





Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
der Technischen Universität München

## **Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**

**Thomas Mosandl**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. F. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Dilger,  
Technische Universität Braunschweig

Die Dissertation wurde am 16.09.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14.12.2004 angenommen.



***Forschungsberichte***

---

***iwb***

***Band 189***

***Thomas Mosandl***

***Qualitätssteigerung  
bei automatisiertem  
Klebstoffauftrag  
durch den Einsatz  
optischer Konturfolgesysteme***

---

***herausgegeben von***

***Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh***

***Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart***

---

***Herbert Utz Verlag***

***UTZ***

## **Forschungsberichte iwb**

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh  
Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
Technische Universität München  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

### **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.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2004

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des  
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der  
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege  
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben,  
auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0471-1

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 – [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren und Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Produktentwicklung über die Planung von Produktionssystemen hin zu den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*

Es gibt keinen Ausweg, den ein Mensch nicht beschreitet,  
um die tatsächliche Arbeit des Denkens zu vermeiden.

*Thomas Alva Edison*



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein Dank für die Schaffung und Pflege der hervorragenden Rahmenbedingungen am *iwb*, unter denen diese Arbeit entstand. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, dem Leiter des Instituts für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank all denjenigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, sowie den Studentinnen und Studenten des *iwb*, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mir die notwendige Unterstützung und Geduld entgegengebracht haben, um mir die Arbeit zu ermöglichen.

München, im Dezember 2004

*Thomas Mosandl*

Meiner Familie

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Kleben im produktionstechnischen Umfeld .....	2
1.2	Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise.....	3
<b>2</b>	<b>Situationsanalyse und Problemstellung</b> .....	<b>5</b>
2.1	Grundlagen zur Klebtechnik.....	5
2.1.1	Klebstoffe in der industriellen Anwendung .....	6
2.1.2	Anlagenkomponenten zur automatisierten Klebstoffverarbeitung.....	9
2.2	Anforderungen und Randbedingungen beim Klebstoffauftrag.....	10
2.2.1	Form- und Lagegenauigkeiten von Klebstoffraupen.....	11
2.2.2	Rheologische Randbedingungen .....	13
2.2.3	Anforderungen an die Handhabungseinrichtungen .....	14
2.3	Dosierfehler und Fehlerursachen.....	16
2.3.1	Dosierfehler .....	16
2.3.2	Fehlerursachen.....	18
2.3.2.1	Roboter- und werkzeugabhängige Ursachen.....	18
2.3.2.2	Werkstückbedingte Ursachen .....	21
2.3.2.3	Programmierfehler.....	23
2.3.3	Bewertung der Fehlerursachen .....	25
2.4	Qualitätssicherung .....	26
2.4.1	Sensorik .....	28
2.4.1.1	Definitionen zum Begriff Sensor.....	28

2.4.1.2	Verarbeitung von Sensordaten .....	30
2.4.2	Zerstörende Prüfverfahren.....	33
2.4.3	Zerstörungsfreie Prüfverfahren .....	35
2.5	Zusammenfassung und Bewertung .....	38
<b>3</b>	<b>Analyse von Sensorsystemen zur Bahnführung .....</b>	<b>41</b>
3.1	Systematik zur Auswahl von Sensorsystemen.....	41
3.2	Anforderungen an das Sensorsystem .....	43
3.3	Stand der Sensorsystemtechnik zur Bahnführung .....	44
3.3.1	Strategien zur Betriebsart .....	44
3.3.2	Sensoren zur Bahnführung .....	47
3.3.3	Bewertung .....	51
3.4	Zusammenfassung und Handlungsbedarf .....	54
<b>4</b>	<b>Qualifizierung optischer Konturfolgesysteme .....</b>	<b>55</b>
4.1	Theorie und Grundlagen.....	55
4.1.1	Allgemeine Vorgehensweise in der Bildverarbeitung .....	55
4.1.2	Optische Konturfolgesysteme .....	57
4.1.3	Hardwareplattformen.....	62
4.1.4	Signalverarbeitung.....	63
4.1.4.1	Profilextraktionseinheiten .....	64
4.1.4.2	Entzerrung .....	67
4.1.4.3	Filter .....	68
4.1.5	Beurteilung der Verfahren zur Signalverarbeitung .....	69
4.2	Oberflächeneigenschaften .....	72

4.2.1	Einflüsse durch die Oberflächenstruktur .....	72
4.2.2	Einflüsse durch die Werkstückfarbe .....	74
4.3	Zusammenfassung .....	79
<b>5</b>	<b>Methode zur Parameteranpassung .....</b>	<b>81</b>
5.1	Beschreibung der Versuchsmethode .....	81
5.1.1	Versuchsplanung und -durchführung .....	82
5.1.1.1	Versuche zur Farbeneinteilung .....	82
5.1.1.2	Versuche zur Parametereinstellung .....	84
5.1.2	Datenanalyse .....	89
5.2	Verfahren zur Parameteranpassung .....	97
5.3	Sensorinterne Parameteranpassung .....	99
5.3.1	Anforderung an die automatische Parameteranpassung .....	99
5.3.2	Methoden zur automatischen Parameteranpassung .....	100
5.3.3	Beurteilung der Verfahren zur Parameteranpassung .....	105
5.4	Ableitung einer allgemeinen Vorgehensweise .....	107
5.5	Zusammenfassung .....	110
<b>6</b>	<b>Aufbau und Betrieb des Anwendungsbeispiels .....</b>	<b>111</b>
6.1	Beschreibung des Produktbeispiels .....	111
6.2	Simulationsumgebung .....	113
6.2.1	Aufbau der Simulationsumgebung .....	114
6.2.2	Optimierung der Auftragseinheit .....	116
6.2.3	Optimierung der Sensorvorlauflänge .....	117
6.3	Eingesetzte Zellenkomponenten .....	119

6.3.1	Handhabungsgerät .....	121
6.3.2	Auftragseinheit .....	121
6.3.2.1	Exzentrerschneckenpumpe .....	123
6.3.2.2	Auftragsmedium .....	124
6.4	Eingesetzte Sensorik zur Konturverfolgung .....	125
6.4.1	Aufbau und Integration des Sensorsystems .....	126
6.4.2	Sensorrechner zur Verarbeitung der Sensordaten .....	127
6.4.3	Kalibrierung des Lichtschnittsensors .....	128
6.4.4	Implementierung .....	128
6.5	Strategien zur Verringerung systematischer Dosierfehler .....	130
6.5.1	Dynamische Eigenschaften des Systems Roboter-Sensor ..	131
6.5.2	Einsatz des Sensors zur Funktionssteuerung.....	132
6.5.3	Auftragsergebnisse .....	134
6.5.4	Einsatz des Sensors zur Qualitätsüberprüfung .....	135
6.6	Zusammenfassung .....	137
<b>7</b>	<b>Wirtschaftliche Bewertung .....</b>	<b>139</b>
7.1	Inbetriebnahme .....	139
7.2	Betriebsverhalten .....	141
7.3	Bewertung .....	143
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>145</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>149</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>167</b>

## Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Abkürzung	Bedeutung
3D-CAD	Dreidimensionales Computer Aided Design
AD-Wandler	Analog-Digital-Wandler
ANSI	American National Standards Institute
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSP	Digital Signal Processor
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
Griech.	Griechisch
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IPO-Takt	Interpolationstakt
IR	Infrarot-Strahlung
ISO	International Standardisation Organisation
KRL	KUKA Roboter Language
NMAB	National Materials Advisory Board
PCI	Peripheral-Component-Interconnect-Bus
PDM	Produktdatenmanagementsystem

## Formelzeichen

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
Pixel	Picture Element (Bildpunkt)
PSD	Position Sensitive Detectors
RAL	Reichsausschuss für Lieferbedingungen (heute: Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. )
RAM	Random Access Memory
RGB	Rot, Grün, Blau
SDB	Sensordatenbearbeitung
SRAM	Statistic Random Access Memory
TCP	Tool Center Point
TCP/IP	Transmisson Control Protocol/Internet Protocol
U	Unbuntpunkt
US	Ultraschall
UV	Ultraviolett
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VIS	sichtbarer Strahlungsanteil des Lichts (visible)



## Verzeichnis der Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung
H	Variable für den Parameter „Helligkeit“
K	Variable für den Parameter „Kontrast“
$K_B$	Betriebskosten
$K_I$	Instandhaltungskosten
$K_{Invest}$	Investitionskosten
$K_{Kleb}$	Kosten pro Meter aufgetragenem Klebstoff
$K_L$	Lohnkosten
$K_M$	Maschinenstundensatz
$K_R$	Raumkosten
S	Variable für den Parameter „Schwelle“
$S_a$	Schleppabstand
$T_E$	Einsatzzeit
$T_{IPO}$	Totzeit der Steuerung (IPO-Takt)
$T_{Kor}$	Zeitaufwand für Programmkorrektur
$T_{Mod}$	Modellierungszeit
$T_{Prog}$	Programmierzeit
$T_{t,sen}$	Sensortotzeit
$u_{max}$	Maximale Auftragsgeschwindigkeit
V	Verfügbarkeit
X	Variable für Normfarbwert
x	Variable für Normwertanteile

## Formelzeichen

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
$x_{\text{vmin}}$	Erforderlicher Mindestvorlauf
$Y$	Variable für Normfarbwert
$y$	Variable für Normwertanteile
$Z$	Variable für Normfarbwert
$z$	Variable für Normwertanteile
$Z_s$	Zinssatz

# 1 Einleitung

Für die Produktion haben sich die Rahmenbedingungen in den letzten Jahren stark verändert. Zum einen lässt sich an den ständig wachsenden Variantenzahlen im Konsumgüterbereich ein Trend zu zunehmend individualisierten Produkten beobachten [NÖKEN & KIRSCHKE 1998, PILLER 1998, REINHART U. A. 2001, WAGNER U. A. 2003, ZÄH U. A. 2003C]. Diese Individualisierung von Produkten stellt aus Sicht der Fertigungs- und Montagetechnik die Anforderung, mehr Produktvarianten bei sinkender Produkttypenzahl kostengünstig handhaben und verbinden zu können. Damit ist der derzeitige Einsatz komplexer und teurer Fertigungssysteme nur bedingt möglich [REINHART U. A. 2000B].

Zum anderen werden immer höhere Ansprüche an die Produkte seitens der Kunden gestellt. Im Automobil- und Nutzfahrzeugbau müssen zum Beispiel wirtschaftliche, ökologische, komfortbedingte sowie sicherheitstechnische Aspekte in das Endprodukt integriert werden. Trotz der zahlreichen Weiterentwicklungen im Bereich der konventionellen Stahlherstellung, kann in der Regel ein einzelner Werkstoff die vielen gleichzeitig auftretenden Anforderungen nicht erfüllen. Aluminium, Magnesium und Kunststoffe haben sich bereits als alternative Konstruktionswerkstoffe etabliert [PHILIPPS 2003]. Neuartige Fertigungsverfahren wie beispielsweise die Bandbeschichtung (Coil Coating), bei dem schon im Stahlwerk Speziallacke auf Stahl- und Aluminiumbänder aufgewalzt und eingebrannt werden, erweitern zusätzlich die Auswahl an zur Verfügung stehenden Halbzeugen [BASF 2002]. Die in den jeweiligen Basiskomponenten eingesetzten Werkstoffe und Beschichtungsstrukturen werden an die auftretenden Belastungen angepasst und müssen anschließend in ein Gesamtprodukt integriert werden.

Die daraus hervorgehenden Werkstoffkombinationen sind jedoch mit den herkömmlichen Fügeverfahren oft nur schwer zu realisieren. Die Verbindung von Werkstoffen mit unterschiedlichen Materialkennwerten, die so genannte Mischverbindung, ist deshalb für die Produktionstechnik von großer Bedeutung [REINHART U. A. 2000A, MOSANDL & GARTNER 2000, BÖHM 2003]. Die Klebtechnik stellt dafür eine viel versprechende Alternative zu den traditionellen Fügeverfahren dar und wird deshalb in Zukunft an Bedeutung gewinnen [MAURER & STARK 2001]. Das industrielle Kleben wird zum Teil bereits erfolgreich eingesetzt, das bestehende Potenzial zur Erfüllung der neuen Anforderungen und Randbedingungen hinsichtlich der Mischverbindungen ist jedoch bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

## 1.1 Kleben im produktionstechnischen Umfeld

Die Klebtechnik bietet gegenüber anderen Fügeverfahren eine Reihe von spezifischen Vorteilen. Neben der Verbindung von unterschiedlichen Materialien mit ihren spezifischen Werkstoffeigenschaften, beispielsweise deren Wärmeausdehnungskoeffizienten, sind insbesondere die zusätzlichen Sekundärfunktionen wie die Dichtwirkung, die Steifigkeitserhöhung durch flächige Kraftübertragung, die hohe dynamische Festigkeit und Schwingungsdämpfung zu nennen. Darüber hinaus können in Abhängigkeit des eingesetzten Klebstoffsystems bestimmte Bauteiltoleranzen ausgeglichen werden. Allerdings steht die Entwicklung der Klebtechnologie noch am Anfang ihrer technischen und industriellen Einsatzphase [DÖRFLER 2002]. Vor allem im Bereich der Produktionstechnik bestehen noch erhebliche Vorbehalte gegenüber dem Kleben. In Abbildung 1-1 sind ausgewählte Zitate zusammengefasst, die aus den Erfahrungen im alltäglichen Gebrauch im Haushalt gedanklich auf die industrielle Fertigung übertragen werden.

„Der Waschlappenhalter im Bad – eines Tages fällt er herunter. Die geklebte Kaffeetasse – nach dem ersten Spülen liegen die Einzelteile in der Geschirrspülmaschine. Kleben gilt auf Grund der alltäglichen Erfahrungen im Haushalt als Notbehelf.“  
[Strassmann 2002, Die Zeit, Nr. 28, 4. Juli 2002]

„Beim Fünfer kommt dem Kleber außerdem eine tragende Funktion zu. Weil Laien die Klebung als einzige Verbindung zwischen Vorderwagen und dem Rest der Karosserie aber suspekt sein dürfte, setzt BMW zusätzlich auf Nieten im Übergangsbereich der Segmente. Technisch ist das nicht notwendig, weil die Festigkeit der Klebenahnt rund 30 Prozent über der einer Punktschweißnaht liegt.“  
[N. N. 2003, Auto Motor Sport (2003) 8]

„... unter Klebtechnikern kursierendes Motto, welches jeden Qualitätssicherer in den Wahnsinn treiben müsste: Sauber arbeiten – und hoffen!“  
[Böhm 2002, Die Zeit, Nr. 28, 4. Juli 2002]

*Abbildung 1-1: Ausgewählte Zitate zur Leistungsfähigkeit der Klebtechnik*

Um diesen Vorurteilen entgegen wirken zu können, werden die Klebstoffe und die Klebverbindungen systematisch sowohl zerstörend als auch zerstörungsfrei geprüft, um das grundlegende Verhalten der geklebten Strukturen zu ermitteln [KRÜGER 1999]. Aufgrund der Fülle an verschiedenen Klebstoffen und deren Anwendungsgebieten können diese Methoden noch nicht für eine generelle Vorgehensweise verallgemeinert werden. Die im Labormaßstab entwickelten Kleb-

verbindungen müssen aufwändig in den Fertigungsprozess übertragen werden. Das Aufbringen des Klebstoffs kann dabei entweder manuell oder automatisiert erfolgen. Für einen automatisierten Klebstoffauftrag sprechen die höhere Reproduzierbarkeit der Raupenform und deren Positionierung auf dem Bauteil. Zudem können durch das Handhabungssystem exakte Parametereinstellungen für den Applikationsvorgang vorgegeben werden. Probleme ergeben sich beim Klebstoffauftrag im Hinblick auf die Prozessqualität durch das Auftreten von Dosierfehlern. Hierbei kann zwischen zufälligen Dosierfehlern, die beispielsweise durch Inhomogenitäten des Klebstoffs hervorgerufen werden [DILGER & HASENBERG 2000], und systematisch bedingten Dosierfehlern unterschieden werden [REINHART & GARTNER 2001]. Zufällige Dosierfehler können aufgrund des nicht vorhersehbaren Auftretens kaum gezielt vermieden werden. Durch das Einhalten eines möglichst exakt definierten Prozessfensters können ihre Auswirkungen jedoch begrenzt werden [LEHNER 2001]. Systematische Dosierfehler werden zum Beispiel durch eine fehlerhafte Abstimmung zwischen Handhabungsgerät, Dosiereinheit und Bauteillage hervorgerufen. Wegen ihres systematischen Ursprungs kann diesen Dosierfehlern entgegengewirkt werden.

Eine deutliche Verbesserung des Auftragsergebnisses ist demnach nur bei Methoden zu erwarten, welche die Fehlerursachen zielgerichtet vermeiden oder kompensieren. Diese präventive Fehlervermeidung in Kombination mit einer geeigneten Online-Prozessregelung kann dann als qualitätssichernde Maßnahme eingesetzt werden.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die Reproduzierbarkeit beim automatisierten Klebstoffauftrag unabhängig von den vorgegebenen Fertigungstoleranzen zu erhöhen und damit eine nachhaltige Qualitätssteigerung der Klebverbindung zu erreichen. Hierzu sollen geeignete Prüfverfahren und Prozesssensorik für die Klebtechnik untersucht werden. Durch die Kompensation von produktionsbedingten Fehlereinflussfaktoren wird mit Hilfe ausgewählter Systemtechnik, insbesondere durch die Kombination von Handhabungs- und Sensortechnik, eine systematische Verringerung der Dosierfehler angestrebt.

Mit der vollständigen Betrachtung der systemtechnischen Möglichkeiten zum fehlerfreien Klebstoffauftrag und zur Prozesskontrolle sollen komplexe Bearbei-

# 1 Einleitung

---

tungsaufgaben prozesssicher und unabhängig von den Werkstückparametern erschlossen werden.

Die Vorgehensweise, um diese Ziele zu erreichen, ergibt sich wie folgt. Zur Hinführung an die Thematik wird in **Kapitel 2** der Stand der Technik aufgearbeitet. Dabei werden die wesentlichen Grundlagen und Anforderungen zur industriellen Klebstoffverarbeitung vorgestellt sowie die daraus resultierenden Fehlerursachen innerhalb einer klebtechnischen Fertigungszelle aufgezeigt. Weiterhin werden zur Erhöhung der Qualitätssicherung sensorische Maßnahmen sowie die aktuellen Verfahren zur zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfung diskutiert und die daraus ersichtlichen Defizite dargestellt.

**Kapitel 3** beschreibt die Analyse zum Sensoreinsatz in der automatisierten Klebtechnik. Ausgehend von der Systematik zur Auswahl von Sensorsystemen werden die aktuellen Möglichkeiten der Sensortechnik zur Bahnführung vorgestellt. Dazu werden die bestehenden Lösungen untersucht und mit den zuvor definierten Anforderungen verglichen.

In **Kapitel 4** erfolgt die Qualifizierung optischer Sensorsysteme für die klebtechnischen Anwendungen. Basierend auf den Grundlagen zur industriellen Bildverarbeitung wird der Einfluss von unterschiedlichen Bauteiloberflächeneigenschaften auf optische Sensoren verdeutlicht.

Für die in der Arbeit verwendete optische Sensorik werden in **Kapitel 5**, ausgehend von den experimentell ermittelten Kennwerten, Algorithmen zur automatischen Parameteranpassung an wechselnde Oberflächeneigenschaften erarbeitet und umgesetzt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird eine allgemeine Vorgehensweise zur Parameterbestimmung von optischen Konturfolgesystemen abgeleitet.

**Kapitel 6** befasst sich mit der Integration der Sensortechnik in eine fertigungsnahe Versuchsumgebung. Anhand eines industriellen Anwendungsbeispiels werden die Funktionsweise der entwickelten Algorithmen und die Qualität der applizierten Klebstoffraupen durch einen sensorgeführten Auftrag überprüft.

In **Kapitel 7** erfolgt die wirtschaftliche Bewertung der eingesetzten Prozesssensorik. Hierzu werden die Konzepte zum starren und sensorgeführten Klebstoffauftrag gegenübergestellt und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt.

Den Abschluss der vorliegenden Arbeit bilden die Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse und der Ausblick in **Kapitel 8**.

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

Basierend auf dem aktuellen Stand in der Klebtechnik werden die Grundlagen sowie die notwendigen Anforderungen und Randbedingungen zum automatisierten Klebstoffauftrag erläutert. Dazu werden zum einen die eingesetzten Klebstoffe und zum anderen die dafür erforderliche Anlagentechnik dargestellt. Darüber hinaus werden anhand von spezifischen Dosierfehlern und deren Ursachen die Möglichkeiten zur Erhöhung der Qualität von Klebverbindungen erläutert.

### 2.1 Grundlagen zur Klebtechnik

Neben der Einordnung innerhalb der DIN 8593 gehört das Kleben zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren. Als Zusatzwerkstoff muss bei Verklebungen ein Klebstoff eingesetzt werden. Darunter wird nach DIN 16920 ein nichtmetallischer Stoff verstanden, der die Fügepartner durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) verbinden kann.

Grundsätzlich erfolgt der Klebprozess in mehreren Schritten [ENDLICH 1995]. Der erste Schritt ist die Bevorratung des benötigten Klebstoffs und/oder der benötigten Einzelkomponenten. Zu Beginn der Verarbeitung werden bei zwei- oder mehrkomponentigen Klebstoffen die einzelnen Bestandteile gemischt. Im folgenden Schritt wird der Klebstoff zu der Auftragseinheit an die Fügestelle transportiert. Dem Misch- und Fördervorgang folgt der Auftrag des Klebstoffs auf einen oder mehrere Fügepartner, die danach zusammen gefügt werden. Der nächste Schritt in der Prozesskette ist die Fixierung der Fügepartner während der Aushärtungsphase des Klebstoffs. Im letzten Schritt kann eine Qualitätskontrolle der Klebverbindung durchgeführt werden.

Die notwendigen Maßnahmen zur Herstellung können darüber hinaus in drei Phasen, der Pre-, In- und Post-Prozess-Phase, untergliedert werden.

In der **Pre-Prozess-Phase** einer Klebverbindung müssen verschiedene planerische Entscheidungen getroffen werden [SCHULLER 1998]. Dazu gehören unter anderem verschiedene konstruktive Merkmale zur Erfüllung des Anforderungsprofils der Fügestelle, die Auswahl des Klebstoffsystems, die Bevorratung und die Bestimmung der prozesstechnischen Randbedingungen. Weiter muss überprüft werden, ob für die Herstellung der Verbindung eine Kombination mit anderen Fügeverfahren notwendig oder sinnvoll ist.

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

Die **In-Prozess-Phase** umfasst das Mischen und Fördern, die Dosierung und den Auftrag des Mediums, das Fügen und Fixieren der Bauteile und den Aushärtvorgang des Klebstoffs. Zusätzlich zu den in der Pre-Prozess-Phase vorgesehenen, vorbeugenden Qualitätssicherungsmaßnahmen können für die In-Prozess-Phase direkte und indirekte Maßnahmen zur sensorischen Prozessüberwachung und Qualitätssicherung getroffen werden.

Ziel der **Post-Prozess-Phase** ist es, die Qualität einer Fügeverbindung im Rahmen der vorgegebenen Qualitätsrichtlinien zu gewährleisten. Dazu werden zum einen zerstörende Prüfverfahren stichprobenhaft eingesetzt, um das statistische Festigkeitsverhalten der Verbindung zu überprüfen. Zum anderen können durch zerstörungsfreie Prüfverfahren Aussagen über etwaige Fehlstellen innerhalb der Klebung getroffen werden.

Zudem soll im Rahmen des gesamten Fertigungsprozesses die Qualitätssicherung und Qualitätsprüfung wirtschaftlichen Gesichtspunkten genügen.

### 2.1.1 Klebstoffe in der industriellen Anwendung

In der Industrie wird bereits eine sehr große Anzahl verschiedener Klebstoffe eingesetzt [HABENICHT 2001]. Die jährlich in Deutschland produzierten Klebstoffmengen weisen dabei eine kontinuierliche Steigerung auf (vgl. Abbildung 2-1 links).

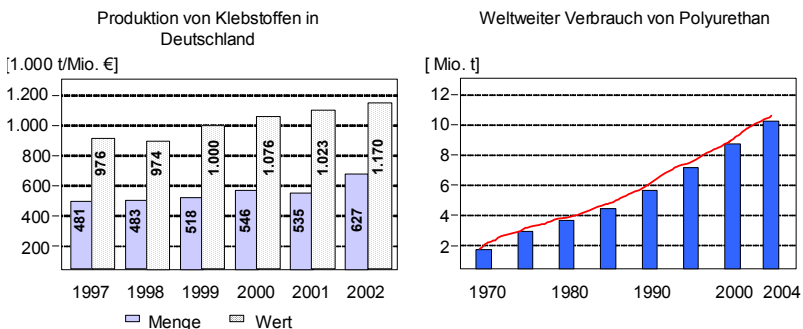


Abbildung 2-1: Übersicht über die Mengenentwicklung von Industrieklebstoffen [in Anlehnung an INDUSTRIEVERBAND KLEBSTOFFE 2003]



Die Klebstoffe können grundsätzlich nach ihrer chemischen Basis und nach dem Abbindemechanismus eingeteilt werden [HABENICHT 1997]. Eine Klassifizierung nach dem Abbindemechanismus ist für die anwendungsorientierte Betrachtung am aussagekräftigsten. Diese wird in

- chemisch reagierende Klebstoffe,
- physikalisch abbindende Klebstoffe sowie
- reaktive Schmelzklebstoffe

unterteilt.

