse von Simulation und Berechnung sind Bild 86 gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass beide Kurven denselben Verlauf aufweisen. Die Simulationsergebnisse weisen dabei eine treppenförmige Kurve auf, entsprechend der gewählten Diskretisierung von zehn Elementen für jeden Abschnitt der Führungsschiene. Falls eine noch bessere Annäherung an den analytischen Verlauf erforderlich ist, kann die Zahl der

Elemente erhöht werden. In Bild 86 ist bei ca. -90 mm ein Ausreißer zu erkennen. Dieser Effekt wird durch die Kontaktformulierung verursacht und kann durch eine feinere zeitliche Diskretisierung vermieden werden. Er zeigt auch, dass der gewählte Ansatz trotz der Verwendung von Kontakten hinreichend stabil ist und ein geringer numerischer Fehler nicht zum Abbruch der Berechnung führt. Für die Verwendung der Auflagerkräfte in einem FE-Modell des Portals können derartige Ausreißer mit der in Abschnitt 5.3.2 vorgestellten Adams-Femap-Schnittstelle geglättet werden.

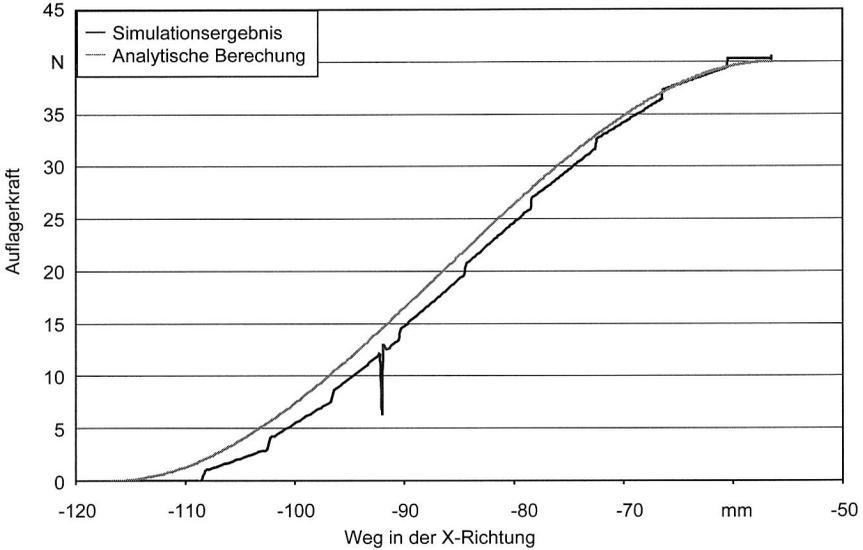


Bild 86: Verifizierung der Auflagerkräfte durch Vergleich mit dem analytischen Modell eines beidseitig fest eingespannten Balkens

7.4.5 Integration des Zahnriementriebs

Die Umsetzung der Rotationsbewegung des Elektromotors in die Translationsbewegung der Maschinenachse erfolgt im betrachteten Bestückautomaten für die X-, Y- und die Z-Achse über Zahnriementriebe. Da sie das Bindeglied zwischen dem Motor und den angetriebenen mechanischen Baugruppen darstellen, ist es von Interesse, ihr Übertragungsverhalten zu kennen. Dies beinhaltet Schwingungen, die durch den Wechsel von Zahn- und Lückenkontakt beim Einlauf in die Riemenscheibe verursacht werden. Außerdem ist für die Wahl der Vorspannung die geschwindigkeitsabhängige Aufweitung des Leertrums zu beachten [132].

Für die Modellierung wird das Modul "timing mechanism" von Adams / Engine [80] eingesetzt, das den in Bild 87 gezeigten Modellierungsansatz verwendet. Dazu wird der Riemen in einzelne starre Körper aufgeteilt, die einen Zahn bzw. einen Zahnzwischenraum (Lücke) darstellen. Diese sind über Drehgelenke und Feder-Dämpfer-Elemente

ander verbunden. Die Riemenscheiben sind starre Körper, deren Außenkontur dem gewählten Zahnprofil entspricht. Um die Umschlingung der Scheibe durch den Riemen darstellen zu können, werden Kontaktkräfte zwischen den Riemenkörpern und der Scheibe verwendet. Die Kontaktkräfte wirken sowohl in radialer als auch in tangentialer Richtung der Scheibe. Während die Summe der radialen Kräfte der Vorspannung des Riemens entspricht, wird über die tangentialen Kräfte die Antriebsbewegung übertragen. Dieser Ansatz wird auch bei anderen Simulationswerkzeugen als Basis verwendet, z. B. bei [73].

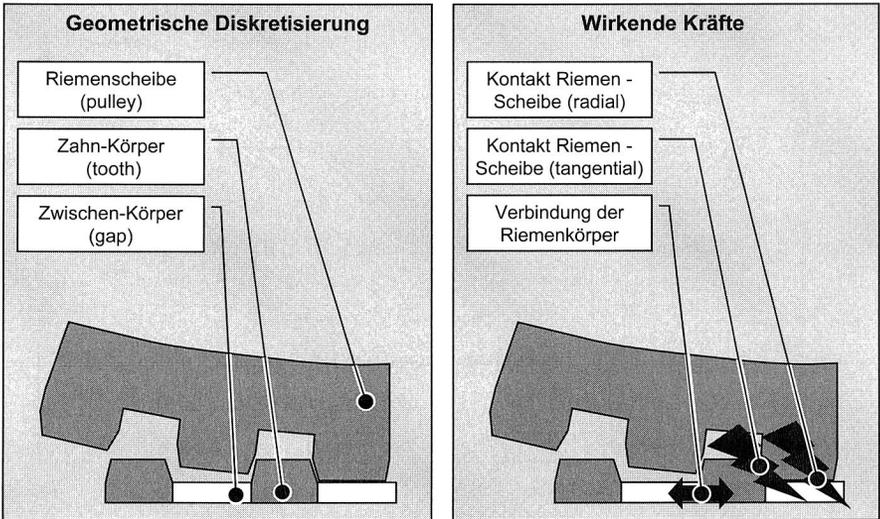


Bild 87: Schematischer Aufbau von Riementreiben in Adams/Engine

Der Riemetrieb stellt kein Standardmodellierungselement in der Mehrkörpersimulation dar, vielmehr bildet er einen Teil von Adams / Engine, und wurde speziell für Steuertriebe von Kolbenmaschinen entwickelt. Auf Grund der schablonenbasierten Modellierung in Adams / Engine ist der Anwender in der Freiheit der Modellerstellung erheblich eingeschränkt. Es ist nötig, das Modell des Bestückautomaten als Subsystem zu kapseln und die Punkte, an denen der Riemetrieb mit dem übrigen Automaten interagiert, a priori zu definieren. Der Riemetrieb bildet dann ein zweites Subsystem, das über korrespondierende Punkte mit anderen Subsystemen verbunden ist. In der kommerziellen Distribution ist nur die Übergabe der Drehzahl bzw. des Drehmoments an den Riemenscheiben zwischen den Subsystemen vorgesehen. Dies ist für den Einsatz des Zahnriemens als lineares Antriebselement nicht ausreichend. Vielmehr ist zusätzlich eine Kopplung der Translationsbewegung des Riemenschlosses am angetriebenen Körper mit dem Riemenelement vorzusehen, das am Riemenschloss befestigt ist (Bild 88). Für die Umsetzung im Modell wird Adams / Engine entsprechend erweitert.

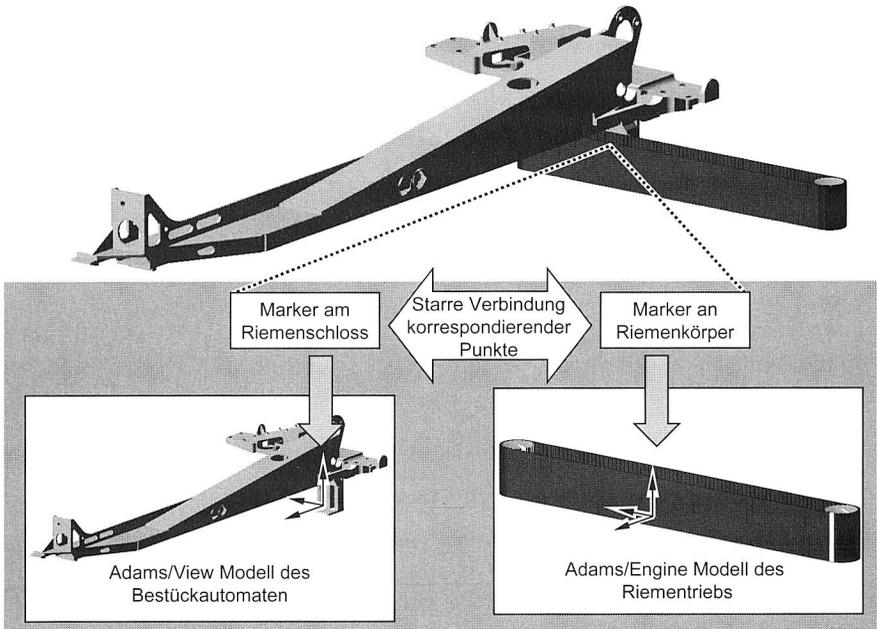


Bild 88: Integration von Riemenmodell und Modell des Bestückautomaten

Diese Kopplung eröffnet das Potential, den gesamten Antriebsstrang inklusive der Effekte des Zahnriemens in einem Modell zu studieren. Damit können auch die Einflüsse der einzelnen Zahnriemenparameter wie Teilung und Modul erfasst und am Simulationsmodell gegenübergestellt werden. Gleichzeitig weist die Verwendung des Moduls timing mechanism einige nicht zu vernachlässigende Einschränkungen auf: In Kolbenmaschinen ist der Abstand der Riemenscheiben durch die Lage von Kurbel- und Nockenwelle starr vorgegeben. Die Riemenspannung wird durch Spannrollen eingestellt, die von außen gegen den Riemen drücken. Im Gegensatz dazu ist beim Bestückautomaten die Spannrolle gleichzeitig eine innen liegende Umlenkrolle. Die Vorspannung kann für das Modell des Bestückautomaten auf Grund des andersartigen mechanischen Aufbaus nur durch zeitintensives, iteratives Probieren eingestellt werden. Sie stellt allerdings einen wesentlichen Faktor für die Eigenfrequenz des Riementriebs dar [44]. Die Berechnungen des Zahnriementriebs erweisen sich wegen der hohen Zahl der Freiheitsgrade im Modell, die direkt mit der Riemenlänge ansteigt, als sehr rechenzeitintensiv. Daher wird für die folgenden Berechnungen der Riementrieb als Kraftgröße am Antrieb übernommen.

7.4.6 Überlagerte Simulation von Schwingungen und Starrkörperbewegungen

Nachdem alle wesentlichen mechanischen Baugruppen bzgl. ihres Modellierungsansatzes festgelegt sind, wird das Mehrkörpersimulationsmodell des Automaten (Bild 89) erstellt. Es beinhaltet die bewegten Baugruppen der vier angetriebenen Achsen mit den Verbindungen durch Gelenke und Kraftgrößen. Insbesondere wird für die X-Achse das in Abschnitt 7.4.4 dargestellte lineare Gelenk an einem flexiblen Körper verwendet.

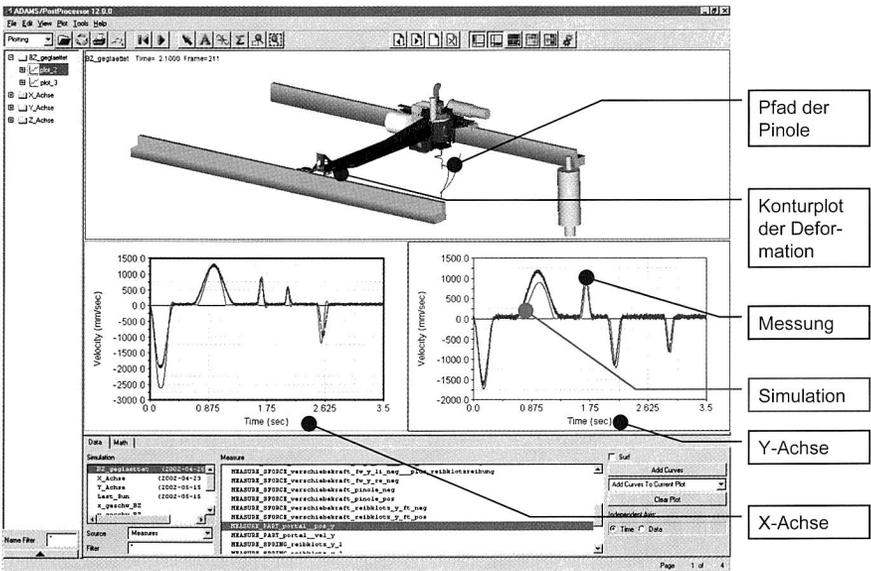


Bild 89: Simulation eines Bestückzyklus in der Mehrkörpersimulation

Das Modell wird durch Messungen am realen Automaten validiert. Dazu wird ein vom Maschinenhersteller zur Verfügung gestelltes Messgerät verwendet. Mit diesem werden der Motorstrom und gleichzeitig die Verfahrensgeschwindigkeit der einzelnen Achsen bei unterschiedlichen Verfahrensbewegungen aufgenommen. Das wirkende Antriebsmoment wird aus dem Motorstrom berechnet, indem dieser mit dem Drehmomentfaktor des Motors und dem Radius der treibenden Riemenscheibe multipliziert wird. Der Drehmomentfaktor wird aus den Datenblättern der Motoren entnommen. Er ist jedoch keine Konstante, sondern weist bei größeren Motorströmen als dem Nennstrom eine abfallende Kennlinie auf.

In der Simulation wird das so ermittelte Antriebsmoment vorgegeben. Der Simulationslauf liefert dann einen Geschwindigkeitsverlauf entsprechend der hinterlegten Parameter. Die in der Simulation und der Messung ermittelten Geschwindigkeitsverläufe werden dann verglichen. Dabei zeigt sich, dass mit einem elastischen Portal eine deutlich bessere Übereinstimmung mit der Messung erzielt wird. Für einen Bestückzyklus, der

das Anfahren von fünf Positionen umfasst, sind die Ergebnisse der Simulation und der Messung in Bild 89 für die X- und die Y-Achse gezeigt. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen, die auch im Laufe der überlagerten Bewegung aller Achsen erhalten bleibt. Das dynamische Teilmodell ist damit validiert und steht für die Integration zur virtuellen Maschine bereit.

7.4.7 Integration der Antriebsregelung

Die Maschinensteuerung setzt die logische Abfolge nacheinander zu bestückender Bauteile in Verfahrensbewegungen der einzelnen Achsen um. Dazu werden die anzufahrenden Positionen der Achsen berechnet und der Antriebsregelung als Sollwerte übergeben. Für die Antriebsregelung wird eine mehrschleifige Lageregelung (vgl. z. B. [65], [135]) verwendet. Diese beinhaltet drei ineinander geschachtelte Regelkreise für den Motorstrom, die Geschwindigkeit und die Position.

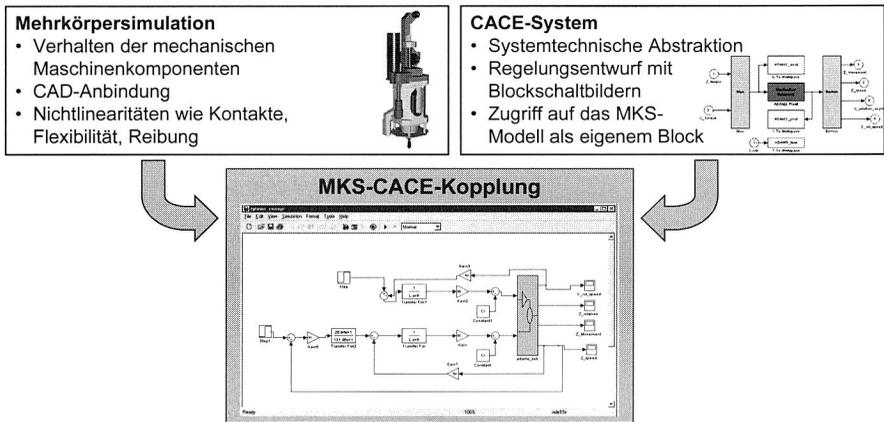


Bild 90: Prinzip der Kopplung von Mehrkörper- und Blocksimulator zur Auslegung der Antriebsregelung am Beispiel des Bestückkopfs

Für die Integration der Antriebsregelung in das Mehrkörpersimulationsmodell wird dieses als Regelstrecke aufgefasst, deren Eingangsgrößen die Antriebsmomente sind und die Lage und Geschwindigkeit der angetriebenen Achsen als Ausgangssignale liefert. Die Umsetzung kann durch eine entsprechende Formulierung des Antriebsmoments als benutzerdefinierte Funktion mit Hilfe der Programmierschnittstelle (API) erfolgen. Die Funktion wird dann bei jedem Berechnungsschritt der Simulation aufgerufen. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass vergleichsweise einfach ein komplexer Bestückzyklus realisiert werden kann. Gleichzeitig sind jedoch einige gravierende Nachteile festzuhalten: So müssen alle Blöcke des Regelkreises, die nicht im Mehrkörpermodell hinterlegt sind, mit der Programmierschnittstelle umgesetzt werden. Außerdem erlaubt die verfügbare Programmierschnittstelle keine globalen Variablen. Dadurch wird die Datenhaltung bereits bei einer Achse sehr unübersichtlich. So sind etwa für jeden Block, der ein integrierendes Verhalten aufweist, der letzte Eingangswert, der letzte Ausgangswert sowie der

entsprechende Zeitpunkt als formale Parameter mitzuführen. Gleiches gilt für die Verzögerungsglieder.

Als Alternative bietet sich die Kopplung des Mehrkörpermodells mit einem CACE-System an, wie in Bild 90 am Beispiel der Achsen des Bestückkopfs gezeigt. Damit werden die elektrischen Komponenten, deren genauer innerer Aufbau oft unbekannt ist und von denen meist nur die systemtechnischen Kenngrößen vorliegen, im Blocksimulator hinterlegt. Der mechanische Aufbau der Maschine, inklusive der Nichtlinearitäten wie Reibung und Kontakten, ist weiterhin im Mehrkörpermodell hinterlegt. Dieses wird automatisch als nichtlinearer Block im CACE-System gekapselt und hat die Antriebsmomente der betrachteten Achsen als Eingänge sowie deren Geschwindigkeiten und Positionen als Ausgänge. Somit lassen sich schnell realistische Regelkreisstrukturen in die Mehrkörpersimulation einbinden.

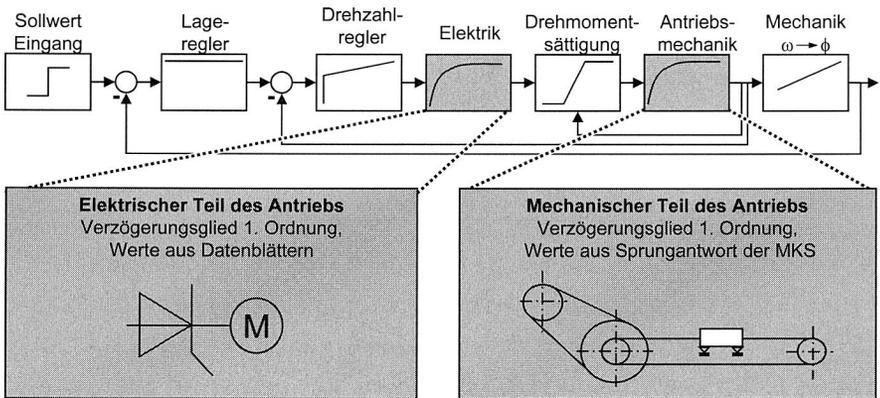


Bild 91: Schematische Struktur der Lageregelung für die angetriebenen Achsen

Für die Antriebsregelung ergibt sich die in Bild 91 gezeigte Struktur. Hier wird außerdem eine Drehmomentsättigung am Ausgang des Blocks für die elektrischen Komponenten eingeführt. Diese spiegelt die Kennlinie des Motors wieder, die bei hohen Drehzahlen einen deutlichen Abfall des Drehmoments aufweist. Der Verlauf wird durch ein Polynom vierten Grades approximiert. Dadurch wird sichergestellt, dass das Mehrkörpermodell mit dem korrekten Antrieb betrieben wird.