Chemisch reagierende Klebstoffe haben aufgrund der hohen erreichbaren Festigkeitswerte in der industriellen Fertigung die größte Bedeutung. Diese können weiter nach strukturellen und semistrukturellen Klebstoffen unterschieden werden [SCHULENBURG 2003].

Die strukturellen Klebstoffe ermöglichen hochfeste Verbindungen und werden in dünnen Schichten auf die Bauteile aufgetragen. In verquetschtem Zustand liegt die Klebstoffdicke in der Regel unter einem Millimeter. Eine der wichtigsten Gruppen stellen hier die warmaushärtenden Epoxidharze dar. Diese werden beispielsweise in der Automobilindustrie hauptsächlich im Rohbau verarbeitet. Die Aushärtung der strukturellen Klebstoffe erfolgt zumeist innerhalb der KTL-Öfen in der Lackiererei bei definierter Temperaturführung.

Semistrukturelle Klebungen weisen einen großen elastischen Bereich bei ausreichenden Festigkeitswerten auf. Der Medienauftrag wird in Raupenform durchgeführt. Die Schichtdicke der Klebefuge kann mehrere Millimeter betragen. Dadurch können sowohl die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedenster Werkstoffpaarungen als auch allgemeine Fertigungstoleranzen kompensiert werden. Aufgrund der genannten Möglichkeiten zum Toleranzausgleich werden diese Klebstoffe insbesondere in der Endmontage eingesetzt, die durch eine zunehmende Modulbauweise mit fertig konfektionierten und zum Teil empfindlichen Baugruppen gekennzeichnet ist. Als Beispiele können das Verkleben von Windschutzscheiben, Dachmodulen und weiterer Systemkomponenten im Automobil- und Nutzfahrzeugbau angeführt werden.

Semistrukturelle Klebungen, mit ihren bedeutsamsten Vertretern den Polyurethanklebstoffen, haben deshalb in den letzten Jahren eine deutliche Absatzsteigerung (vgl. Abbildung 2-1 rechts) erfahren. Diese Klebstoffsysteme liegen in

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

---

der Regel als vorvernetzte Prepolymere vor. Die Aushärtung erfolgt nach dem Auftrag in der Klebfuge ausschließlich durch Feuchtigkeit Zutritt. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Luftfeuchtigkeit von mindestens 40% relativer Feuchte im Prozessumfeld erforderlich [SIKA 2000]. Die Durchhärtegeschwindigkeit beträgt zwischen drei und vier Millimetern pro 24 Stunden.

Diese langen Aushärtezeiten sind besonders im Bereich der Endmontage problematisch. Speziell durch die geringe Anfangsfestigkeit ergeben sich technische Schwierigkeiten bei den weiteren Montageschritten. Mechanische Fixierungen sind zum einen kostenaufwändig und schränken zum anderen die Zugänglichkeit für nachfolgende Arbeiten ein. Deshalb werden für einen schnellen und prozesssicheren Montageablauf den Polyurethanklebstoffen bestimmte Hilfsstoffe beigemischt. Handelsübliche Lösungen stellen dabei die Quickfix- und Boostersysteme dar [BORN 2003].

Bei den Quickfixsystemen wird über eine Temperaturerhöhung und einem anschließenden Abkühlprozess eine Teilkristallisation von Zusatzpolymeren erreicht. Dadurch wird eine erhebliche Steigerung der Viskosität bei gleicher Aushärtezeit des Klebstoffs erzielt. In gleichem Maß steigt auch der Widerstand gegenüber Fließprozessen, die durch Bauteilverschiebungen induziert werden können. Über die in der Regel großflächige Verteilung des Klebstoffs kann somit die spätere Bauteilposition fixiert werden. Eine ausreichende Montagefestigkeit wird daher gewährleistet. Nachteilig wirkt sich insbesondere die Vergrößerung der Fügeprozesskräfte aus, die auf ein Vielfaches des eigentlichen Verquetschungswerts ansteigen können [BORN 2003].

Den Boostersystemen wird über einen externen Zugang im Dosiersystem eine Komponente zum schnelleren Aushärten zugemischt. Mit einer zusätzlichen Temperaturerhöhung im Dosierkopf wird die Aushärtung deutlich beschleunigt. Bereits nach einer Stunde können bis zu 50% der Endfestigkeit erlangt werden. Die Anfangsfestigkeit kann damit jedoch nicht erhöht werden. Zudem sind der Aufbau und die Wartung der speziellen Anlagentechnik zur Boosterbeimischung sehr aufwändig [BORN 2003].

In den letzten Jahren wurden deshalb verstärkt Untersuchungen zur Kombination dieser Systeme durchgeführt. Erste derartige Klebstoffsysteme werden bereits industriell eingesetzt [BORN 2003]. Eine qualitativ hochwertige Verarbeitung dieser komplexen Klebstoffsysteme ist jedoch nur innerhalb eines optimal definierten Prozessfensters möglich.

### 2.1.2 Anlagenkomponenten zur automatisierten Klebstoffverarbeitung

Klebstoffe können unabhängig von der weiteren Verarbeitung manuell, in teilautomatisierten Vorrichtungen oder vollautomatisch auf das Werkstück aufgetragen werden [ENDLICH 1995, KUROSCH 2003]. Ein automatisierter Klebstoffauftrag bietet gegenüber einer manuellen beziehungsweise teilautomatischen Applikation folgende Vorteile [LAMMEL 1997, GARTNER 2001]:

- Höhere Reproduzierbarkeit der Raupenform und deren Positionierung auf dem Bauteil
- Möglichkeit exakter Parametervorgaben für den Applikationsvorgang
- Möglichkeit der kontinuierlichen Parameterüberwachung und deren Aufzeichnung
- Höhere Auftragsgeschwindigkeit
- Höhere Produktivität

Durch die Automatisierung des Dosier- und Auftragsprozesses in der industriellen Serienproduktion wird deshalb versucht, die hohen Anforderungen der Klebtechnik prozesssicher umzusetzen. Die dadurch notwendigen Investitionen und zusätzlichen Kosten sollen bei großer Prozessqualität durch niedrigere Taktzeiten amortisiert werden.

Automatisierte Auftragsstationen setzen sich im Allgemeinen aus einem Handhabungsgerät sowie dessen Steuerung, einer Bereitstellungs- und Förderanlage, dem Dosiersystem und verschiedenen Systemen für die Prozess- und Parameterüberwachung zusammen [PETRY 1992, WERN 1993, KERN 1995]. Hinzu kommen medienspezifische Komponenten wie Mischer, Auslassvorrichtungen, Heizelemente, Heizleitungen sowie Reinigungs- und Oberflächenvorbehandlungstationen (vgl. Abbildung 2-2).

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

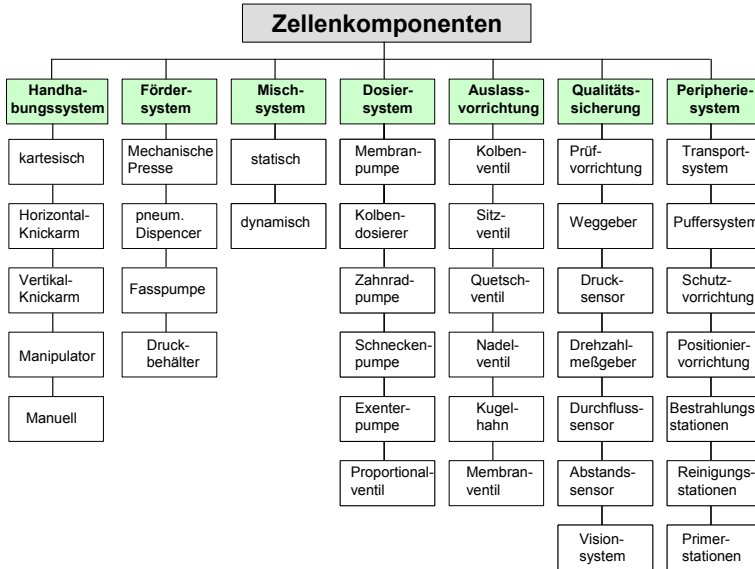


Abbildung 2-2: Auswahl an Komponenten zum Aufbau einer automatisierten Auftragsstation [NACH SCHULLER 1998]

Da derzeit keine verbindlichen Richtlinien und Anhaltswerte zur Anlagengestaltung bekannt sind [SCHULLER 1998, GARTNER 2001], muss die Auswahl des Klebstoffsystems und der dazugehörigen anlagentechnischen Ausstattung auf der Basis von Herstellerangaben und zahlreichen anwendungsspezifischen Versuchen erfolgen.

### 2.2 Anforderungen und Randbedingungen beim Klebstoffauftrag

Bezüglich des automatisierten Klebstoffauftrags werden hohe Ansprüche sowohl an die Wirtschaftlichkeit des Auftragsprozesses als auch an die erreichbare Qualität der Klebverbindung gestellt. Daher werden in diesem Abschnitt die Anforderungen an die Genauigkeit der aufgetragenen Klebstoffraupen sowie die Randbedingungen in Hinblick auf deren physikalischen Medieneigenschaften dargestellt. Daraus werden anschließend die grundlegenden Anforderungen an die Handhabungseinrichtung abgeleitet.

### 2.2.1 Form- und Lagegenauigkeiten von Klebstoffraupen

Form und Lage der Klebstoffraupe haben einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionserfüllung einer Klebverbindung. Für eine qualitativ hochwertige Klebung müssen folgende Mindestanforderungen an die Klebstoffraupe gestellt werden:

- **Formgenauigkeit der Raupe:** Darunter wird das Verhältnis von Raupenhöhe zu Raupenbreite unmittelbar nach dem Auftrag des Klebstoffs verstanden. Die Formgenauigkeit beeinflusst die im Rahmen der Montage notwendige Fügeprozesskraft und stattfindende Verformung der Raupe. Bei unzulässigen Formabweichungen der Raupe kann eine ausreichende Klebung und Dichtung nicht sichergestellt werden.
- **Lagegenauigkeit der Raupe:** Darunter wird die relative Lage der aufgetragenen Klebstoffraupe zum Bauteil verstanden. Bei unzulässigen Abweichungen der Raupenlage auf einem Flanschabschnitt kann eine ausreichende Klebung und Dichtung nicht gewährleistet werden.

Trotz der hohen Bedeutung für die Gestaltung und Positionierung von Klebstoffraupen gibt es dafür keine einschlägigen Normen oder allgemein gültige Richtlinien. Bei dem aus fertigungstechnischer Sicht vergleichbaren Auftrag von hochviskosen, elastomeren Dichtungen werden beispielsweise ähnliche Anforderungen wie bei O-Ringen im Hinblick auf Form- und Maßgenauigkeit gestellt, um beim späteren Einsatz die vorgesehene Dichtigkeit zu gewährleisten [GARTNER 2001, S. 25, DIN 3771A, DIN 3771B]. Für die Klebtechnik ist der Einsatz der in der Dichtungstechnik verwendeten Rundraupe aufgrund der deutlich niedrigeren Viskosität der Auftragsmedien jedoch unüblich. Hier werden vorwiegend Dreiecksraupen für semistrukturale Klebungen appliziert, da diese eine stabilere Grundform darstellen [BÄR U. A. 2000]. Bei dieser Art des Auftrags werden hohe Anforderungen an die Orientierung der Düsenlage gestellt. Abweichungen von der senkrechten Ausrichtung der Auftragsdüse zur Bauteiloberfläche führen zu Über- bzw. Unterdosierung des Klebstoffs (vgl. Abbildung 2-3).

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

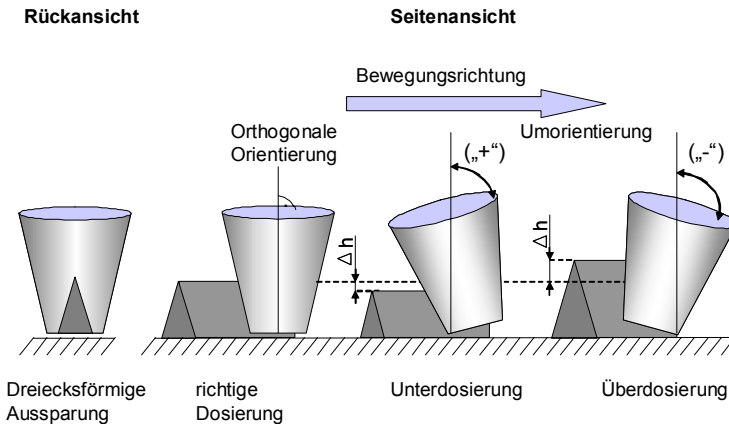


Abbildung 2-3: Orientierung der Auftragsdüse und ihre Auswirkungen auf die Form der Klebstoffraupe

Die Dimensionierung der Dreiecksraupe hängt von der geforderten Schichtdicke in der Klebfuge ab (vgl. Abbildung 2-4). In der Regel sollte dabei die Raupenhöhe doppelt so hoch wie die spätere Schichtdicke gewählt werden [SIKA 2000]. Im Gegensatz zur Dichtungstechnik ist die Raupenlage nicht durch eine feste Nut- und Flanschkonstruktion vorgeben [SCHULLER 1998, S. 79], sondern kann je nach Anwendungsfall frei definiert werden. Als Richtwert wird bei semistrukturellen Klebungen eine Genauigkeit von  $\pm 1$  mm vorgeben.

## 2.2 Anforderungen und Randbedingungen beim Klebstoffauftrag

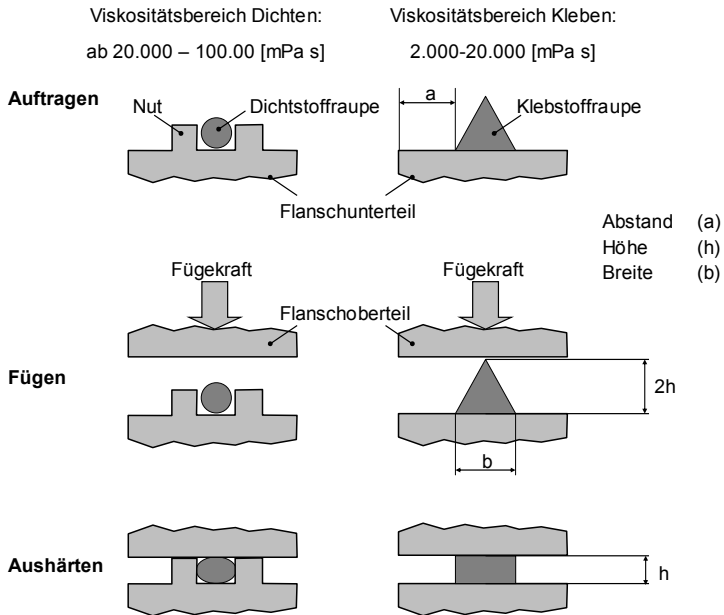


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung vorgeformter Raupenquerschnitte

### 2.2.2 Rheologische Randbedingungen

Das erzielbare Auftragsergebnis ist insbesondere von den rheologischen Eigenschaften des eingesetzten Mediums abhängig [BRUNS 2002]. Damit wird die geometrische Form der Klebstoffraupe und deren Formstabilität hinsichtlich weiterer Bearbeitungsschritte bestimmt. Die Ausprägung der Raupengeometrie ist die letzte visuell erfassbare Größe vor dem Verquetschen. Weiterhin werden durch die rheologischen Eigenschaften des Klebstoffs die Fügeprozesskräfte und das Fließverhalten während des Verpressens der Bauteile festgelegt.

Die für den Durchfluss und somit für das aufgetragene Klebstoffvolumen wichtigste Größe ist die Viskosität des aufzutragenden Mediums. Im einfachsten Fall besteht bei den so genannten newtonschen Flüssigkeiten ein linearer Zusammenhang zwischen Verformungsgeschwindigkeit und Schubspannung. In der Regel handelt es sich bei höher viskosen Kleb- und Dichtstoffen jedoch nicht um newtonsche Flüssigkeiten. Diese Kleb- und Dichtstoffe weisen zumeist ein strukturviskoses Verhalten auf. Seltener können rheopexe oder dilatante Eigenschaften

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

---

beobachtet werden [DILTHEY U. A. 1998, DILGER & HASENBERG 2000]. Bei strukturviskosen Medien nimmt mit steigender Schergeschwindigkeit die Viskosität ab, bei dilatanten Medien nimmt diese zu. Bei einer druckgesteuerten Mediendosierung kann in Abhängigkeit des aufgebrachtten Dosierdrucks der geförderte Volumenstrom berechnet werden [BEITZ & GROTE 1997]. Dabei können Änderungen der Stoffeigenschaften zum Auftreten von Dosierfehlern führen. Gegenüber der druckgesteuerten Dosierung ist eine volumengesteuerte Mediendosierung beispielsweise mit Zahnrad- oder Exzentrerschneckenpumpen vorteilhafter, da die Förderrate unabhängig von den rheologischen Materialeigenschaften ist [GARTNER 2001].

Neben diesen theoretischen rheologischen Materialgesetzen treten bei realen Kleb- und Dichtstoffen oftmals Mischformen der oben geschilderten Materialcharakteristika auf. Zusätzlich wird die rheologische Beschreibung durch den starken Einfluss der Temperatur erschwert, welche bei Erhöhung eine sinkende Viskosität der jeweiligen Medien bewirkt. Daher müssen das dynamische Verhalten des Handhabungsgeräts und die Charakteristik der Dosiereinrichtung unter Berücksichtigung der rheologischen und chemischen Eigenschaften der eingesetzten Medien abgestimmt werden [BRANDENBURG 1996, SCHULLER 1998]. Eine derartige Abstimmung wird dabei auf der Grundlage der Erfahrung des jeweiligen Anwenders und mit Hilfe von Auftragsversuchen durchgeführt. Dadurch kann ein so genannter „stabiler Betriebspunkt“ der Auftragsanlage ermittelt werden, an dem Klebstoffraupen mit hinreichender Qualität auf das Bauteil aufgetragen werden. Automatisierungsgeräte im fertigungstechnischen Umfeld verlassen jedoch den unter idealen Bedingungen ermittelten „stabilen Betriebspunkt“ sobald Störgrößen auf den Prozess wirken.

### 2.2.3 Anforderungen an die Handhabungseinrichtungen

Für die Gewährleistung eines gleichmäßigen Klebstoffauftragsbilds kommt der automatisierten Handhabungseinrichtung eine hohe Bedeutung zu. Basierend auf den Qualitätsanforderungen bezüglich der Form- und Lagegenauigkeit der Klebstoffraupe können für die Handhabungsgeräte folgende Anforderungen abgeleitet werden [SCHULLER 1998, GARTNER 2001]:

- Hohe Positioniergenauigkeit und Bahntreue
- Ausreichender Arbeitsraum mit frei programmierbaren Achsen
- Ausreichende Tragkraft



## 2.2 Anforderungen und Randbedingungen beim Klebstoffauftrag

- Hohe Eigensteifigkeit bei geringen Massen sowie Schwingungsfreiheit
- Möglichst dynamisches, aber dennoch gleichmäßiges Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten

Neben diesen Anforderungen an das kinematische Verhalten des Handhabungsgeräts werden umfangreiche Ansprüche an die Funktionalität der eingebundenen Steuerung gestellt. Die Hauptaufgabe von Robotersteuerungen besteht darin, die Achsen der Roboterkinematik zu führen. Dies geschieht in Abhängigkeit von den Bewegungsbefehlen des Roboterprogramms. Die Steuerungen sollen beispielsweise für einen effizienten Arbeitsablauf einige grundlegende Softwarefunktionen und Schnittstellen beinhalten:

- Vorgabe von dynamischen Maximalwerten wie zum Beispiel Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und Orientierungsgeschwindigkeit innerhalb des Bearbeitungsprogramms
- Steuerungstechnische Ausgabe von bahn- und zeitspezifizierten Schaltfunktionen zur Ansteuerung von Peripheriegeräten
- Bereitstellung von standardisierten Schnittstellen für die Offline-Programmierung und Sensordatenverarbeitung sowie analoge und digitale Anwenderschnittstellen zur Prozesssteuerung
- Steuerungstechnische Verarbeitung von eingehenden Sensorsignalen
- Positionsausgabe in Echtzeit sowohl zeit- als auch ortssynchron

Dabei erfüllen moderne Handhabungsgeräte und deren Steuerungen die oben genannten Anforderungen zum großen Teil. Allerdings müssen aufgrund von schnittstellentechnischen Randbedingungen innerhalb der verschiedenen Steuerungen, Einschränkungen hinsichtlich der Offenheit für eine standardisierte Sensorintegration hingenommen werden. Hierbei kommt der Frequenz des Interpolationstakts eine hohe Bedeutung zu. Der Interpolationstakt ist der zeitliche Abstand innerhalb dessen ein Abgleich der aktuellen Ist-Position des Handhabungsgeräts oder externer Sensorsignale mit der vorgegebenen Soll-Position erfolgt.

Eine experimentelle Abstimmung zwischen Dosier-, Verfah- und Bauteilparametern ist technisch aufwändig, da durch iterative Auftragsversuche und Veränderung der Parameter versucht wird, ein möglichst gleichmäßiges Auftragsbild herzustellen. Bei Veränderung der Umgebungsbedingungen müssen die Anlagenparameter in der Regel nachjustiert werden.

### 2.3 Dosierfehler und Fehlerursachen

Trotz der Einhaltung der beschriebenen Anforderungen kommt es zu Qualitätsproblemen beim automatisierten Klebstoffauftrag. Fehlklebungen, Undichtigkeiten sowie Klebstoffaustritt sind im Wesentlichen auf eine fehlerhafte Dosierung des Klebstoffs zurückzuführen. Abweichungen der angestrebten Raupenform und ihre Lage relativ zu einer vorgegebenen Bezugskante werden als „Dosierfehler“ bezeichnet [BRANDENBURG 1996, SCHULLER 1998, GARTNER 2001]. Bei komplexen Bauteilgeometrien treten Dosierfehler in der Regel am häufigsten auf.

#### 2.3.1 Dosierfehler

Eine **falsche Form** der Klebstoffraupe kann durch das Unterschreiten einer geforderten Mindesthöhe oder durch die so genannte Sockelbildung - infolge eines zu großen Düsenabstands von der Werkstückoberfläche - hervorgerufen werden.

Als Hauptursachen für die Nichteinhaltung der Raupenhöhe können zum einen das strukturviskose Fließverhalten des Klebstoffs und zum anderen der Klebstoffmangel durch Unterdosierung angeführt werden (vgl. Abbildung 2-5). Als Folge davon kann es zu einer unvollständigen Spaltfüllung und zur Entstehung von Leckagekanälen kommen, die zu Festigkeitsverlusten bzw. Undichtigkeiten führen.

Durch eine Sockelbildung wird in der Regel zuviel Klebstoff aufgetragen. Diese Überdosierung erhöht einerseits die Aushärtezeit und verursacht andererseits das Ausquellen von Klebstoff. Neben den Verlustmengen an Klebstoff sind vor allem die Verunreinigungen an der Bauteilinnen- und -außenseite kritisch (vgl. Abbildung 2-5). Da diese Verschmutzungen in der Endmontage an bereits fertig lackierten Bauteiloberflächen vorliegen, müssen diese Fehler sofort und sehr sorgfältig ausgebessert werden, was erhebliche Folgekosten bedingt.

Eine **falsche Lage** der Klebstoffraupe ist in der Regel auf eine fehlerhafte Abstimmung der Verfahrensparameter des Handhabungsgeräts in Bezug zur Bauteiloberfläche zurückzuführen. Dabei kann es wiederum zum Klebstoffaustritt mit den schon beschriebenen Folgen kommen. Bei zu großen Abweichungen von der Solllage ist zudem nicht mehr sichergestellt, dass zwischen den Fügeteilen genügend Klebstoff zum Verpressen vorhanden ist (vgl. Abbildung 2-5).

## 2.3 Dosierfehler und Fehlerursachen

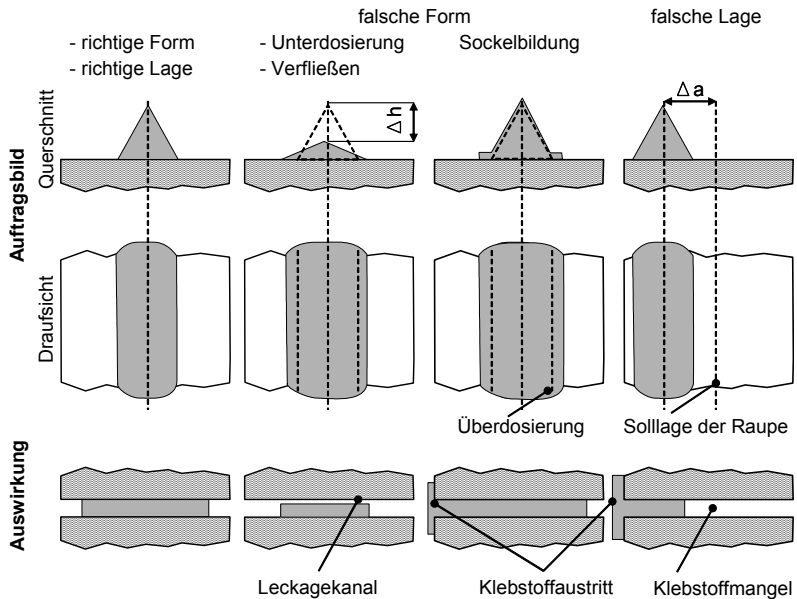
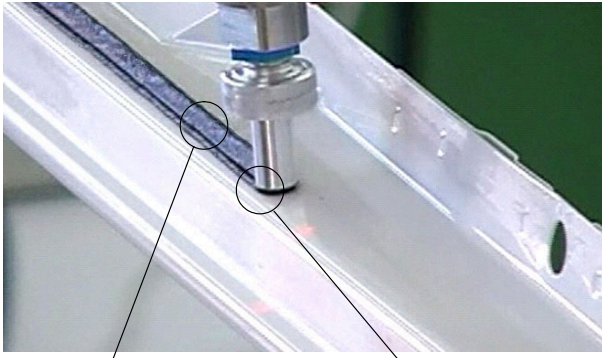


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung ausgewählter Dosierfehler

Die singular beschriebenen Fehler treten häufig auch in kombinierter Form auf, was die Funktionsfähigkeit der Klebung weiter verschlechtert (vgl. Abbildung 2-6). Im Folgenden werden die möglichen Ursachen, die zu Form- und Lagefehlern führen können, näher analysiert.



**Formabweichung:**  
**Klebstoffraupe mit**  
**Sockel**

**Lageabweichung:**  
**Klebstoffraupe mit zu geringem**  
**Abstand zur Bauteilkante**

*Abbildung 2-6: Auftragsergebnis mit charakteristischen Dosierfehlern*

### 2.3.2 Fehlerursachen

Innerhalb einer automatisierten klebtechnischen Fertigungszelle können eine Reihe von Abweichungen zwischen der zu bearbeitenden Kontur und der programmierten Werkzeugbahn festgestellt werden. Dabei kann zwischen roboter- und werkzeugabhängigen, werkstückbedingten und programmiertechnischen Ursachen unterschieden werden. In der Regel besteht zwischen diesen Ursachen kein kausaler Zusammenhang, so dass im schlimmsten Fall von einer Aufsummierung aller Abweichungen ausgegangen werden muss.

#### 2.3.2.1 Roboter- und werkzeugabhängige Ursachen

Gemäß der VDI-RICHTLINIE 2861A ist unter der Genauigkeit eines Industrieroboters im Wesentlichen die Wiederholgenauigkeit beim exakten Positionieren und/oder Orientieren bzw. beim Nachfahren einer programmierten Bewegungsbahn zu verstehen. Diese Genauigkeitskenngrößen sind neben der VDI-RICHTLINIE 2861B in weiteren nationalen und internationalen Richtlinien, wie der ISO 9283 oder der ANSI/RIA, definiert. Das am Handhabungsgerät angebundene Bearbeitungswerkzeug bedingt darüber hinaus weitere Fehlermöglichkeiten. Da sich diese Ursachen unmittelbar auf die Fertigungsqualität auswirken, werden diese genauer erläutert.

### **Wiederholgenauigkeit**

Die Wiederholgenauigkeit gibt an, mit welcher maximalen Abweichung ein numerisch im Raum vorgegebener Punkt - bei stets gleicher Anfahrtsrichtung und Geschwindigkeit - von dem Industrieroboter angefahren werden kann. Demnach entspricht die Wiederholgenauigkeit der Streuung der Ist-Position gegenüber einer anzufahrenden Soll-Position. Neben der kartesischen Positionsabweichung werden auch die Orientierungsabweichungen zwischen der programmierten Soll-Position und der erreichten Ist-Position mit einbezogen [VDI-RICHTLINIE 2861A].

Systematische Abweichungen innerhalb der kinematischen Kette wirken sich in vollem Maße auf die Wiederholgenauigkeit aus. Eine begrenzte fertigungstechnische Genauigkeit führt zu Abweichungen in den Roboterarmlängen, Lage- und Orientierungsfehlern der Achsmittelpunkte und zu Nulllagefehlern der Achsen. Statische und dynamische Durchbiegungen der Achsen, infolge von Störkräften, wie beispielsweise Reaktion- und Gravitationskräfte, resultieren in Verformungen des kinematischen Aufbaus. Eine Verformung der Achskörper als Folge von Temperaturänderungen ist insbesondere bei hochpräzisen Anwendungen von Bedeutung [HEISEL & REINHART 1995, GRÄSER 1999]. Durch Berechnung der systematischen Fehlereinflüsse, beispielsweise der unterschiedlichen Längenausdehnungen aufgrund von Temperatureinwirkungen [BONGART 2003], können Abweichungen teilweise kompensiert werden. Der Aufwand zur Umsetzung derartiger Verfahren ist jedoch als relativ hoch einzustufen.

Zusätzlich zu den Kinematikfehlern treten mechanische Fehler im Antriebsstrang auf. Als Beispiele hierfür sind Achswinkelfehler durch Getriebeelastizitäten, ein fehlerhaftes Winkelübertragungsverhalten des Getriebes und Hystereseeinflüsse durch Getriebeleose zu nennen [SEIDEL 1992, S. 32].

### **Bahngenauigkeit**

Die Bahngenauigkeit gibt die Größe der Abweichungen an, die bei Bewegungen entlang von Raumkurven entstehen [VDI-RICHTLINIE 2861A]. Bei hohen Bahngeschwindigkeiten, wie sie beispielsweise beim Klebstoffauftrag benötigt werden, führen vor allem die dynamischen Eigenschaften der Achsregelkreise zu merklichen Bahnabweichungen. Diese verstärken sich mit wachsender Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters [BONGART 2003]. Neben diesen Bahnabweichungen kommt es infolge von großen Richtungsänderungen innerhalb der Bearbeitungsbahn ebenfalls zu Bahnungenauigkeiten [REEK 2000, S. 116-118]. Um diese

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

zu minimieren, muss die aktuelle Bearbeitungsgeschwindigkeit herabgesetzt werden (vgl. Abbildung 2-7).

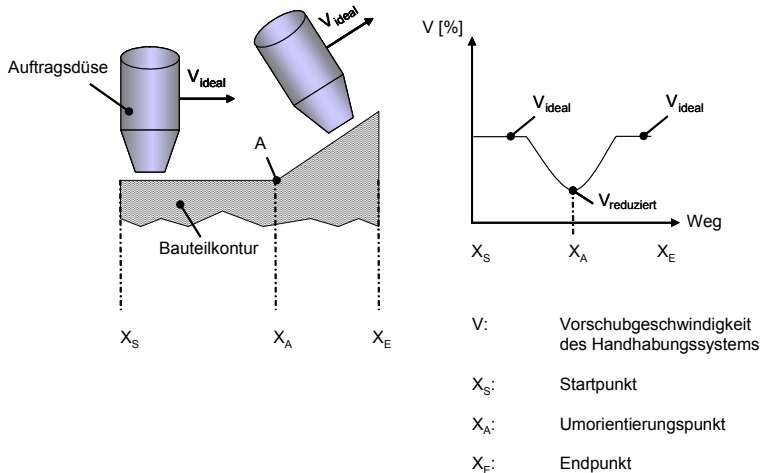


Abbildung 2-7: Verlauf der Vorschubgeschwindigkeit bei nicht ebenem Bahnverlauf

### Werkzeugbedingte Ursachen

Die verschiedenen Roboterkinematiken dienen in erster Linie dazu, Werkzeuge, die an der Roboterhand angebracht sind, im Arbeitsraum definiert zu bewegen. Der Eingriffs- oder Startpunkt des Werkzeugs wird dabei als so genannter Werkzeugbezugspunkt oder Tool Center Point (TCP) definiert. Dies kann beispielsweise der Auftragspunkt einer Klebstoffauftragsdüse oder der Greifermittelpunkt sein. Die programmierte Position und Orientierung sowie die programmierte Bahngeschwindigkeit werden grundsätzlich auf den TCP bezogen. Deshalb ist die exakte Vermessung des TCPs vor allem bei der Umorientierung des Werkzeugs bei gekrümmten Bahnen notwendig. Wurde der TCP nicht genau vermessen, so wird das Werkzeug nicht in Bezug auf den Eingriffspunkt umorientiert, was sofort zu einer großen Abweichung in der vorgesehenen Werkzeuglage führt [SCHMID 1990].

Weitere Fehler ergeben sich bei der steuerungstechnische Anbindung des Werkzeugs an das Handhabungsgerät. So kann es beispielsweise bei der Kopplung

einer Robotersteuerung mit einer Dosiereinheit zu zeitlichen Verzögerungen zwischen den veränderten Betriebszuständen des Handhabungsgeräts und der Ansteuerung der Dosiereinheit kommen (vgl. Abbildung 2-8).

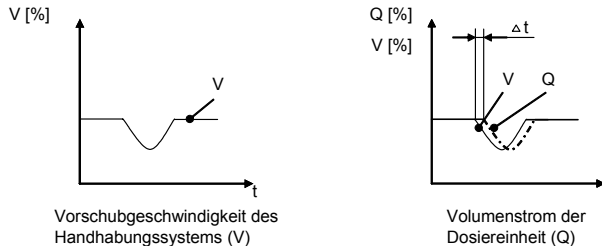


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung des Phasenversatzes zwischen Geschwindigkeitsänderung und gefördertem Volumenstrom [nach GARTNER 2001]

Die Steuerung des Handlingsystems erzeugt als Führungsgröße für die Dosiersteuerung ein Analogsignal, welches der Geschwindigkeit im TCP proportional ist. Die Steuerung der Dosieranlage wird daher als so genanntes Folgesystem ausgelegt. Das von der Handhabungseinheit vorgegebene Signal wird dabei als Eingangsgröße definiert. Die Anpassung an die wechselnden Vorgaben erfolgt im Vergleich mit zeitlich langsam wirkenden Störgrößen, wie zum Beispiel die Änderung der Raumtemperatur, mit höchster Priorität. Je nach Anlagenkonzeption ergibt sich ein bestimmtes Trägheitsverhalten hinsichtlich der Ansprechzeit zwischen Geschwindigkeitsänderung und dosiertem Volumenstrom.

Dieses Zeitverhalten erschwert zum einen die Regelungseinstellung der Dosiersteuerung und zum anderen die Synchronisation der beiden Teilsysteme Dosierung und Roboter. Dies führt sowohl zu Abweichungen der Form als auch der Lage der aufzutragenden Klebstoffraupe [GARTNER 2001].

### 2.3.3.2 Werkstückbedingte Ursachen

Beim Ausführen eines Roboterprogramms wird davon ausgegangen, dass es keine Abweichung zwischen dem realen Werkstück und dem bei der Programmierung verwendeten Werkstück bzw. dem rechnerinternen vorliegenden Werkstückmodell bestehen. In der Praxis treten jedoch werkstückbedingte Fehlereinflüsse auf, die diese idealisierte Annahme widerlegen. Werkstückbedingte Feh-

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

---

Ursachen können auf das Werkstück selbst, aber auch auf die Werkstückzuführung zurückgeführt werden.

### Vorgeschaltete Fertigungsschritte

Bevor ein Werkstück innerhalb einer automatisierten Roboterzelle bearbeitet wird, hat es in der Regel eine Reihe vorgeschalteter Fertigungsschritte durchlaufen. Hierbei handelt es sich häufig um Umform-, Trenn- und Fügeprozesse. Diese Prozesse unterliegen allgemeinen serienfertigungstechnischen, stochastischen Abweichungen. Aber auch chargenabhängige Werkstoffeigenschaften, wie beispielsweise das Rückfederverhalten nach dem Umformen, führen zu Fertigungstoleranzen. Bei mehreren aufeinander folgenden Fertigungsschritten können sich die einzelnen Toleranzen aufaddieren und zu relevanten Werkstückabweichungen führen.

Gemäß Abbildung 2-9 unterscheidet man bei den werkstückbedingten Fehlereinflüssen grundsätzlich nach Maßabweichungen, Lageabweichungen und Formabweichungen [ZHAO 1990, SEIDEL 1992, REEK 2000]. Bei Maßabweichungen ist ein einzelnes Maß des Werkstücks fehlerhaft. Insbesondere bei großflächigen Bauteilen können durch die vorhergehenden Fertigungsschritte Maßungenauigkeiten von mehreren Millimetern auftreten.

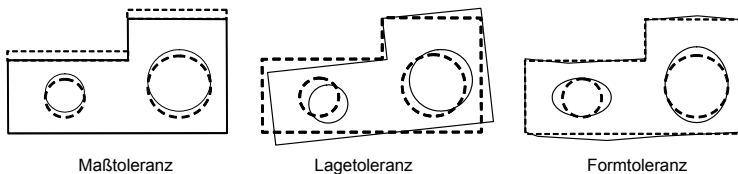


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung von Bauteilabweichungen [nach WENK 2002]

Eine für das gesamte Werkstück erstellte Bearbeitungsbahn lässt sich daher nicht mit der programmierten Bahn zur Deckung bringen. Bei Lageabweichungen ist die gesamte Kontur des zu bearbeiteten Kontursegments durch eine Translation oder Rotation im Raum verschoben. Dabei können sich Lageabweichungen auf das gesamte Werkstück oder nur auf Teilsegmente beziehen. Die programmierte Bearbeitungsbahn kann durch geeignete Verschiebung wieder mit der Werkstückkontur zur Deckung gebracht werden [SEIDEL 1992]. Dies kann beispielsweise steuerungsintern durch die Anwendung von Transformationsoperationen



auf die programmierten Raumpunkte erfolgen. Unter Formabweichungen werden Abweichungen verstanden, bei denen die ursprünglich vorgesehene Gestalt einer Kontur, zum Beispiel einer Geraden oder eines Kreissegments, nicht eingehalten wird.

### **Aufspannvorrichtung**

Abweichungen innerhalb von Spannvorrichtungen können entweder durch Spannfehler oder durch die Spannmittel selbst verursacht werden. Spannfehler entstehen durch mangelhafte Positionierung des Werkstücks vor dem Betätigen der Spannelemente sowie durch Verschmutzungen oder Beschädigungen zwischen Werkstück und Spannmittel [SEIDEL 1992]. Abweichungen der Spannmittel lassen sich in Form- und Lageabweichungen unterteilen. Formabweichungen werden durch zu große Nachgiebigkeit, Verzug der Spannmittel oder durch Temperatureinflüsse hervorgerufen [WENK 2002]. Lageabweichungen werden besonders durch Kollisionen verursacht. Bei der Repositionierung der Spannmittel können anschließend Lageabweichungen auftreten.

### **2.3.2.3 Programmierfehler**

Im produktionstechnischen Umfeld werden für die Programmierung von Industrierobotern hauptsächlich zwei Verfahren eingesetzt. Dies sind die direkte Online-Programmierung - das so genannte Teach-In-Verfahren - und die indirekte Offline-Programmierung [BACKES 1997]. Hybride oder kombinierte Verfahren werden aufgrund ihrer geringen Verbreitung im industriellen Einsatz nicht näher betrachtet. Sämtliche Verfahren beinhalten spezifische Fehlereinflusspotenziale. Als Folge treten Programmierfehler auf, die bei der Programmausführung zu Bearbeitungsfehlern und damit zu Qualitätsverlusten führen.

### **Online-Programmierung**

Beim Teach-In-Verfahren wird der Roboter als Programmierhilfsmittel verwendet. Der Programmierer erzeugt die erforderlichen Bewegungsschritte des Roboters durch manuelles Verfahren der jeweiligen Achsen. Die aktuelle Position des Werkzeug Bezugspunkts – in der Regel die Werkzeugspitze – und die Orientierung des Werkzeugs werden direkt in das Roboterprogramm übernommen. Das Bewegungsprogramm des Roboters ergibt sich dann aus der seriellen Abarbeitung der geteachten Punkte durch die Steuerung. Darüber hinaus steht dem Programmierer ein syntaktischer Befehlsvorrat zur Verfügung, der neben Befehlen zur Bewegungsart, wie beispielsweise Punkt-zu-Punkt-, Linear- oder Zirkular-

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

---

bewegungen, und Bewegungsbeeinflussungen, wie zum Beispiel Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsvorgaben, auch Unterweisungen zum Aufbau einer Programmlogik bereithält.

Fehlereinflüsse bei der Teach-In-Programmierung ergeben sich dadurch, dass die erreichbaren Genauigkeiten bei der Handprogrammierung prinzipiell von der Erfahrung und dem „Augenmaß“ des Programmierers abhängen. Zudem bedingen terminliche Zwänge häufig eine ungenaue Programmierung [WENK 2002, S. 11]. Neben der Programmierung der anzufahrenden Position ist die Festlegung der Orientierung des Werkzeugs zum Werkstück von ebenso hoher Bedeutung. Vor allem bei Bearbeitungstechnologien, die die Zuführung von Zusatzwerkstoffen erfordern, wie beispielsweise das Auftragen einer gleichmäßigen Dreiecksraupe beim Kleben, wird dies deutlich. Während das Einhalten von Abständen durch Anlegen von Messnormalen relativ unproblematisch gestaltet werden kann, ist die Messung der Orientierungswinkel zu jedem geteachten Punkt sehr aufwändig.

### **Offline-Programmierung**

Die Offline-Programmierung als indirektes Verfahren findet nicht am realen Roboter, sondern auf einem Simulationsrechner statt. Die Programmiersprache des Offline-Systems besitzt dabei in der Regel die gleiche Syntax und Semantik wie die Robotersteuerung. Voraussetzung ist die exakte Abbildung der Roboterkinematik, des Werkzeugs, des Werkstücks und der Fertigungsumgebung innerhalb des Programmiersystems. Wie beim Teach-In-Verfahren kann auch hier die Programmierung benutzergeführt erfolgen. Dazu wird in der graphischen Bedienerschnittstelle der virtuelle Roboter zu den anzufahrenden Punkten bewegt.

Fehlereinflüsse ergeben sich durch die nicht vermeidbaren Abweichungen zwischen den rechnerinternen idealisierten Modellen und den störungsbehafteten realen Zellenkomponenten [BACKES 1997, BAUER 1998]. Die erreichbare Genauigkeit hängt von dem Aufwand ab, den man der Vermessung der Zellenkomponenten und deren anschließenden Abbildung in das Offline-Programmiersystem widmet. Ebenso erfordert jede Umbaumaßnahme eine Neuvermessung der betroffenen Komponenten. In Bezug auf die robotergestützte Werkstückbearbeitung ist die Abbildung der exakten geometrischen Beziehungen zwischen dem vom Roboter geführten Werkzeug und dem Werkstück in den Rechnermodellen von entscheidender Bedeutung. In den meisten Fällen müssen aus Genauigkeits-

gründen die offline erstellten Roboterprogramme noch manuell nachgeteacht werden [WENK 2002, S.12].

### 2.3.3 Bewertung der Fehlerursachen

Die oben beschriebenen Fehlerursachen haben einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Ausprägung der Form- und Lagefehler der aufgetragenen Klebstoffraupe. In Tabelle 2-1 werden die einzelnen Fehlerursachen in Hinblick auf die Relevanz ihrer Beeinflussung bewertet.

	Beeinflussung der Klebstoffraupe		
	Form		Lage
	Unterdosierung	Sockelbildung	
Wiederholgenauigkeit	○	○	◐
Bahngenauigkeit	○	○	◐
Werkzeugbedingte Ursachen	◐	◑	●
Vorgeschaltete Fertigungsprozesse	●	●	●
Aufspannvorrichtung	●	●	●
Online-Programmierung	◐	◑	◐
Offline-Programmierung	○	○	◐
Legende:	○: niedrig	◐: mittel	●: hoch

*Tabelle 2-1: Bewertung der Fehlerursachen*

Die bei semistrukturellen Klebungen vorgegebenen Genauigkeiten liegen im Allgemeinen bei  $\pm 1$  mm [SIKA 2000]. Die Wiederhol- und Bahngenauigkeiten von heutigen Industrierobotern sind in der Regel um den Faktor Zehn genauer

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

---

[KUKA 2002] und deshalb für die betrachteten klebtechnischen Anwendungen vollkommen ausreichend.

Im Rahmen der Online-Programmierung ergeben sich insbesondere bei komplexen Bauteilgeometrien Schwierigkeiten für eine exakte Werkzeugorientierung zur Bauteiloberfläche. Bei stark gekrümmten oder geknickten Bauteilabschnitten können Dosierfehler entstehen.

Eine unzureichende Abstimmung zwischen der Auftragsgeschwindigkeit des Handhabungsgeräts und der Förderleistung der Dosiereinrichtung als Bearbeitungswerkzeug führen häufig zu Dosierfehlern [GARTNER 2001, S. 46].

Die gesamten Bauteiltoleranzen der vorgeschalteten Fertigungsprozesse und die Abweichungen der Aufspanvorrichtung im Bereich der Endmontage können sich auf mehrere Millimeter addieren und stellen damit die Hauptursachen für Form- und Lagefehler dar [MOSANDL & GOLLING 2002]. Diese führen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Qualitätsproblemen in der Klebverbindung.

### 2.4 Qualitätssicherung

Für das Fertigungsverfahren Kleben gilt in gleicher Weise wie für andere Technologien, dass dessen Fertigungsqualität nicht erprüft werden kann, sondern mit entsprechenden Maßnahmen bereits in Konstruktion und Fertigung erzeugt werden muss [ELSNER 1999]. Ein wesentlicher Bestandteil der klebtechnischen Anlagengestaltung sind die prozessspezifischen Maßnahmen zur Sicherung der Qualität der Klebverbindung. Ziel einer optimalen und effektiven Qualitätssicherung unter Einhaltung wirtschaftlicher Randbedingungen ist daher die Beherrschung und sollwertnahe Führung möglichst vieler relevanter Parameter und Parameterkombinationen [SCHULLER 1998, S.63].

In Tabelle 2-2 sind mögliche qualitätssichernde Maßnahmen entsprechend ihrem Einsatzzeitpunkt und Wirkort dargestellt. Dabei kann nach präventiven, direkten und ergebnisorientierten Maßnahmen unterschieden werden. Die Einteilung ergibt sich analog zu den vorgestellten Phasen zur Herstellung von Klebverbindungen.

Qualitätssicherung (QS)		
präventive QS (Pre-Process)	direkte QS (In-Process)	ergebnisorientierte QS (Post-Process)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozessoptimierte Produktgestaltung</li> <li>• Bearbeitungsstrategien</li> <li>• Simulation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parameterüberwachung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualitätsprüfung</li> <li>• Zerstörende Prüfung</li> <li>• Zerstörungsfreie Prüfung</li> </ul>

*Tabelle 2-2: Ansätze für qualitätssichernde Maßnahmen (erweitert nach SCHULLER 1998)*

### Präventive Qualitätssicherung

Die präventive Qualitätssicherung beinhaltet Maßnahmen, welche die potenziellen systematischen Fehler senken beziehungsweise ausschließen sollen. Sie können schon in der Konzeptionsphase durch die konstruktive Gestaltung des Klebflansches oder im Rahmen von geeigneten Bearbeitungsstrategien getroffen werden. Hierzu zählt auch der Einsatz von prozessführenden Sensoren wie aktive Abstandssensoren oder Konturfolgesysteme [MOSANDL & SCHLICKENRIEDER 2003].

Simulationssysteme bieten ebenfalls die Möglichkeit, bereits im Fertigungsvorfeld sichere Prozesse und Abläufe zu entwickeln. Beispielsweise können mit Hilfe der kinematischen Simulation von Bewegungsabläufen Programmier- und Bedienungsfehler eingeschränkt und Kollisionen vermieden werden.

### Direkte Qualitätssicherung

Unter der direkten Qualitätssicherung werden Überwachungsmaßnahmen verstanden, die unter Ausnutzung maschineninterner oder sensorischer Messsignale Rückschlüsse auf den Prozess, dessen Ergebnis oder den Anlagenzustand erlauben [EIS 2003]. Dabei steht die Erfassung unmittelbarer Messgrößen wie zum Beispiel der Volumenstrom oder der Systemdruck im Vordergrund. Auch geometrische Abmessungen wie die Lage der Raupe am Klebflansch oder das Breiten-/Höhenverhältnis der Raupe können ermittelt werden.