Die mit diesem Ansatz erzielten Ergebnisse sind in Bild 92 zusammengefasst. Hier ist ein Einheitssprung der Lage als Sollwert vorgegeben. Es ist zu erkennen, dass die Kaskadenregelung daraufhin ein Drehmoment fordert, das über dem maximalen Motormoment liegt. Die Begrenzung ist während des gesamten Beschleunigungsvorgangs aktiv, wie die Drehzahl-Drehmoment-Kurve zeigt. Der Regelkreis ist so eingestellt, dass zum Abbremsen die im Mehrkörpermodell hinterlegte Reibung ausreichend ist. Mit dieser Einstellung wurde eine Ausregelzeit von einer halben Sekunde erreicht, gleichzeitig

weist das Antwortverhalten kein Überschwingen auf. Der Regelkreis ist damit trotz der im Modell hinterlegten Nichtlinearitäten stabil und schnell.

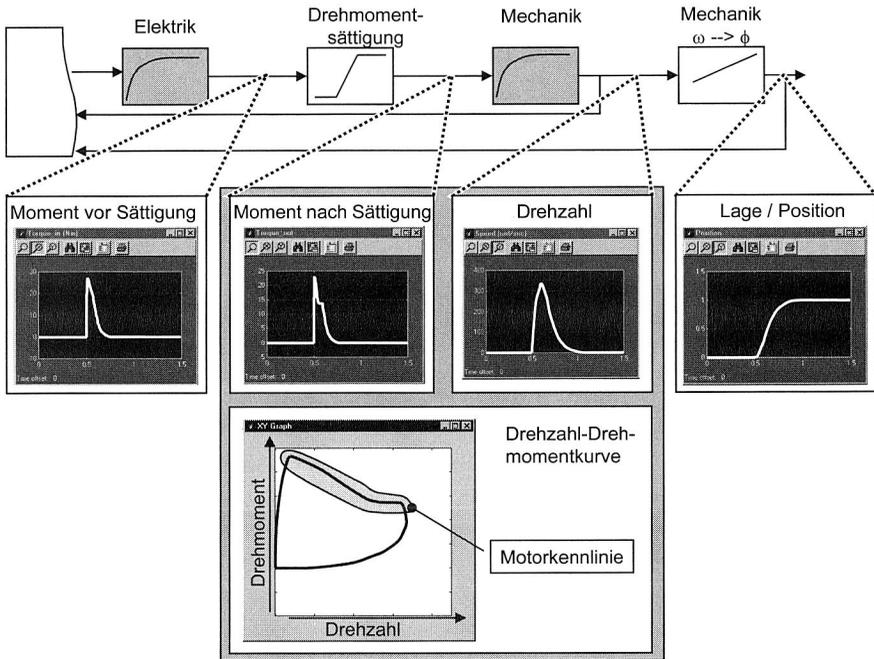


Bild 92: Auslegung des Lagereglers durch Kopplung von Mehrkörper- und CACE-Simulation²⁰

Der modulare Aufbau des Reglers und die Flexibilität der Kopplung von Mehrkörper- und Steuerungssimulation erlauben eine einfache Erweiterung bzgl. fortgeschrittener Regelungskonzepte. Dazu gehören etwa eine Ruckbegrenzung oder ein Führungsgrößenformer [135]. Dieser kann auch für die gezielte Beeinflussung des Lagesollwerts im Rahmen der thermischen Kompensation verwendet werden. Hierfür wird die thermische Verzerrung, die in Abschnitt 7.3 ermittelt wurde, vom Lagesollwert abgezogen und somit der Antriebsregelung der thermisch korrigierte Lagesollwert vorgegeben.

Für die Einbettung der realen Steuerung, die meist so komplex ist, dass sie nur zu Teilen als Blockdiagramm verfügbar ist, sind sog. Hardware in the Loop (HIL)-Lösungen verfügbar. Dies bedeutet, dass die reale Steuerung an den Rechner angeschlossen wird, auf dem die Mehrkörpersimulation läuft. Mit dieser Methode lässt sich die Steuerung projektieren, bevor ein realer Prototyp der Maschine zur Verfügung steht [137].

²⁰ Die Drehzahl-Drehmoment-Kurve ist aus Vertraulichkeitsgründen nicht beschriftet.

7.5 Virtuelle Maschine auf Basis des Mehrkörpermodells

Nachdem alle Teilmodelle zur Verfügung stehen, werden sie zum virtuellen Prototypen integriert. Seine wesentlichen Modellelemente, wie das selbstdefinierte Kraftelement zur Realisierung einer Linearführung am flexiblen Portal, sind in Bild 93 zusammengefasst.

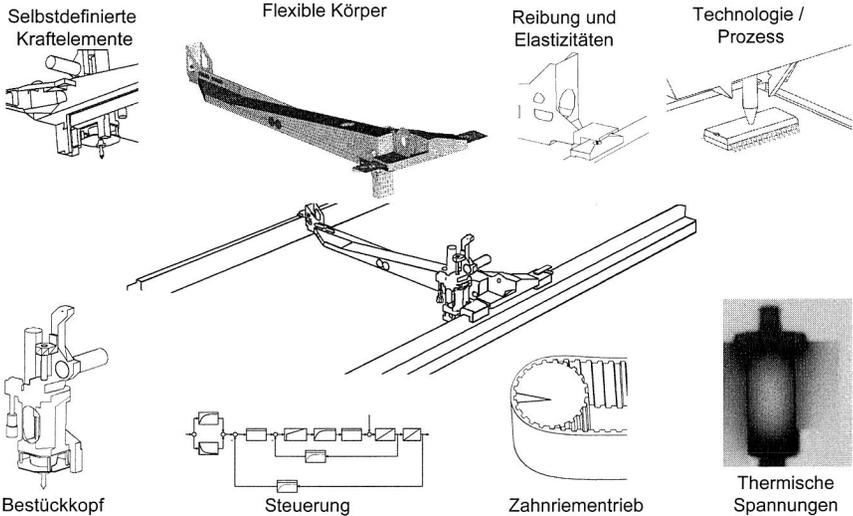


Bild 93: Modellelemente des virtuellen Prototypen des Bestückautomaten

7.5.1 Integration im Mehrkörpersimulationsmodell

Der virtuelle Prototyp des Bestückautomaten wird auf der Basis des Mehrkörpermodells erstellt. Dies hat den Vorteil, dass die Teilbereiche der Maschinendynamik und Steuerungstechnik bereits in einem Modell zusammengefasst sind. Das thermische Verhalten der Maschine wird über sog. modale Lasten auf die hierfür entscheidenden Bauteile aufgebracht. Dies beinhaltet die Bauteile, die im Betrieb einen signifikanten Temperaturgradienten aufweisen oder eine deutliche Erwärmung gegenüber der Umgebung zeigen. Außerdem kommen hierfür Bauteile in Frage, bei denen eine mögliche thermische Verzerrung steuerungstechnisch nur sehr schwer zu kompensieren ist. Zur Übernahme der thermisch induzierten Spannungen wird der in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Prozessor Nastran2Adams verwendet. Als vierter Punkt ist die Technologie in das Modell und die Planung der Simulationsexperimente zu übernehmen. Diese kann nicht einzelnen Modellierungselementen zugeordnet werden, da sie bereits bei der Maschinenentwicklung zu berücksichtigen ist. Wesentliche Aspekte bzgl. der Technologie sind im Falle des Bestückautomaten die geforderte Genauigkeit, die vom verarbeiteten Bauelementspektrum abhängt sowie die zulässigen Prozesskräfte (vgl. [40]). Damit sind alle relevanten Teilbereiche der Fertigungsmaschine, entsprechend der Vision in Bild 29, in einem virtuellen Prototypen integriert.

Die Integration in einem Mehrkörpermodell ermöglicht es, an einem einzigen Simulationsmodell alle relevanten Einflüsse auf die Arbeitsgenauigkeit und -geschwindigkeit zu untersuchen. Durch gezielte Variation von Parametern des Modells lassen sich die Interdependenzen zwischen Entwicklungszielen und konstruktiven Maßnahmen beurteilen. Die Nutzung dieses simulationsgestützten Ansatzes für die Maschinenentwicklung als wesentlichem Teil der Fertigungssystemplanung erlaubt es, ein Gesamtoptimum für den mechatronischen Aufbau der betrachteten Maschine zu finden. Ein Beispiel hierfür ist die Auslegung der Antriebe mit unterschiedlichen Motoren, deren Kennlinie und Wirkungsgrad die realisierbare Genauigkeit und Geschwindigkeit wesentlich beeinflussen. Damit stellt die Erstellung einer virtuellen Maschine entsprechend der in dieser Arbeit entwickelten Methodik in Anlehnung an VDI 2221 das Ausarbeiten dar, vgl. Abschnitt 4.2. Durch die Erstellung eines umfassenden Simulationsmodells, des virtuellen Prototypen, verringert sich somit der Aufwand für den Aufbau realer Prototypen deutlich.

Dieses Modell wird im Folgenden für die Ableitung von Genauigkeitskenngrößen im Rahmen einer „virtuellen Maschinenfähigkeitsuntersuchung“ genutzt. Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse für die Planung von Fertigungslinien einsetzen und somit für die Entwicklung von Strategien zur Linienplanung und Auftragseinlastung verwenden. Damit können die Herstellkosten einer Flachbaugruppe, die mit dieser Maschine gefertigt wird, im Voraus bestimmt werden. Dabei wird das selbe Verfahren eingesetzt wie in Abschnitt 6.7.2. Die verwendeten Eingangsdaten wie Arbeitsgeschwindigkeit, Herstellkosten oder Flächenbedarf sind allerdings dank des detaillierteren Planungsstands wesentlich stabiler.

7.5.2 Durchführung einer virtuellen Maschinenfähigkeitsuntersuchung

Der virtuelle Bestückautomat beinhaltet alle relevanten Einflüsse auf das Systemverhalten der Maschine. Er kann daher als Referenz eingesetzt werden, um die von der Maschine erreichbare Maschinenfähigkeit zu analysieren. Dabei ist es von besonderem Interesse, die Einflüsse auf die Maschinenfähigkeit bereits am Simulationsmodell zu untersuchen und somit Toleranzgrenzen, Wartungsunterlagen und Diagnosewissen abzuleiten.

Vorgehensweise und Definition der Genauigkeitskriterien

Das simulationsgestützte Vorgehen lehnt sich an die Methodik für die experimentelle Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) an: Hier werden zunächst die Anforderungen festgelegt, die vom betrachteten Bestücksystem zu erfüllen sind und dementsprechend die Bauelementtypen für die folgenden Bestückversuche ausgewählt [180]. Für die Durchführung der Experimente werden die Fügepartner Leiterplatte und Bauelement durch Dummies aus Glas ersetzt. Dadurch werden potentielle Fehlerquellen aus dem Fügeprozess und der Verarbeitung der Bauelemente ausgeschlossen. Für die simulationsgestützte Untersuchung bedeutet dies, dass diese Einflüsse nicht im Modell zu hinterlegen sind. Bei der experimentellen Maschinenfähigkeitsuntersuchung werden die Bestückversuche im thermischen Gleichgewicht der Maschine durchgeführt, analog zum Vorgehen bei der Abnahme von Werkzeugmaschinen (vgl. [91], [92]). Dadurch

werden allerdings Effekte ausgeschlossen, die bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts nach mehreren Stunden auftreten. Außerdem ist es auf Grund der abnehmenden Losgrößen nicht mehr realistisch anzunehmen, dass ein Bestückautomat während seiner gesamten Arbeitszeit im thermischen Gleichgewicht wäre und thermische Effekte somit zu vernachlässigen seien.

In der Simulation lassen sich durch die gekoppelte Simulation des thermischen und dynamischen Verhaltens genau diese Effekte nachvollziehen und die Ursachen und Wirkungsmechanismen aufklären. Daraus lassen sich dann sehr einfach Kompensationsmöglichkeiten für die Maschinensteuerung ableiten und in der Simulation testen.

Im Rahmen von Maschinenfähigkeitsuntersuchungen werden häufig systematische Fehlerursachen an den untersuchten Maschinen identifiziert. So werden unzureichende Kalibrierungen, mangelhafte Bilderkennungen oder verschlissene Antriebseinheiten gefunden [180]. Für diese Fehlerquellen lassen sich am Simulationsmodell die Toleranzgrenzen bestimmen und Wartungsintervalle mit entsprechenden Verschleißkriterien festlegen. Weiterhin sind die relevanten Mechanismen in einer Sensitivitätsanalyse zu identifizieren.

Dabei ist durch entsprechende Toleranzen zwischen den von der Simulation ermittelten Werten und der Zielvorgabe zu berücksichtigen, dass den systematischen Effekten eine zufällige Streuung überlagert ist. Diese hat vielfältige Ursachen, die von kleineren Fertigungstoleranzen der mechanischen Bauteile bis hin zu Verzerrungen in der Signalverarbeitung in der Maschinensteuerung reichen können. In der Simulation können diese Effekte durch Überlagerung des betreffenden Wertes mit einem Rauschen als zufälliger Störgröße abgebildet werden.

Festlegen der Anforderungen

Für die Ermittlung der Maschinenfähigkeit auf der Basis der Simulationsdaten ist es nötig, obere und untere Toleranzgrenzen festzulegen. Diese sind sowohl vom verarbeiteten Bauelementspektrum als auch vom zu fertigenden Produkt abhängig [152]. Dabei werden die wesentlichen Anforderungen durch Gehäusetyp und Raster der verwendeten Bauelemente bestimmt.

Die zu berücksichtigenden Geometriegrößen unterscheiden sich, je nachdem, welcher Bauelementtyp zu bestücken ist. In der Simulation wird auf die explizite Modellierung des Bauelements verzichtet, da die Modellierung als weiterer starrer Körper nur einen marginalen Informationsgehalt bietet. Im Rahmen der virtuellen Maschinenfähigkeitsuntersuchung wird daher der Mittelpunkt der Pipette als Mittelpunkt des Bauteils und damit als Referenz angesehen. Im Folgenden werden für drei repräsentative Kategorien von Bauelementen jeweils die entscheidenden Größe abgeleitet (Zusammenfassung in Tabelle 8). Dies sind die drei Gehäusetypen CR 0402, SQFP 208 und BGA 225, für deren Verarbeitung die betrachtete Maschine qualifiziert ist.

Bei einem Chip Resistor CR 0402 mit rechteckigen Anschlussflächen ist der seitliche Überstand des Bauelementanschlusses (Pin) über die Leiterplattenanschlussfläche (Pad), der Side-overhang, die entscheidende Größe. Dies liegt daran, dass das Grö-

ßenverhältnis von Pad zu Pin in axialer Richtung wesentlich größer ist als in lateraler Richtung. Bei einem Bestückwinkel von 0° oder 180° (Hauptachse des Bauelements parallel zur X-Achse) ist die Abweichung Δy entscheidend. Entsprechend ist bei einem Bestückwinkel von 90° oder 270° Δx der wichtige Kennwert. Da i. d. R. auf realen Leiterplatten beide Orientierungen vorkommen, gilt analog zum QFP das Maximum von Δx und Δy als entscheidendes Kriterium. Auch hier ist der axiale Überstand, der Toe-overhang, von untergeordneter Bedeutung.

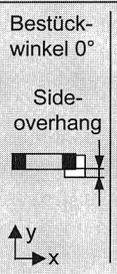
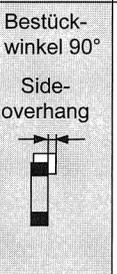
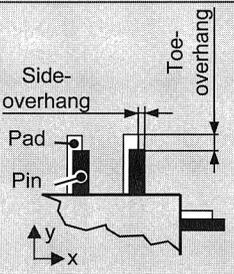
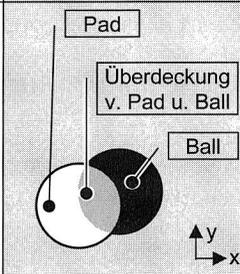
	Einfach-symmetrische Bauelemente z.B. CR 0402		Doppelt-symmetrische Bauelemente z.B. QFP 208	Flächige Bauelemente z.B. BGA 225
Bei einer „realen“ MFU gemessene Größen	 Bestückwinkel 0° Side-overhang y x	 Bestückwinkel 90° Side-overhang y x	 Side-overhang Pad Pin Toe-overhang y x	 Pad Überdeckung v. Pad u. Ball Ball y x
Für die Simulationsauswertung verwendetes Kriterium	Side Overhang Δy Side Overhang Δx $\Delta y \Rightarrow \text{MAX}(\Delta x, \Delta y)$ y x	Größter Side-Overhang $\text{MAX}(\Delta x, \Delta y)$	Toleranzradius $\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$	
Pin Breite/ Ball Durchmesser	540 μm	200 μm	750 μm	
Pad Breite/ Ball Durchmesser	700 μm	~250 μm	750 μm	
Zul. Side-overhang / Toleranzrad.	135 μm	63 μm	303 μm	

Tabelle 8: Kriterien bei einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung für verschiedene Bauelementtypen und deren Entsprechung in der "virtuellen Maschinenfähigkeitsuntersuchung"²¹

Die Maschinenfähigkeit wird bei flächigen fine-pitch Bauelementen wie QFP 208, die an allen vier Seiten mit Pins kontaktiert werden, durch die schlechteste Kombination der

²¹ Geometrie zu CR, SQFP aus [103], Geometrie zu BGA aus [182], max. Side-overhang für QFP, BGA nach [182]

gegenseitigen Lage von Pins und zugehörigem Pad bestimmt [180]. Das heißt, dass der größere Wert von Δx und Δy zu wählen ist.

Die dritte relevante Kategorie sind flächige Bauelemente wie BGA und CSP. Diese weisen kreisförmige Anschlussflächen am Bauelement, sog. Balls, auf. Beim Reflowlöten wird bei diesen Bauelementen eine Selbstzentrierung beobachtet, die bis zu einem gewissen Grad Bestückungenauigkeiten ausgleicht [40], [180]. Auf Grund der anders gearteten Anschlussgeometrie ist es nicht möglich, eine sinnvolle Aussage über einen Side-overhang zu treffen. Vielmehr wird dieser durch einen Toleranzradius ersetzt. An Stelle der Differenz der Größe von Pad und Pin wird die übliche radiale Überdrückung von 10... 20 μm über den Rand der Leiterplattenanschlussfläche gesetzt. Für eine sichere Verarbeitung wird ein Überdeckungsgrad zwischen Ball und Pad von ca. 40 % gefordert. Damit liegt eine radiale Toleranz bzgl. der Sollposition vor. Aus diesem Grund ist $\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ die maßgebliche Größe.

Die Betrachtung der Anforderungen in Tabelle 8 zeigt, dass die Gehäuseform QFP 208 die höchsten Ansprüche an die Bestückgenauigkeit stellt. Sie lässt maximal einen seitlichen Überstand von 63 μm zu. Dies bedeutet, dass eine Positioniergenauigkeit von ca. 50 μm zuverlässig erreicht werden muss, da im realen Prozess noch Einflüsse aus der Fertigungsgenauigkeit der Leiterplatte und des Bauelements zu berücksichtigen sind.