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

---

Eine Überwachung von sämtlichen prozessrelevanten Parametern ist aus wirtschaftlichen und technologischen Erwägungen nicht sinnvoll. Vielmehr sollen anhand der gegebenen Abhängigkeiten einige Einflussgrößen erfasst und mit geeigneten Prozeduren Aussagen zur Ergebnisqualität abgeleitet werden [SCHULLER 1998, S. 65].

### Ergebnisorientierte Qualitätssicherung

Ergebnisorientierte Maßnahmen zur Qualitätssicherung sind am Ende des Fertigungsprozesses angesiedelt. Die Qualitätsprüfung ist rein produktorientiert und beinhaltet die Prüfung qualitätsrelevanter Produktmerkmale wie z.B. Geometrie, Oberfläche oder Aussehen [REINHART U. A. 1996, S. 99, BRABENDER 1999]. Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren ermöglichen Aussagen über die Qualität der Verbindung hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens sowie das Auftreten von Fehlstellen in der Klebung.

#### 2.4.1 Sensorik

Geeignete Sensorik kann sowohl zur präventiven als auch zur direkten Qualitätssicherung eingesetzt werden. Im Folgenden werden deshalb die zum Verständnis erforderlichen Definitionen und Grundlagen vorgestellt.

##### 2.4.1.1 Definitionen zum Begriff Sensor

Das Wort Sensor leitet sich von dem lateinischen Begriff „sensus“ ab und bezeichnet einen technischen Fühler mit der Aufgabe der Informationsbeschaffung [Elbel 1996]. Sensoren nehmen in der Automatisierungs- und Robotertechnik eine Schlüsselrolle zur Erschließung komplexer Bearbeitungsaufgaben ein. Sie dienen zur Ermittlung von Prozess- oder Zustandsdaten bzw. zur Erfassung physikalischer Eigenschaften von Objekten, mit oder an denen fertigungstechnische Operationen durchgeführt werden sollen. Im klassischen Sinn versteht man unter einem Sensor einen Wandler physikalischer Größen in elektrische Signale, welche in einer nachgeschalteten bzw. integrierten Einheit zu analogen oder digitalen Messwerten aufbereitet werden [LEVI & VAJTA 1987].

Komplexe Sensoren, wie zum Beispiel mehrdimensionale Kraft-Momentensensoren oder Bildwandler zur Konturverfolgung, verfügen über eine eigene Signalverarbeitungseinheit auf Mikrorechnerbasis. Für solche Kombinationen hat sich im technischen Sprachgebrauch der Industrierobotertechnik der Begriff Sensorsystem durchgesetzt [TRÄNKLER & OBERMEIER 1998]. Abweichend vom

rein messtechnischen Verständnis schließt dieser Begriff auch alle erforderlichen peripheren Komponenten, wie beispielsweise Beleuchtungseinheiten, mit ein. Werden mehrere Sensoren oder auch Sensorsysteme mit einer übergeordneten Einheit verknüpft, so spricht man von einem Multisensorsystem [HIRZINGER & DIETRICH 1986].

In der Robotertechnik kann im Allgemeinen zwischen roboterinternen und -externen Sensoren unterschieden werden.

### **Roboterinterne Sensoren**

Die seitens der Roboterhersteller eingebauten internen Sensoren erfassen hauptsächlich roboterspezifische Daten wie beispielsweise aktueller Motorstrom oder Überlastungskennzahlen, um den Roboterbetrieb grundsätzlich zu ermöglichen. Neben diesen maschinellen Kennwerten können mit den integrierten Sensoren zudem weitere Informationen ausgelesen bzw. aufgezeichnet werden [GARTNER 2001]. Beispielsweise können hier die Aufzeichnungen der Geschwindigkeit des Handhabungsgerätes und der Förderleistung als aufgenommener Spannungswert der Dosierpumpe durchgeführt werden. Bei der Auswertung der steuerungsinternen Signale werden die aktuelle Bahngeschwindigkeit der Auftragsdüse und die Höhe der zugeordneten analogen Ausgangsspannung, die zur Ansteuerung der Dosiereinheit verwendet wird, direkt aus der Steuerung ausgelesen.

Die Umrechnung der roboterspezifischen Positionskoordinaten beziehungsweise der Geschwindigkeitsinformationen in eine kartesische Koordinatenform wird dabei direkt von der Robotersteuerung durchgeführt. Eine Synchronisation der erfassten Geschwindigkeits- und Spannungsdaten ist nicht notwendig, da beide Werte gleichzeitig aus der Robotersteuerung ausgelesen werden.

Roboterinterne Sensoren werden der direkten Qualitätssicherung zugeordnet. Der größte Nachteil dieser Sensoren besteht darin, dass mögliche Störeinflüsse innerhalb der Bearbeitungszelle nicht erkannt werden können.

### **Roboterexterne Sensoren**

Im Vergleich zur Erfassung und Verarbeitung von steuerungsinternen Informationen ist die Messung und Aufbereitung externer Sensordaten wesentlich aufwändiger. Roboterexterne Sensoren nehmen Informationen über die Umgebung des Industrieroboters auf und wandeln diese in für die Robotersteuerung verarbeitbare Signale um. Bei der Ermittlung der Umgebungsparameter kann zwischen passiver und aktiver sensorischer Funktionsweise unterschieden werden.

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

---

- Passive Sensorik ermöglicht eine quantitative Aussage über die Prozessstabilität und zählt deshalb zur Prozessüberwachung. Beispiele für Messgrößen sind Prozesstemperatur, Materialdruck oder Mediendurchfluss. Prozessfehler können hiermit erfasst und entsprechende Nachbearbeitungsstrategien eingeleitet werden. [GARTNER 2001, S. 40].
- Aktive Sensorik verfügt über die zusätzliche Möglichkeit, mittels geeigneter Regelstrategien in den Prozess einzugreifen. Die Funktionen dieser Sensoren umfassen beispielsweise die Identifizierung und Lokalisierung von Objekten und eignen sich daher zur Prozessführung. Durch Vermeidung von Prozessfehlern im Rahmen einer präventiven Qualitätssicherung kann die Prozessqualität innerhalb eines tolerierbaren Bereichs gehalten werden [REINHART U. A. 1996].

### 2.4.1.2 Verarbeitung von Sensordaten

Die aus der Prozessüberwachung gewonnenen Daten beziehen sich in der Regel auf die Darstellung des aktuellen Ist-Zustands von Anlagenkomponenten [SCHULLER 1998, S. 107]. Der Ist-Zustand kann mit einer vorgegebenen Ausgangsgröße verglichen und daraus gegebenenfalls geeignete Regelungsmaßnahmen abgeleitet werden. Beispielsweise können so Druck- oder Temperaturunterschiede bei der Medienzuführung ausgeglichen werden. Die Verarbeitung der Prozessdaten erfolgt ausschließlich in geschlossenen Regelkreisen innerhalb der zu überwachenden Systemkomponenten [GRÜNEKLEE 2000, S. 94].

Insbesondere bei der präventiven Qualitätssicherung ist die steuerungstechnische Verarbeitung der Sensormesswerte von großer Bedeutung. Generell können zwei unterschiedliche Bearbeitungsweisen unterschieden werden. Bei der ersten Bearbeitungsart, der Offline-Verarbeitung, werden die Sensordaten **vor** der Ausführung einer Bearbeitungsaufgabe verarbeitet. Im Gegensatz dazu werden die Sensordaten bei der zweiten Bearbeitungsart, der Online-Verarbeitung, **während** der Ausführung einer Bearbeitungsaufgabe verwendet. verarbeitet

#### Offline-Verarbeitung

Die Aufgabe von Sensoren für die Offline-Verarbeitung besteht darin, die Position bzw. Orientierung von Werkstückmerkmalen **vor der Bearbeitung** zu bestimmen, die für den Fertigungsprozess relevant sind. Die gewonnenen Sensordaten werden zur Modifikation und zum Lageabgleich eines bereits vorhandenen Roboterprogramms verwendet. Dabei werden die Bewegungsbefehle nach



einem Vergleich mit dem zuvor programmierten und gespeicherten Bahnprogramm an die aktuellen Werkstückgegebenheiten angepasst. Ein typischer Anwendungsfall ist beispielsweise die Modifikation eines Positionierungsbefehls zum Einkleben der Windschutzscheibe in eine Fahrzeugkabine. Weitere Anwendungsbeispiele sind vor allem in der Mikrosystemtechnik zu finden, die eine exakte Positionierung von fragilen Bauteilen gewährleisten sollen [HÖHN 2001, JACOB 2002]. Diese Systeme eignen sich in erster Linie für die Erfassung von bauteilspezifischen Lagefehlern und deren Kompensation durch die Erzeugung von Korrekturvektoren.

### **Online-Verarbeitung**

Bei der Online-Verarbeitung wird die aktuelle Position der Werkzeugspitze in Bezug zum Bauteil **während der Bearbeitung** zyklisch abgefragt und die notwendige Bewegungsbahn basierend auf den Sensormesswerten berechnet. Damit wird eine aktive Bahnführung erreicht. Diese Sensorsysteme zur Konturverfolgung werden derzeit hauptsächlich in der Schweißtechnik unter dem Begriff „Nahtfolgesensorik“ eingesetzt [HORN 1994, TRUNZER 1996, REEK 2000]. Sie bestehen im Wesentlichen aus fünf Elementen. Im Sensorkopf werden die Eingangsgrößen, welche die Informationen zur Lage und Geometrie der Werkstückkontur enthalten, erfasst. Der Sensorrechner verarbeitet diese Signale und übergibt die errechneten Korrekturwerte an das Korrekturglied. In diesem werden die Signale weiterverarbeitet und in eine Bewegung umgesetzt. Das Werkzeug führt anschließend die eigentliche Bearbeitungsaufgabe durch.

Bei den Konturfolgesystemen existieren vielfältige Ausführungen mit unterschiedlichen Fähigkeiten und Komplexität [REEK 2000, S. 21]. Dabei kann nach verschiedenen Kriterien differenziert werden (vgl. Abbildung 2-10).

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

<b>Geometrische Anordnung des Sensorkopfs</b>	
• Vorlaufend	• Bearbeitungsart
<b>Freiheitsgrade der Bahnkorrektur</b>	
• Seiten- oder Abstandsführung	• Orientierungs- oder Geschwindigkeitsführung
<b>Betriebsart</b>	
<b>Korrekturglied</b>	
• Zusatzachsen	• vorhandene Roboterachsen
<b>Bahnplanung</b>	
• Sensorrechner	• Sensor- und Robotersteuerung
<b>Erstellung der Bearbeitungsbahn</b>	
• Sensorgeführte Bahnkorrektur	• Sensorgestützte Bahngenerierung
<b>Kinematik</b>	
• Bewegung des Werkzeugs	• Bewegung des Werkstücks

Abbildung 2-10: Überblick über die Prinzipien der online Sensorführung [erweitert nach REEK 2000]

Hinsichtlich des geometrischen Aufbaus von Sensorkopf und Werkzeug kann zwischen der Messung an der Bearbeitungsstelle und einer vorlaufenden Anordnung unterschieden werden. Ein weiteres Merkmal ist die Anzahl der zu messenden Freiheitsgrade. Diese variieren zwischen einem bei der reinen Abstand- oder Seitenführung und bis zu sechs bei komplexen dreidimensional korrigierenden Systemen [HORN 1994, ZELLER 1995].

Die Betriebsart der online Sensorführung kann prinzipiell aus drei Bausteinen konfiguriert werden [SEIDEL 1992, QU U. A. 1994, WENK 2002]. Dabei stehen folgende Möglichkeiten zur Auswahl:

- Die Korrektur der Bearbeitungsbahn kann entweder mit Hilfe externer Zusatzachsen oder durch die Beeinflussung der Bewegung des Roboters durchgeführt werden.
- Die Integration der Korrekturdaten in die Bahnplanung kann über die Sensor- oder Robotersteuerung erfolgen.

- Die Erzeugung der Bearbeitungsbahn kann über eine sensorgeführte Bahnkorrektur der vorgegebenen Bahn oder durch eine rein sensorgestützte Bahngenerierung realisiert werden.

Für die kinematische Anlagengestaltung kann zwischen der Bewegung des Werkzeugs relativ zu einem festen Bauteil oder der Bewegung des Bauteils zu einer starren Werkzeugspitze unterschieden werden [TRUNZER 1996].

Des Weiteren können die verschiedenen Konzepte hinsichtlich der erreichbaren Bahngeschwindigkeit und der Genauigkeit unterteilt werden. Diese werden neben der Rechenleistung von Roboter- oder Sensorsteuerung maßgeblich durch das eingesetzte Messprinzip des Sensors bestimmt.

### 2.4.2 Zerstörende Prüfverfahren

Im Vergleich zu den Fügeverfahren Schweißen und Löten ist anzumerken, dass die Qualitätseigenschaften der Klebstoffverbindung nicht allein durch die vom Hersteller definierten Klebstoffeigenschaften vorgegeben sind, sondern sich erst bei der späteren Aushärtung der Klebung ergeben. Der Klebstoff verändert vom Klebstoffauftrag bis zum Produkteinsatz seine physikalischen Eigenschaften wesentlich. Dadurch ist es für die Auslegung der Klebverbindung notwendig, die endgültigen Eigenschaften des Klebstoffes an der ausgehärteten Klebverbindung zu bestimmen. Hier sind die Verfahren zur zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfung in der ergebnisorientierten Qualitätssicherung von großer Bedeutung.

Den zerstörenden Prüfverfahren liegt grundsätzlich die Erfassung von Festigkeitswerten zugrunde [HABENICHT 1997]. Zudem können durch eine Sichtprüfung der Bruchstellen wichtige Aussagen über das kohäsive und adhäsive Verhalten des Klebstoffs auf dem Bauteil getroffen werden. Wie in Abbildung 2-11 dargestellt, werden Klebungen deshalb verschiedenen Belastungen unterworfen. Dabei kann zwischen statischen und dynamischen Prüfungen unterschieden werden.

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung

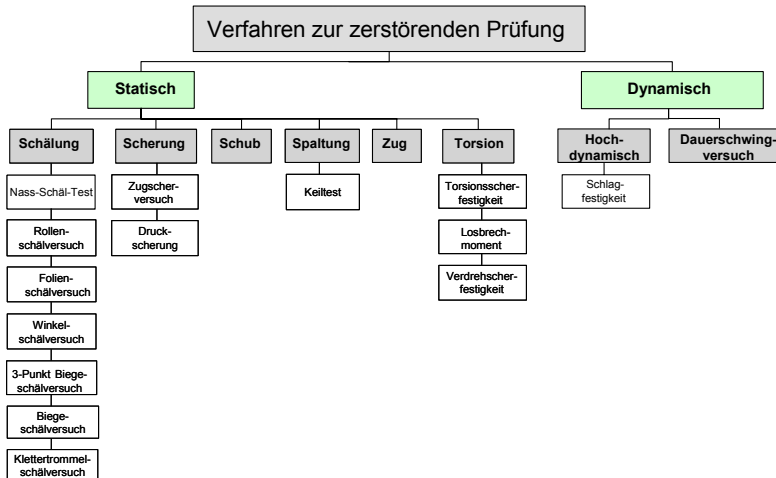


Abbildung 2-11: Überblick über ausgewählte Verfahren zur zerstörenden Bauteilprüfung von Klebverbindungen [in Anlehnung an HABENICHT 1997]

Bei statischen Prüfungen wird ein Prüfkörper mit einer bestimmten Kraft beaufschlagt. Als charakteristische Messgröße wird in der Regel die Verformgeschwindigkeit oder auch die Dehnrage verwendet. Diese beschreibt die Dehnung des Prüfkörpers bezogen auf die jeweilige Prüfzeit bis zur Zerstörung [DIN 53281, DIN EN 26922, DIN 54451].

Dynamische Versuche dienen dazu, das Verhalten eines Bauteils bei dauernder oder häufig wiederholter schwellender oder wechselnder Beanspruchung zu ermitteln [DIN 50100, DIN EN ISO 9664]. Die hochdynamischen Prüfungen von Klebungen ermöglichen Aussagen über das unterschiedliche viskoelastische Verhalten von Klebstoffen bei schlag- oder impulsartiger Belastung [LAMMEL & DILGER 2001].

Die jeweiligen Untersuchungen finden an genormten Bauteilproben statt. Zur Sicherstellung gleicher und reproduzierbarer Prüfbedingungen und um eine grundlegende Vergleichsmöglichkeit gewährleisten zu können, sind diese Prüfverfahren in den oben aufgeführten Normen festgelegt. Damit leisten zerstörende Prüfverfahren einen wichtigen Beitrag zur Auswahl und Qualifizierung von Klebstoffsystemen vor dem eigentlichen Produktionsbeginn [DÖRFLER 2002].

Für eine Qualitätskontrolle während der Fertigung können jedoch nur stichprobenartige Untersuchungen an den realen Produkten durchgeführt werden. Darauf basierend werden mit Hilfe von statistischen Methoden Rückschlüsse auf die Prozessqualität errechnet.

Diese Prüfungen sind zum einen sehr kostenintensiv, da bereits fertige Produkte oder Halbzeuge herangezogen werden. Im Gegensatz zu den genormten Prüfkörpern erschweren die nun komplexen Bauteilgeometrien die Aussagekraft der zerstörungsfreien Prüfverfahren. Zum anderen ist eine schnelle Rückführung der Ergebnisse in den Produktionsprozess nicht gegeben, da die Bauteile in der Regel aus der Produktion ausgeschleust und in einem Prüflabor geprüft werden.

### 2.4.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Vor dem Hintergrund eines hohen Automatisierungsgrades und der Verwendung des Fügeverfahrens Kleben bei der Herstellung von sicherheitsrelevanten Bauteilen in der Großserienproduktion besteht großer Bedarf zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit und Qualität eines Produkts. Daher wird im Folgenden ein Überblick über die gerätetechnische und verfahrensbedingte Einsetzbarkeit von zerstörungsfreien Prüfverfahren für die Klebtechnik im produktionstechnischen Umfeld näher vorgestellt.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren ermöglichen vor allem die Prüfung der Klebschicht auf Fehlstellen, wie zum Beispiel Poren, Lunker, Risse oder auch Lagefehler der Klebstoffraupe. Eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung finden bereits in der Industrie Anwendung oder werden in der einschlägigen Literatur vorgestellt [YANG 1997, PURSCHKE 1999, RÖSNER 2000, KROHN 2001, STÖBEL 2002]. Eine Normung der Verfahren ist noch nicht vorhanden. Für eine übersichtliche Klassifizierung der Verfahren ist deshalb eine Zuordnung der jeweiligen Verfahren zu sinnvollen Obergruppen erforderlich [ENDLICH 1995]. Vom "National Materials Advisory Board (NMAB) Ad Hoc Committee on Nondestructive Evaluation" wird eine allgemeine Struktur vorgeschlagen [ASNT 2002], welche die Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung in sechs Oberkategorien einteilt (vgl. Abbildung 2-12).

## 2 Situationsanalyse und Problemstellung



Abbildung 2-12: Überblick über ausgewählte Verfahren zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung

Die größte Aussagekraft hinsichtlich der Detektion von Fehlstellen weisen dabei visuelle Verfahren, Verfahren mit durchdringender Strahlung, Verfahren mit mechanischer Vibration sowie thermische Verfahren auf [ZÄH U. A. 2003A].

### Visuelle Verfahren:

Unter visuellen Verfahren werden hier Verfahren und Methoden verstanden, die mit Hilfe optischer Komponenten ein Abbild der aktuellen Geometrie erfassen und zur Auswertung aufbereiten. Größte Praxisrelevanz weist hier die Shearografie auf. Dabei wird das Bauteil zu Beginn der Untersuchung im Grundzustand und anschließend unter externer Zug- oder Druckbelastung von der Kamera aufgenommen. Durch eine spezielle Optik wird eine Bildverdopplung erzeugt. Damit findet ein stetiger Vergleich zweier benachbarter Punkte des Körpers statt. Dabei wird die Verformung des Körpers über ihren Gradienten gemessen [YANG 1997]. Aus dem Verformungsverhalten lassen sich Aussagen über die Position von Fehlstellen in der Klebung ableiten.

### Verfahren mit durchdringender Strahlung:

Bei der Radiografie oder Radioskopie werden die Bauteile mit Röntgen-, Neutronen- oder Gammastrahlen durchstrahlt. Dabei wird Strahlung während einer bestimmten Zeitspanne auf einen Röntgenfilm (Radiografie) aufgenommen oder an einen Computer (Radioskopie) zur Bearbeitung übergeben. Eine dreidimensi-

onale Rekonstruktion des gesamten Bauteils erfolgt anschließend durch die Auswertung der gewonnenen computergesteuerten Mehrwinkel- und Mehrschicht-Durchstrahlungen [PURSCHKE 1999]. Neben der Position der Fehlstellen können mit diesen Methoden auch Aussagen über Fehlerart und Beschaffenheit in der Klebverbindung getroffen werden.

### **Verfahren mit mechanischer Vibration:**

Das Bauteil wird hier zu kleinen Vibrationen angeregt, die durch einen Vibrations-Scanner erfasst werden können. Durch Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens von Vibrationen kann auf den inneren Aufbau des Körpers und damit auf eventuell vorhandenen Inhomogenitäten im Bauteil geschlossen werden [KROHN 2001].

Bei Anwendung des Impuls-Echo-Verfahrens werden beispielsweise die an Inhomogenitäten und Grenzflächen reflektierten Ultraschallwellen erfasst. Inhomogenitäten stellen zum Beispiel Luftporen oder Poren in der Klebschicht dar. Allen Verfahren gemeinsam ist die Notwendigkeit zur definierten Ankopplung des Senders/Empfängers mittels flüssigen Kontaktmediums an das zu untersuchende Bauteil [STÖBEL 2002].

### **Thermische Verfahren:**

Die thermischen Verfahren beruhen im Wesentlichen auf der Betrachtung des Abkühlverhaltens eines zuvor erwärmten Körpers. Bei der Impuls-Video-Thermografie wird das Bauteil durch einen einzelnen Energieimpuls (Wärmeimpuls) erwärmt. Gleichzeitig wird die Rückseite durch eine Thermografiekamera beobachtet. An Inhomogenitäten tritt eine Störung des Energieflusses auf, die sich in einer divergierenden Temperaturverteilung auf der Rückseite zeigt. Daraus kann auf Fehlerstellen im Bauteil geschlossen werden [RÖSNER 2000]. Alternative thermische Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich bei der Wärmeinkopplung in das Bauteil.

Allerdings können mit den Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung den gemessenen Prüfwerten keine Festigkeitswerte zugeordnet werden, da die eigentlichen Haftungskräfte nicht erfasst werden können [HABENICHT 1997]. Aufgrund des hohen technischen Aufwands wird noch keines der aufgeführten Verfahren in der Großserie angewandt [SCHLICKENRIEDER & MOSANDL 2003A, ZÄH U. A. 2003B]. Zudem existieren noch keine Methoden, wie aus den erfassten Fehlstellen eine regelnde Rückführung in den Fertigungsprozess gestaltet werden kann.

### 2.5 Zusammenfassung und Bewertung

Trotz der Anforderungen, die an einen automatisierten Klebstoffauftrag gestellt werden, treten insbesondere bei Klebungen im Bereich der Endmontage eine Reihe von Dosierfehlern auf. Die diskutierten Fehlerursachen erschweren den Einsatz von Industrierobotern bei Klebapplikationen, die hohe Anforderungen an die Einhaltung exakter geometrischer Beziehungen zwischen Werkstück und Werkzeug stellen. Als Hauptursachen von Dosierfehlern werden zum einen das strukturviskose Fließverhalten der Klebstoffe und zum anderen eine unzureichende Abstimmung der Verfahrensparameter des Handhabungsgeräts in Bezug zur Bauteiloberfläche und zu den Parametern für die Dosierung identifiziert.

Mit Hilfe geeigneter Qualitätssicherungsmaßnahmen soll die Qualität des Raupeauftrags beziehungsweise der Klebverbindung verbessert werden. Die Wirksamkeit der beschriebenen Maßnahmen zur Qualitätssicherung (QS) wird im Weiteren gegenübergestellt und bewertet (vgl. Tabelle 2-3).

	Sensorische QS		Ergebnisorientierte QS	
	präventiv	direkt	zerstörend	zerstörungsfrei
Einfluss auf Ausschussquote	ja	teilweise	dokumentarisch	dokumentarisch
Verfügbarkeit der gewonnenen Daten	unmittelbar	schnell	langsam	langsam
Verbesserung der Wirtschaftlichkeit	ja	teilweise	nein	nein
Technologischer Reifegrad	mittel	hoch	hoch	niedrig bis mittel

Tabelle 2-3: Wirksamkeit der Maßnahmen zur Qualitätssicherung (QS)

Bei den zerstörenden Prüfungen wurden eine Reihe von dynamischen und hochdynamischen Prüfmethoden entwickelt, die neben der Klebstoffauswahl auch wichtige Kennwerte für die simulative Betrachtung der Klebverbindung in den unterschiedlichen Betriebszuständen erlauben. Für die zerstörungsfreien Prüfverfahren gilt, dass die umfangreichen Forschungstätigkeiten noch nicht in die Praxis übertragen werden können.



Mit Hilfe von zerstörungsfreien und zerstörenden Qualitätssicherungsmaßnahmen kann demnach keine wirkungsvolle Qualitätsverbesserung des Applikationsergebnisses erreicht werden. Diese Maßnahmen können nur sehr bedingt zum Aufbau von Prozessregelkreisen herangezogen werden.

Die direkte Qualitätssicherung durch sensorische Überwachungsmaßnahmen erlaubt lediglich eine Zustandsüberwachung der Handhabungs-, Förder- und Dosiereinheit. Sensorik, die eine Aussage über Form und Lage der aufgetragenen Klebstoffraupe zulässt, kann nur passiv eingesetzt werden [GARTNER 2001, S. 42]. Die Prozessregelung erfolgt dabei quasistatisch. Eine notwendige Verbesserung des Prozessergebnisses kann nur durch die Anpassung der Dosier- und Verfahrensparameter zwischen zwei Auftragsvorgängen durchgeführt werden. Eine echtzeitfähige Prozessregelung ist durch die nachträgliche Kontrolle einer am Bauteil befindlichen Raupe nicht möglich.

Eine sensorische Prozessführung als präventive Qualitätssicherungsmaßnahme erlaubt hingegen eine flexible Anpassung der Verfahrensparameter beim Auftragsprozess. So können beispielsweise Dosierfehler bei toleranzbehafteten Bauteilgeometrien schon im Voraus vermieden werden.

Damit stellt die Sensorik zur Prozess- bzw. Bahnführung, nach dem aktuellen Stand der Technik, die am besten geeignete Alternative zur nachhaltigen Qualitätserhöhung von Klebverbindungen dar.



## 3 Analyse von Sensorsystemen zur Bahnführung

In Kapitel 2 wurde dargestellt, dass für bestimmte klebtechnische Anwendungen die erforderlichen Form- und Lagegenauigkeiten bei einem robotergeführten Klebstoffraupenauftrag nicht erreicht werden können. Der Einsatz von Sensorsystemen zur Führung des Roboters während des Auftragsprozesses stellt hierfür eine technologische Alternative dar. Basierend auf der systematischen Vorgehensweise zur Sensorauswahl werden in diesem Kapitel die notwendigen Anforderungen an das Sensorsystem definiert, der Stand der Sensorsystemtechnik und mögliche Strategien zur Bahnführung in der Klebtechnik erläutert.

### 3.1 Systematik zur Auswahl von Sensorsystemen

Vor der eigentlichen, systematischen Integration von Sensoren in die Fertigungsanlage müssen zunächst qualifizierte Sensorsysteme zur Lösung der jeweiligen Aufgabenstellung ausgewählt werden. Im Folgenden wird die in der Arbeit verwendete Methode zur Analyse und Auswahl von Sensorsystemen vorgestellt [CLASSE 1988, ZELLER 1995].

Die Vorgehensweise ist grundsätzlich in die Vorbereitungsphase, die zur Detaillierung der Anforderungen an die Sensorsysteme und zur Definition möglicher Messgrößen führt, und in die Auswahlphase untergliedert. Während der Auswahlphase sollen anhand konkreter Messgrößen und den festgelegten Anforderungen die geeigneten Sensoren bestimmt werden (vgl. Abbildung 3-1).

### 3 Analyse von Sensorsystemen zur Bahnführung

---

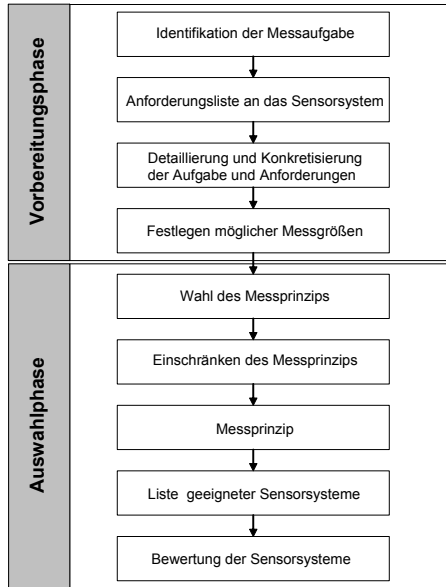


Abbildung 3-1: Systematische Vorgehensweise zur Auswahl von Sensorsystemen [nach ZELLER 1995]

In der Vorbereitungsphase wird die Messaufgabe identifiziert. Dazu muss die Aufgabenstellung bezüglich der erforderlichen Sensorfunktionen analysiert werden. Zur Systematisierung der Anforderungen kann beispielsweise eine Einteilung in technologische und fertigungsspezifische Anforderungen vorgenommen werden. Die Aufgabenstellung und die Anforderungen an den Sensor sind weiter zu detaillieren und zu konkretisieren, um denkbare Messgrößen zur Lösung der Messaufgabe festzulegen. Dabei ist in der Vorbereitungsphase darauf zu achten, dass die Aufgabendefinition nicht im Vorhinein Lösungswege vorgibt, die andere, eventuell günstigere Lösungen bereits im Vorfeld unberücksichtigt lässt.

Zur Bestimmung des Werts einer Messgröße können unterschiedliche Messprinzipien verwendet werden. In vielen Fällen ist aber gerade das Messprinzip ausschlaggebend für den Erfolg der speziellen Messaufgabe. In der Auswahlphase werden die in Frage kommenden Messprinzipien sukzessive eingeschränkt, bis ein zweckmäßiges Messprinzip gefunden ist. Wird ein passendes Messprinzip ermittelt, so kann eine Übersicht möglicher Sensoren angegeben werden. Die Sensoren können dazu in unterschiedlichen Sensorsystemen und Bearbeitungs-

strategien eingebunden werden. Dabei findet gleichzeitig ein Übergang vom herstellerneutralen zum herstellerspezifischen Teil der Auswahlsystematik statt. Bei der Erschließung neuer Aufgabengebiete müssen die ausgewählten Sensorsysteme anschließend weiter angepasst beziehungsweise weiterentwickelt werden.

### 3.2 Anforderungen an das Sensorsystem

Das kennzeichnende Merkmal der betrachteten Bahnplanungsaufgaben ist die Vermeidung von Fehlern bei der Positionierung und das Führung der Dosiereinheit beim Klebstoffauftrag. Für die Durchführung einer solchen Aufgabe sind grundlegende Anforderungen an die Struktur eines Sensorsystems zur Bahnführung zu stellen. Diese lassen sich in technologische und fertigungsspezifische Anforderungen unterteilen.

#### **Technologische Anforderungen:**

Sensorsysteme, die zur Konturverfolgung von Industrierobotern eingesetzt werden, müssen grundsätzlich in der Lage sein, die Dosiereinheit in definiertem Abstand und definierter Orientierung entlang einer markanten Werkstückkontur zu führen. Daraus ergeben sich folgende allgemeine Anforderungen:

- Ermittlung des Höhenabstands und die seitliche Abweichung des Werkzeugs vom Werkstück
- Konturerkennung anhand definierter geometrischer Merkmale
- Erfassung der Geschwindigkeitskomponente in Vorschubrichtung
- Ermittlung der räumlichen Orientierung

#### **Fertigungsspezifische Anforderungen:**

In der Schweißtechnik werden die Sensorsysteme vor allem im Rohbau verwendet. Im Gegensatz dazu wird die Klebtechnik auch im Bereich der Endmontage eingesetzt. Daraus ergeben sich weitere spezifische Anforderungen:

- Universalität in Bezug auf Materialzusammensetzung und -wechsel
- Unabhängigkeit hinsichtlich Oberflächenbeschaffenheit wie beispielsweise Rauheit, Farbe oder Glanz des Werkstücks
- Möglichkeit zur Prozesssteuerung der Dosiereinheit

Das Sensorkonzept sollte ferner eine geringe Baugröße aufweisen sowie eine industriell übliche Auftragsgeschwindigkeit von 10 m/min erlauben. In wirtschaftlicher Hinsicht sind ein geringer Preis für Anschaffung, Inbetriebnahme und Betrieb des Sensorsystems wünschenswert [TRUNZER, 1996, S. 15].

Den Schwerpunkt dieser Arbeit wird die Erfüllung der fertigungsspezifischen Anforderungen in der Klebtechnik bilden.

### 3.3 Stand der Sensorsystemtechnik zur Bahnführung

Sowohl für die Betriebsarten zur Bahnführung als auch für die dazu einsetzbaren Sensoren stehen eine Reihe von unterschiedlichen Systemlösungen zur Verfügung. Diese werden im Folgenden im Hinblick auf ihre Eignung zur Positionierung und Führung der Dosiereinheit untersucht.

#### 3.3.1 Strategien zur Betriebsart

Die Online-Sensorführung eines Industrieroboters kann generell in drei Betriebsarten realisiert werden. In der ersten Betriebsart erfolgt die Bahnkorrektur durch die Verwendung einer durch Sensorik gesteuerten zusätzlichen Achse. Bei der zweiten Betriebsart werden die programmierten Bewegungssätze des Roboterprogramms in Abhängigkeit von den Sensormesswerten korrigiert. Die dritte Betriebsart ist dadurch charakterisiert, dass der Interpolator der Robotersteuerung softwaretechnisch deaktiviert wird und die anzufahrenden Stützstellen ausschließlich durch das Softwaresystem des Sensorrechners generiert werden. Diese Betriebsart bezeichnet man als lokale Bahnplanung. Für die eingesetzten Sensoren kommen dabei unterschiedliche physikalische Messprinzipien zum Tragen.

#### Bahnkorrektur durch Zusatzachse

In der ersten Betriebsart erfolgt die Korrekturbewegung durch eine Zusatzachse. Dosiereinheit und Sensor bewegen sich auf einer fest vorgegebenen Bewegungsbahn, die eindimensionale Lageabweichung in Bezug auf die Bauteiloberfläche wird mit Hilfe einer Zusatzachse ausgeglichen.

Der Sensor ist in der Regel direkt an der Bearbeitungsstelle angebracht und liefert ein entsprechendes Messsignal. Die jeweils erfassten physikalischen Eingangsgrößen werden in ein eindimensionales Abstandssignal umgesetzt und als Stellgröße an die Zusatzachse ausgegeben [ADHÄSION 2003]. Für Zusatzachsen kommen sowohl elektrische als auch hydraulische Antriebe zum Einsatz.

Je nachdem, ob der Sensor durch die Stellbewegung der Zusatzachse mitbewegt wird oder nicht, ergibt sich ein geschlossener Regelkreis oder eine Steuerung der Zusatzachse. Durch den Aufbau als Steuerung treten keine Instabilitäten eines Regelkreises auf, und es kann im Vergleich zur Sensorführung eine wesentlich größere Dynamik der Stellbewegungen verwirklicht werden. Der größte Vorteil bei einer Bahnkorrektur durch eine Zusatzachse liegt in der hohen erreichbaren Geschwindigkeit und Beschleunigung der Korrekturbewegung. Statt der gesamten Masse des Roboterarmes wird von der Zusatzachse nur die geringe Masse der Auftragseinheit bewegt. Sämtliche Rechenoperationen, die zum Erkennen und Korrigieren der Bahnabweichung notwendig sind, finden außerhalb der Robotersteuerung statt und führen nicht zu einer Verlängerung der Interpolationszeit. Da sowohl die Abstandsauswertung als auch die Lageregelung auf demselben Rechner erfolgen, kann eine enge Kopplung von Sensor und Zusatzachse vorgenommen werden. Das Verfahren ist somit hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Befehle zur Sensorführung unabhängig von der jeweiligen Adaptionmöglichkeit der Robotersteuerung.

Der Einsatz von Zusatzachsen ist jedoch insbesondere für die dreidimensionale Bahnführung mit einem hohen apparativen Aufwand verbunden, da pro Freiheitsgrad in der Bewegungskorrektur eine weitere Stellachse erforderlich ist.

#### **Bahnkorrektur durch Stützwerte**

Bei dieser Betriebsart wird in einem ersten Schritt die Bewegungsbahn durch ein Roboterprogramm grob vorgegeben. Das Roboterprogramm kann dabei manuell geteacht oder in einem Offline-Programmiersystem erzeugt werden [BAUER & TRUNZER 1995, BACKES 1997]. Die Messwerterfassung erfolgt durch einen vorlaufenden Sensor. Der Abstand des jeweiligen Messpunkts vom Werkzeugbezugspunkt wird als Vorlauflänge bezeichnet. Damit lassen sich die dynamisch bedingten Abweichungen zwischen Soll- und Istbahn deutlich reduzieren. Je größer die Vorlauflänge eingestellt wird, desto früher werden Orientierungsänderungen der Sollbahn berücksichtigt. Eine zu große Vorlauflänge bedingt jedoch bei stark gekrümmten Bauteilen ein unzulässiges Verlassen der Bauteilkontur. Für die Minimierung der Bahnfehler ist daher eine Optimierung der Vorlaufstrecke erforderlich. Die Sensormesswerte beschreiben damit den zukünftigen Verlauf der Werkstückkontur. Der Messort wird somit in Verfahrrichtung des Werkzeugs mit konstantem Abstand verschoben.

Die von dem Sensorsystem erfassten geometrischen Konturinformationen werden nach einer Steuerstrategie in Korrekturdaten umgesetzt und zum richtigen Zeitpunkt an die Robotersteuerung übergeben. Diese Funktion übernimmt der Interpolator, der die erforderlichen Stützwerte bestimmt. Die Roboterachsen übernehmen dann die Ausgleichsbewegung. Die Korrektur der Bewegungsbahn führt dazu, dass der Werkzeugeingriffspunkt während der Bearbeitung eine geometrisch festgelegte relative Position und Orientierung zu der Bauteilkante einnimmt.

Der wesentliche Vorteil gegenüber der Bahnkorrektur mit Zusatzachse besteht bei dieser Betriebsart in der Erfassung der Werkzeugorientierung in Bezug zur Bauteiloberfläche. Damit kann eine lage- und formgenaue Klebstoffraupe erzeugt werden. Nachteilig wirkt sich jedoch die immer noch notwendige Programmierung der Roboterbahn aus, die insbesondere bei dreidimensionalen Konturen aufwändig ist.

#### **Lokale Bahnplanung**

In der lokalen Bahnplanung als dritte Betriebsart ist die steuerungstechnische Bahnplanung des Roboters deaktiviert. Die Stützwerte werden direkt von dem Sensorsystem generiert. Der vorlaufende Sensor erfasst die aktuell erforderliche Sollbahn als analytisch nicht beschreibbare Zeitfunktion im Sensorkoordinatensystem. Ein Softwaremodul transformiert die in Sensorkoordinaten ermittelten Signale in das Roboterbasiskoordinatensystem. Die von der Sensorsteuerung gelieferten Bahnpunkte werden der Sensorschnittstelle der Robotersteuerung zugeführt und in der lokalen Bahnplanung verarbeitet.

Der steuerungstechnische Vorteil dieser Betriebsart liegt darin, dass die Informationen über den zukünftigen Verlauf der Sollbahn in Bezug auf die Dynamik der Regelstrecke optimal genutzt werden. Ist die optimale Vorlauflänge bekannt, so kann damit als Endpunkt der Interpolation der entsprechende Bahnpunkt auf der Sollbahn bestimmt werden. Je nach eingestellter Bahngeschwindigkeit wird der nächste anzufahrende Stützpunkt auf der Interpolationsgeraden von dem Sensorrechner bestimmt und an die Robotersteuerung übergeben.

Ein weiterer Vorteil einer lokalen Bahnplanung durch das Softwaresystem des Sensorrechners besteht darin, dass nur der Anfangspunkt der sensorgeführten Bahnbearbeitung durch den Bediener programmiert werden muss. Dies ist vor allem bei kleinen Losgrößen oder stark toleranzbehafteten Bauteilen vorteilhaft. Die einzige Bedingung bei der Programmierung des Anfangspunkts besteht dar-



in, dass sich die relevante Werkstückkante, welcher der Sensor folgen soll, im Erfassungsbereich des Sensors befindet. Treten Fehler bei der Aufspannung des Werkstücks auf oder sind die Bauteiltoleranzen zu groß, so kann diese Bedingung verletzt werden. Für diesen Fall kann eine Funktion zur Nahtfindung implementiert werden, die eine definierte Suchbewegung des Bearbeitungskopfs um den TCP durchführt, bis die Werkstückkante detektiert wird. Des Weiteren müssen so genannte Freifahrpunkte definiert werden, um bei Störungen während der Bearbeitung innerhalb der Sensorführung ein sicheres Wegfahren der Werkzeug-einheit zu gewährleisten [TRUNZER 1996].

#### 3.3.2 Sensoren zur Bahnführung

Für die sensorgeführte Bahnführung kommen eine Reihe unterschiedlicher Sensorprinzipien in Frage, die im Rahmen dieses Abschnittes näher vorgestellt werden (vgl. Abbildung 3-2). Die eingesetzten Sensoren haben dabei einen entscheidenden Einfluss auf die gewählte Betriebsart zur Bahnführung.

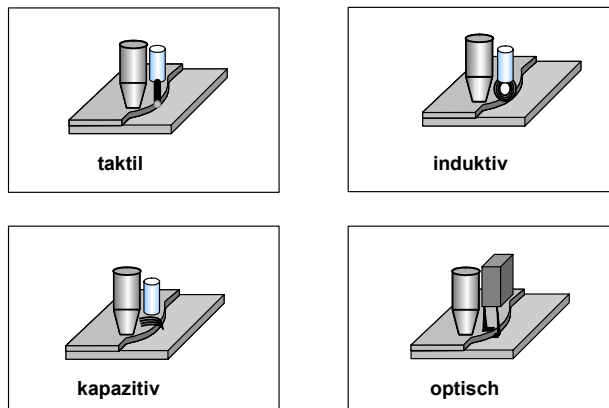


Abbildung 3-2: Sensorenprinzipien zur Bahnführung

#### Taktile Sensoren

In der Schweißtechnik werden taktile Sensoren schon seit einigen Jahren prozesssicher [ERNE 1982, FABER & LINDENAU 1985, HAFERKAMP & HÖFEMANN 1997, PILLER 1997, OSTER & OSTER 2000] für die Schweißkopfpositionierung eingesetzt. Taktile Sensoren gliedern sich in direkte mechanische Führungen, zum Beispiel Spornräder, und elektrisch umgesetzte mechanische Tastspitzen.

Prinzipbedingt sind diese nur für die Verfolgung ausgeprägter Konturformen wie Überlappstoß oder Bördelnähte geeignet. Die meisten taktilen Sensoren verwenden hierfür Schleppebel, die entsprechend ihrer jeweiligen Aufgabe konstruktiv ausgeführt sind. Dies können beispielsweise Rollen oder Taster mit kugelförmig ausgebildeter Spitze sein, die entlang der Werkstückoberfläche geführt werden. Für die anschließende Ermittlung der Auslenkung des Schleppebels ist eine Vielzahl von Verfahren bekannt. Eine einfache Variante, der so genannte Zweipunktregler, verwendet Schalter, mit denen die Richtung der Auslenkung digital erfasst wird. Aufwändigere Systeme liefern analoge, der einzelnen Auslenkung proportionale Signale.

Vorteilhaft ist der sehr einfache, robuste und kostengünstige Aufbau des Sensorkopfes. Nachteile entstehen durch den starken Verschleiß des Messfühlers. Sie eignen sich zur Bahnverfolgung nur bei weitgehend geradlinigen Konturverläufen und sind in den erfassbaren Konturgeometrien stark eingeschränkt. Zudem ist eine Messung der Werkzeugorientierung zum Bauteil nicht möglich.

#### **Induktive Sensoren**

Induktive Sensoren gehören wegen ihres einfachen und kostengünstigen Aufbaus seit Jahren zu den am meisten in der Schweißtechnik eingesetzten berührungslosen Sensoren [GOLDBERG 1985, FIEDER U.A. 1987, MATTHES U.A. 1992, OSTER & OSTER 2000, PRECITEC 2003]. Diese sprechen prinzipiell auf alle elektrisch leitenden Materialien an. Ein häufig verwendeter Sensortyp arbeitet mit Differenzspulen zur Abstandserfassung. Die Primärspule erzeugt ein mittelfrequentes magnetisches Wechselfeld, das im Initialzustand die beiden Messspulen symmetrisch durchsetzt. Aufgrund der entgegengesetzten Wicklungsrichtungen der Messspulen ergibt sich in diesem Zustand die induzierte Messspannung zu Null. Werden während des Betriebs ferromagnetische Materialien in die Nähe einer der Messspulen gebracht, so ändert sich dort der magnetische Widerstand im Messkreis. Die Auswertung der Sensorsignale erfordert die Kenntnis der Werkstoffe, die detektiert werden sollen. Während Einspulen-Sensoren entweder eine Abstands- oder Seitenführung ermöglichen, können Mehrspulensensoren Seiten- und Höhensignale gleichzeitig erfassen.

Als Vorteile dieser Sensortechnik sind die Prozessrobustheit, das gute Preis-Leistungsverhältnis und die Unempfindlichkeit gegen Störungen wie beispielsweise Verschmutzungen zu nennen. Nachteilig wirken sich bei den induktiven Sensoren die relativ kleinen Messabstände, die Beschränkung auf Metallteile und

elektrisch leitende Materialien sowie die eingeschränkte laterale Auflösung des Messbereichs aus.

#### **Kapazitive Sensoren**

Kapazitive Sensoren bestehen aus einer im Abstand von wenigen Millimetern von der Bauteiloberfläche angebrachten Elektrode, die mit dem Bauteil eine elektrische Kapazität bildet. Dabei wird der funktionale Zusammenhang zwischen Kapazitätsänderung innerhalb der Kondensatoranordnung Sensor-Messobjekt und Messabstand ausgenutzt. Die Größe der Kapazität ist umgekehrt proportional zum Abstand der Elektrode von der Bauteiloberfläche. Um eine einfache und prozessrobuste Kapazitätsmessung zu ermöglichen, wird der Sensor in einen elektrischen Schwingkreis integriert, dessen Resonanzfrequenz sich bei Änderung des Sensorabstands zur Bauteiloberfläche verschiebt. Die Auswertungs elektronik wertet diese Frequenzverschiebung aus und generiert daraus ein abstandsproportionales Signal. Handelsübliche Systeme [PRECITEC 2003] werden oft in Verbindung mit schnellen Zusatzachsen angeboten, die mit dem Sensor einen eigenen Regelkreis bilden. In der Lasermaterialbearbeitung, wo Fokusverlagerungen von wenigen zehntel Millimetern bereits zu einer erheblichen Verschlechterung der Prozessqualität führen, nehmen solche Systeme seit Jahren einen festen Platz zur Regelung des Arbeitsabstand ein [FÄRBER 1991, BEUTHNER 1991, BIERMANN U.A. 1992, MUELLER & DULEY 1998].

Vorteilhaft sind die Detektierbarkeit unterschiedlicher Werkstoffe sowie die Preiswürdigkeit der Sensoren. Der Hauptnachteil von kapazitiven Sensoren besteht darin, dass diese ausschließlich Abstände erfassen können. Aussagen über die Bauteilorientierung können aus den erfassten Messsignalen nicht getroffen werden. Weiterhin sind die Messwerte stark materialabhängig.

#### **Optische Sensoren**

Optische Sensoren sind in der Regel in komplexe Bildverarbeitungssysteme eingebunden [RUOFF 1989, WELLING 1994, HABERÄCKER 1995, BIMBERG 2003]. Diese bestehen aus Sende-, Empfangs- und Auswertungseinheit mit den Komponenten Beleuchtung, Optik, Kamera und Bildverarbeitungsrechner mit Softwarepaket. Den eigentlichen Bildverarbeitungssensor bildet die Kamera mit charakteristischer Optik. Das Sensorelement ist ein Halbleiterbaustein, der linear oder matrixartig angeordnete, lichtempfindliche Bereiche aufweist, welche die empfangenen Lichtintensitäten in elektrische Ströme umwandeln. Damit können Kennlinien erzeugt werden, die eine Korrelation zwischen auftreffenden Photo-

### 3 Analyse von Sensorsystemen zur Bahnführung

nen und Ausgabespannung ermöglichen. Das von der Kameraelektronik aufbereitete Videosignal kann erst nach erfolgter Digitalisierung in einem Rechnersystem weiterverarbeitet werden. Die dazu notwendige Hardwarekomponente wird als Framegrabber bezeichnet. Die Auswertung der Bilddaten erfolgt durch spezielle Bildverarbeitungsalgorithmen. Ausgehend von den dort erzeugten Ergebnissen können letztendlich der Ablauf bzw. die Bewegungsbefehle für das angebundene Handhabungssystem gewonnen werden.

Als Vorteile von optischen Messverfahren sind das gute Verhältnis von Auflösung zu Messbereich sowohl in longitudinaler als auch lateraler Richtung, die Möglichkeit einer 3D-Objektvermessung und der hohe Informationsgehalt der Messsignale hervorzuheben. Nachteilig wirken sich die hohe Empfindlichkeit gegenüber störendem Fremdlicht, die Abhängigkeit der Empfangssignale von den Reflexionseigenschaften der Messoberfläche sowie der relativ hohe Aufwand für die Signalverarbeitung insbesondere bei bildverarbeitenden Systemen aus.