Der Bestückversatz hat drei wesentliche Ursachen: die Positionierungsgenauigkeit in beiden ebenen Achsen sowie die Winkelverdrehung. Die Verdrehung spielt insbesondere bei großen fine-pitch Bauelementen wie QFP die Hauptrolle, während sie bei Zweipolern von untergeordneter Bedeutung ist. Außerdem ist zu beachten, dass die Fähigkeitsindices für die X- und die Y-Richtung i. d. R. nicht gleich sind [151]. Der Maschinenfähigkeitsindex wird dann direkt aus der Anschlussgeometrie sowie dem Side-overhang und der Streuung berechnet [180].

Beschreibung und Modellierung zufälliger Einflüsse auf die Maschinenfähigkeit

Auf die Arbeitsgenauigkeit und damit auf die Maschinenfähigkeit haben vor allem die Systeme eines Bestückautomaten einen Einfluss, die zur Handhabung des Bauelements und der Leiterplatte dienen. Dabei werden bei modernen Maschinen eine Vielzahl an potentiellen Fehlerquellen durch den Einsatz der Bildbearbeitung kompensiert. Dies beinhaltet unter anderem die Lage der Leiterplatte im Automaten und die Orientierung des Bauelements in der Zuführeinrichtung.

Die Einflüsse, die im normalen Betrieb die Bestückgenauigkeit beeinträchtigen und auf Grund ihres nur sehr bedingt reproduzierbaren Charakters steuerungstechnisch kompensiert werden können, resultieren aus drei prinzipiellen Kategorien (Bild 94): Neben den bereits ausführlich diskutierten thermischen und dynamischen Einflüssen spielt auch der mechanische Verschleiß eine wesentliche Rolle. Dies gilt vor allem dann, wenn Entwicklungen über mehrere Monate hinweg betrachtet werden [180]. Demgegenüber betrifft das thermische Verhalten Zeiträume von einigen Stunden und das dynamische den Bereich von Sekunden.

Die thermischen und dynamischen Einflüsse sind im Automaten hinterlegt, der Verschleiß ist durch Variationen der Parameter abzubilden. Dies kann etwa durch Variation der Vorspannung bzw. des Spiels in Kontakten geschehen, wie in [113] für Toleranzbetrachtungen vorgestellt. Eine alternative Datenquelle stellen die Ergebnisse von Lebensdauerversuchen an Baugruppen dar.

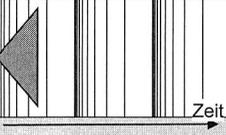
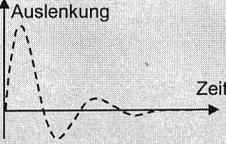
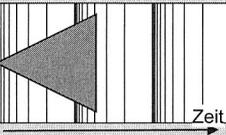
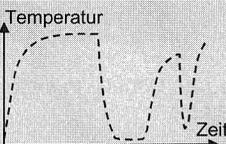
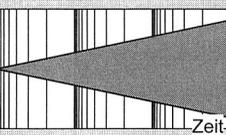
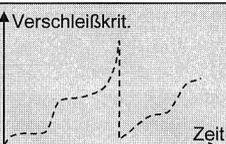
Einfluss	Zeitliche Ausdehnung	Typischer Verlauf	Modellierung
Maschinen-dynamik			Schwingungen FEM Starrkörper-bewegung MKS, (FEM)
Thermisches Verhalten			Temperatur FEM, CFD Verzerrung FEM, MKS-Kopplung
Mechanischer Verschleiß			Verschleiß-bereiche FE-Lebensdauerber. Verformung Parametervariation

Bild 94: Hauptkategorien von Einflüssen auf die Maschinenfähigkeit und Simulationstechnologien zu ihrer Abbildung

Beispielhafte Einflüsse, die im virtuellen Prototypen abgebildet werden können, sind ein Offset von Bildverarbeitung und Pipette, der thermisch induziert oder durch die Schiefstellung der Pipette verursacht sein kann. Ein weiteres Beispiel ist eine zu große Toleranz der Winkel der angetriebenen Achsen zueinander. Außerdem spielen Ungenauigkeiten in den Achsantrieben, etwa durch Verschleiß von Lagern, Getrieben oder Riemetrieben auf Grund der begrenzten Lebensdauer von Bauteilen im Wälz-Gleitkontakt eine Rolle.

Im Folgenden wird die geschilderte Methodik am Beispiel der Reibung und an einer Linearführung dargestellt. Wie Bild 95 zeigt, wird die Reibkraft (zur Modellierung vgl. Bild 83) durch den Reibkoeffizienten und die Normalkraft beeinflusst. Dabei stellt die Normalkraft die von der Führung abzufangende Last dar. Der Reibkoeffizient beschreibt im mechanischen Modell als skalare Größe die Beschaffenheit des Kontakts von Führung und geführtem Bauteil. Die beiden Größen werden durch das komplexe Zusammenspiel von Effekten in der Maschine beeinflusst. Dies fängt bei der Konsistenz des Schmierstoffs an und reicht über eine mögliche Verzerrung bis hin zum aktuellen Be-

wegungszustand der Maschine. Dieses Zusammenwirken wird durch den vom Anwender vorgegebenen Bestückzyklus und die Umgebungsbedingungen, vor allem der Temperatur vorgegeben.

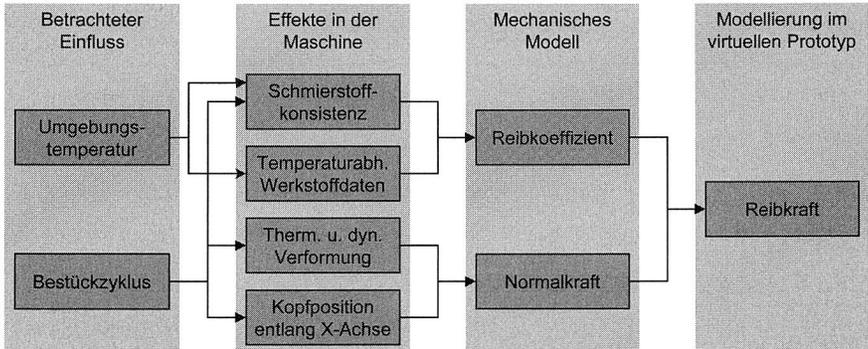


Bild 95: Beeinflussung der Modellparameter im Betrieb am Beispiel der Reibkraft an einer Linearführung

Als Anwendungsbeispiel mit dem virtuellen Prototypen wird eine Variation der Reibkraft an der motorseitigen Führung der Y-Achse untersucht. Dabei wird der Wert um 14 % relativ zum Normalwert, sowohl nach oben als auch nach unten, verändert. Die Verfahrensgeschwindigkeit, die sich damit ergibt, ist in Bild 96 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Veränderung in der Beschleunigungsphase nur einen geringen Einfluss ausübt. Dagegen ist in der Phase der konstanten Maximalgeschwindigkeit und beim Abbremsen ein deutlicher Effekt erkennbar: So ist die Achse im Fall der verringerten Reibung noch in Bewegung, wenn sie beim Standardfall schon zur Ruhe gekommen ist. Der Bestückkopf fährt also über die Sollposition hinaus weiter. Im gegensätzlichen Fall ist sogar ein Überschwingen über die vorgegebene Position hinaus zu beobachten. Dies ist auf Grund der Gefahr einer Kollision nicht akzeptabel.

In den gezeigten Fällen von 14 % zusätzlicher bzw. verringerter Reibung ist eine prozesssichere Bestückung nicht mehr gewährleistet. Durch weitere Parametervariationen wird für dieses Beispiel der zulässige Toleranzbereich ermittelt.

Mit dem virtuellen Prototypen kann somit eine virtuelle Maschinenfähigkeitsuntersuchung in dem Sinne durchgeführt werden, ob der Automat unter den gegebenen bzw. angenommenen Betriebsbedingungen für das geforderte Bauelementspektrum fähig ist.

Die Ergebnisse dieser simulationsbasierten Untersuchungen auf die Maschinenfähigkeit am virtuellen Prototypen können für die Erstellung von Wartungsplänen und die Ableitung von Diagnosewissen herangezogen werden. Dazu wird für einen definierten, fehlerhaften Zustand am Simulationsmodell das Verhalten des Automaten ermittelt. Damit wird eine wesentliche Beschleunigung dieser Aufgabe gegenüber der Erstellung an physikalischen Prototypen erreicht. Die Maschinenfähigkeitsuntersuchung lässt sich außerdem zur Prozessfähigkeitsuntersuchung erweitern: Dazu werden die Einflüsse

aus den Bauelementen, der Lotpaste sowie der Leiterplatte hinterlegt. Diese sind dafür als elastische Körper zu hinterlegen. Damit werden wesentlich detailliertere Daten für die Prozessplanung verfügbar. Außerdem können die Einflüsse aus einer schiefen Aufstellung erfasst werden, die im Rahmen von Maschinenfähigkeitsuntersuchungen immer wieder als Ursache für mangelnde Bestückgenauigkeit identifiziert werden [151]. Auch hier lassen sich mit der Simulation zulässige Grenzwerte ermitteln.

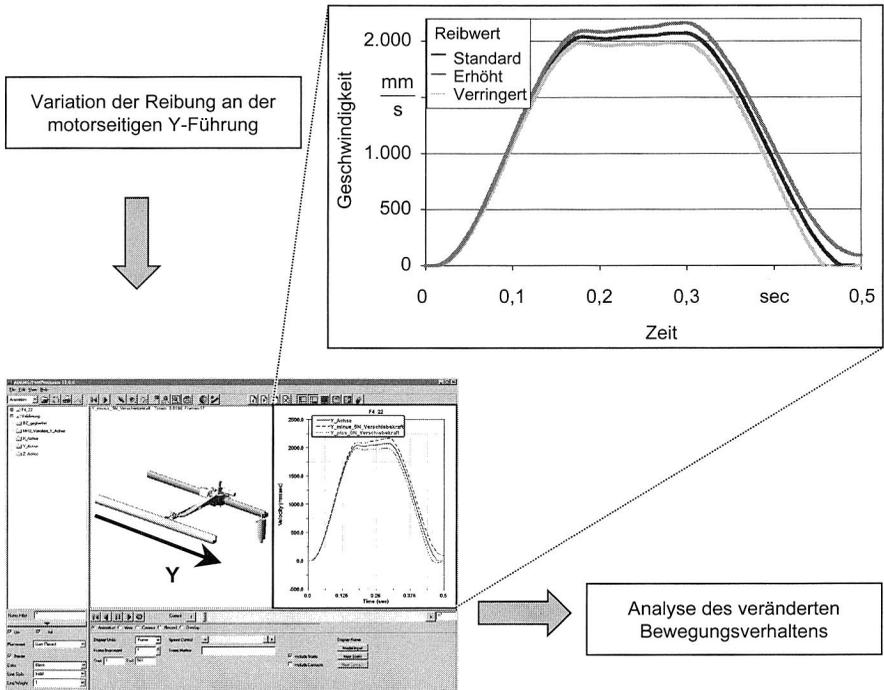


Bild 96: Gezielte Variation von Parametern als Basis für Ermittlung der Maschinenfähigkeit am Beispiel des Reibwerts an der motorseitigen Y-Führung

7.5.3 Ableitung logistischer Kenngrößen aus dem virtuellen Prototypen

Der virtuelle Prototyp beinhaltet alle relevanten Daten der zukünftigen Maschine und kann daher auch für den Vertrieb des Maschinenanbieters bzw. die Investitionsentscheidung des Betreibers herangezogen werden. Das Ziel ist es, den Nutzen einer Investition in einen neuen Bestückautomaten (z. B. erhöhte Ausbringung) mit Hilfe der Simulation schon vorab beurteilen zu können. Hierfür ist es erforderlich, das detaillierte Simulationsmodell der Fertigungsmaschine mit dem des Produktionssystems in der Ablaufsimulation zu koppeln. Hierin werden die logistischen Kenngrößen, wie Bearbei-

tungszeiten und Störverhalten, der weiteren Bearbeitungsstationen in die Betrachtung einbezogen. Außerdem wird das zu bearbeitende Variantenspektrum abgebildet.

Um in der Ablaufsimulation zu erfassen, wie sich die Maschine bzgl. einer definierten Systemlast aus Aufträgen verhält, ist eine starke Verdichtung der Ergebnisse des virtuellen Prototypen erforderlich. Außerdem sind die Rechenzeiten von Ablauf- und Mehrkörpersimulation überaus unterschiedlich. So benötigt die Simulation des Bestückvorgangs in der Mehrkörpersimulation bis zu zwei Stunden, während in der Ablaufsimulation nur Sekunden erforderlich sind. Deshalb ist eine online Kopplung nicht sinnvoll; vielmehr wird eine zeitliche und datentechnische Entkopplung über eine Datenbank angestrebt. Bild 97 veranschaulicht die Abläufe bei der Datenerfassung.

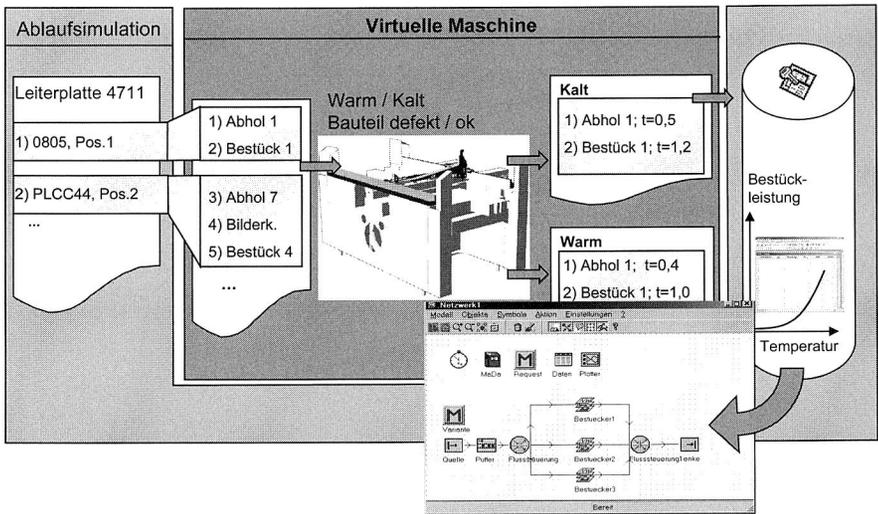


Bild 97: Ableitung von Daten für die Ablaufsimulation aus der virtuellen Maschine (Mehrkörpersimulationsmodell) [20]

Von der Ablaufsimulation wird für eine Flachbaugruppe die Liste der zu bestückenden elektronischen Bauelemente an die virtuelle Maschine geliefert. In der Mehrkörpersimulation werden die Bestückpositionen in hinterlegte Koordinatensysteme aufgelöst (Abholposition, Bestückposition und ggfs. Position für optische Bauelementzentrierung). Die Mehrkörpersimulation schreibt dann die Zeitpunkte, zu denen die Positionen erreicht wurden, in die Datenbank zurück. Dies erfolgt für unterschiedliche Betriebszustände, z. B. die Erwärmung im Betrieb. Diese Ergebnisdaten werden in der Datenbank als Kennfelder (Bestückzeit als Funktion der Temperatur) abgelegt. Sie dienen dazu, in der Logistiksimulation die Bearbeitungszeit zu bestimmen. Sie ist etwa dann höher, wenn sich der Automat nicht im thermischen Gleichgewicht befindet, da ggf. zusätzliche Kalibrierungen notwendig sind. [20]

Aus Sicht des Logistiksystems haben diese unterschiedlichen Bearbeitungszeiten einen veränderten Materialfluss zur Folge. Arbeiten beispielsweise drei Bestückautomaten parallel, so beeinflusst das Verhalten jedes einzelnen die Auslastung der anderen. Wird das Verhalten der Maschine bei der Wahl der Materialflussstrategien berücksichtigt, können unterschiedliche maschinenbezogene Betriebsstrategien getestet werden [20].

Das asynchrone Zusammenspiel von zwei Simulationsanwendungen erfordert neben dem direkten Datenaustausch eine konsistente Datenverwaltung über mehrere Iterationsschleifen der Maschinenentwicklung. Entsprechend ist die Datenbank um eine Versionenverwaltung zu erweitern, die eine zweckmäßige Kennzeichnung von durchzuführenden, erledigten, verworfenen und verbindlichen Simulationsexperimenten ermöglicht [139].

Damit wird offensichtlich, dass ein Austausch von Informationen zwischen Maschinenentwicklung und Anlagenplanung ein umfassenderes Systemverständnis und eine sicherere Planungsbasis für Investitionsentscheidungen ermöglicht.

8 Integration von Fertigungs- und Maschinenplanung am Beispiel des Reflowlötens im Konvektionsofen

Die gegenseitige Abhängigkeit von Prozessführung, Maschinenentwurf und Produktqualität ist beim Reflowlötens besonders stark ausgeprägt. Insbesondere das geplante Verbot von Blei im Endprodukt führt zu erheblichen Anstrengungen bei der Auslegung der Lötöfen und der Anpassung der Temperaturführung (vgl. [63], [141]).

Das folgende Kapitel schildert, ausgehend von der Beschreibung des Lötprozesses, die simulationstechnische Erfassung der Temperaturverteilung in einem Konvektionsofen. Diese wird anschließend verwendet, um die Temperaturverteilung an einem Bauteil zu ermitteln, das durch einen entsprechend eingestellten Ofen gefahren wird. Dabei wird deutlich, wie die Ergebnisse der Maschinenentwicklung für die Technologieplanung zu verwenden sind. Gemäß dem in Kapitel 4 entwickelten Schema ist diese Aufgabenstellung in den Phasen des Entwerfens und Ausarbeitens angesiedelt.

8.1 Technologische Randbedingungen des Reflowlötens

8.1.1 Technologie des Lötprozesses

Das Ziel des Lötprozesses ist es, durch die gezielte Einbringung von Wärme die Lotdepots aufzuschmelzen und damit eine Lötverbindung zwischen Bauelement und Leiterplatte herzustellen. Dazu werden Temperaturprofile verwendet, die sich typischerweise in vier Phasen gliedern, wie in Bild 98 dargestellt.

Der Lötprozess beginnt mit der Aufheizphase. Hier wird die Baugruppe rasch erwärmt um eine Aktivierung des Flussmittels in der Lotpaste zu erreichen. Die Aufheizrate soll hierbei jedoch einen Grenzwert von vier Kelvin pro Sekunde nicht überschreiten [45]. Die Dauer der anschließenden Haltephase wird durch zwei technologische Größen bestimmt: Zum einen muss sich auf der Leiterplatte eine homogene Temperaturverteilung einstellen, was insbesondere bei großen, flächigen Bauelementen von Bedeutung ist. Daneben wird vom Anbieter der verwendeten Lotpaste eine bestimmte Haltezeit und -temperatur empfohlen, um die optimale Benetzung und Reinigung der Verbindungsstelle zu gewährleisten [45]. Das Aufschmelzen des Lotes geschieht in der Peakphase. Dabei werden die Ofeneinstellungen so gewählt, dass ein sicheres Aufschmelzen des Lotes an allen Verbindungsstellen gewährleistet ist, gleichzeitig aber Beschädigungen von Bauelementen oder des Schaltungsträgers durch örtliche Temperaturmaxima vermieden werden. Dies ist insbesondere bei hochschmelzenden, bleifreien Lotes von Bedeutung. Das Erstarren der Schmelze wird durch die aktive Kühlung mit kaltem Fluid erreicht. In dieser Phase ist die Abkühlrate entsprechend dem verwendeten Lot einzustellen [49]. Dabei ist für ein eutektisches Zinn-Blei-Lot eine hohe Abkühlphase vorzusehen, um das Wachstum intermetallischer Verbindungen zu minimieren [45]. Bei bleifreien Lotes wird dagegen eine langsamere Abkühlung gewählt [63].

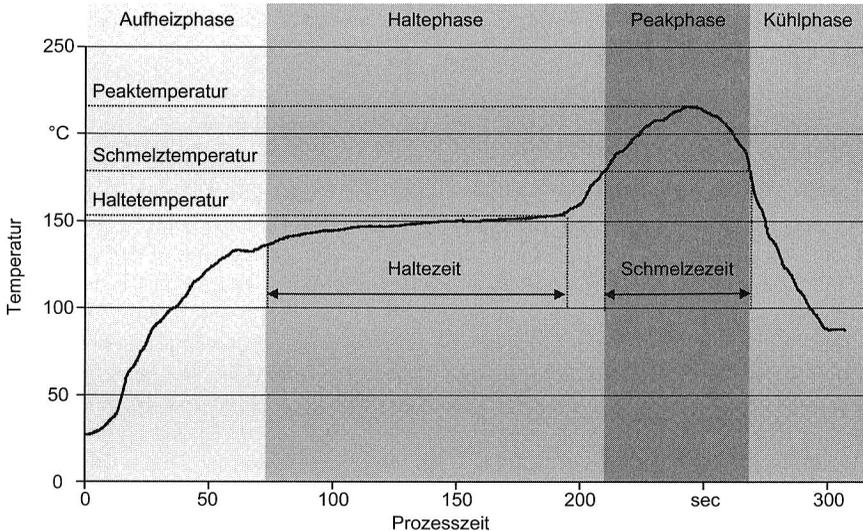


Bild 98: Kenngrößen eines typischen Temperatur-Zeit-Profiles beim Reflowlöten (nach [45])

Die Umsetzung der einzelnen Phasen geschieht im Reflowofen durch entsprechende Zonen. Dabei können einer Phase jeweils eine oder mehrere Zonen zugeordnet sein. Dies ist auch vom geforderten Durchsatz abhängig. Das gewählte Profil wird am Ofen durch die Wahl der Transportgeschwindigkeit sowie der Wahl der Temperaturen und Lüfterleistungen in den einzelnen Zonen bestimmt.

8.1.2 Anforderungen an Maschinenentwicklung und Prozessplanung

Bei der Entwicklung von Lötöfen sind heute eine Vielzahl von Forderungen zu erfüllen, die sich auch in den Produktmerkmalen der Anbieter niederschlagen (vgl. [26], [106], [116], [117]). Diese lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen: Zunächst muss der Ofen reproduzierbare Fertigungsbedingungen gewährleisten. Dazu gehört die Forderung, eine sichere thermische Trennung der einzelnen Zonen sicherzustellen. Daneben ist eine thermische Stabilität über einen Zeitraum von mehreren Stunden erforderlich sowie homogene Temperaturen und Strömungsbedingungen entlang der Ofenbreite. Als zweite Anforderungskategorie ist eine möglichst weit gehende Parametrierbarkeit zu nennen. So wird etwa verlangt, möglichst viele Lötprofile realisieren zu können, was etwa durch eine stufenlose Verstellung der Lüfterdrehzahlen erreicht werden kann.

Die Einstellung eines Lötprofils erfolgt heute meist experimentell. Dafür wird eine Leiterplatte mit Thermosensoren versehen und der Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Einstellungen an diesen Punkten gemessen. In einem iterativen Vorgehen wird dann die optimale Einstellung gefunden. Der Nachteil dieses Vorgehens besteht darin, dass während dieser Einstellphase kein produktiver Betrieb möglich ist. Eine Verringe-

Die Reduzierung dieser unproduktiven Zeiten kann durch eine simulationsgestützte Planung erreicht werden.

8.2 Simulation des Prozessraums des Lötens

Für den Wärmeübergang in einem Lötens sind vor allem zwei Aspekte relevant: Zum einen die Förderung des gasförmigen Mediums durch Lüfter und Strömungskanäle und zum anderen die Führung der Strömung innerhalb des Prozessraums, d. h. in dem Ofenbereich, durch den die Flachbaugruppe geführt wird. In modernen Öfen wird meist für jede Zone ein einzeln ansteuerbarer Lüfter vorgesehen und somit werden relativ kurze Strömungswege zu den Austrittsöffnungen zum Prozessraum realisiert. Damit ist sichergestellt, dass an allen Düsen die vorgesehene Strömungsgeschwindigkeit herrscht. Für den Lötprozess ist die Strömungs- und Temperaturentbreitung im Prozessraum von erheblicher größerer Bedeutung. Hier ist von Bedeutung, ob eine ausreichende Trennung der einzelnen Temperaturzonen gewährleistet ist und ob die Temperaturverteilung den Vorgaben entspricht. Dies wird im Folgenden an einem CFD-Modell des Prozessraums untersucht.

8.2.1 Erstellung des Simulationsmodells

Der betrachtete Ofen (Bild 99) verfügt über insgesamt fünf Zonen, in denen die ersten vier sowohl bzgl. der Lüfterleistung als auch der Temperatur einstellbar sind. In diesen Zonen wird das Fluid auch in einem weitgehend geschlossenen Kreislauf geführt. Dagegen wird in der Kühlzone direkt die Luft der Umgebung angesaugt. Die Zufuhr des Fluids erfolgt durch Schlitzdüsen. Die einzelnen Zonen sind jeweils durch düsenfreie Barrierebereiche abgetrennt.

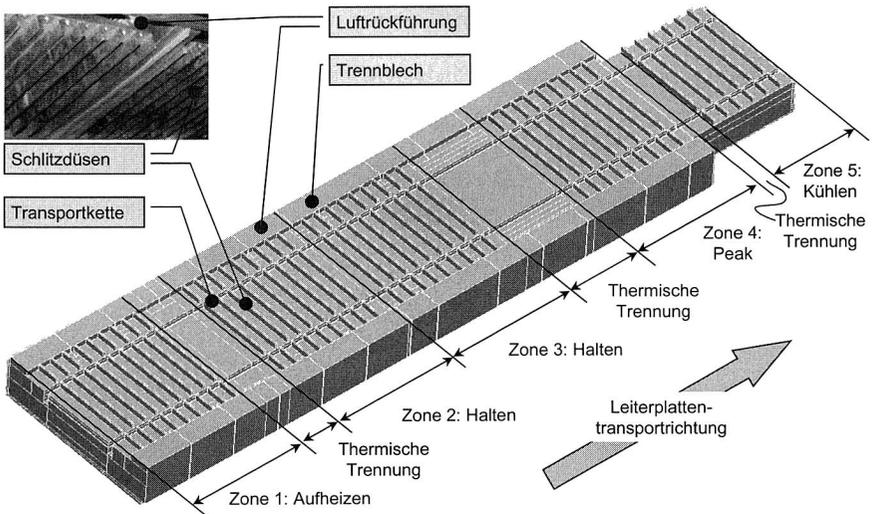


Bild 99: Geometrie des Simulationsmodells für den Prozessraum des Lötens

Im Simulationsmodell wird nur der Fluidbereich modelliert, nicht durchströmte Bereiche wie die Transportkette oder die Luftleitbleche werden als Wände modelliert. Da die Luftrückführung links und rechts unterschiedlich breit ist, ist es nicht möglich, den Modellumfang durch die Nutzung von Symmetriebedingungen zu verringern. Als Fluidaten werden die Werte von Luft hinterlegt. Auf Grund der hohen Düsendeschwindigkeiten sind Anteile aus der freien Konvektion zu vernachlässigen. Die Dichte kann daher als konstant angenommen werden. Bei der Vernetzung der Geometrie ist auch das Luftvolumen in den Schlitzdüsen zu berücksichtigen, um eine gerichtete, definierte Strömung zu erreichen. An den Düsen werden die in Tabelle 9 zusammengefassten Lasten hinterlegt. Dieses Lötprofil wurde für ein SnPbAg 2 Lot ermittelt, bei dem die Spitzentemperatur die kritische Prozessgröße darstellt. Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit einem Hitzdrahtanemometer gemessen. Dabei zeigt sich, dass die Strömungsgeschwindigkeit nicht linear mit der eingestellten Lüfterleistung korreliert. Für den betrachteten Ofen ist jeweils ein Maximalwert von $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ angegeben. Der gemessene Wert unterscheidet sich in den ersten drei Zonen um $1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bei jeweils der gleichen Lüfterleistung von 60 %. Außerdem ist in der Peakzone eine Einstellung von 70 % nötig, um dieselbe Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen.

Zone		Temperatur		Eingestellte Lüfterleistung	Strömungsgeschwindigkeit
1	Aufheizzone	175 °C	448 K	60 %	$5,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
2	Haltezone 1	165 °C	438 K	60 %	$4,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
3	Haltezone 2	165 °C	438 K	60 %	$5,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
4	Peakzone	260 °C	533 K	70%	$5,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
5	Kühlzone	30 °C	303 K	ein ²²	$4,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Tabelle 9: Lasten für das Modell des Prozessraums des Lötens

Die Öffnungen für die Luftrückführung werden als Oberflächen modelliert, an denen Umgebungsdruck vorgegeben wird.

8.2.2 Ergebnisse der Simulation des Prozessraums

Die Simulation des Prozessraums erfasst das stationäre Strömungs- und Temperaturfeld im Ofen. Dazu wird der Rechenlauf in zwei Schritten durchgeführt: Zunächst wird das Strömungsfeld auf der Basis der vorgegebenen Geschwindigkeiten an den Düsen ermittelt. Anschließend wird die Temperatur überlagert. Dieses Vorgehen ist zulässig, da die Anteile aus der freien Konvektion im Modell vernachlässigbar sind und auch in

²² Lüfterleistung in der Kühlzone nicht regelbar.

den Fluideigenschaften nicht abgebildet werden. Dadurch wird eine deutliche Beschleunigung des Rechenlaufs erreicht.

Die Auswertung der Simulation in Bild 100 zeigt den Temperaturverlauf im oberen Teil als Konturplot für die Ofenmitte und im unteren Teil als Diagramm für die Mitte der Leiterplattenebene. Hier ist im Konturplot eine sehr homogene Temperaturverteilung innerhalb der einzelnen Zonen zu erkennen, die außerdem weitgehend thermisch getrennt sind. Dieser Effekt wird durch die Luftleitbleche erreicht, was besonders gut im Bereich zwischen der Halte- und der Peakzone zu erkennen ist. Hier führen die Leitbleche zu einer scharfen Temperaturtrennung, wie der Falschfarbverlauf zeigt. Die kürzere Trennzone zwischen Peak- und Kühlzone zeigt eine Verschleppung der warmen Luft aus der Peakzone zur Ausgangsöffnung. Die Verwirbelung ist vor allem unterhalb der Leiterplattenebene zu sehen.

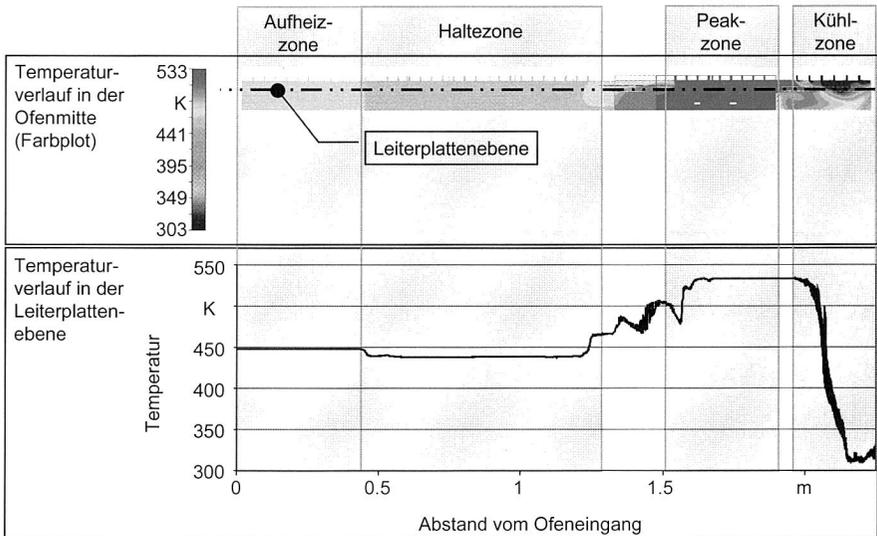


Bild 100: Ergebnisse der Simulation der Strömung und Temperatur im Prozessraum des Lötens

Eine detailliertere Aussage liefert die Darstellung der Temperaturverteilung in der Leiterplattenebene im unteren Teil von Bild 100. Hierfür wird die Temperatur an den Knoten ausgewertet, die in der Mitte der Leiterplattenebene liegen. Dabei ist der Abstand der einzelnen Messpunkte in Durchlaufrichtung nicht konstant, außerdem variiert die Position der Knoten quer zur Transportrichtung um wenige Millimeter. In den Zonen mit einer homogenen Temperaturverteilung ist der Temperaturverlauf absolut eben. In den Trennbereichen vor und nach der Peakzone sind dagegen deutliche Schwankungen zu erkennen. Besonders ausgeprägt sind diese Verwirbelungen in der Kühlzone, wie die häufigen Änderungen zwischen den einzelnen Messpunkten zeigen, die den Eindruck einer dickeren Linie hervorrufen.

An Hand dieses Modells lassen sich nun Optimierungspotentiale bzgl. der Strömungsführung bei der Entwicklung des Ofens ableiten. Dies betrifft z. B. den Wärmeaustausch aus der Peakzone in die Kühlzone, der potentiell zu einer thermischen Instabilität und zu einem unnötig hohen Temperaturverbrauch führt. In Lötöfen neueren Baujahrs als dem betrachteten sind z. B. auch die Kühlzonen mit einem geschlossenen Luftkreislauf versehen (vgl. [106], [116], [117]).

Das Modell des Prozessraums kann außerdem dazu verwendet werden, die Zeitkonstanten für die Erwärmung der Luft im Prozessraum zu ermitteln. Diese sind dann ein wichtiger Eingangswert für die Auslegung der Temperaturregelung, um die Stabilität des Ofens über die Zeit und bei Störungen aus der Umgebung sicherzustellen

8.3 Simulation des Wärmeübergangs auf der Baugruppe

Das Ziel der Simulation des Temperaturverlaufs auf der Leiterplatte ist es, den zeitlichen Verlauf und die örtliche Verteilung der Temperatur möglichst effizient vorhersagen zu können. Dafür ist wegen der großen Zahl der Zeitschritte bei der transienten Berechnung eine feine zeitliche und örtliche Diskretisierung erforderlich.

8.3.1 Modularer Aufbau des Modells für die Flachbaugruppe

Das in Bild 101 gezeigte Modell für die Ermittlung der Temperaturverteilung auf der Flachbaugruppe (FBG) beinhaltet lediglich den (kleinen) Bereich des Prozessraums, der die Baugruppe umgibt. Dieses entspricht in der Breite dem Ofen, weist aber eine wesentlich geringere Länge und Höhe auf.

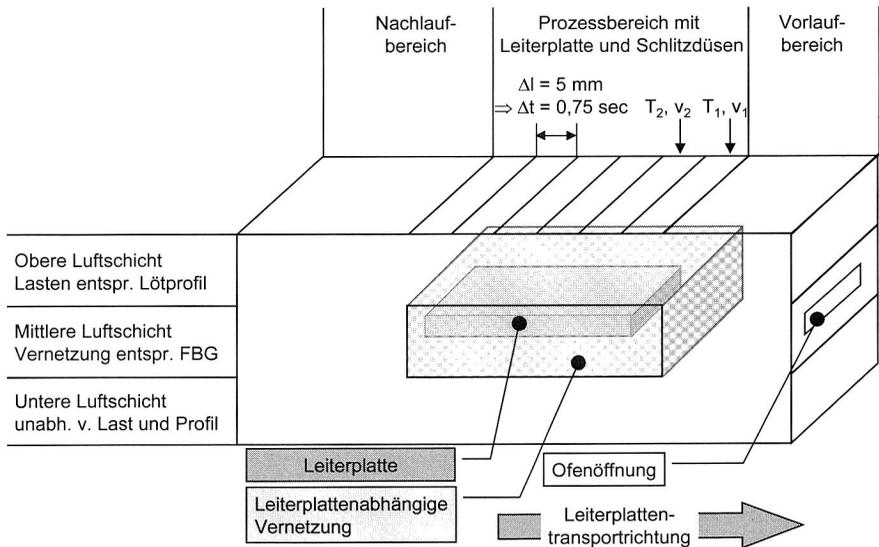


Bild 101: Struktur des Modells zur Simulation der Flachbaugruppe

Um an beiden Enden der Leiterplatte korrekte Bedingungen für die Strömung und damit für den Wärmeübergang zu erreichen, wird das Luftvolumen unter der Baugruppe in voller Höhe hinterlegt. Aus demselben Grund wird auch vor und hinter ihr ein ausreichend großes Luftvolumen hinterlegt. Das mittlere Volumen enthält die Leiterplatte und entspricht ihr in der Länge. Nur dieses ist bzgl. der Geometrie und des entsprechenden Netzes für die jeweils betrachtete Baugruppe anzupassen. An den gemeinsamen Kanten mit den anderen Volumina ist bei der Vernetzung die Kompatibilität der Netze sicherzustellen. Die Fläche des Volumens oberhalb der Leiterplatte beinhaltet die Daten des betrachteten Reflow-Profiles.

Die Lasten werden so gewählt, dass sie der Abfolge entsprechen, die eine Baugruppe beim Durchfahren des Ofens erfahren würde. Dazu wird die oberste mittlere Deckfläche in Segmente unterteilt, die die Abmessungen der Schlitzdüsen aufweisen. Auf diesen Flächen sind die Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten hinterlegt, die im Modell des Prozessraums für die Luftschicht unmittelbar oberhalb der elektronischen Baugruppe ermittelt wurden. Durch die Wiederverwendung der Ergebnisse wird das Netz für die Düsen eingespart und damit werden numerische Probleme bei schmalen Querschnitten und abrupten Querschnittsänderungen vermieden. Der zeitliche Versatz, mit dem die Leiterplatte im Ofen die einzelnen Düsen passiert, wird im Modell entsprechend in den Lastfunktionen abgelegt. Dies ist schematisch in Bild 102 dargestellt: So wird auf der vordersten Fläche die Temperatur T_1 , auf der folgenden T_2 , auf der nächsten T_3 usw. hinterlegt. Dasselbe gilt für die Strömungsgeschwindigkeiten.

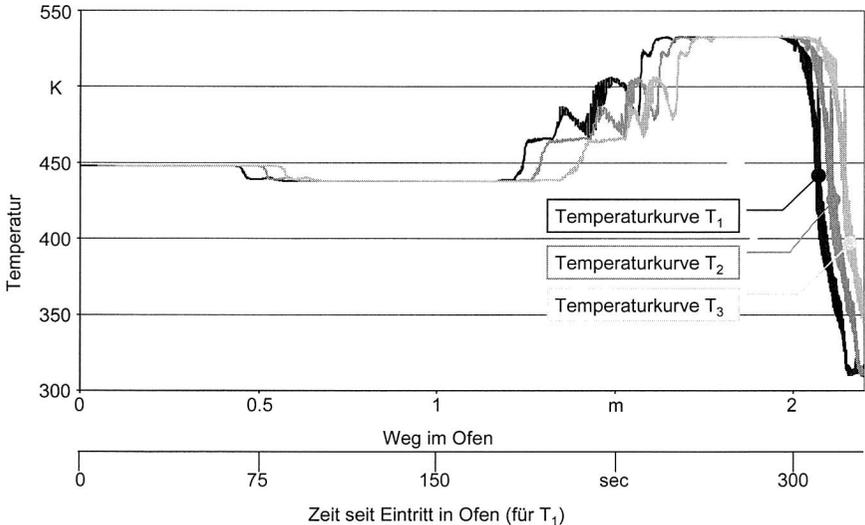


Bild 102: Lastfunktionen für die Simulation der Erwärmung der Leiterplatte am Beispiel der Temperatur (Abstände der Kurven überzeichnet)

Für den betrachteten Ofen betragen die Düsenlänge und der Abstand zwischen den Düsen jeweils 5 mm. Bei einer Transportgeschwindigkeit von $40 \frac{\text{cm}}{\text{min}} = 6,67 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ passiert die Leiterplatte alle 0,75 Sekunden eine dieser Düsen. Dementsprechend wird ein zeitlicher Abstand von 0,75 Sekunden zwischen den einzelnen Lastfunktionen eingestellt. Mit der Parametrierung über Lastfunktionen kann dann für ein einmal erstelltes Modell einer Leiterplatte sehr schnell eine Variantenrechnung für ein anderes Lötprofil vorbereitet werden.