Die diskutierten Sensoren sind alle prinzipiell zur Bestimmung des Abstands eines robotergeführten Werkszeugs relativ zur Werkstückoberfläche geeignet. Basierend auf der Erfassung von geometrischen Merkmalen können die genannten Sensoren bestimmten Betriebsarten zur Bahnführung zugeordnet werden (vgl. Tabelle 3-1).

		Sensorprinzip			
		taktil	induktiv	kapazitiv	optisch
Betriebsart	Schnelle Zusatzachse	●	●	●	●
	Bahnplanung durch Stützwerte	○	○	○	●
	Lokale Bahnplanung	○	○	○	●
Legende:		○: ungeeignet	●: geeignet		

Tabelle 3-1: Zuordnung der Sensorprinzipien zu den möglichen Betriebsarten

#### 3.3.3 Bewertung

Im Folgenden werden die Sensorprinzipien und Betriebsarten mit den erarbeiteten Anforderungen zum Klebstoffauftrag verglichen. Dabei werden zuerst die möglichen Sensoren hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Funktionsweise bewertet. Hier stehen insbesondere die geometrischen Anforderungen im Vordergrund. Bei der Bewertung der Betriebsarten werden zusätzlich die Möglichkeit zur Prozesssteuerung sowie der Programmieraufwand berücksichtigt.

#### Bewertung Sensoren

Die vorgestellten Sensorprinzipien sind in Tabelle 3-1 zusammenfassend gegenübergestellt.

	Funktionsweise			
	taktil	induktiv	kapazitiv	optisch
Abstandsermittlung	◐	●	●	●
Konturerkennung geometrischer Merkmale	○	○	○	●
Erfassung der Vorschubgeschwindigkeit	○	○	○	●
Ermittlung der Orientierung	○	○	○	●
Unabhängigkeit von der Materialzusammensetzung	●	○	○	●
Unabhängigkeit gegenüber Oberflächenbeschaffenheit	●	●	●	◐
Legende:    ○: Kriterium nicht erfüllt    ◐: Kriterium meist erfüllt    ●: Kriterium voll erfüllt				

*Tabelle 3-2: Bewertung der Sensorprinzipien*

Neben der Abnutzung von Tastelementen und der Gefahr von Beschädigungen des Bauteils weisen taktile Sensorprinzipien nur eine sehr eingeschränkte geometrische Auflösung auf. Daher werden diese Systeme nicht weiter betrachtet.

Kapazitive und induktive Sensoren liefern prinzipbedingt nur ein eindimensionales Abstandssignal. Es existieren hierzu verschiedene industrielle Umsetzungen [TOPKAYA 1992, PRECITEC 2003], die auf Sensorregelung mit Hilfe einer schnellen Zusatzachse basieren. Aufgrund ihrer integralen Messwirkung und den dadurch bedingten geringen Informationsgehalt können diese daher lediglich für eine Höhen- oder Seitenführung der Auftragseinheit eingesetzt werden. Für die Abtastung von komplexen Konturen müssen Sensoren mehrere Freiheitsgrade erfassen können. Diese mehrdimensionalen Messungen werden nach zwei Grundprinzipien durchgeführt:

- Verwendung mehrerer Sensoren, die durch bestimmte geometrische Anordnungen in einem Messkörper zusammengesetzt werden
- Verwendung von Sensorsystemen, die mehrdimensionale Messergebnisse liefern

Bei der Verwendung mehrerer Sensorsysteme ist zu beachten, dass sich die Messwerte nicht gegenseitig beeinflussen dürfen. Die Bestimmung der Neigung und Orientierung des Werkzeugs zur Bauteiloberfläche kann auch mit diesen Sensorsystemen nicht durchgeführt werden. Beim Klebstoffauftrag auf lackierte Oberflächen sind als spezielle Randbedingung die zum Teil unterschiedlichen Grundwerkstoffe zu beachten. Die lackierten Bauteile weisen zwar eine einheitliche Oberflächenbeschaffenheit auf, die Grundwerkstoffe haben aber variierende magnetische und dielektrische Eigenschaften, die mit den induktiven bzw. kapazitiven Sensoren während der Bearbeitung nicht angepasst werden können. Die weitere Diskussion beschränkt sich daher auf die Untersuchung von optischen Sensoren zur Bahnführung.

#### **Bewertung Betriebsart**

Optische Sensoren können prinzipiell für alle der genannten Betriebsarten eingesetzt werden (vgl. Tabelle 3-1). Die jeweiligen Betriebsarten unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur Anpassung der Orientierungslage des Werkzeugs zur Bauteiloberfläche. Daneben bestehen Differenzen bei der Integration der Sensorsysteme innerhalb einer durchgängigen Prozesssteuerung sowie der aufzuwendenden Programmierfähigkeit (vgl. Tabelle 3-3).

### 3.3 Stand der Sensorsystemtechnik zur Bahnführung

	Betriebsart		
	Schnelle Zusatzachse	Bahnplanung mit Stützwerten	Lokale Bahnplanung
Anpassung der Orientierungslage	○	◐	●
Möglichkeit zur Prozesssteuerung	○	◐	●
geringer Programmierumfang	○	◐	●
Legende:    ○: Kriterium nicht erfüllt    ◐: Kriterium meist erfüllt    ●: Kriterium voll erfüllt			

*Tabelle 3-3: Bewertung Betriebsarten*

Durch die Zusatzachsen können nur Abweichungen in Richtung des Verfahrenswegs der Achsen ausgeglichen werden. Eine flexible Anpassung der Werkzeugorientierung an die Bauteiloberfläche ist mechanisch nicht möglich. Sensor und Zusatzachse stellen in der Regel ein geschlossenes System dar, was die Einbindung in eine Prozesssteuerung häufig verhindert. Zudem müssen bei dieser Betriebsart die Bewegungsbahnen des Roboters auf herkömmliche Weise programmiert werden.

Bei der Bahnplanung mit Stützwerten können Orientierungsänderungen in definiertem Umfang angepasst werden. Die maximale Bewegungsfreiheit wird dabei von dem eingesetzten Sensorsystem vorgegeben. Durch die Übergabe von Stütz- und Korrekturwerten zwischen Roberter- und Sensorsteuerung besteht grundsätzlich die Möglichkeit zur Prozesssteuerung. Voraussetzung ist jedoch das Vorhandensein von geeigneten Schnittstellen. Der Programmieraufwand ist deutlich niedriger, da erheblich weniger Bahnpunkte programmiert werden müssen.

Die Strategie zur lokalen Bahn erlaubt im Vergleich zur Bahnplanung mit Stützwerten einen wesentlich größeren Toleranzbereich zur Kompensation von Lageabweichungen. Die Bewegungsfreiheit ist in der Regel nur hinsichtlich der kinematischen Restriktionen des Roboters eingeschränkt. Der programmiertechnische

Aufwand beschränkt sich auf die Festlegung des Anfangspunkts sowie der notwendigen Freifahrpunkte.

#### 3.4 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Anhand der vorgestellten Systematik zur Sensorauswahl sowie den Erläuterungen zum aktuellen Stand der Systemtechnik zur Bahnführung konnte mit den aufgestellten klebtechnischen Randbedingungen eine geeignete Sensorlösung ermittelt werden. Optische Sensoren erfüllen demnach die erarbeiteten Anforderungen am Besten.

Für optische Sensoren bieten sich eine Reihe von unterschiedlichen Möglichkeiten zur Gestaltung und Anordnung innerhalb eines Sensorsystems an. Aufgrund der hohen Komplexität müssen die optischen Sensorsysteme für die Klebtechnik weiter qualifiziert werden.

Hierfür sind insbesondere die optischen Störeinflüsse im industriellen Einsatz zu berücksichtigen. Dazu zählen vor allem die variierenden Messbedingungen wie beispielsweise die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Werkstückoberflächen. Diese werden durch die unterschiedlichen Oberflächenfarben der Bauteile bedingt, die vor allem im Bereich der Endmontage auftreten. Aber auch Fremdlichteinwirkungen wie zum Beispiel Raumbelichtung und Sonneneinstrahlung erfordern eine besondere Betrachtung.

Die Behebung dieser Defizite bildet den weiteren Inhalt der Arbeit. Daher ergibt sich folgender Handlungsbedarf:

- Ermittlung des Einflusses von Oberflächenstruktur und -farbe auf optische Sensorsysteme
- Erarbeitung einer Methode zur Kompensation dieser Einflüsse



### 4 Qualifizierung optischer Konturfolgesysteme

Die Klebtechnologie erlaubt im Gegensatz zu den Schweißverfahren einen Fügeprozess auf den verschiedensten Werkstoffen und Oberflächen. Bei Verwendung von Bildverarbeitungssystemen aus dem Bereich der Schweißtechnik müssen diese an die neuartigen Anforderungen angepasst werden. Nach den grundlegenden Erläuterungen zur digitalen Bildverarbeitung wird in diesem Kapitel der Einfluss von unterschiedlichen Werkstoffoberflächen, insbesondere der Farbspektren, auf optische Sensorsysteme untersucht.

#### 4.1 Theorie und Grundlagen

Unter industrieller Bildverarbeitung ist die berührungslose Erfassung, visuelle Darstellung und automatische Auswertung bildhafter Szenen unter industriellen Umgebungsbedingungen zu verstehen [WELLING 1994, LAMBERT U. A. 2002]. Die Abbildung eines Bauteilmerkmals, zum Beispiel einer Kante, auf einen optischen Sensor wird durch die geometrischen Eigenschaften der Kante, das Reflexionsverhalten der Oberfläche, die gewählte Beleuchtung sowie durch die optischen Elemente des abbildenden Strahlengangs beeinflusst [KLEIN & FURTAK 1988, FOUCKHARDT 1994, HENTSCHEL 2002]. Das Entstehen der Abbildung kann als eine Kette von Transformationen aufgefasst werden, bei der das Licht der Beleuchtungsquelle und das Umgebungslicht durch die Geometrie sowie die Oberflächeneigenschaften des Werkstücks in eine räumliche Verteilung überführt werden [SEIDEL 1992]. Ein Teil der Lichtenergie wird von der Sensoroptik in eine Abbildung auf dem Sensorelement umgewandelt. Durch die Bildwandlung wird die Bildinformation in eine für den Auswertungsrechner nutzbare Form überführt.

Im Folgenden wird die grundsätzliche Funktionsweise von optischen Sensoren in der industriellen Bildverarbeitung näher vorgestellt. Des Weiteren werden die hierfür notwendigen Komponenten und Auswertungsalgorithmen sowie die prinzipielle Vorgehensweise zur Konfiguration dieser Systeme eingehend beschrieben.

##### 4.1.1 Allgemeine Vorgehensweise in der Bildverarbeitung

HABERÄCKER [1995] schlägt für den optimalen Einsatz von Bildverarbeitungssystemen eine systematische Vorgehensweise vor. Innerhalb der digitalen Bildverarbeitung sind die im Weiteren beschriebenen Schritte ausgehend von der

Bildaufnahme bis hin zu den Möglichkeiten der anschließenden softwaretechnischen Weiterverarbeitung der erfassten Daten zu durchlaufen [AHLERS & WARN- ECKE 1991, ABMAYR 1994].

Zu dieser Vorgehensweise ist anzumerken, dass bei vielen Anwendungen nicht alle aufgeführten Punkte ausgeführt werden müssen. Oftmals ist es möglich, dass einzelne Verarbeitungsstufen einfach lösbar sind oder ausgelassen werden können.

### 1. Sensorauswahl

Bei der Auswahl von Sensoren ist die bereits beschriebene systematische Vorgehensweise zur Sensorauswahl empfehlenswert. Durch eine umfangreiche Spezifizierung der Anforderungen können geeigneten Sensoren zur Bilderfassung ausgesucht werden.

### 2. Digitalisierung

Zur Digitalisierung von Bilddaten werden die Schritte Rasterung und Quantisierung durchgeführt. Bei der Rasterung wird das zu digitalisierende Bild mit einem rechteckigen oder quadratischen Gitter in Rasterflächenstücke unterteilt. Durch die Quantisierung kann jedem Rasterflächenstück ein bestimmter Grauwert zugewiesen werden.

### 3. Vorverarbeitung der Rohdaten

In diesem Schritt werden Fehler, die durch die Aufzeichnung in das digitalisierte Datenmaterial eingefügt wurden, aus den Rohdaten entfernt. Als Beispiele können hier die Verzerrung durch das Linsenssystem oder Störeinflüsse durch das produktionstechnische Umfeld genannt werden.

### 4. Berechnung von Merkmalen

Nach der Rohdatenverarbeitung, können Merkmale zur Charakterisierung der Objekte berechnet werden. Damit ist das Objekt, beispielsweise eine Kante, geometrisch bestimmt.

### 5. Segmentierung des Bilds

Bei der Segmentierung wird das Bild nach Maßgabe der berechneten Merkmale in einheitliche Bereiche, so genannte Segmente, aufgeteilt. Hier kommen Verfahren wie die Binärbilderzeugung, multivariate statistische Klassifikatoren, geo-

metrische Klassifikatoren oder Operatoren auf Basis der Fuzzy Logic zum Einsatz.

### **6. Kompakte Speicherung der Segmente**

Zur Reduzierung der Datenmenge und damit der Rechenzeit ist es sinnvoll, die Segmente mit geeigneten Datenstrukturen so zu speichern, dass redundante Informationen eliminiert und die jeweiligen Zugriffsmechanismen erleichtert werden.

### **7. Beschreibung der Segmente**

Nachfolgend schließen sich häufig Verfahren zur Beschreibung der Segmente an. Hier können zum Beispiel einfache Segmenteigenschaften wie der Flächeninhalt oder die Lage des Schwerpunkts schon ausreichend sein. Aufwändigere Algorithmen untersuchen die Form des Segments durch die Analyse der relativen Lage der Bildpunkte des Segments. Aber auch kanten- und linienorientierte Verfahren werden verwendet.

### **8. Synthese von Objekten**

Die in den vorhergehenden Verarbeitungsschritten erkannten und beschriebenen Segmente werden hier zu sinnvollen Objekten zusammengeführt. Neben heuristischen Verfahren werden dabei Methoden der künstlichen Intelligenz, beispielsweise semantische Netze oder Expertensysteme, eingesetzt.

### **9. Ableitung von Reaktionen**

Als letzter Schritt muss aus den analysierten Bilddaten eine Reaktion abgeleitet werden, im einfachsten Fall das Auslösen eines Alarms oder wie in der vorliegenden Arbeit ausführlich beschrieben, die Steuerung eines Roboters. Diese Komponente wird als Reaktionskomponente oder Exekutive des Systems bezeichnet.

#### **4.1.2 Optische Konturfolgesysteme**

Optische Bahnführungssysteme zur Konturverfolgung lassen sich nach Messprinzip, Abtastvorgang und Datenauswertung am Werkstück klassifizieren (vgl. Abbildung 4-1) [Horn 1994]. Die Ermittlung der Konturlage erfolgt durch Auswerten konturspezifischer Merkmale in den Sensorsignalen, welche physikalisch entweder Geometrie- oder Strahlungsintensitätsdaten repräsentieren.

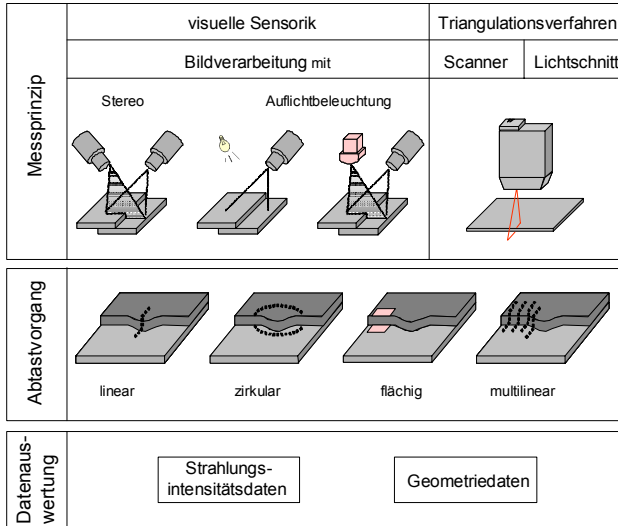


Abbildung 4-1: Klassifizierung optischer Bahnführungssensoren [erweitert nach HORN 1994]

Die in Abbildung 4-1 vorgestellten Bausteine können ähnlich einem morphologischen Kasten zu einem optischen Gesamtsystem kombiniert werden. Dabei müssen die technologischen Einschränkungen der Einzelkomponenten berücksichtigt werden. Die am häufigsten industriell eingesetzten Verfahren werden im Folgenden näher vorgestellt.

### Stereoskopieverfahren

Das Stereoskopieverfahren, welches dem menschlichen Sehen sehr ähnlich ist, ist den flächenhaft abbildenden Sensorsystemen zugeordnet. Es basiert auf der Verschiebungsmessung eines auf zwei Kamerasystemen abgebildeten Objekts. Alternativ können auch zwei Bilder aus unterschiedlicher Perspektive durch nur eine Kamera aufgenommen werden. Die sequentielle Aufnahme zweier Bilder steht hier aber nicht zur Diskussion, da dieses Verfahren nur für statische Szenen geeignet ist. Beim stereoskopischen Prinzip mit zwei Kameras werden die Grauwerte der Pixel beider Bilder nach einem speziellen Ähnlichkeits- und Korrelationsverfahren miteinander verglichen und in Positionen im Raum umgerechnet [SUPPES U. A. 2000]. Die Auswertung über Grauwerte ist insgesamt sehr zeit- und rechenaufwändig. Das Verfahren ist prinzipbedingt auf möglichst ausgeprägte

Signalmerkmale, in erster Linie Helligkeitsunterschiede, angewiesen. Eine Entfernungsmessung ist deshalb stark von den Reflexionseigenschaften der Werkstückoberfläche abhängig. Neben dem teureren Hardwareaufbau durch die Verwendung von zwei Kamerasystemen, führt die erforderliche Bildaufnahme aus unterschiedlichen Blickrichtungen bei Geometriesprüngen im Konturbereich zu partiellen Abschattungen und damit zu undefinierten Messwerten. Damit entstehen deutliche Nachteile bei der Generierung von dreidimensionalen Geometriedaten, so dass die stereoskopischen Systeme daher nicht näher betrachtet werden.

### **Lichtschnittverfahren**

Alternativ zur Stereoskopie kann auch mit nur einer Kamera die dreidimensionale Geometrieinformation der Oberfläche bestimmt werden. Um die aufwändige Grauwertanalyse zu vermeiden, wurden Lichtschnittverfahren entwickelt, deren gemeinsames Prinzip ist, definierte Muster, in der Regel Lichtbalken, aus definierter Richtung auf die Messfläche zu projizieren [HORN 1994]. Damit müssen nicht mehr feine Nuancen in Grauwerten analysiert werden, sondern nur noch der signifikante Verlauf heller Streifenmuster ausgewertet werden.

Bei dem schon seit 1936 prinzipiell bekannten Lichtschnittverfahren [SCHMALZ 1936] wird ein auf die Werkstückoberfläche projizierter Lichtstreifen auf einen zweidimensionalen Bildsensor abgebildet und dessen Formung im Bildsignal zur Geometriebestimmung herangezogen. Dieses Messprinzip stellt eine Erweiterung der punktwisen Triangulationsverfahren nach dem Scheimpflug-Prinzip [DONGES & NOLL 1993, HÜSER 1995] im Sinne von DIN 1319 Teil 1 dar und kann als eine zweidimensionale Triangulation verstanden werden. Aufgrund der oben beschriebenen technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkte werden im Weiteren die verschiedenen Varianten zu den Lichtschnittverfahren eingehend erörtert.

Bei allen musterbasierten Verfahren wird die Bildauswertung durch die Verwendung von Lichtquellen mit definierter Wellenlänge, die deutlich außerhalb jener der normalen Umgebungsbeleuchtung liegt, erheblich vereinfacht. Der durch eine Laserdiode erzeugte Lichtstreifen erfüllt in der Regel diese Anforderung. In den Strahlengang der Kamera wird dann ein optischer Filter integriert, der nur noch für die Wellenlänge des Lasers durchlässig ist [BAUER 1991, NAUMANN & SCHRÖDER 1992]. Das Kamerabild zeigt im Prinzip dann nur noch weiße Streifen auf schwarzem Hintergrund, wodurch das Suchen der Streifen im Bild wesentlich vereinfacht wird. Der Graubereich dazwischen, aufgeteilt in 255 Bit, wird abhän-

gig von der jeweiligen Auswertungssoftware der Sensorsysteme zu Weiß (255 Bit) oder zu Schwarz (0 Bit) umgerechnet.

Diese laseroptischen Sensoren sind entwicklungsgeschichtlich gesehen die jüngsten und momentan auch die teuersten Sensoren. Zweidimensional, also linienförmig messende Laser-optische Sensoren gliedern sich in Laser-Scanner und Laser-Lichtschnittsensoren (vgl. Abbildung 4-2). Beide basieren auf dem Prinzip der aktiven Lasertriangulation [SEITZ 1990]. Unterschiedlich sind lediglich die Erzeugung der Laserlinie und die Beobachtung des am Werkstück gestreuten Laserlichts.

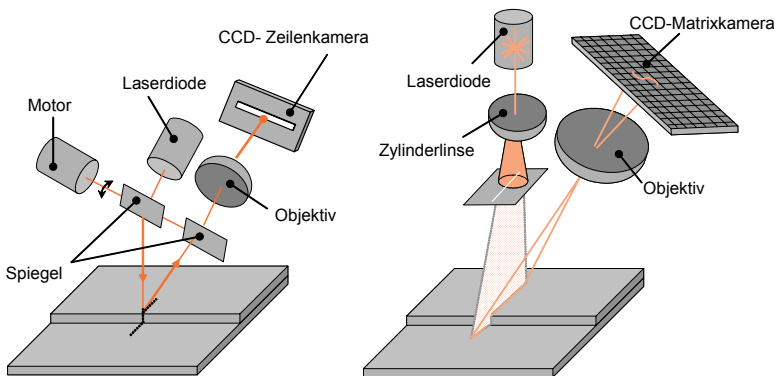


Abbildung 4-2: Darstellung des Messprinzips von Laser-Scanner (links) und Laser-Lichtschnittsensor (rechts)

Während beim Laser-Scanner die linienförmige Abtastung des Werkstücks durch hochfrequentes Ablenken eines Laserstrahls über einen motorgetriebenen Spiegel erfolgt, weiten Lichtschnittsensoren den Laserstrahl statisch über eine Zylinderlinse beziehungsweise Aufweitungsoptik zu einem Lichtvorhang auf. Als Empfangselement kommt beim Laser-Scanner eine CCD-Zeilenkamera oder ein PSD-Sensor (Position Sensitive Detectors) zum Einsatz, welchen das vom Werkstück reflektierte Licht über einen Empfangsspiegel zugeführt wird. Lichtschnittsensoren dagegen beobachten mit einer Matrixkamera die komplette Laserlinie. Eine Erweiterung des einfachen Lichtschnittsensors stellt das Mehrstreifenlichtschnittverfahren dar [TRUNZER 1996, S. 40]. Den schematischen Aufbau zeigt Abbildung 4-3.

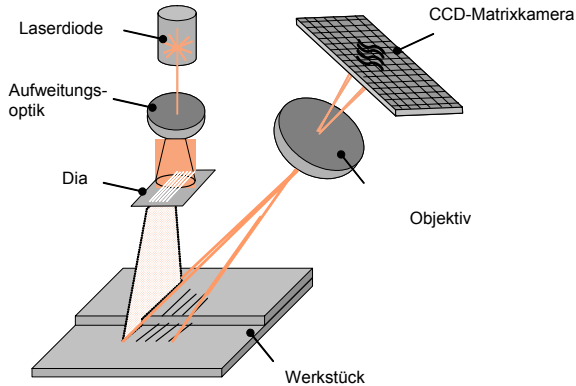


Abbildung 4-3: Mehrstreifenlichtschnittverfahren [nach TRUNZER 1996]

Bei mehreren Lichtstreifen wird eine höhere effektive Messrate erreicht, da pro Bild im Durchschnitt drei bis fünf Stützpunkte gleichzeitig erfasst werden [BARTHEL & TRUNZER 1994]. Weiterhin kann durch die Verwendung von Multilichtschnittverfahren die Werkstückorientierung ermittelt und somit das Bearbeitungswerkzeug orientierungsrichtig zur Bauteiloberfläche positioniert werden [SHIOU 1998].

Der Messbereich kann bei den vorgestellten Sensorprinzipien durch geeignete optische Auslegung wie beispielsweise die Wahl von Triangulationswinkel, Brennweite des Objektivs usw. praktisch beliebig an die diversen Aufgabenstellungen angepasst werden [PRITSCHOW & HORN 1991]. Die Auflösung ergibt sich dann aus dem gewählten Messbereich, der Größe der Pixelmatrix der ausgewählten CCD-Kamera und den verwendeten Algorithmen zur Signalvorbereitung.