8.3.2 Anwendung für die Simulation einer Testplatine

Für eine unbestückte FR4-Platine wird eine transiente Simulation des Erwärmungsverhaltens durchgeführt. Dabei werden die in Tabelle 9 angegebenen Einstellungen verwendet. Das Modell beinhaltet neben der Flachbaugruppe die Transportketten, an denen sie an beiden Seiten anliegt. Die Ketten werden im Modell als Quader hinterlegt. Außerdem ist im Modell das umgebende Luftvolumen enthalten, um den Wärmeübergang durch die erzwungene Konvektion abzubilden. Da mit dieser Simulation mehrere Berechnungen für eine Leiterplatte durchzuführen sind, ist eine Abwägung zwischen der gewünschten Genauigkeit und der benötigten Rechenzeit zu treffen. Für die hier diskutierte Simulation wird ein Ausgabeintervall von zwei Sekunden und eine Begrenzung auf 50 Iterationen pro Intervall gewählt. Bild 103 zeigt für den Zeitschritt 121, d. h. ca. vier Minuten nach dem Eintritt der Leiterplatte in den Ofen, das Strömungs- und Temperaturfeld in der Peakzone.

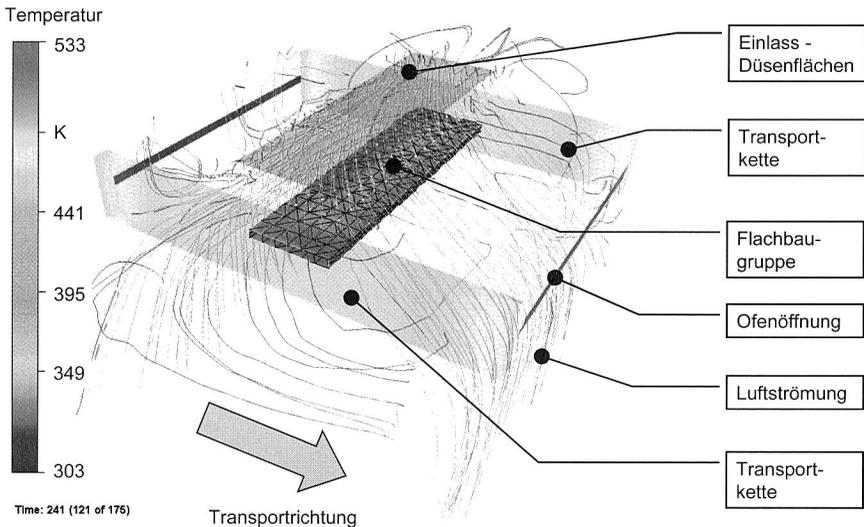


Bild 103: Simulation der Temperaturverteilung auf der Leiterplatte

Dabei ist gut zu erkennen, dass die Strömung aus den Düsen senkrecht auf die Flachbaugruppe auftrifft und dort verwirbelt. Dies deutet darauf hin, dass die gewünschte,

turbulente Strömung auf der Werkstückoberfläche erreicht wird. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Vereinfachung der Prozessraumgeometrie, insbesondere das Weglassen der Leitbleche, zu einer signifikanten Veränderung der Strömung im Fernfeld, d. h. nach dem Auftreffen auf die Leiterplatte und im Auslaufbereich, führt. Für die Betrachtung der Erwärmung der Baugruppe ist dies jedoch von untergeordneter Bedeutung, da die thermische Trennung durch die Modellierung der Lasten erzwungen wird. Hier zeigt sich die Wechselwirkung von Maschinenentwicklung und Prozessführung deutlich: Das Modell des Prozessraums ist für die korrekte Erstellung der Lastfunktionen des Modells der Leiterplatte unbedingt erforderlich.

Nach [9] bestimmt die Wärmestrahlung der erwärmten Bauteile des Ofens zu einem erheblichen Anteil die Wärmeabgabe an die Baugruppe. Allerdings werden dort keine Angaben gemacht, wie die angegebenen Zahlenwerte ermittelt wurden. Aus diesem Grund werden für die Testplatine zwei Varianten berechnet, wobei einmal die Strahlung mit berücksichtigt wird. Diese Ergebnisse sind in Bild 104 einer Messung an einer entsprechenden Leiterplatte gegenübergestellt.

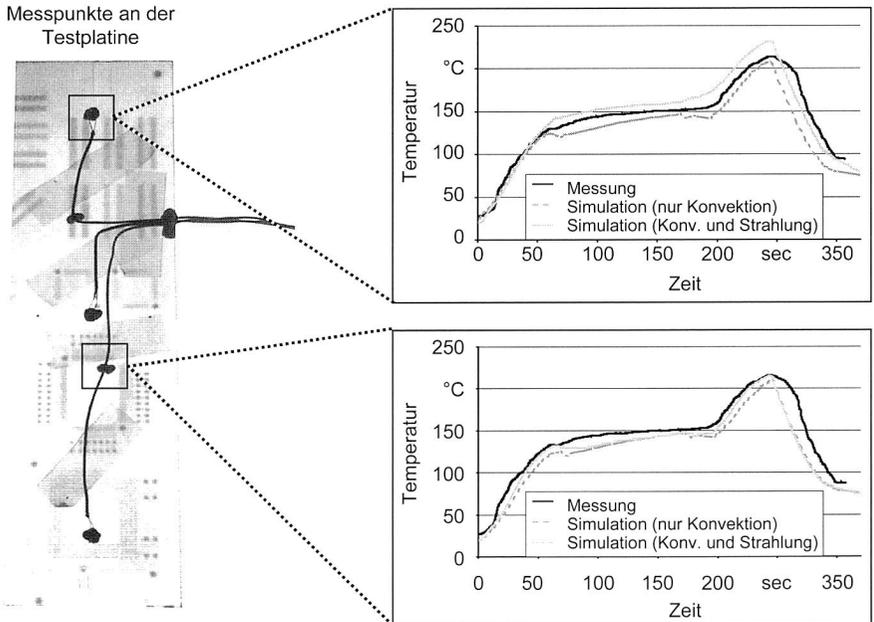


Bild 104: Ergebnisse Simulation der Temperaturverteilung auf der Leiterplatte mit und ohne Berücksichtigung der Strahlung

Dabei zeigt sich an den Messpunkten, dass bereits die Simulation des konvektiven Wärmeübergangs weitgehend mit dem gemessenen Temperaturverlauf übereinstimmt, vor allem beim Aufheizen in der Haltephase. In der Peakphase wird durchweg eine geringere Spitzentemperatur ermittelt als in der Messung. Dies ist unzureichend, da somit

nicht alle relevanten Effekte für die Ermittlung der Spitztemperatur im Modell abgebildet sind. Aus diesem Grund ist ein weiterer Simulationslauf mit Berücksichtigung der Strahlung an den Ofenwänden erforderlich. Die Abkühlung erfolgt im Simulationsmodell deutlich schneller als in der Messung. Hier ist anscheinend die Temperatur des Kühlmediums zu kalt angenommen. An dieser Stelle zeigt sich, dass die unscharfe Trennung von Peak- und Kühlzone (vgl. Bild 100) es erschwert, für diesen Bereich eine korrekte Annahme über die thermischen Bedingungen zu treffen. Der Einfluss der Strahlung ist in diesem Teil des betrachteten Ofens gering, da die Kühlzone beim betrachteten Ofen lediglich aus einer Ventilatorbaugruppe oberhalb der Transportstrecke besteht. An beiden Seiten ist keine Verkleidung vorgesehen. Bzgl. der Homogenität der Temperaturverteilung ist festzustellen, dass die Simulation der reinen Konvektion sowohl für den Messpunkt in der Leiterplattenmitte als auch am -rand eine gleichmäßige Temperaturverteilung ergibt. Dies korreliert ebenfalls mit der Messung.

In einem zweiten Simulationslauf wird zusätzlich der Wärmeübergang durch Strahlung berücksichtigt. Hierzu wird für die Außenflächen der modellierten Luft ein Emissionsfaktor von 0,3 angenommen. Der Wärmeeintrag in die Leiterplatte wird dadurch deutlich erhöht. Beim Vergleich der beiden Messpunkte in Bild 104 zeigt sich, dass für den Messpunkt in der Mitte der Leiterplatte der Temperaturverlauf bis zum Erreichen des Maximalwerts praktisch fehlerfrei beschrieben wird. Beim weiter außen liegenden Punkt ist festzustellen, dass der Temperaturwert nun über dem in der Messung erfassten Wert liegt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass für die Temperatur auf dem Schaltungsträger der konvektive Wärmeübergang die mit Abstand größte Bedeutung hat. Darüber hinaus ist die Strahlung der über der Leiterplatte liegenden Düsen zu berücksichtigen. Die Wärmestrahlung des Transportbands und der seitlichen Ofenwände kann dagegen vernachlässigt werden.

Damit ist ein simulationsgestützter Ansatz verfügbar, der in der Lage ist, die maximale Temperatur auf der Leiterplatte korrekt zu ermitteln. Dieser kann daher für bestückte Baugruppen erweitert werden. Hierfür ist es im ersten Ansatz nicht erforderlich, die detaillierte Geometrie aller Bauelemente abzubilden. Dies hätte den Nachteil, dass eine sehr große Zahl an Elementen im Modell erforderlich ist. Es ist für die Ermittlung der Temperatur ausreichend, die meisten, unkritischen Bauelemente durch eine erhöhte Wärmekapazität zu modellieren. Nur besonders kritische Bauelemente sind geometrisch zu hinterlegen. Die Prozesswärme beim Aufschmelzen des Lotes, Aktivieren des Flussmittels und Erstarren der Schmelze kann durch temperaturabhängige Werte für die Wärmekapazität und -leitfähigkeit der betroffenen Elemente des Netzes nachgebildet werden.

Für die weitgehende Unterstützung des Technologieplaners ist eine automatisierte Übernahme der CAD-Daten aus dem EDA zu erstellen, an die eine Bibliothek der Bauelementgehäuseformen angeschlossen ist. Die Geometrie des Simulationsmodells wird dann automatisch erstellt und vernetzt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Leistungssteigerung elektronischer Baugruppen ist der maßgebliche Innovationstreiber für nahezu alle industriell gefertigten Produkte. Dies umfasst gleichermaßen den Konsumgüterbereich wie die Investitionsgüterbranchen. Hier sind die Miniaturisierung und die Erhöhung der Bauelementanzahl als die wesentlichen Faktoren zu nennen. Aus diesem Umfeld ergeben sich erhebliche Anforderungen an die Planung von Produktionssystemen, insbesondere in der Leiterplatten- und Flachbaugruppenfertigung. Hier ist das Zusammenspiel von Fragestellungen aus der Anlagenplanung, der Maschinenentwicklung sowie der Prozessführung zu optimieren. Dies beinhaltet nach der Festlegung der technologischen Randbedingungen die Definition des Grundkonzepts der Maschine und anschließend die mechatronische Auslegung der Baugruppen. Dabei ist das thermische Verhalten bereits frühzeitig in die Maschinenentwicklung einzubeziehen. Bei Maschinen der Elektronikproduktion sind vor allem die Arbeitsgenauigkeit und -geschwindigkeit von Bedeutung. Demgegenüber treten die Anforderungen an den Energieumsatz in den Hintergrund.

Im Sinne einer durchgängigen Planung fließen die Entwicklungsergebnisse anschließend in die Anlagenplanung, etwa zur Layoutplanung und Abtaktung, ein. Außerdem werden sie für die Offline-Programmierung und Technologieplanung verwendet. Um die Durchführung dieser Aufgaben in der geforderten Zeit und Qualität sicherzustellen, kommt vor allem der Simulationstechnik wachsende Bedeutung zu. Auf Grund der Komplexität der Anforderungen und der gegenseitigen Abhängigkeiten und Beeinflussungen wird der Simulationseinsatz in ein systematisches Vorgehen eingebettet. Hierfür wird in dieser Arbeit eine ganzheitliche Planungsmethodik in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 entwickelt. Dabei erfolgt sowohl eine Spezifizierung für die technologischen Randbedingungen von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion, als auch eine Erweiterung für das simulationsgestützte Vorgehen. Dazu wird der Planungsvorgang in einzelne Phasen aufgeteilt, von denen jede mit einem Simulationsergebnis als definiertem Meilenstein abschließt. Die Methodik wird anschließend in eine durchgängige CAE-Umgebung umgesetzt, die einen bidirektionalen Austausch von Simulationsdaten und -ergebnissen zwischen unterschiedlichen Programmen und Modellen erlaubt. So ist es z. B. möglich, das Bewegungsprofil aus der 3D-Kinematiksimulation für dynamische Analysen zu verwenden oder thermische Lasten und mechanische Schwingungen sowohl in der FEM als auch in der Mehrkörpersimulation zu überlagern. Die Durchgängigkeit von Methodik und CAE-Umgebung wird anschließend an einem Beispiel aus der Robotik demonstriert. Diese Ergebnisse werden danach eingesetzt, um drei typische Fragestellungen der Planung von Fertigungseinrichtungen zu betrachten: Die Neukonzipierung einer Anlage auf der Basis technologischer Anforderungen, die Optimierung des Entwurfs bzgl. des thermischen und dynamischen Maschinenverhaltens sowie die Analyse des Zusammenspiels von Maschinenentwicklung und Technologieplanung.

In der ersten Aufgabenstellung ist für ein neu entwickeltes Verfahren zur Leiterplattenherstellung in Additivtechnik die Fertigungsanlage zu planen. Dabei wird der Leiterzug

durch Laserdirektstrukturierung eines katalytischen Harzes erzeugt. Dies stellt den Fertigungsschritt dar, der sowohl für die Produktqualität als auch die Bearbeitungszeit entscheidend ist. Für eine entsprechende Fertigungsmaschine werden auf der Basis der Anforderungen vier alternative Systemlösungen entwickelt und mit der 3D-Kinematiksimulation analysiert. Parallel werden mit Hilfe der Ablaufsimulation und einer nachgeschalteten Kostensimulation die zulässige Bearbeitungszeit und das Kostenziel ermittelt. Auf der Basis dieser Ergebnisse wird für die betrachtete Fertigungseinrichtung eine Strahlführung mit einem XY-Tisch und einem galvanometrischen Spiegelsystem vorgeschlagen. Das 3D-Kinematiksimulationsmodell kann bei der anschließenden Realisierung der Maschine zur Offline-Programmierung dienen.

Ein Anwendungsbeispiel für die mechatronische Auslegung wird an einem Bestückautomaten dargestellt: Bei diesen Maschinen kommt dem thermischen und dynamischen Verhalten größte Bedeutung zu. Für die Analyse des thermischen Verhaltens wird die Temperaturverteilung in der Maschine mit der CFD-Simulation ermittelt. Diese Ergebnisse werden direkt als Lasten für die Ermittlung der thermischen Verformung übernommen. Für die Untersuchung der Maschinendynamik wird ein Mehrkörpermodell erstellt, das die Starrkörperbewegungen sowie die Flexibilität und Dämpfung der Bauteile und Bauteilverbindungen zusammenfasst. Die Antriebsregelung ist in das Modell über eine Kopplung zu einem Blocksimulator eingebettet. Darüber hinaus wird die thermische Verzerrung der relevanten Bauteile übernommen. Das Modell stellt somit einen umfassenden, virtuellen Prototypen dar. Die Simulationsergebnisse wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch Messungen an einem entsprechenden Automaten validiert. Die durchgeführten Arbeiten und die Parameterstudien tragen wesentlich zum Verständnis der Mechanismen bei, die einer unzureichenden Maschinenfähigkeit zu Grunde liegen. Sie fließen in die Entwicklung zukünftiger Bestücksysteme ein.

Das dritte Anwendungsbeispiel für die durchgängige simulationsgestützte Planung koppelt am Beispiel des Reflow-Lötens die Entwicklung der Fertigungseinrichtung und die Prozessplanung. Dazu wird ein CFD-Modell des Prozessraums zur Ermittlung der Strömung und Temperaturverteilung in einem Konvektionslötofen erstellt. An Hand dieser Ergebnisse ist der Ofen bzgl. der technologischen Anforderungen zu beurteilen. In einem anschließenden Schritt werden die Temperaturen und Strömungsdaten für die Untersuchung einer Leiterplatte abgeleitet. Das Modell wurde durch Temperaturmessungen bei Lötversuchen validiert.

Die Methodik und die daraus entstandene CAE-Umgebung leistet einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung der Vision der digitalen Fabrik für die Elektronikproduktion. Dabei wird eine maschinenbezogene Sicht realisiert, die sowohl technologische und entwicklungstechnische Aspekte als auch logistisch-wirtschaftliche Kenngrößen beinhaltet. Mit der stetig steigenden Rechnerleistung wird es so zunehmend möglich, alle Aspekte der Anlagenplanung, Maschinenentwicklung und Prozessführung schon vorab in der Simulation zu planen und damit Produkteinführungszeiten, -kosten und -risiken deutlich zu verringern. Die vorliegende Arbeit stellt hierfür die notwendige, strukturierte Vorgehensweise und die dazu gehörige CAE-Umgebung zur Verfügung und weist ihren Nutzen an drei Anwendungsfeldern nach.

Summary

Innovations in industrially manufactured products are mainly driven by the increasing performance of electronic systems. This includes both, consumer products as well as industrial equipment. The main factors for this trend can be found in miniaturisation and increase in lead count of electronic components, especially integrated circuits. This situation results in challenges for planning the adequate production systems, particularly for printed wiring board manufacturing and electronics assembly. The optimum solution has to be found taking into consideration the technological process, machine development as well as factory and logistics planning. Therefore, the technological requirements are identified as the basis for determining the concept for the machine in question. This is followed by the design of the machine's mechatronics. At this stage, the thermal behaviour is already to be taken into consideration. Manufacturing equipment for electronics production has to be designed to meet the challenging demands for operation accuracy and speed.

In order to realise a universal and seamless planning chain, the design results are subsequently taken into account for factory planning, especially for floor planning and line balancing. Furthermore, they are utilised for offline programming and technology planning. This can only be performed in the quality and speed demanded by applying computer aided planning tools, especially simulation. As the requirements and the mutual dependencies of the individual problems define a noticeable complex problem, the simulation approach is embedded into a systematic procedure. Therefore, a comprehensive approach is developed following the engineering guideline VDI 2221. This includes a specification for the technological constraints of electronics production as well as an extension for an effective application of simulation. Hence, the overall planning approach is divided into four phases that end at defined results representing dedicated milestones. This procedure is then realised creating a universal CAE environment, which provides a bi-directional transfer of simulation data and results between various models and software programs. For instance, the motion history created in a 3D kinematics simulation can be utilised for dynamics analyses or thermal loads and mechanical vibrations can be overlaid in both, finite element analysis and multi-body simulation. The versatility and the continual use of simulation data is being demonstrated using an application in robotics. These achievements are afterwards applied to analyse three problem positions in planning of manufacturing equipment. This includes the concept design of a manufacturing line based on technological requirements, the optimisation of thermal and dynamical machine behaviour and finally the interdependencies of machine and process design.

The first task is to plan a manufacturing line for printed circuit board manufacturing in a newly developed fully additive process chain. In this process chain, the circuit is created by direct laser structuring a catalytic resin. This step determines both, the quality of the final product and the manufacturing time. Therefore, an adequate manufacturing machine has to be developed. This is being done by elaborating four different concepts which are compared using 3D kinematics simulation. Simultaneously, a discrete event

simulation model is created to determine the maximum acceptable operation time. A subsequent cost analysis of the simulation results determines the target costs for this equipment. Based on these results, the optimum concept appears to be an XY-table combined with a galvanometric scanner systems. It is proposed for realisation and the corresponding simulation model can be used for offline programming a later prototype.

The mechatronical design is demonstrated at the example of a placement machine. The performance of these systems is widely determined by their thermal and dynamic behaviour. The first step in the thermal analysis is the determination of the temperature distribution inside the machine using a CFD simulation. These results are directly employed as loads for calculating the thermal distortion. The study of the machine dynamics is being carried out in a multi-body simulation. This model comprises rigid body movement, flexibility and damping of components and their connections. The motion control is included via a direct coupling to a block simulator. Furthermore, the thermal distortion of relevant components is included. Thus, the multi-body model represents a universal, virtual prototype of the machine in question. The simulation results have been validated by dedicated measurements at a real world system. The study considerably supports understanding the underlying mechanisms of insufficient machine capability found in production. They will be included into future machines' development.

As a third application the interdependency of machine development and technology planning is shown for reflow soldering. Therefore, a CFD model of the process fluid in the oven is created in order to determine the flow and temperature distribution. Based on these results, it can be determined, up to which extend this piece of equipment can fulfil the technological requirements. In the following step, the flow and temperature data is derived for a detailed analysis of processing a PCB assembly. The model has been validated using in-process temperature measurements.

The methodology and the resultant CAE environment provides a significant step towards the realisation of universal virtual manufacturing in electronics production. Here, a machine-centred solution is provided, which includes technological, design-related and economic aspects. So, all aspects of logistics systems, machine design and process development can be planned using computer simulation. Thus the costs time and risks for product introduction can be significantly reduced. The required methodology and the appropriate CAE tools are presented and their benefits are demonstrated in three fields of application.

Abkürzungen

3DKS	3D-Kinematiksimulation	FEM	Finite Elements Method
AOI	Automatic Optical Inspection	FORSIM	Bayerischer Forschungsverband Simulationstechnik
API	Application Programming Interface	FVM	Finite Volume Method
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	HDI	High Density Interconnection
BE	Bauelement	HIL	Hardware In the Loop
BGA	Ball Grid Array	LDI	Laser Direct Imaging
CACE	Computer Aided Control Engineering	MFU	Maschinenfähigkeitsuntersuchung
CAD	Computer Aided Design	MKS	Mehrkörpersimulation
CAE	Computer Aided Engineering	MLB	Multi Layer Board
CAM	Computer Aided Manufacturing	MRC	Manufacturing Rule Check
CFD	Computational Fluid Dynamics	PDM	Produktdatenmanagement
CSP	Chip Size Package	PRIME	Program for Re-engineering and Innovating Printboard Manufacturing and Equipment
cw	Continuous Wave	QFP	Quad Flat Pack
DRC	Design Rule Check	SBU	Sequential Build Up
EDA	Electronic Design Automation (Elektronik CAD)	SMD	Surface Mounted Device
EDM	Engineering Data Management	TCP	Tool Center Point (Werkzeugreferenzpunkt)
ERP	Enterprise Ressource Planning	THT	Through Hole Technology
FBG	Flachbaugruppe	UV	Ultra-violett

Literatur

- [1] Albers, A.; Häußler, P.; et. al:
Automated Topology Optimization of Flexible Components in Hybrid Finite Element Multibody Systems using Adams/Flex and MSC.Construct. In: Proceedings of the 16th Adams European Users Conference. Berchtesgaden 2001.
- [2] Albin, D.; Christoph, F.; Goosey, M. et. al.:
Development of a new, more efficient and environmentally friendly method for producing high density interconnects - the "Prime" process. In: Circuit World Vol. 27 (2001), 2/2001, S. 12-16.
- [3] Altan, T.; Blaine, L.; Yen, Y.:
Manufacturing of Dies and Molds. In: Annals of the CIRP. Vol. 50/2/2001. S. 405-423. Nancy, Frankreich. 2001.
- [4] Ambrogi, F.; Braccesi, C.; Cianetti, F.:
Simulation of moving parts on flexible bodies using multibody approach. Test case on a reinforced concrete highway bridge. Proceedings of the 15th Adams European Users Conference. Rom, Italien 2001.
- [5] Baehr, H. D.; Stephan, K.:
Wärme- und Stoffübertragung. 3. Auflage. Berlin: Springer 1998.
- [6] Barclay, B.; Morrell, M.:
Laser Direct Imaging - a Users Perspective. In: ZEV Leiterplatten 22 (2001), 7-8 /2001, S. 34-40.
- [7] Baumgartner, A.; Bernhard, R.; Schreck, G.; Willnow, C.:
Realistic Robot Simulation in Concurrent Engineering. In: Proceedings of the 8th International Conference on Concurrent Engineering. Anaheim Hotel. Kalifornien, USA 2001.
- [8] Beitz, W.; Küttner, K.-H.:
Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 17. Auflage. Berlin: Springer 1992.
- [9] Bell, H.:
Der Wärmeübergang in Konvektionsanlagen - Überlegungen zur Konstruktion von Reflowöfen und optimalen Reflowparametern. rehm Anlagenbau GmbH. 5/2000. Zugl.: www.rehm-anlagenbau.de Stand: 04.11.02
- [10] Bell, H.:
Die Bewertung von Reflowprofilen. In: productronic 10/1999, S. 58-60.
- [11] Bergmann, H. W.; Rouafi, N.:
Simulation der Auswirkungen des Reflowlötprozesses auf Gefüge und Zuverlässigkeit von Lötverbindungen. In: Feldmann, K.; Reinhart, G. (Hrsg.): Simulationsbasierte Werkzeuge für die Produktionstechnik. Ergebnisbericht zum 1. Forschungsjahr des Bayerischen Forschungsverbands Simulationstechnik. Erlangen und München 2000.
- [12] Bestle, D.; Meier, M. et. al.:
Vorabinbetriebnahme numerischer Steuerungen mit simulierten Werkzeugmaschinen. In: Industriemanagement 14 (1998), 5/1998, S. 49-52.

- [13] Bickendorf, J.:
Full-Automatic Off-Line Programming of Complex Paths. Proceedings of the 25th International Symposium on Industrial Robots (ISIR). Hannover 1994.
- [14] Bindbeutel, K.:
Engineering-Rahmensystem für den integrierten Produktentwicklungsprozeß. Dissertation, TU München. München: Herbert Utz. 1998.
- [15] Bley, C.; Franke, C.:
Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der digitalen Fabrik. In: wt Werkstattstechnik 91 (2001), 4/2001, S. 214-220.
- [16] Bodner, D. A.; Damrau, M. et. al.:
Virtual prototyping of electronics assembly systems. In: Electronics Manufacturing Engineering. Vol. 14. No. 3. Dearborn, USA: Society of Manufacturing Engineers 1999, S. 1-5.
- [17] Boiger, M.; Abach, A.; Fleckenstein, M.:
Trends in der Elektronik. In: Feldmann, K.; Geiger, M. (Hrsg.): Produktionssysteme in der Elektronik. Bamberg: Meisenbach 2001. S. 483-490.
- [18] Brand, A.:
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID). Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 1997.
- [19] Bronstein, I.; Semendjajew, :
Taschenbuch der Mathematik. Stuttgart: Teubner 1991.
- [20] Christoph, F.; Collisi, T. et. al.:
Durchgängiger Einsatz der Simulationstechnik. In: VDI-Z 144 (2002), 3/2002, S. 30-33.
- [21] Chryssolouris, G.:
Laser Machining. New York: Springer 1991.
- [22] Coles, R.:
How do you know when your design is right. In: Proceedings of the 16th Adams European Users Conference. Berchtesgaden 2001.
- [23] Collisi, T.:
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2002.
- [24] Colombo, A. W.:
Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High-Level Petri Nets. Dissertation Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 1998.
- [25] Crum, S.:
Convergence promises Profits for Contract Manufacturer. In: EP&P Electronic Packaging and Production, 10 /2000, S. 32-40.
- [26] Erhard, J.:
Anforderungen an Reflowlötssysteme. In: SMT Surface Mount Technology 12 (1999), 11/1999, S. 43-46.
- [27] Eßer, G.:
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermo-

- plasts substraten für die MID-Technik. Dissertation Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2002.
- [28] Eun, I.: Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren für den Einsatz in Werkzeugmaschinen. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker. 1999.
- [29] Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Hütte: Taschenbuch für Betriebsingenieure: Betriebshütte - Produktion und Management. 7. Auflage. Berlin: Springer 1996.
- [30] Falk, B.: Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2000.
- [31] Feldmann, K.: Advance of MID by Innovative Products and Production Technologies. In: K. Feldmann et. al.: Proceedings of the 4th International Congress Molded Interconnect Devices, S. 1-12, Erlangen 2000.
- [32] Feldmann, K.; Christoph, F.: Maschinennahe Simulation - Anwendung in Maschinenentwicklung und -betrieb. In: Panreck, K.; Dörrscheidt, F. (Hrsg.): Frontiers in Simulation. Tagungsband zum 15. Symposium Simulationstechnik. Paderborn September 2001, S. 131-136.
- [33] Feldmann, K.; Christoph, F.: Application of simulation tools for a technology-driven planning of a PCB-production line. In: Circuit World Vol 28 (2002), 4/2002, S. 21-25.
- [34] Feldmann, K.; Christoph, F.: Virtual prototyping of placement machines in electronics production. In: Proceedings of the 1st Conference on digital enterprise technology (DET). Durham, Vereinigtes Königreich, September 2002.
- [35] Feldmann, K.; Christoph, F.: Multi-body Simulation as the Integration Platform for a Virtual Manufacturing Machine. In: Proceedings of the 16th Adams European Users Conference. Berchtesgaden 2001.
- [36] Feldmann, K.; Krimi, S.; Boiger, M.; Zolleiß, B.: Optimization of SMD assembly systems regarding dynamical and thermal behavior. In: International Symposium on Assembly and Task Planning. Fukuoka, Japan: 2001.
- [37] Feldmann, K.; Reinhart, G.: Simulation in der Produktionstechnik. Multimedia-CD. Erlangen und München 2001.
- [38] Feldmann, K.; Schlögl, W.: Optimierung von automatisierten Bestücksystemen. In: Zwf 93 (1998), 10/1998, S. 497-499.
- [39] Feldmann, K.; Wunderlich, J.: Simulation Based Costing (SBC) in Production Systems. In: Ades, M.; Deschaine, L. M. (Hrsg.): Proceedings of the Business and Industry Symposium. San Diego: SCS 2001, S. 149-154.

- [40] Feuerstein, R.:
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementtechnologien in die Flachbaugruppenfertigung. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2001.
- [41] Feufel, H.:
Freedom through Microvia Technology. In: Printed Circuit Europe, 11-12/1998, S. 13-19.
- [42] Fröhlich, P.:
FEM-Leitfaden. Berlin: Springer 1995.
- [43] Fuhrmann, J.:
Der Elektronikfertigungsmarkt 2000 aus der Sicht des VDMA. In: productronic 4/2001, S. 58-60.
- [44] Füßling, L.:
Vorspannungsmessung an Riemengetrieben. In: VDI-Z Special Antriebstechnik 03/2000, S. 64-65.
- [45] Gerhard, M.:
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozessführung beim Löten komplexer Baugruppen. Dissertation Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 1998.
- [46] Gerndt, A.; van Reimersdahl, T. et. al.:
A parallel approach for VR-based visualization of CFD data with PC clusters. Proceedings of the IMACS 2000 Conference. Lausanne, Schweiz: 2000.
- [47] Großmann, K.; Jungnickel, G.:
Genauigkeitssteigerung an Werkzeugmaschinen - Modellbasierte Kompensation thermischer Verlagerungen im Arbeitsraum. In: Zwf 94 (1999), 6/1999, S. 320-323
- [48] Haas, G.; Herzberg, H.:
Another step in SMD miniaturization - the tiny 01005 device. In: EPP Europe Electronics Production and Test, 11-12/2001.
- [49] Hall, W. J.:
Concentrating on reflow's cooling zones. In: EPP Europe Electronics Production and Test, 3/2001, S. 44-50.
- [50] Heisel, U.; Hund, A.:
Thermisches Verhalten von Parallelkinematiken - Ursachen. Auswirkungen und Möglichkeiten der Fehlerminimierung. In: wt Werkstattstechnik 90 (2000), 10/2000, S. 450-454.
- [51] Herrmann, G.:
Handbuch der Leiterplattentechnik. Band 2. Saugau / Württemberg: Eugen G. Leuze 1991.
- [52] Honsel, C.:
Die Berechnung von Wärme- und Eigenspannungen infolge von Abkühlprozessen mit der Methode der tangentialen Steifigkeiten. Dissertation, RWTH Aachen. 1991.
- [53] Idelchick, I. E.:
Handbook of Hydraulic Resistance. 3. Auflage. London: CRC Press 1994.

- [54] Johnson, G.:
Semiconductors in Perspective. In: EP&P Electronic Packaging and Production, 11/2001, S. 20.
- [55] Jungnickel, G.: Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. Dresden: Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen der TU Dresden 2000.
- [56] Keeping, S.:
Lasers lead the way for microvias. In: Electronic Production, 7-8/2000, S. 51.
- [57] Kemenas, J.:
Unterschiedliche Bestückprinzipien aus einer Hand. In: SMT Surface Mount Technology 12 (1999), 11/1999, S. 22-24.
- [58] Knothe, K.; Wessels, H.:
Finite Elemente. Berlin: Springer 1991.
- [59] Kosmowski, W.; Wells, A.:
Impact of machine dynamics on PCB drilling. In: PC FAB Printed Circuit Fabrication, 02/2002.
- [60] Krause, F.-L.; Wöhler, T.:
Effiziente Aufbereitung von CAD-Modellen für FEM-Berechnungen. In: Zwf 96 (2001), 5/2001, S. 266-269.
- [61] Krimi, S.:
Analyse und Optimierung von Montagesystemen für die Elektronikproduktion. Dissertation Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach: 2001.
- [62] LaCourse, D.:
Developer roundtable: STEP vs. IGES - Six vendors assess standards for file transfers. In: Cadalyst 10/2001
- [63] Laird, J.:
Reflow Technology ready for lead-free challenge. In: EPP Europe Electronics Production and Test, 11/2001, S. 36-40.
- [64] Leers, U.:
Bestückung von 0201-Bauteilen. In: productronic, 6/2000, S. 60-62.
- [65] Lutz, H.; Wendt, W.:
Taschenbuch der Regelungstechnik. 2. Auflage. Thun und Frankfurt am Main: Harri Deutsch 1998.
- [66] Maciariello, R.:
Lotpastendruck Stand und Trends. Konferenzband zum Kongress für Systemintegration in der Mikroelektronik. GMM Fachbericht 24 Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik. Band 1 Mikrotechnische Produktion. Berlin: VDE-Verlag 1998, S. 443-452.
- [67] Makkonen, P.:
On Multi Body Systems Simulation in Product Design. Dissertation, KTH Stockholm. 1999.
- [68] Männli, W.:
Grundlagen der Kostenrechnung. 5. Auflage. Lauf a. d. Peg.: Verlag der GAB 1992.

- [69] Meier, D.; Agater, M.:
Laser Direct Patterning (LDP) - Microelectronics production without etching process. Garbsen: LPKF AG 2002.
- [70] Meier, H.; Kreusch, K.:
Virtuelle Maschinen für eine realistische Simulation. In: wt Werkstattstechnik 90 (2000), 1-2/2000, S. 19-21.
- [71] Meinlschmidt, J.; Oertli, Th.; v. der Hagen, F.:
Rechnergestützte Entwicklung von Werkzeugmaschinen. In: Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V. (Hrsg.): Forschungs-Info 8 (2000), S. 2.
- [72] Melzer, K.; Bickert, M. et. al.:
Umweltgerechte Elektronikproduktion. In: Feldmann, K.; Geiger, M. (Hrsg.): Produktionssysteme in der Elektronik. Bamberg: Meisenbach 2001. S. 491-497.
- [73] Mertens, H.; Heubner, A.:
Rechnerische Simulation des Betriebsverhaltens von Synchrongetrieben mit Spannelementen. In: Schwingungen in Antrieben 1998. VDI-Berichte Nr. 1416. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, S. 245-260.
- [74] Meyer, G.; Schiffner, E.:
Technische Thermodynamik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1989.
- [75] Miric, A.; Grusd, A.:
Bleifreie Lotlegierungen. In: productronic 11/1997, S. 34-43.
- [76] Mochizuki, T.:
Moving load modeling on flexible body. Proceedings of the 15th Adams European Users Conference. Rom, Italien 2001.
- [77] Moore, G. E.:
Cramming more components onto integrated circuits. In: Electronics. Vol. 38. April 1965. Zugl.: <http://www.intel.com/research/silicon/moorespaper.pdf>. Stand: 07.11.02
- [78] Mooren, J.:
Zuverlässige Bestückung von 0201-Bauelementen. productronic, 5-6/2001. S. 24-25.
- [79] Mühl, G.:
iVIP-Client und offene Informationsplattform In: Krause, F.-L. et. al. (Hrsg.): Abschlussbericht zum bmb+f Leitprojekt integrierte virtuelle Produktentstehung iVip. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 52-69.
- [80] N. N.:
Adams/Engine User's Guide V12. Ann Arbor, USA: Mechanical Dynamics Inc. 2002.
- [81] N. N.:
ANSI/EIA-274-D-80: Interchangeable Variable Block Data Contouring. Format for Positioning and Contouring / Positioning Numerically Controlled Machines. Richtlinie der EIA Electronic Industries Alliance. Ausgabe 10/1988.
- [82] N. N.:
ANSI/US PRO/IPO 100-1996 Digital Representation for Communication of Product Data: IGES Application Subsets and IGES Application Protocols. American National Standards Institute 1996.

- [83] N. N.:
Argos - neues optisches Inspektionssystem von Barco. In: ZEV Leiterplatten 22 (2001), 3/2001, S. 40
- [84] N. N.:
CFDesign Training. Charlottesville, USA: Blue Ridge Numerics Inc. 1999.
- [85] N. N.:
Chancen für Bayern - Bayern 2020. Arthur D. Little, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (Hrsg.). München: 2001.
- [86] N. N.:
Closed-Loop Galvanometer Scanner Selection Guidelines. Watertown, USA: General Scanning Inc. 1996.
- [87] N. N.:
Crescent/30 Laser Imager. Kortrijk, Belgien: Barco N. V. 2000.
- [88] N. N.:
Design-Richtlinien für HDI-Leiterplatten. In: PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen, 3/99, S. 285-286.
- [89] N. N.:
Die digitale Fabrik wird Chefsache. In: VDI Nachrichten, 12.07.2002, S. 9.
- [90] N. N.:
Die Zukunft der europäischen Leiterplattenindustrie In: ZEV Leiterplatten 20 (1999), 12/1999, S. 20-25.
- [91] N. N.:
DIN ISO 230 - 1: Prüfregele für Werkzeugmaschinen. Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen. die ohne Last oder unter Schlichtbedingungen arbeiten. Ausgabe 07/1999.
- [92] N. N.:
DIN ISO 230 - 2: Prüfregele für Werkzeugmaschinen. Teil 2: Bestimmung der Positionierungsunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen. Ausgabe 05/2000.
- [93] N. N.:
DLR-Leichtbaurobster - Multisensorieller 7-Achsroboter in Leichtbauweise. Oberpfaffenhofen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. 2001.
- [94] N. N.:
DP-100 Direct Imaging System. Brüssel, Belgien: Orbotech S. A. 2002.
- [95] N. N.:
Durchsatz beim Schablonendruck. In: EPP Elektronikproduktion und Prüftechnik, 6/2000, S. 52-54.
- [96] N. N.:
esi 5410 Dual Head UV Laser μ -Via Drill. Portland, USA: Electro Scientific Industries Inc. 2001.
- [97] N. N.:
Fast and accurate setup. <http://www.cd-adapco.com/products/post.htm>. Stand: 07.11.02
- [98] N. N.:
Features of MSC.Marc. MSC Software Corporation. Santa Ana, USA. 2001.