In den letzten Jahren wurden Triangulationssensoren im Hinblick auf die Verringerung der Messunsicherheit bei einer weiteren Vergrößerung des Arbeitsbereichs und einer weitgehenden Unempfindlichkeit gegenüber unterschiedlichen Materialeigenschaften optimiert [SHIOU 1998]. Ein Großteil dieser Systeme wurde vor allem für das automatisierte Schweißen konzipiert [REEK 2000, WENK 2002, HAUG 2002, DILTHEY U. A. 2003].

Da die Präzisionsmechanik zur Strahlablenkung von Laser-Scannern durch ihre bewegten Teile im fertigungstechnischen Umfeld immer wieder zu Ausfällen neigt, ist dem Lichtschnittprinzip für schweiß- und klebtechnische Anwendungen eindeutig der Vorzug zu geben. Als weiterer Nachteil der Scanmechanik erweist

sich die relativ große Baugröße sowie deren Stoß- und Verschleißempfindlichkeit. Rotierende Strahlablenker, wie beispielsweise Polygonspiegel, die ebenfalls ein schnelles linienförmiges Abtasten ermöglichen, sind in der Regel großvolumig, relativ teuer, verschleißbehaftet und nicht wartungsfrei. Auch wirtschaftliche Betrachtungen sprechen damit für das statische Lichtschnittprinzip, da die Investitionen für eine Linienoptik deutlich niedriger ausfallen, als für eine Scannereinheit [HAUG 2002]. Aufgrund dieser Nachteile basieren alle weiteren Untersuchungen dieser Arbeit auf dem Lichtschnittverfahren.

### 4.1.3 Hardwareplattformen

Die industriell verbreitetsten Hardwareplattformen für Laser-Lichtschnittsensoren werden im Folgenden vorgestellt und bezüglich der geforderten Echtzeitfähigkeit und ihres Aufwands diskutiert.

#### **Kamera:**

Die in der Klebtechnik geforderten hohen Auftragsgeschwindigkeiten bedingen die Bereitstellung von ausreichenden Bahnstützstellen und damit die volle Ausnutzung der von der Kamera gelieferten Bilder. Je nach verwendeter Technologie handelt es sich dabei um einen CCD-Chip (Charged Coupled Device) oder einen CMOS-Chip (Complementary Metal Oxide Semiconductor) [TAEYMANN 1997, GEIB 1998]. Beide Systeme wandeln durch ihre lichtempfindlichen Dioden das einfallende Licht in elektrische Ladung um. Im CCD-Sensor werden die entstandenen Ladungen mittels einer festen Taktung, dem so genannten Pixeltakt, seriell von Zelle zu Zelle eine Zeile weiter gereicht, bis diese den Mess- bzw. Auswertungsverstärker erreichen und ausgewertet werden. Dieses Vorgehen wird als Eimerkettenprinzip bezeichnet, da nicht jede Zelle für sich alleine ausgelesen, sondern zentral verarbeitet wird. Im Gegensatz dazu werden bei CMOS-Sensoren die Photozellen direkt ausgewertet, indem eine Art Adressierung ähnlich dem Ansprechen von RAM-Adressen erfolgt. Damit ist eine direkte Ansprache beziehungsweise Auswertung der einzelnen Zellen möglich. Niedrigere Fertigungskosten und Energiebedarf sprechen für die CMOS-Sensoren, die CCD-Sensoren weisen aber eine deutlich höhere Bildqualität auf. Bei den CCD-Sensoren liegen die Photozellen eng nebeneinander, so dass eine hohe Detektionsrate vorliegt. Der Abstand der Zellen innerhalb der CMOS-Sensoren ist wesentlich größer, da hier zusätzlich Raum für Bausteine zum Auslesen etc. benötigt wird. Dadurch geht eine erhebliche Menge an Licht verloren, das auch durch den Einsatz von Auswertungsverstärkern nicht kompensiert werden kann.



Aufgrund dieser Nachteile werden deshalb in der industriellen Bildverarbeitung weiterhin CCD-Kameras eingesetzt. Die CMOS-Technologie weist allerdings bei der stetigen technischen Weiterentwicklung ein hohes Einsatzpotenzial auf.

### **Bilderfassungskarte:**

Die Bilderfassungskarte, der so genannte Framegrabber, digitalisiert das analoge Videosignal der Kamera und transferiert die Bilddaten über den PCI-Bus (Peripheral-Component-Interconnect-Bus) in den Hauptspeicher des Sensorrechners. Geht man davon aus, dass die hochdynamische Entwicklung in der Rechnertechnik im gleichen Maße anhält, so wird in wenigen Jahren die vollständige Abarbeitung in Videoechtzeit gelingen. Da die Abarbeitung eines kompletten Kamerabilds in Videoechtzeit mit einem PC-Prozessor zurzeit noch nicht gelingt, werden für heutige Lichtschnittsensoren überwiegend Parallelrechner auf Transputer- oder Signalprozessorbasis (DSP) eingesetzt. Bei der Transputerlösung wird das Kamerabild zwischengespeichert und anschließend in mehrere Bereiche aufgeteilt, die von jeweils einem Prozessor abgearbeitet werden. Innerhalb der schnelleren Signalprozessoren wird stattdessen der Pixelstrom ohne Zwischenspeicherung direkt auf mehrere DSPs verteilt. Das extrahierte Profil steht dann praktisch ohne Verzögerung direkt nach dem Einlesen der letzten Pixel aus der Kamera für die weitere Verarbeitung zur Verfügung.

### **4.1.4 Signalverarbeitung**

Die erreichbare Genauigkeit des Lichtschnittverfahrens wird entscheidend durch die Qualität der auf die Werkstückoberfläche projizierten Laserlinien bestimmt. Von der Kamera wird jedoch nur der geringe diffuse Anteil des reflektierten Lichts detektiert. Eine für das Lichtschnittverfahren ideale Laserlinie würde unabhängig von dem Projektionsabstand sowohl in ihrer Längsachse als auch über die komplette Linienbreite eine konstante Intensität aufweisen (vgl. Abbildung 4-4). Unter Intensität wird hier die Helligkeitsverteilung des eingebrachten Laserlichts auf die Oberfläche verstanden.

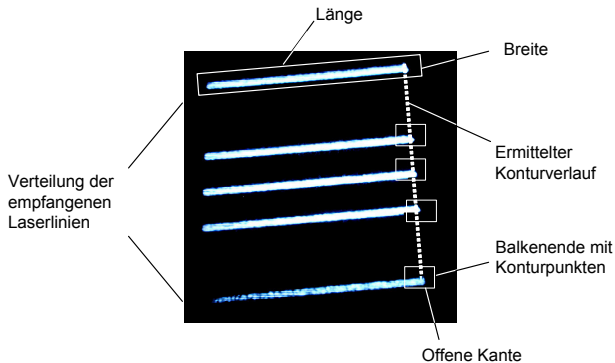


Abbildung 4-4: Optimale Helligkeitsverteilung der empfangenen Laserlinien am Beispiel eines Mehrstreifenlichtschnitts

Dabei wird eine möglichst kleine Linienbreite angestrebt, da somit der Einfluss der Werkstückorientierung und von Inhomogenitäten der Laserintensität quer zur Linie durch Ungleichmäßigkeiten der Werkstückoberfläche sinkt [MÖHRKE 1991]. Die Signalverarbeitung eines Laser-Lichtschnittsensors gliedert sich nach der Analog-Digital-Wandlung des Kamerasignals in die Hauptverarbeitungsschritte Profilextraktion, Entzerrung und Filterung [HAUG 2002].

### 4.1.4.1 Profilextraktionseinheiten

Die von der Kamera gelieferte Pixelmatrix lässt sich durch die Profilextraktion in ein vektorförmiges Höhenprofil überführen. Dabei können die Verfahren zur Profilextraktion in ein- und mehrstufige Verfahren untergliedert werden (vgl. Abbildung 4-5):

- Einstufige Verfahren kommen ohne Zwischenspeicherung aus und ermitteln direkt aus dem seriellen, digitalen Pixelstrom der Kamera die Position eines Profilpunkts.
- Mehrstufige Verfahren erfordern eine Zwischenspeicherung, da einzelne Pixels mehrfach benötigt werden. Dazu gehören Verfahren, die zuerst in einer Grobsuche das Intensitätsmaximum einer Zeile bestimmen und dann eine Feininterpolation um das gefundene Maximum einleiten.

Die Extraktionsprinzipien der verschiedenen Verfahren werden im Folgenden näher erläutert. Das Maximalwertverfahren [WU U. A. 1996], das Schwellwertverfahren [MINGE 1994] und das Schwerpunktverfahren [HORN 1994] sind häu-

fig eingesetzte einstufige Verfahren. Diese können direkt in schnelle und preiswerte Hardwareschaltungen integriert werden und die volle Bildrate der Kamera ausnutzen.

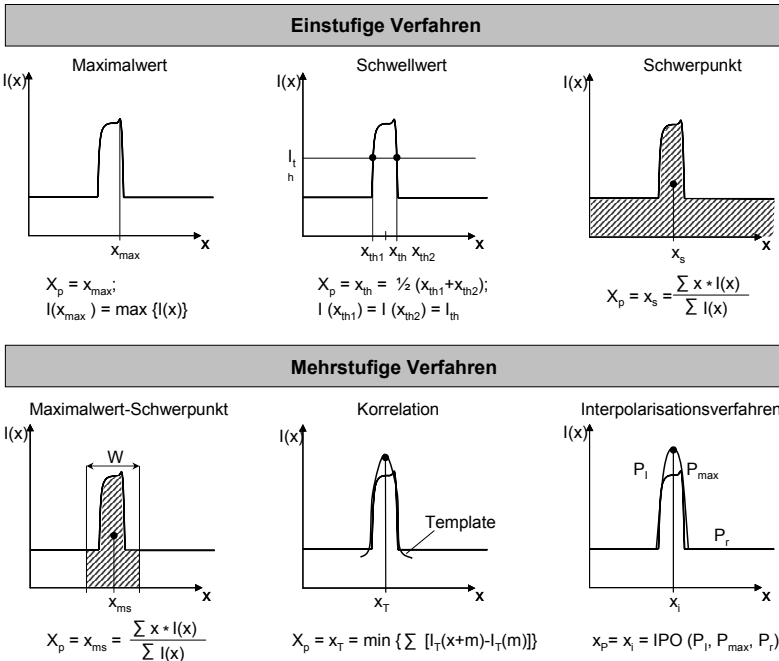


Abbildung 4-5: Übersicht über mögliche Verfahren zur Profilextraktion [in Anlehnung an HAUG 2002]

**Maximalwertverfahren:**

Bei diesem Verfahren wird die Position des Pixels mit maximaler Intensität bestimmt. Kommt es zu einer übersteuerten Intensitätsverteilung durch Plateaus, die mehrere Pixel breit sind, so weicht die Mitte des Lichtstreifens erheblich ab. Die Umsetzung des Verfahrens in eine echtzeitfähige Hardwarelösung ist einfach und kann sowohl auf ein analoges als auch ein digitales Kamerasignal angewandt werden [WU U. A. 1996].

### **Schwelwertverfahren:**

Das Schwellwertverfahren legt einen definierten Wert fest, ab welchem Grauwert ein Pixel zur schwarzen Umgebung gezählt oder dem weißen Lichtbalken zugeordnet wird. Damit sollen die betrachteten Objekte optimal voneinander getrennt werden. Der aktuelle Schwellwert muss hierbei sehr sorgfältig an die aktuellen Umgebungsbedingungen adaptiert werden, was grundsätzlich eine allgemeine Parametrierung hinsichtlich wechselnder Werkstoffoberflächen erschwert [MINGE 1994].

### **Schwerpunktverfahren:**

Das Schwerpunktverfahren ist der Funktionsweise von PSDs nachgebildet, die den Flächenschwerpunkt aller Pixelintensitäten einer Zeile ermitteln. Unter idealen Bedingungen lassen sich hohe Auflösungen erzielen. In der Praxis auftretende Störeinflüsse wie Reflexionen oder Überblendungen verursachen jedoch starke Verzerrungen [HORN 1994].

Durch den Einsatz von mehrstufigen Verfahren können die spezifischen Nachteile der einzelnen Profilextraktionsverfahren deutlich kompensiert werden. Im Folgenden werden mögliche Verfahrenskombinationen diskutiert.

### **Maximalwert-Schwerpunktverfahren:**

Eine Verbesserung des Schwerpunktverfahrens kann durch die Kombination mit dem Maximalwertverfahren erzielt werden. Die Berechnung des Flächenschwerpunkts erfolgt in einem definierten Fenster um das Pixel mit maximaler Intensität. Dadurch können Störeinflüsse durch Gleichlicht und Reflexionen zum Teil reduziert werden. Allerdings erweist sich eine echtzeitfähige Realisierung dieses zweistufigen Verfahrens als sehr aufwändig, so dass bis jetzt keine praktische Umsetzung bekannt ist [HAUG 2002].

### **Korrelationsverfahren:**

Die Korrelationsverfahren ermitteln in Abhängigkeit der Relativverschiebung zweier Signalformen einen Korrelationswert, der auf dem Vergleich der aktuellen Intensitätsverteilung einer Zeile mit einem abgelegten Muster (Template) basiert. Durch die Bewertung der Linienform können theoretisch die höchsten Auflösungen erreicht werden. Allerdings ist das Verfahren sehr störungsanfällig und die zur Kompensation notwendigen Algorithmen sind besonders rechenintensiv [KIM U. A. 1996].

### **Interpolationsverfahren:**

Eine weitere Gruppe von mehrstufigen Verfahren stellen die Interpolationsverfahren dar. Diese basieren in der Regel auf dem Maximalwertverfahren, mit dem im ersten Schritt die Grobposition ermittelt wird. Im zweiten Schritt wird anschließend in einem Fenster die Feinberechnung durch Interpolation mit Gauß-, Parabel- und Bezierfunktionen durchgeführt [HAUG 2002].

Aufgrund des mehrstufigen Vorgehens sind die oben beschriebenen Verfahren sehr rechenaufwändig und werden deshalb für die Anwendung für schnelle Bahnführungsaufgaben in der Praxis noch nicht eingesetzt.

### **4.1.4.2 Entzerrung**

Das von der Profilextraktion erzeugte vektorförmige Höhenprofil liegt zunächst in Kamerakoordinaten (Einheit: Pixel) vor. Für Anwendungen zur Konturverfolgung wird hingegen eine kartesische Darstellung des Höhenprofils relativ zum Sensorgehäuse benötigt (Sensorkoordinaten, Einheit: Millimeter). Deshalb ist eine Transformation von Kamera- in Sensordaten erforderlich. Da bei Triangulationssensoren eine nichtlineare Korrelation zwischen der Position des Lichtbalkens im Kamerabild und dem geometrischen Abstand des Sensors vom Werkstück besteht [HORN 1994, HAUG 2002], wird diese Transformation auch als Entzerrung oder Linearisierung bezeichnet. Die in der Literatur hierfür vorgeschlagenen Methoden lassen sich in die Verfahren mathematisches Kameramodell mit Transformationsmatrizen [HECKEL 1995] und zweidimensionale Kennfelder, so genannte look-up-tables [HORN 1994], gliedern.

Während mathematische Kameramodelle eine genaue Kenntnis der optischen Abbildung voraussetzen, stellen Kennfelder lediglich einen Zusammenhang zwischen korrespondierenden Punkten von Kamera- und Sensor-Koordinatensystem her. Gegenüber mathematischen Kameramodellen werden bei Kennfeldern auch Fehler der optischen Komponenten und Montagetoleranzen beim Zusammenbau des Sensorkopfes voll mitberücksichtigt. Auf die Störsicherheit des Sensors hat die Entzerrung keinen Einfluss, da nur ein Wechsel der Koordinatensysteme vorgenommen wird. Aus heutiger Sicht stellt die Entzerrung kein nennenswertes technisches Problem dar und wird daher im Weiteren nicht näher betrachtet.

### 4.1.4.3 Filter

Die bisher vorgestellten Maßnahmen in der Signalverarbeitung zielen auf die Verarbeitung der von der Kamera des Laser-Lichtschnittsensors aufgenommenen Szene. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die mögliche Verbesserung der Signalqualität durch Filtern in der Signalverarbeitungsstruktur von Laser-Lichtschnittsensoren gegeben. Prinzipiell ist eine Filterung an drei Stellen der Signalverarbeitung des Sensorsystems denkbar (vgl. Abbildung 4-6).

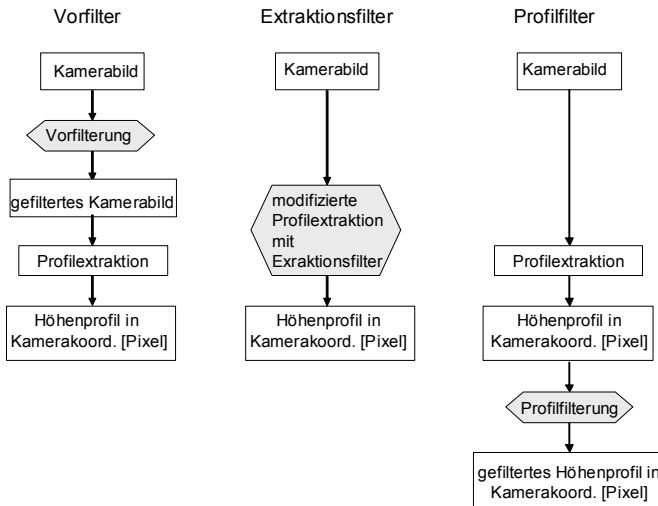


Abbildung 4-6: Möglichkeiten der Filterung in der Signalverarbeitung des Laserlichtschnittsensors [nach HAUG 2002]

#### Vorfilterung:

Kommerzielle Bilderfassungskarten bieten in der Regel die Möglichkeit, die Kamerabilder vor der Profilextraktion einer einfachen analogen Tiefpassvorfilterung zur Glättung des Kamerasignals zu unterziehen [HAUG 2002].

Eine höherwertige Vorfilterung wird jedoch durch die hohe Taktfrequenz des Kamerasignals erschwert. Zudem fehlen bisher Kriterien, wie die auszufilternden Anteile des Rohsignals exakt aussehen, um geeignete Filter auszuwählen.

### **Extraktionsfilter:**

Bei einer Erweiterung der Profilextraktionseinheit um einen Filter sind in der Regel aufwändige Änderungen der Hardwarestruktur der Sensorik durchzuführen, da die Leistungscharakteristik der verfügbaren Extraktionseinheiten üblicherweise so ausgelegt ist, dass ihre Rechenleistung optimal ist. Die in der Literatur vorgeschlagenen Verfahren [ZUNKER 1993, HORN 1994] stellen daher nicht standardisierte Insellösungen dar, die nur bedingt zur Übertragung auf eine allgemeine Betrachtungsweise geeignet sind.

### **Profilfilterung:**

Eine Profilfilterung des Höhenprofils kann teilweise auch nach der Profilextraktion durchgeführt werden. Aufgrund der gegenüber dem Kamerasignal niedrigeren Datenrate des Höhenprofils können daher aufwändigere Rechenverfahren herangezogen werden [HAUG 1997, WU U. A. 1996]. Die darin vorgestellten Algorithmen wurden jedoch individuell für den jeweiligen spezifischen Profilverlauf entwickelt und sind deshalb nicht universell einsetzbar.

Den bisherigen Ansätzen für Vorfilterung, Extraktionsfilterung und Profilfilterung gemeinsam ist der Umstand, dass „falsche“ Profilpunkte im besten Fall als solche erkannt, jedoch nicht mehr durch richtige Profilpunkte ersetzt werden können. Diese Filter dienen daher in erster Linie einer Schadensbegrenzung und einer Erhöhung der Profiltüte. Eine echte Verbesserung zur Minderung von Störungen durch das Reflexionsverhalten von unterschiedlichen Werkstoffoberflächen und -farben ist damit nicht möglich.

### **4.1.5 Beurteilung der Verfahren zur Signalverarbeitung**

Die Fähigkeiten der vorgestellten Verfahren zur Profilextraktion, Entzerrung und Filterung wurden eingehend von HAUG untersucht und bewertet [HAUG 2002]. Dazu wurde experimentell die Einsetzbarkeit dieser Methoden unter fertigungstechnischen Randbedingungen ermittelt. Die Messungen erfolgten nach der manuellen Parametrierung an die jeweiligen produktionstechnischen Umgebungsbedingungen. Damit lässt sich die Aufteilung der vom Videobild gelieferten Grauwerte bezüglich ihrer Zuordnung zum schwarzen Hintergrund oder zur weißen Projektionslinie variieren. Zur Anpassung von optischen Systemen stehen dabei grundsätzlich die Einstellparameter Schwelle, Kontrast, Helligkeit und Pixeltoleranz zur Verfügung.

### **Schwellwert:**

Dieser Parameter bestimmt, ab welcher Helligkeitswertverteilung der empfangene Lichtbalken erkannt wird. Durch die Ermittlung eines geeigneten Stellwerts lassen sich unerwünschte, dunkle Bildanteile von dem helleren Balkensignal trennen. Allgemein gilt, je heller der Lichtbalken am Kontrollmonitor erscheint, desto größer sollte dieser Wert eingestellt werden. Dieser Wert wird von der Software innerhalb des Framegrabbers verarbeitet und ist damit der Auswertungseinheit zugeordnet.

### **Kontrastwert:**

Der Kontrastwert beeinflusst die Digitalisierung des Kamerabilds und damit die Empfangseinheit. Ein hoher Einstellwert führt zu einem harten, kontrastreichen Bild, niedrige Werte ergeben ein weiches, kontrastarmes Bild. In der Regel wird die Konturerkennung durch einen hohen Kontrast stabilisiert. Treten jedoch störende Reflexionen im Videobild auf, lassen sich diese in der Regel durch Verringerung des Kontrasts unterdrücken.

### **Helligkeitswert:**

Der Einstellparameter Helligkeit erlaubt eine Anpassung der Kameradynamik an dunkle oder helle Werkstückoberflächen. Dieser wirkt sich ebenso wie der Einstellparameter Kontrast auf die Digitalisierung des Kamerabilds aus. Hauptsächlich dunkle Bilder, d.h. Oberflächen die das eingestrahelte Licht besonders schlecht remittieren, wie beispielsweise schwarze Körper, lassen sich durch höhere Einstellwerte aufhellen.

### **Pixeltoleranz:**

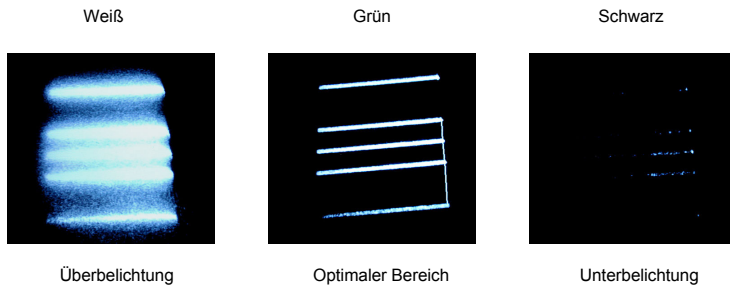
Durch den Einstellparameter Pixeltoleranz werden die Rauigkeitsunterschiede verschiedener Werkstückoberflächen ausgeglichen. Diese Anpassung findet in der Auswertungseinheit statt.

Basierend auf der manuellen Parametrierung kompensieren die genannten Verfahren zur Signalverarbeitung in erster Linie die innerhalb des Prozesses auftretenden Störeinflüsse. Die Intensitätsverteilung des reflektierten Lichtbalkens für eine bestimmte Werkstoffoberfläche wird dabei als konstant betrachtet. Diese Verfahren haben demnach eine große Bedeutung für eine prozesssichere Erfassung der Lichtbalken und anschließenden Signalauswertung **während** des eigentlichen Arbeitsprozesses. Eine Anpassung an sich verändernde Prozessbedingun-



gen, vor allem die Einbeziehung unterschiedlicher Werkstoffoberflächen mit ihren variierenden Strukturen und Farben, ist nicht vorgesehen.

Dies ist jedoch erforderlich, wenn zum Beispiel bereits lackierte Oberflächen betrachtet werden. Hier treten aufgrund der unterschiedlichen Reflexionsgrade bei den einzelnen Oberflächenstrukturen und Farben große Intensitätsunterschiede der Lichtbalken auf, die mit den zuvor vorgestellten Verfahren nicht mehr verarbeitet werden können. Abbildung 4-7 zeigt beispielhaft die Intensitätsverteilung für die Farben Weiß, Grün und Schwarz bei optimaler Parametereinstellung für die Farbe Grün im mittleren Bild.



*Abbildung 4-7: Intensitätsverteilung von unterschiedlichen Farben bei konstanter Parametereinstellung*

Während bei der weißen Farbe die Empfangseinheit überbelichtet wird, reichen die empfangenen Signale bei der schwarzen Farbe für eine Vermessung der Kontur nicht aus. In beiden Fällen kann die Auswertungssoftware im Sensorsystem das Videobild nicht verarbeiten. Die Intensitätsverteilung des zurückgestrahlten Lichts ist ohne Vermessung der jeweiligen Farben somit nicht allgemein vorher-sagbar.