- [99] N. N.:
High-Density-Interconnection: Laser-Direktbelichtung im Kommen. In: ZEV Leiterplatten 20 (1999), 11/1999, S. 48-50.
- [100] N. N.:
High-Volume 0201-Bestückung. In: productronic, 12/1999, S. 26.
- [101] N. N.:
Igrip User Manual. Detroit, USA: Deneb Robotics Inc. 2000.
- [102] N. N.:
Innovativ. Präzis und sehr kompakt. In: EPP Elektronikproduktion und Prüftechnik, 6/2000, S. 50.
- [103] N. N.:
IPC - SM - 782: Surface Mount Design and Land Pattern Standard. Revision A - August 1993.
- [104] N. N.:
ISO 10303 - Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange 1994 (Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 1: Überblick und grundlegende Prinzipien) Ausgabe 12/1994.
- [105] N. N.:
Lösungen für die Fabriksimulation. Fellbach: Delmia GmbH 2002. Zugleich: www.delmia.de, Stand 07.11.2002.
- [106] N. N.:
Löten unter Sauerstoff. Blaubeuren-Seissen: Rehm Anlagenbau GmbH 2002. Zugl.: <http://www.rehm-anlagenbau.de/deutsch/jsindex.htm>, Stand: 07.11.02
- [107] N. N.:
LP-7008X Family. Brüssel, Belgien: Orbotech S. A. 2002.
- [108] N. N.:
LSA 600. Heidelberg: Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH 2001.
- [109] N. N.:
Markt für elektronische Baugruppen in Deutschland nach Branchen. Fachverband Bauelemente in der Elektronik im ZVEI. 2002.
- [110] N. N.:
Microbeam 3300 Laser Structuring System. Bruchsal: Siemens Dematic AG 2001.
- [111] N. N.:
Optische Inspektion: Brilliante Augen. In: ZEV Leiterplatten 22 (2001), 3/2001, S. 25-26.
- [112] N. N.:
Product List 2001. Göttingen: Lambda Physik AG. Göttingen 2001.
- [113] N. N.:
Providing Insight to the functional digital car. In: Automotive News and Views. Issue 2/2000. Ann Arbor, USA: Mechanical Dynamics Inc. 2000.
- [114] N. N.:
REFA - Basisseminar Arbeitssystemgestaltung. Darmstadt: REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation 1994.

- [115] N. N.: REFA - Methodenlehre des Arbeitsstudiums - Band 3 Arbeitssystemgestaltung. 6.Auflage. Darmstadt: REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation. zugl.: München: Hanser 1978
- [116] N. N.: Reflow ohne Grenzen. Wertheim: Ersä GmbH 2002. Zugl.: <http://www.ersa.de/loetmaschinen.html>, Stand: 07.11.02
- [117] N. N.: Reflow-Lötanlagen. Kreuzwertheim: Seho Seitz & Hohnerlein GmbH 2002. Zugl.: www.seho.de, Stand: 07.11.02.
- [118] N. N.: Schnell, schneller, Ultra-speed. Rödermark: Schmoll-Maschinen GmbH. Zugleich: http://www.schmoll-maschinen.de/deutsch/01d_produkte_und_technologien/01.03_bf_ultra_speed/d_01_03_ultra_speed.htm, Stand: 07.11.2002.
- [119] N. N.: Simpack module flexible bodies. <http://www.simpack.com/websitep.html>, Stand: 07.11.2002
- [120] N. N.: Spezifizierung der Trendstudie Bayern 2020 für die Branchen des VDMA Bayern. VDMA Landesverband Bayern. München: 2001.
- [121] N. N.: The Compact-Q. Rugby, UK: Sectron Laser Systems 1999.
- [122] N. N.: Ultra Violet UV @355nm/351nm Laser. New York, USA: Photonics Industries International, Inc. http://www.photonix.com/diode_ultraviolet355.htm, Stand 07.11.02
- [123] N. N.: Using Adams/Flex. Ann Arbor, USA: Mechanical Dynamics Inc. 1998.
- [124] N. N.: VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte und Systeme. Ausgabe 5/1993.
- [125] N. N.: VDI Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Anleitung und Beispiele. Ausgabe 11/98.
- [126] N. N.: VDI Richtlinie 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Ausgabe 12/2000.
- [127] N. N.: VDI Richtlinie 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. Ausgabe 1/2002.
- [128] N. N.: VDI Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Blatt 1: Grundlagen. Gründruck 3/2000 (Weißdruck voraussichtl. 3/2003).

- [129] N. N.:
VDI Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Blatt 8: Maschinennahe Simulation. Arbeitsversion 10/2002 (Gründruck voraussichtl. 4/2003).
- [130] N. N.:
VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Blatt 7: Kostensimulation. Ausgabe 3/2001.
- [131] N. N.:
Virtuelle Lacktrocknung bei der BMW AG - Kundenspezifische Anpassung eines Standard-FE-Programms. In: Infoplaner, 1/1999, S. 26-27. Grafing: CAD-FEM GmbH.
- [132] Nagel, T.; Böttger, A.; Vollbarth, J.:
Zahnriemengetriebe für die Lineartechnik. In: Der Konstrukteur, 1-2/ 1993, S. 18-22.
- [133] Oberender, L.:
Stand und Trends in der Micro-Via-Technologie. In: ZEV Leiterplatten 22 (2001), 1-2/2001, S. 30-34.
- [134] Ottarsson, G.:
Modal flexibility method in Adams/Flex. Ann Arbor, USA: Mechanical Dynamics Inc. 03/1998.
- [135] Papiernick, W.:
Digitale Servoantriebe für CNC-gesteuerte Werkzeugmaschinen und Industrieroboter. VDI-Seminar Praxis der digitalen Regelung - Industrielle Anwendungsbeispiele. Düsseldorf: VDI 1994.
- [136] Pritschow, G.; Croon, N.:
Wege zur virtuellen Werkzeugmaschine. In: wt Werkstattstechnik 92 (2002), 5/2002, S. 194-199.
- [137] Pritschow, G.; Schmid, J.; McCormac, S. E.:
Ein integriertes Simulationssystem für Werkzeugmaschinen und Roboter. In: Zwf 94 (1999), 9/1999, S. 546-549.
- [138] Rampalli, R.:
Adams/Solver Theory Seminar. Mechanical Dynamics. Berchtesgaden. 2001
- [139] Rauh, E.:
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Entscheidungsabläufe. Dissertation, Universität Erlangen. Meisenbach Bamberg. 1998.
- [140] Redshaw, R.:
The PWB Industry in Europe: Challenges and Opportunities. Shipley Europe Ltd. Coventry, UK. productronica 2001. München 2001.
- [141] Reichenberger, M.:
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT). Dissertation Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2001.
- [142] Reinhart, G.:
Simulation – ein Experiment am digitalen Modell. In: Feldmann, K.; Reinhart, G. (Hrsg.): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Berlin: Springer 1999.

- [143] Reinhart, G.; Baudisch, T.:
Mechatronic Simulation Environment for Machine Tools. In: Proceedings of the 8th IEEE Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice. Hong Kong, SAR China: 2001, S. 217-221.
- [144] Reinhart, G.; Bauer, L.; Meier, H. et. al.:
Vernetzte Entwicklung mechatronischer Probleme. In: Zwf 94 (1999), 4/1999, S. 191-194.
- [145] Reinhart, G.; Feldmann, K.:
Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? München: Herbert Utz. 1997.
- [146] Reinhart, G.; Schneider, Ch. et. al.:
Kooperative Entwicklung technologisch komplexer Produkte. In: Konstruktion 50 (1998), 9/1998, S. 15-22.
- [147] Reinhart, G.; Weißenberger, M.:
Multibody Simulation of Machine Tools as mechatronic systems for optimisation of motion dynamiks in the design process. Proceedings of the International conference on advanced intelligent mechatronics. Atlanta, USA: 1999.
- [148] Reynolds, T.:
Is Integration the (Only) Answer in the Drive for "Smaller"? In: EP&P Electronic Packaging and Production, 10 /2000, S. 86.
- [149] Rothhaupt, A.:
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung. Dissertation, Universität Erlangen. 1995. Hanser: München.
- [150] Rottbauer, H.:
Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2000.
- [151] Sauer, W.; Wohlrabe, H.; Keil, M.:
Use of Process Capability Coefficients in SMT-Manufacturing: Theory and Practical Experiences. In: APEX Proceedings. Long Beach, USA: APEX 2000.
- [152] Sauer, W.; Wolter, K. et. al.:
Qualitätssicherung in der SMT-Bestückung - Bestimmung von Prozess- und Maschinenfähigkeitskoeffizienten. In: Tagungsband zum Symposium Elektronik-Technologie. Dresden 1996.
- [153] Scheel, W.:
Baugruppen-Technologie der Elektronik. Band 3: Montage. Berlin: Verlag Technik 1999.
- [154] Schimanek, E.; März, M.:
Thermal Aspects of Inverter Motors. Proceedings of the CIPS - International Conference on Integrated Power Systems. Bremen 2002.
- [155] Schlögl, W.:
Integriertes Simulationsdatenmanagement für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2000.
- [156] Schlögl, W.:
Referenzmodell maschinennaher Simulationskomponenten. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Delft: SCS, S. 151-170.

- [157] Schröder, T.:
Digitale Produktion mit Tücken. In: Financial Times Deutschland, 17.01.2002, S. 30.
- [158] Shafeev, G. A.:
Laser activation and metallisation of insulators. In: Quantum electronics 27 (1997), 12/1997, S. 1104-1110.
- [159] Soemers, H. M.; Gaal, E. W. et. al.:
The mechatronic design approach - a case study. In: Proceedings of the 7th mechatronics forum international Conference. Atlanta, USA 2000.
- [160] Spur, G.; Krause, F.-L.:
Das virtuelle Produkt - Management der CAD-Technik. München: Hanser 1997.
- [161] Spur, G.; Uhlmann, E.; Ising, M.:
Virtualisierung der Werkzeugmaschinenentwicklung. In: Zwf 94 (1999), 12/1999, S. 740-745.
- [162] Steinbuch, R.:
Finite Elemente. Berlin: Springer 1998.
- [163] Steinweger, T.; Weltin, U.:
Mehrdimensionale Beschreibung elastischer Lager in MKS-Simulationen. In: Schwingungen in Antrieben 1998. In: VDI-Berichte Nr. 1416. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, S. 581-599.
- [164] Süllau, A.; Wiemers, A.:
Laserdirektbelichtung. Hannover: ILFA Feinstleitertechnik 1999.
- [165] Tönshoff, H.-K.; Pritschow, G. et. al.:
Preventive Error Compensation Circuit for Multi-Axis Machining. In: Production Engineering Vol. VII/1 (2000), S. 31-34.
- [166] van Gastel, S.:
Trends in der Elektronikfertigung. In: productronic 6 /2002. S. 11-15
- [167] Walsh, D.; Arena, J.:
Seeing AOI for Six-Sigma PCB Manufacturing. In: EP&P Electronic Packaging and Production, 8/2001, S. 46-50.
- [168] Wayness, D.:
Shipley's European Technology Roadmap. Shipley Europe Ltd. Coventry, UK. productronica 2001. München 2001.
- [169] Weber, J.:
Keramikpipetten meistern 0201 optimal. In: productronic, 10/2000. S. 32-33.
- [170] Weck, M.:
Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Band 2: Berechnung und Konstruktion. 6. Auflage. Berlin: Springer 2002.
- [171] Weck, M.:
Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Band 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung. 6. Auflage. Berlin: Springer 2001.
- [172] Weck, M.; Dammer, M.:
Die virtuelle Werkzeugmaschine - Simulation als Hilfsmittel zur effizienten Produktgestaltung. In: Konstruktion 49 (1997). S. 21-25.

- [173] Weck, M.; Müller-Held, B.:
Virtuelle Produkt- und Prozessentwicklung. In: wt Werkstattstechnik 90 (2000), 7/8/2000, S. 302-306.
- [174] Weck, M.; Tüllmann, U.:
Kinematics of Spindle Bearings with rigid or spring preload. In: Production Engineering Vol. VI/1 (1999), S. 67-72.
- [175] Weinert, K.; Zabel, A.:
Design and Application of an Adaptive Milling Simulation für Optimizing Feed-Rates in Three-Axis Milling. In: Production Engineering Vol. VII/2 (2000), S. 27-30.
- [176] Weinhold, M.:
Thermount™ Basismaterial und Prepreg für Leiterplatten mit eingebetteten Bauteilen. In: PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen, 1/2002. S. 108 - 112.
- [177] Weule, H.; Schmidt, J.; Söhner, J.:
Simulation of the High Speed Milling Process. In: Production Engineering Vol. VII/2 (2000), S. 23-26.
- [178] Will, J.:
Implizit versus Explizit. In: Infoplaner, 1/1999, S. 42-43. Grafing: CAD-FEM GmbH.
- [179] Wischoffer, S.:
Automated Odd-form Placement. In: EPP Europe Electronics Production and Test, 8/2001, S. 32-36
- [180] Wohlrabe, H.:
Maschinen- und Prozessfähigkeit von Bestücksystemen in der SMT: Elektronik-Technologie in Forschung und Praxis. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert. 2000
- [181] Wohlrabe, H.:
Prozess- und Maschinenfähigkeitsanalysen in der Baugruppenfertigung - dargestellt am Beispiel des automatischen Bestückens. In: PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen, 5/99, S. 697-702.
- [182] Wohlrabe, H.; Fellhauer, H.:
Qualitätskostensenkung in Theorie und Praxis. Teilthema Maschinen- und Prozessfähigkeitsuntersuchungen. Workshop zum Forschungsvorhaben Elproma. Wiesloch 1999.
- [183] Wunderlich, J.:
Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme. Dissertation, Universität Erlangen. Bamberg: Meisenbach 2002.
- [184] Zangemeister, C.:
Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. 4.Auflage. München: Wittmannsche Buchhandlung 1976.
- [185] Zuber, E.; Kress, M.; Wagner, W.:
Virtuelle Produktion - Partner der digitalen Produktentwicklung. In: wt Werkstattstechnik 91 (2001), 6/2001, S. 308-314.

Anhang A Winkelkorrektur für ein Scannersystem

Für das 3D-Kinematiksimulationsmodell des Konzepts, das ein System galvanischer Scanner beinhaltet (vgl. Abschnitt 6.6.3), ist eine detaillierte Betrachtung der vorliegenden geometrischen Optik erforderlich. Der Grund hierfür liegt darin, dass durch die Ablenkung des Strahls an drehbaren Spiegeln ein Abbildungsfehler (Kissenfehler) auftritt. Die Anwendung von Kleinwinkelnäherungen führt hier zu nicht mehr akzeptablen Fehlern.

A.1 Geradheitskorrektur für vertikale Linien

Die Strahlführung an den Scannerspiegeln ist in Bild 105 dargestellt: Der Laserstrahl trifft nach dem Verlassen der Strahlquelle auf den ersten Spiegel und danach auf den hierzu senkrecht stehenden zweiten Spiegel. Anschließend trifft er auf die f-Theta-Linse, die den Strahl senkrecht nach unten projiziert. Da diese im Rahmen der geometrischen Optik keinen Einfluss auf den Auftreffpunkt des Strahl auf der Leiterplatte hat, wird sie nicht näher betrachtet.

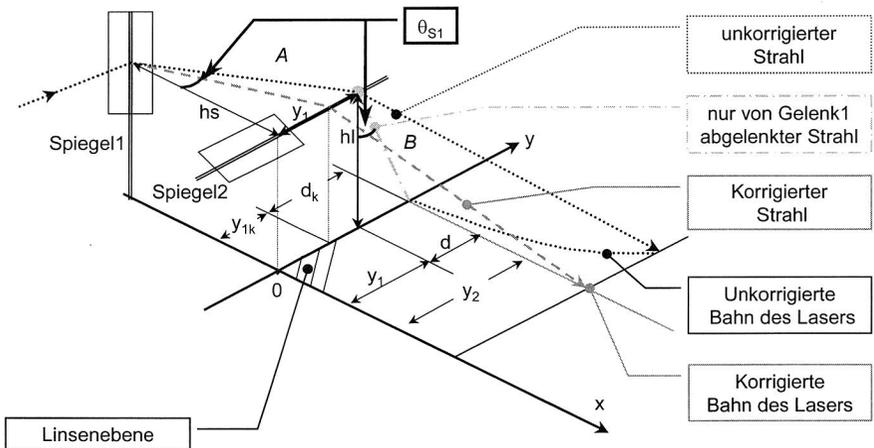


Bild 105: Geometrische Optik des Scannersystems und geometrische Größen für die Korrektur des Abbildungsfehlers

Wird von einer Kleinwinkelnäherung ausgegangen, so erzeugt der unkorrigierte Strahl nach der Ablenkung an beiden Spiegeln durch eine Drehbewegung des zweiten Spiegels keine Gerade, die zur Y-Achse parallel ist (korrigierte Bahn), sondern eine gekrümmte Kurve (unkorrigierte Bahn). Dieses Verhalten ist durch eine Änderung des Drehwinkels des zweiten Spiegels nicht zu beeinflussen, vielmehr ist eine Korrektur des Drehwinkels des ersten Spiegels erforderlich. Diese wird im Folgenden hergeleitet. Dazu sind die geometrischen Größen aus Bild 105 und Bild 106 erforderlich. Ihre Festle-

ung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit auf zwei Bilder aufgeteilt. Sie sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

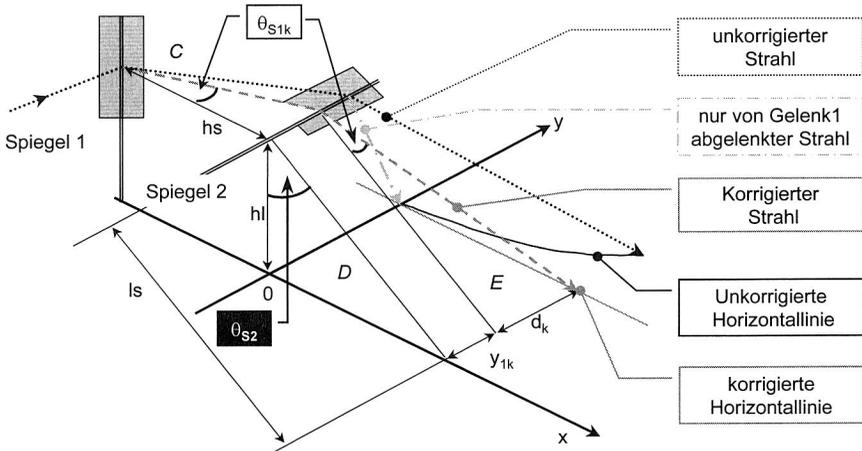


Bild 106: Geometrische Zusammenhänge zur Ableitung der Winkelkorrektur

Aus Bild 105 und Bild 106 lassen sich die folgenden geometrischen Zusammenhänge ableiten:

- (1) $y_1 + d = y_{1k} + d_k$ (Bild 105)
- (2) $d = hl \cdot \tan \theta_{S1}$ (Bild 105, Dreieck B)
- (3) $y_1 = hs \cdot \tan \theta_{S1}$ (Bild 105, Dreieck A)
- (4) $y_{1k} = hs \cdot \tan \theta_{S1k}$ (Bild 106, Dreieck C)
- (5) $ls = \frac{hl}{\cos \theta_{S2}}$ (Bild 106, Dreieck D)
- (6) $d_k = ls \cdot \tan \theta_{S1k} \stackrel{(5)}{=} \frac{hl \cdot \tan \theta_{S1k}}{\cos \theta_{S2}}$ (Bild 106, Dreieck E)

Durch Einsetzen von (2), (3), (4), (5), (6) in (1) folgt:

$$(7) \tan \theta_{S1k} = \frac{(hs + hl) \cdot \tan \theta_{S1} \cdot \cos \theta_{S2}}{hs \cdot \cos \theta_{S2} + hl}$$

Für die Drehwinkel θ_{D1} und θ_{D2} der Spiegel folgt entsprechend dem Reflexionsgesetz:

$$(8) \quad \theta_{S1} = 2 \cdot \theta_{D1}$$

$$(9) \quad \theta_{S2} = 2 \cdot \theta_{D2}$$

Der zu korrigierende Drehwinkel des ersten Spiegels, der im Steuerungsprogramm zu hinterlegen ist, folgt durch Einführen der Drehwinkel aus (8) und (9) in die Beziehung (7) für den zu korrigierenden Strahlwinkel:

$$2 \cdot \theta_{D1k} = \theta_{S1k} = \arctan \left[\frac{(hs + hl) \cdot \tan(2 \cdot \theta_{D1}) \cdot \cos(2 \cdot \theta_{D2})}{hs \cdot \cos(2\theta_{D2}) + hl} \right]$$

$$(11) \quad \theta_{D1k} = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{(hs + hl) \cdot \tan(2 \cdot \theta_{D1}) \cdot \cos(2 \cdot \theta_{D2})}{hs \cdot \cos(2\theta_{D2}) + hl} \right]$$

A.2 Linearitätskorrektur zur Erzeugung gleichmäßiger Geschwindigkeiten

Mit der Korrektur des Drehwinkels des ersten Spiegels können Parallelen zur Y-Achse realisiert werden. Bei der überlagerten Drehung der beiden Spiegel, die für Erstellung von Diagonalen nötig ist, ist eine konstante Geschwindigkeit des Laserstrahls in beiden Achsen sicherzustellen. Diese Korrektur ist insbesondere dann nötig, wenn keine Diagonale durch den Ursprung erstellt werden soll. Die Korrekturformel wird am prinzipiellen Zusammenhang der Vervielfachung von Drehwinkel bzw. Laserweg hergeleitet, der in Bild 107 dargestellt ist.

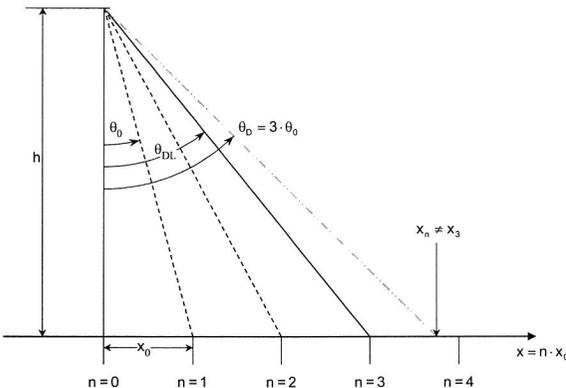


Bild 107: Linearitätsfehler bei Vervielfachung des Drehwinkels (am Beispiel der Verdreifachung)

Für eine Wegeinheit, die der Laserstrahl auf der Prozess- bzw. Linsenebene überstreicht, gilt mit den geometrischen Beziehungen aus Bild 107:

$$(12) \quad x_0 = h \cdot \tan \theta_0 \Rightarrow \tan \theta_0 = \frac{x_0}{h}$$

Für die Vervielfachung des Drehwinkels gilt:

$$(13) \quad \theta_D = n \cdot \theta_0 \Rightarrow n = \frac{\theta_D}{\theta_0}$$

Für den Winkel, der für den vielfachen Weg erforderlich ist, gilt:

$$(14) \quad \tan \theta_{DL} = \frac{n \cdot x_0}{h}$$

Durch Einsetzen von (12), (13) in (14) und Auflösen nach θ_{DL} ergibt sich für den Drehwinkel, der für ein Vielfaches des Weges in der Steuerung zu hinterlegen ist:

$$(15) \quad \theta_{DL} = \arctan\left(\frac{\theta_D}{\theta_0} \cdot \tan \theta_0\right)$$

Für beide Spiegel sind die Linearisierungswinkel zu ermitteln. Diese werden in der 3D-Kinematiksimulation in Grad angegeben. Daneben wird die Korrektur auf einen Einheitswinkel $\theta_0 = 1^\circ$ bezogen.

$$(16) \quad \theta_{D1L} = \arctan(\theta_{D1} \cdot \tan 1^\circ)$$

$$(17) \quad \theta_{D2L} = \arctan(\theta_{D2} \cdot \tan 1^\circ)$$

Für den Spiegel 1 ist noch die Korrektur für vertikale Linien aus (11) zu berücksichtigen. Durch Einsetzen von (16) in (11) folgt:

$$(18) \quad \theta_{D1Lk} = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{(hs + hl) \cdot \tan(2 \cdot \arctan(\theta_{D1} \cdot \tan 1^\circ)) \cdot \cos(2 \cdot \arctan(\theta_{D2} \cdot \tan 1^\circ))}{hs \cdot \cos(2 \cdot \arctan(\theta_{D2} \cdot \tan 1^\circ)) + hl} \right]$$

Mit den Beziehungen (17) und (18) wird es ermöglicht, der Steuerung den korrekten Endwert für die Interpolation der Drehbewegung so zu übergeben, dass die korrekte Bahngeschwindigkeit realisiert werden kann und alle denkbaren Linien korrekt abzubilden sind.

A.3 Formelzeichen zur Berechnung der Winkelkorrektur

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
d	mm	Differenz zwischen der Soll-Ablenkung und der tatsächlichen Ablenkung in Y-Richtung
d_k	mm	Korrigierte Differenz zwischen der Soll-Ablenkung und der tatsächlichen Ablenkung in Y-Richtung
hl	mm	Abstand des zweiten Spiegels und der f- θ -Linse
ls	mm	Abstand zwischen den Spiegeln
y_1	mm	Ablenkung des Strahls in y-Richtung durch den ersten Spiegel
y_{1k}	mm	Korrigierte Ablenkung des Strahls in y-Richtung durch den ersten Spiegel
y_2	mm	Soll-Ablenkung des Strahls in y-Richtung durch Zusammenwirken beider Spiegel
θ_{D1}	°	Drehwinkel von Spiegel 1; $-45^\circ < \theta_{D1} < 45^\circ$
θ_{D1k}	°	Korrigierter Drehwinkel von Spiegel 1; $-45^\circ < \theta_{D1} < 45^\circ$
θ_{D2}	°	Drehwinkel von Spiegel 2; $-45^\circ < \theta_{D2} < 45^\circ$
θ_{S1}	°	Ablenkwinkel des Strahls durch den ersten Spiegel; ; $\theta_{S1} = 0^\circ$ bedeutet Ablenkung um 90° ; $-90^\circ < \theta_{S1} < 90^\circ$
θ_{S1k}	°	Korrigierter Ablenkwinkel des Strahls durch den ersten Spiegel; $\theta_{1k} = 0^\circ$ bedeutet Ablenkung um 90° ; $-90^\circ < \theta_{1k} < 90^\circ$;
θ_{S2}	°	Ablenkwinkel des Strahls durch den zweiten Spiegel ; $\theta_{S2} = 0^\circ$ bedeutet Ablenkung um 90° ; $-90^\circ < \theta_2 < 90^\circ$

Tabelle 10: Formelzeichen für die Korrekturfunktion des ersten Spiegels (vgl Bild 105, Bild 106)

Anhang B Anisotrope Wärmeleitfähigkeiten für Ersatzmaterialeigenschaften

Im Folgenden werden die in Tabelle 7 angegebenen Ausdrücke zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit zusammengesetzter Körper abgeleitet.

Dabei wird zunächst die Formel für die Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher homogener Körper hergeleitet. Dies bildet den Ausgangspunkt für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit schichtweise aufgebauter Körper.

B.1 Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Geometrien

Den Ausgangspunkt für die Herleitung bildet das Fourier'sche Grundgesetz der Wärmeleitung [5]:

$$(1) \quad \dot{Q} = -\lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \cdot A(r)$$

Durch Trennung der Variablen folgt:

$$(2) \quad -\lambda \cdot \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} d\vartheta = \dot{Q} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{A(r)} \cdot dr$$

Die vom Wärmestrom durchflossene Fläche hängt von der Geometrie des betrachteten Körpers ab. Bei einem Quader ist die vom Wärmestrom durchflossene Fläche von der Ortskoordinate r (vgl. Tabelle 7) unabhängig. Beim Durchgang durch die Mantelfläche eines (Hohl-)Zylinders ist sie dagegen davon abhängig:

$$(3) \quad A(r) = A = l \cdot t = \text{const} \quad \text{für Quader}$$

$$(4) \quad A(r) = 2\pi \cdot L \cdot r \quad \text{für Hohlzylinder}$$

Für einen Quader ergibt sich durch Einsetzen von (3) in (2)

$$(5) \quad -\lambda \cdot \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} d\vartheta = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \int_{r_1}^{r_2} dr$$

$$(6) \quad -\lambda \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot (r_2 - r_1)$$

und somit

$$(7) \quad \lambda = \frac{\dot{Q} \cdot s}{A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)} \quad \text{mit Schichtdicke } s = r_2 - r_1$$

Für den Hohlzylinder ergibt sich durch Einsetzen von (4) in (2)

$$(8) \quad -\lambda \cdot \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} d\vartheta = \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr$$

$$(9) \quad -\lambda \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

und somit

$$(10) \quad \lambda = \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

B.2 Wärmestrom senkrecht zu den Grenzschichten

Bei der Wärmeleitung senkrecht zur Grenzschichtfläche wird jede der Schichten vom gleichen Wärmestrom durchflossen (vgl. Tabelle 7):

$$(11) \quad \dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{Q}_{12} = \dot{Q}_{23} = \dot{Q}_{13} = \dots = \dot{Q}_{ij}$$

Die hier eingeführten Indices i und j ($i > j$) bezeichnen die erste (i) bzw. letzte (j) Wand des betrachteten Körpers und werden auch für die weiteren Formelzeichen verwendet.

Die Gleichungen (7) und (10) können verallgemeinert werden. Dazu werden eingeführt:

$$(12) \quad a_{ij} = \begin{cases} r_j - r_i & \text{für Schichtung von Quadern} \\ \ln \frac{r_j}{r_i} & \text{für Schichtung von Hohlzylindern} \end{cases}$$

$$(13) \quad b = \begin{cases} A = l \cdot t & \text{für Schichtung von Quadern} \\ 2\pi \cdot r & \text{für Schichtung von Hohlzylindern} \end{cases}$$

und es folgt:

$$(14) \quad \lambda_{ij} = \frac{\dot{Q}_{ij}}{b} \cdot \frac{a_{ij}}{(\vartheta_i - \vartheta_j)}$$

Der Ausdruck für die Wärmeleitfähigkeit für zusammengesetzte Schichten wird zunächst für den Fall eines Körpers aus zwei senkrechten Schichten hergeleitet. Dabei wird die Indizierung wie in Tabelle 7 gewählt. Somit entspricht $\lambda_{\text{ges}} = \lambda_{02}$ und $\dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{Q}_{02}$.

Die Eigenschaften der ersten Schicht tragen den Index 01 und der zweiten Schicht dementsprechend den Index 12. Durch paarweises Gleichsetzen der Wärmeströme aus (11) erhält man folgende Gleichungen:

$$\dot{Q}_{01} = \dot{Q}_{02}:$$

$$(15) \quad \Rightarrow b \cdot \frac{\lambda_{01}}{a_{01}} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_1) = b \cdot \frac{\lambda_{02}}{a_{02}} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_2)$$

$$\dot{Q}_{01} = \dot{Q}_{12}$$

$$(16) \Rightarrow b \cdot \frac{\lambda_{01}}{a_{01}} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_1) = b \cdot \frac{\lambda_{12}}{a_{12}} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

Aus Gleichung (16) folgt durch Umformen:

$$(17) \vartheta_1 \cdot \left(\frac{\lambda_{01}}{a_{01}} + \frac{\lambda_{12}}{a_{12}} \right) = \vartheta_0 \cdot \frac{\lambda_{01}}{a_{01}} + \vartheta_2 \cdot \frac{\lambda_{12}}{a_{12}}$$

und Einsetzen von ϑ_1 aus (17) in (15) liefert

$$(18) \frac{\lambda_{02}}{a_{02}} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_2) = \vartheta_0 \cdot \frac{\lambda_{01}}{a_{01}} - \frac{\left(\vartheta_0 \cdot \frac{\lambda_{01}}{a_{01}} + \vartheta_2 \cdot \frac{\lambda_{12}}{a_{12}} \right)}{\left(\frac{\lambda_{01}}{a_{01}} + \frac{\lambda_{12}}{a_{12}} \right)} \cdot \frac{\lambda_{01}}{a_{01}}$$

Durch Umformen folgt:

$$(19) \frac{\lambda_{02}}{a_{02}} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_2) = \frac{\frac{\lambda_{01}}{a_{01}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{a_{12}}}{\left(\frac{\lambda_{01}}{a_{01}} + \frac{\lambda_{12}}{a_{12}} \right)} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_2)$$

und schließlich durch Partialbruchzerlegung:

$$(20) \frac{a_{02}}{\lambda_{02}} = \frac{a_{01}}{\lambda_{01}} + \frac{a_{12}}{\lambda_{12}} \quad \text{mit } \lambda_{\text{ges}} = \lambda_{02}$$

Durch Verallgemeinern für n Schichten folgt:

$$(21) \frac{a_{0n}}{\lambda_{\text{ges}}} = \sum_{k=1}^n \frac{a_{k-1,k}}{\lambda_{k-1,k}}$$

Durch Einsetzen von (12), (13) in (21) folgen die Ausdrücke für die betrachteten Fälle:

$$(22) \frac{r_n - r_0}{\lambda_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i - r_{i-1}}{\lambda_i} \quad \text{für Schichtung von Quadern}$$

$$(23) \frac{\ln \frac{r_n}{r_0}}{\lambda_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\lambda_i} \quad \text{für Schichtung von Hohlzylindern}$$

B.3 Wärmestrom parallel zu den Grenzschichten

Durchfließt der Wärmestrom parallel dazu angeordnete Grenzschichten, so ergibt sich der gesamte Wärmestrom durch diese Wand als Summe der Teilströme durch die einzelnen Schichten:

$$(24) \quad \dot{Q}_{\text{ges}} = \lambda_{\text{ges}} \cdot (\vartheta_a - \vartheta_b) \cdot \frac{A_{\text{ges}}}{l} = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i$$

Die Temperaturen an den Stirnflächen (vgl. Tabelle 7) sind jeweils gleich, so dass für die einzelnen Wärmeströme durch den Körper gilt

$$(25) \quad \dot{Q}_i = \frac{\lambda_i \cdot A_i \cdot (\vartheta_a - \vartheta_b)}{l}$$

Die Stirnfläche ist entlang des Wärmepfads konstant und berechnet sich zu

$$(26) \quad A_i = t \cdot (r_i - r_{i-1}) \quad \text{für Schichtung von Quadern}$$

$$(27) \quad A_i = \pi \cdot (r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad \text{für Schichtung von Hohlzylindern}$$

Damit ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit für den einzelnen Quader durch Einsetzen von (26) in (25) zu:

$$(28) \quad \dot{Q}_i = \frac{\lambda_i \cdot t \cdot (r_i - r_{i-1}) \cdot (\vartheta_a - \vartheta_b)}{l} \quad \text{für Schichtung von Quadern}$$

Durch Einsetzen von (28) in (24) folgt die Wärmeleitfähigkeit für die Schichtung von Quadern:

$$(29) \quad \lambda_{\text{ges}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (r_i - r_{i-1})}{r_n - r_0} \quad \text{für Schichtung von Quadern}$$

Analog folgt die Wärmeleitfähigkeit für die Schichtung von Hohlzylindern aus (24), (24) und (27):

$$(30) \quad \lambda_{\text{ges}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (r_i^2 - r_{i-1}^2)}{r_n^2 - r_0^2} \quad \text{für Schichtung von Hohlzylindern}$$

B.4 Formelzeichen der Ersatzmaterialeigenschaften

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$a_{ij} \cdot b^{-1}$	m^{-1}	Geometrische Kenngröße (vgl. Definition in (12), (13))
k	1	Zählvariable
l	m	Länge der betrachteten Grundgeometrie (gemeinsam für alle Schichten)
n	1	Zählvariable
r	m	Ortskoordinate entlang des Schichtenaufbaus
s	m	Dicke einer Schicht
t	m	Breite der betrachteten Grundgeometrie (bei Quadern gemeinsam für alle Schichten, bei Hohlzylindern parallel zum Schichtaufbau)
A	m^2	Wärmeaustauschende Fläche, allgemein
A_{ges}	m^2	Gesamte wärmeaustauschende Fläche eines Körpers
L	m	Länge eines Zylinders
\dot{Q}	W	Wärmestrom
λ	$\frac{W}{K \cdot m}$	Wärmeleitfähigkeit
ϑ	K	Temperatur

Tabelle 11: Formelzeichen für die Berechnung der anisotropen Wärmeleitfähigkeit (vgl. Tabelle 7)

Lebenslauf

Frank Ralph CHRISTOPH

geboren am 25. September 1972 in Nürnberg

ledig

- 09/79 - 08/83 Grundschule Eckental
- 09/83 - 06/92 Staatliches Gymnasium Lauf a. d. Pegnitz
- 10/92 - 04/98 Studium des
Maschinenbaus (Studienrichtung Fertigungstechnik) an der
Universität Erlangen-Nürnberg
Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)
- 11/94 - 04/95 Internship bei Siemens Plc., Congleton, Großbritannien
- 05/97 - 07/97 Internship bei SVPC, Boshan, VR China
- seit
05/98 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsau-
tomatisierung und Produktionssystematik der Universität Er-
langen-Nürnberg
Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
- seit
01/02 Geschäftsführer des Bayerischen Forschungsverbundes Si-
mulationstechnik (FORSIM)
- seit
07/02 Oberingenieur der Forschungsgruppe
Rechnergestützte Planung und Simulation

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52

Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53

Meisenbach Verlag, Bamberg

45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektiertung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

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

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

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette
für die Herstellung von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs– und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hütfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt–Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl–Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
**Anlagen– und Prozeßdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt
**Modulares Planungssystem
zur Optimierung der Elektronikfertigung**
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechbiegeteile**
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung
in Feldkommunikationssystemen**
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

Band 58: Markus Schultz
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen
von Blechformteilen**
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen
über einem STEP-Produktmodell**
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand
**Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwässer
**Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl
**Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen
zur Prozeß- und Programmoptimierung**
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung
zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

- Band 71: Michael Steber
**Prozeboptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6
- Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-097-4
- Band 73: Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2
- Band 74: Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0
- Band 75: Arthur Meßner
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-6
- Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6
- Band 77: Michael Schwind
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4
- Band 78: Manfred Gerhard
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2
- Band 79: Elke Rauh
**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0
- Band 80: Sorin Niederkorn
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9
- Band 81: Stefan Schubert
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7
- Band 82: Armando Walter Colombo
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1
- Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion**
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgestigter Metallkörper**
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
**Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

- Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6
- Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X
- Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8
- Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9
- Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7
- Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5
- Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8
- Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3
- Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7
- Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3
- Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebe-
ne in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1
- Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X
- Band 109: Markus Kornell
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
176 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Lötten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-191-1