Die bisherige manuelle Voreinstellung der Sensorparameter für eine spezifische Bauteiloberfläche ist somit nicht mehr möglich. Deshalb wird im Weiteren der grundlegende Einfluss der Werkstoffoberfläche auf die Qualität der reflektierten Anteile der Lichtbalken dargelegt.

### 4.2 Oberflächeneigenschaften

Wird eine Oberfläche bestrahlt, so kann die auftreffende Strahlung grundsätzlich in die Anteile Transmission, Absorption und Reflexion aufgeteilt werden. Die Transmission beschreibt dabei die Durchlässigkeit eines Bauteils für Strahlung. Bei metallischen Oberflächen ist, abgesehen von dünnen aufgedampften Metallschichten, der Transmissionsgrad Null [NAUMANN & SCHRÖDER 1992]. Unter Absorption wird der dissipierte Strahlungsanteil verstanden, der an Metallflächen besonders stark auftritt. Die Reflexion gibt den zurückgeworfenen Strahlungsanteil an. Nach dem Energieerhaltungssatz ist die Summe der Anteile aus Transmission, Absorption und Reflexion gleich der auftreffenden Strahlungsleistung [PEREZ 1996]. Diese Kennzahlen beschreiben nur die Aufteilung der Strahlungsleistung, nicht aber ihre räumliche Verteilung. Für die in der Sensorik eingesetzte Empfängereinheit ist vor allem der reflektierte Anteil der Strahlung erheblich. Deshalb konzentrieren sich die weiteren Ausführungen auf das Reflexionsverhalten der Oberflächen.

Zur optischen und lichttechnischen Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften von Werkstoffen werden so genannte lichttechnische Stoffkennzahlen definiert [DIN 5036A, DIN 5036B, DIN 5036C, SCHRÖDER 1986]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind vor allem der Reflexionsgrad und das Streuvermögen einer Oberfläche von Interesse, da diese die größte Aussagekraft hinsichtlich der Intensitätsverteilung der reflektierten Strahlung aufweisen. Mit dem Reflexionsgrad wird das Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtstrahlung bezeichnet. Wird ein Lichtstrom unter einem bestimmten Einfallswinkel auf eine Licht reflektierende Fläche gerichtet, so wird ein Teil davon diffus zurückgeworfen (vgl. Abbildung 4-8). Diese Kennziffern hängen besonders von der Struktur der Werkstückoberfläche und ihrer Farbe ab.

#### 4.2.1 Einflüsse durch die Oberflächenstruktur

Je nach seiner Oberflächenbeschaffenheit reflektiert ein Körper eingestrahktes Licht mehr oder weniger stark. Abbildung 4-8 zeigt schematisch die Modellvorstellung verschiedener Reflexionszustände.

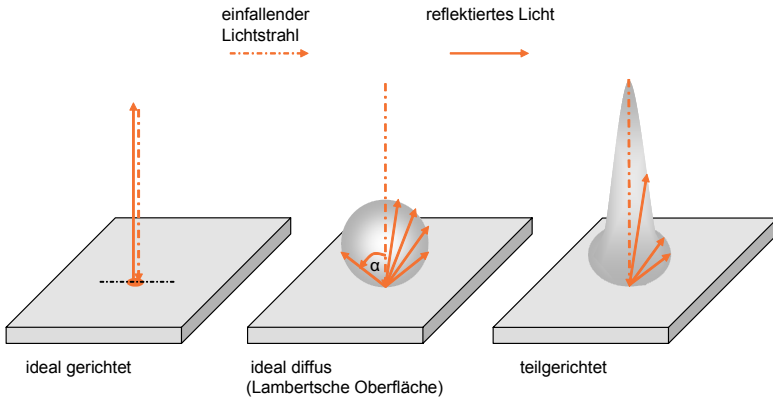


Abbildung 4-8: Reflexionseigenschaften verschiedener Oberflächen

Bei einem Werkstück mit ideal spiegelnder, optisch glatter Oberfläche wird der einfallende Lichtstrahl gerichtet reflektiert (vgl. Abbildung 4-8 links) [HAFERKORN 1990, HEIDENREICH 1998]. Die relative Orientierung von Oberfläche und Lichtstrahl bestimmen dabei die Reflexionsrichtung. Die zweite Idealvorstellung ist die der diffusen Reflexion (vgl. Abbildung 4-8 mitte). Diese tritt vor allem bei technisch rauen Oberflächen auf. Diese verhalten sich dann wie so genannte Lambert-Strahler [SCHRÖDER 1986]. Bei diesen ist die reflektierte Leuchtdichte in allen Richtungen konstant. Der bei der Vermessung von technischen Oberflächen in der Praxis relevante Fall ist eine Mischform aus spiegelnder und diffuser Reflexion (vgl. Abbildung 4-8 rechts). Der einfallende Lichtstrahl, dessen Maximum in Richtung der spiegelnden Reflexion liegt, wird keulenförmig reflektiert. Die Richtungsabhängigkeit der Reflexionseigenschaften wird in den technischen Daten eines Triangulationssensors durch die Angabe der maximalen Grenzneigung [DIN 32877] berücksichtigt. Weist die Oberflächentextur eine Vorzugsrichtung auf, zum Beispiel bei geschliffenen Oberflächen, so bildet sich eine Streukeule mit nicht-rotationssymmetrischen Winkelhalbwertsbreiten aus, was zu Messabweichungen führen kann.

In der Literatur werden zahlreiche Oberflächenstrukturen aus Keramik, Aluminium, Kunststoff und Stahl hinsichtlich ihres Reflexionsverhalten beschrieben, und auf die damit verbundene Problematik für die optische Erfassung hingewiesen [MÖHRKE 1991, SEIDEL 1992, STETTNER 1994, REEK 2000].

### 4.2.2 Einflüsse durch die Werkstückfarbe

Trifft eine reflektierte Strahlung in das menschliche Auge, so bewirkt der im sichtbaren Bereich (VIS-Gebiet) liegende Strahlungsanteil im Gehirn eine Farbempfindung (vgl. Tabelle 4-1).

Wellenlänge $\lambda$ in [nm]	Einordnung		
100-280	Ultraviolette- Strahlung (UV)	UV-V	VUV (Vakuum UV)
280-315		FUV	FUV (fernes UV)
315-380		UV-B	mittleres UV
380-780	sichtbare Licht (VIS)	UV-A	nahes UV
		violett	bis 424nm
		blau	424nm-486nm
		blaugrün	486nm-517nm
		grün	517nm-527nm
		gelbgrün	527nm-575nm
		gelb	575nm-585nm
	orange	585nm-647nm	
	rot	ab 647nm	
780-1400	Infrarot-Strahlung (IR)	IR-A	
1400-3000		IR-B	MIR (mittleres IR)
ab 3000		IR-C	FIR (fernes IR)

Tabelle 4-1: Klassifizierung der Spektralfarben [in Anlehnung an FALK 1990]

Von Lichtquellen oder beleuchteten Körpern werden daher über die Augen verschiedene Farbeindrücke aufgenommen, die sich hinsichtlich Helligkeit (quantitativ) und Sättigung (qualitativ) unterscheiden. Damit ist die Grundempfindung gemeint, die ein Normalbeobachter eindeutig zuordnen kann [NAUMMAN & SCHRÖDER 1992]. Die Farbempfindung ist jedoch nicht bei jedem Menschen gleich [FALK 1990]. Deshalb ist es schwierig, die unterschiedliche Wahrnehmung von Farben durch das menschliche Auge technisch exakt nachzubilden. Die Farbmeterik beschäftigt sich mit der Aufgabe, die Farbreize der spektralen Strahlungsverteilung eines leuchtenden Körpers bzw. die reflektierte Strahlung eines beleuchteten Körpers durch Zahlen zu bestimmen [WYSZECKI & STILES 2000, AMIS 2002]. Die Farbmeterik muss damit den physikalischen mit dem biologischen Bereich verknüpfen. Auf der physikalischen Seite kann die von einer

Lichtquelle ausgehende Strahlung unmittelbar durch Transmission, Remission oder subtraktiver Mischung in das Auge gelangen. Die Remission entspricht dabei der Reflexion an einer farbigen Fläche. Finden diese Modifikationen zwei- oder mehrfach hintereinander statt, so wird von einer subtraktiven Mischung gesprochen, da bestimmte Farbanteile selektiv herausgefiltert werden. Auf biologischer Seite muss das normale farbsiehtüchtige Auge, das heißt der farbmetrische Normalbetrachter definiert werden [DIN 5033A]. Durch umfangreiche Messungen an Versuchspersonen wurden die Normspektralwertfunktionen (vgl. Abbildung 4-9) bestimmt und in Normen hinterlegt.

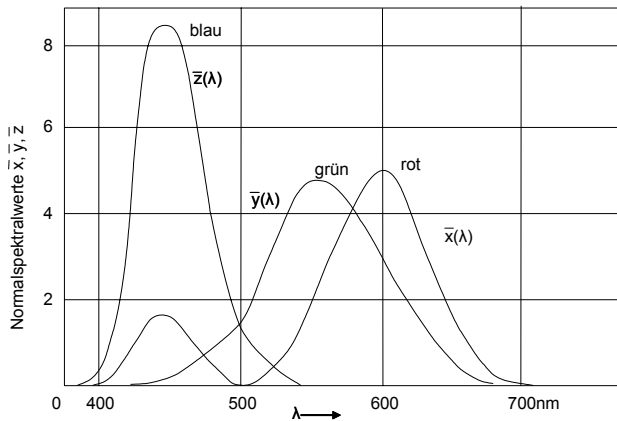


Abbildung 4-9: Normspektralwertfunktion [nach DIN 5033A]

Als Bezugsfarben, den so genannten Primärvalenzen, wurden durch internationale Übereinkunft die drei Spektralfarben Rot (R) mit einer Wellenlänge von  $\lambda=650$  nm, Grün (G) mit  $\lambda=546,1$  nm und Blau (B) mit  $\lambda=435,8$  nm festgelegt. Um zu einer günstigeren Darstellungsform zu gelangen, wurden die Primärvalenzen R, G, B durch rechnerische Transformation in die Normfarbwerte X, Y, Z überführt. Durch die Mischung der drei Bezugsfarben kann jede beliebige Farbe dargestellt werden. Zur geometrischen Farbdarstellung innerhalb einer ebenen Normfarbtafel (vgl. Abbildung 4-10) werden die zwei Koordinaten x und y, die so genannten Normfarbwertanteile, gebildet.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (\text{Gleichung 4-1})$$

## 4 Qualifizierung optischer Konturfolgesysteme

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (\text{Gleichung 4-2})$$

Die beiden Werte  $x$  und  $y$  geben somit den Farbwert der Farbe an. Der Prozentsatz von  $Z$  lässt sich aus  $x$  und  $y$  berechnen, da die Summe der drei Werte  $x$ ,  $y$ ,  $z$  immer eins ergeben muss [SCHRÖDER 1986]. In der Normfarbtafel liegen alle Farbborte auf der durch den Spektralfarbenzug und der Purpurgeraden begrenzten Fläche. Durch die Normfarbtafel sind damit alle Farben eindeutig bestimmbar, wobei die Farbempfindung stark von der Helligkeit abhängt.

Auf dem Rand der Farbtafel liegen die Orte aller Spektralfarben, das heißt der monochromatischen Strahlungen, sowie die Purpurgerade, welche die Mischfarben aus den Spektralenden Violett und Rot bildet. Der Farbort des energiegleichen Spektrums ist der Unbuntpunkt (U), der Ort aller Grautöne von Schwarz bis Weiß. Zwei Farben, die zusammen Weiß ergeben, heißen Komplementär. Rot und Zyan (griech. Kyanos: Kornblume für Tiefblau) ergeben für den Betrachter damit Weiß. Dieses wirkt genau so weiß wie normales weißes Licht, das alle Wellenlängen enthält. Dem Betrachter ist es daher nicht möglich, eine rot eingestrahlte Lichtlinie auf einem blauen Körper zu erkennen.

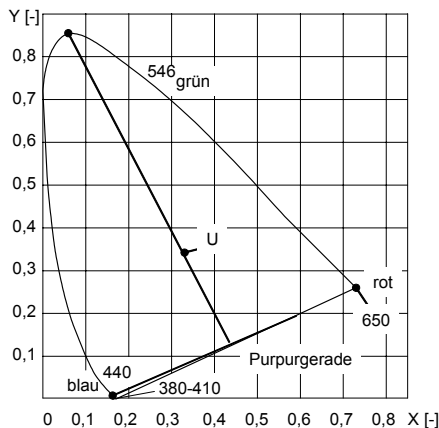


Abbildung 4-10: Normfarbtafel mit Spektralfarbenzug [nach SCHRÖDER 1986]

Farbe ist ein Produktqualitätsmerkmal, das nach ISO 900X Standards in vielen industriellen Anwendungen bestimmt werden muss. Messsysteme zur objektiven Farb- und Farbdifferenzbestimmung werden vor allem in Industriebereichen wie

der chemischen Industrie oder der Automobilindustrie eingesetzt. Zentrale Aufgabe der Farbmessung ist die Bestimmung der Normfarbwerte X, Y, Z durch geeignete Messverfahren und die anschließende rechnerische Auswertung. Daraus können unter anderem Farbmesszahlen sowie Farbabstände abgeleitet werden. Als Messverfahren kommen im Wesentlichen das Spektral-, das Dreibereichs- und das Gleichheitsverfahren zum Einsatz. Bei Messung der Körperfarbe von Nichtselbstleuchtern, also farbigen Oberflächen, sind die vorgegebenen spektralen und geometrischen Randbedingungen zu berücksichtigen [DIN 5033A, NAUMANN & SCHRÖDER 1992].

Das Grundmessgerät bei der Farbmessung nach dem **Spektralverfahren** [DIN 5036B] ist das Spektralfotometer, mit dem die Stoffkennzahl des farbigen Körpers als Funktion der Wellenlänge bestimmt wird. Diese müssen dann in die Normfarbwerte X, Y, Z umgerechnet werden. Dieses Messverfahren liefert zudem Informationen über die spezifischen spektralen Eigenschaften.

Bei dem **Dreibereichsverfahren** erfolgt die Farbmessung ohne Umweg über die Bestimmung der spektralen Körpereigenschaften [DIN 5036C]. Hier wird das Auge mit seinen Normspektralwertfunktionen durch drei fotoelektrische Empfänger nebeneinander messtechnisch nachgebildet. Das Ausgangssignal ist bei linearem Verhalten des Empfängers dem Farbwert direkt proportional. Damit ist eine schnelle und einfache Messung möglich.

Das **Gleichheitsverfahren** hingegen vermeidet jegliche physikalische Messung und stellt daher ein subjektives Messverfahren dar [DIN 5036A]. Durch eine visuelle Beobachtung wird die Gleichheit von zwei Farbflächen eingestellt. Dazu wird dem menschlichen Auge die zu messende Farbe in einer Sehhälfte zugewiesen, während in der anderen Hälfte eine durch Mischung kontinuierlich veränderbare Vergleichsfarbe erscheint. Bei Farbgleichheit werden die Mischanteile der Vergleichsfarbe abgelesen. Das Verfahren hat in dieser Form für technische Messungen eine eher untergeordnete Wichtigkeit, ist jedoch beim Vergleich mit Farbmustersammlungen weit verbreitet.

Im Gegensatz zu den Spektralverfahren erfordern die beiden zuletzt genannten Verfahren eine Messung unter Normbeleuchtung, was den apparativen Aufwand weiter erhöht.

Neben der vorangegangenen Klassifizierung und den Erläuterungen zu den Messmethoden von Farben ist die aktive Farbgebung von Gegenständen von entscheidender Bedeutung [KÜPPERS 1978]. Wenn Licht von einem Objekt re-

## 4 Qualifizierung optischer Konturfolgesysteme

flektiert wird, findet ein Absorptionsprozess statt, der dem Körper seine Farbe gibt. Dieser ist einem Filterprozess ähnlich und entspricht dem Vorgang des subtraktiven Mischens. Die Oberflächeneigenschaften können durch Reflexions- oder Rückstrahlkurven beschrieben werden [HECHT 1998]. Diese geben an, wie viel vom einfallenden Licht bei jeder Wellenlänge reflektiert wird. Die Reflexionskurven verschiedener Oberflächenfarben unterscheiden sich erheblich. Weiße Oberflächen reflektieren etwa  $2/3$  des einfallenden Lichts [NAUMANN & SCHRÖDER 1992]. Im Gegensatz dazu reflektieren schwarze Oberflächen nur wenige Prozent des einfallenden Lichts.

Weiter besteht ein Zusammenhang zwischen Beleuchtungsart und Körperfarbe. Die Intensitätsverteilung des reflektierten Lichts ergibt sich aus der Intensitätsverteilung des einfallenden Lichts und der Reflexionskurve (vgl. Abbildung 4-11).

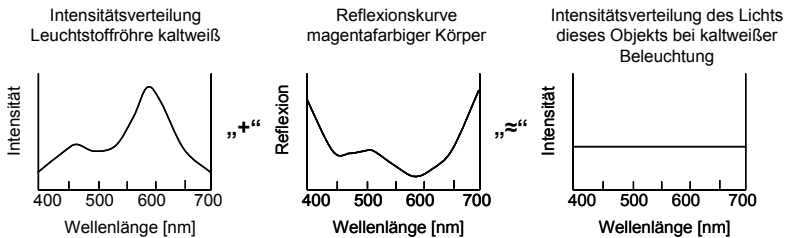


Abbildung 4-11: Intensitätsverteilung eines Körpers bei Beleuchtung mit kaltweißem Licht [nach FALK 1990]

Der in Abbildung 4-11 beispielhaft vorgestellte magentafarbige Körper verliert bei der Beleuchtung mit dem kaltweißen Licht einer Leuchtstoffröhre jede Farbe. Die subtraktiven Eigenschaften eines Objekts geben somit an, wie dieser Körper auf das beleuchtete Licht wirkt. Je nach Art der Beleuchtung und dem Betrachtungswinkel kann dieser ganz verschieden aussehen. Die Rückstrahlkurven der betrachteten Bauteiloberflächen haben demnach einen entscheidenden Einfluss auf die richtige Parametrierung des Sensorsystems.



### 4.3 Zusammenfassung

Die Verwendung von optischen Sensoren erlaubt prinzipiell einen flexibleren Robotereinsatz beim automatisierten Kleben. Insbesondere das Lichtschnittverfahren weist aufgrund seines prozessrobusten Aufbaus große Vorteile auf. Die bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten im Umfeld von Lichtschnittsensoren konzentrierten sich in erster Linie auf die Sensorauslegung, Kalibrierung, Belichtungsregelungen sowie der Bereitstellung von echtzeitfähigen Hardwareplattformen. Die erarbeiteten Methoden gelten vor allem für die Schweißtechnik und ihre produktionstechnischen Randbedingungen [ZUNKER 1993, NITIN & ASOK 1992, HORN 1994, KIM U.A. 1996, VODANOVIC 1996, ROOSEN 1997].

Nur unvollständig wurde in der Literatur hingegen der Einfluss von verschiedenen Werkstückoberflächen betrachtet. Hierbei müssen

- sowohl das Verhalten der Sensorsysteme bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturen als auch der Oberflächenfarben,
- der externe Beleuchtungszustand und
- der Betrachtungswinkel

berücksichtigt werden, da die auftretenden verschiedenen Reflexionsgrade die erzielbare Auswertung des Kamerasignals signifikant reduzieren können.

Eine manuelle Anpassung der Sensorsysteme auf die jeweiligen Bauteiloberflächen ist wegen des hohen zeitlichen Einstellaufwands nicht zweckmäßig. Als weitere Nachteile dieser Vorgehensweise sind die häufig fehlende Dokumentation sowie die Abhängigkeit der erzielbaren Produktqualität von der Erfahrung des jeweiligen Mitarbeiters zu nennen. Darüber hinaus können bei dieser Arbeitsweise veränderliche Prozessbedingungen nur bedingt berücksichtigt werden. Hier ist es erforderlich, die vom Sensorsystem zur Verfügung gestellten Regelparameter vor jedem Bearbeitungsvorgang am Startpunkt neu einzustellen. Die dazu notwendigen Parameteranpassungen können innerhalb der Einstellphase nicht sorgfältig durchgeführt werden. Daher wird im folgenden Kapitel eine Methode entwickelt, die eine automatische Parameteranpassung an wechselnde Oberflächeneigenschaften erlaubt.



# 5 Methode zur Parameteranpassung

Insbesondere im Bereich der Endmontage variieren die Oberflächeneigenschaften der Bauteile stark. Dies erfordert eine kontinuierliche Adaption des optischen Sensorsystems an die jeweils vorliegende Oberfläche. Das ist jedoch nur durch eine geeignete sensorinterne Parameteranpassung erreichbar. Dazu ist es notwendig, den Zusammenhang zwischen der Fertigungsumgebung und den entsprechenden Einstellparametern zu ermitteln. Im Rahmen dieses Kapitels werden deshalb die möglichen Parametereinstellungen experimentell untersucht und anschließend eine Methode zur automatischen Parameteranpassung erarbeitet.

## 5.1 Beschreibung der Versuchsmethode

Die Ermittlung der Einstellparameter wird anhand verschiedener experimenteller Ansätze durchgeführt. Im ersten Schritt muss eine zweckmäßige Analysereihenfolge der ausgewählten Farbtöne festgelegt werden. Basierend auf dieser Einteilung werden im zweiten Schritt die dazugehörigen Einstellparameter in Abhängigkeit von Oberflächenfarbe, Beleuchtungszustand und Betrachtungswinkel erfasst. In Anlehnung an die Vorgehensweise zur Prozessoptimierung mit statistischer Versuchsmethodik [PFEIFFER 1993] wird dabei die dreiphasige Vorgehensweise mit den Schritten Planung, Durchführung und Analyse übernommen (vgl. Abbildung 5-1).

Daher ist das Ziel der Versuchsmethode, systematisch

- die Art der Einflüsse auf das Sensorsystem festzustellen,
- die Höhe der Einflussnahme der bekannten Prozessparameter zu bestimmen und
- durch eine geeignete Variation der Einstellparameter deren Grenzwerte zu finden,

innerhalb der ein robuster sensorgeführter Auftragsprozess gewährleistet werden kann. Für die Untersuchungen werden die wechselnden Oberflächeneigenschaften als variable Prozessparameter definiert.

<b>Planung</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Zusammenstellung und Auswahl der Einflussfaktoren<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Prozess- und Einstellparameter</li><li>➤ Kenngrößen</li><li>➤ Störgrößen</li></ul></li><li>• Abschätzung der Wechselwirkungen</li><li>• Erstellung des Versuchsplans</li><li>• Zusammenstellung und Auswahl der Messtechnik</li></ul>
<b>Durchführung</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ermittlung der Einstellwerte</li><li>• Erfassung der Kenngrößen</li></ul>
<b>Analyse</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Auswertung der Versuchsergebnisse</li><li>• Interpretation der Ergebnisse</li></ul>

Abbildung 5-1: Dreiphasige Vorgehensweise der Versuchsmethode [in Anlehnung an Pfeiffer 1993]

### 5.1.1 Versuchsplanung und -durchführung

Für die Durchführung der Versuche zur Bestimmung der Farbeneinteilung und Einstellparameter werden als Farbproben die 40 Musterplättchen eines Basis-RAL-Farbfächers herangezogen. In der metallverarbeitenden Industrie werden die Farben im Allgemeinen nach ihrer RAL-Nummer eingeordnet. Die RAL-Farben sind mit einer vierstelligen Nummer versehen und umfassen eine Farbsammlung von aktuell 210 Farben, welche zudem in die Register matte und glänzende Farbtöne unterteilt sind. Die standardisierte Basissammlung ist international anerkannt und damit ein idealer Maßstab für die Farbgebung. Die RAL-Nummern lassen sich in die jeweiligen RGB-Zusammensetzungen umrechnen [RAL 2003]. Eine ausführliche Zuordnung der RAL-Nummer zu den einzelnen Farbtönen ist im Anhang gegeben.

#### 5.1.1.1 Versuche zur Farbeneinteilung

Zur Festlegung einer geeigneten Farbeneinteilung wird die Rückstrahlkurve der unterschiedlichen Farbplättchen in Bezug auf das einfallende Licht bestimmt. Als

Lichtquelle dient eine Laserdiode mit einer Wellenlänge von 690 nm. Der Auftreffwinkel der Strahlung auf die Probekörper beträgt 22,5°. Die reflektierte Strahlung wird über eine Photodiode, die senkrecht zur Bauteiloberfläche steht, empfangen. Dieser Messaufbau mit einfacher Sende- und Empfangseinheit entspricht einem typischen Sensorsystem zur Triangulation (vgl. Abbildung 5-2). Die Messungen erfolgten in einer abgedunkelten Versuchsumgebung, um externe Störeinflüsse zu vermeiden.

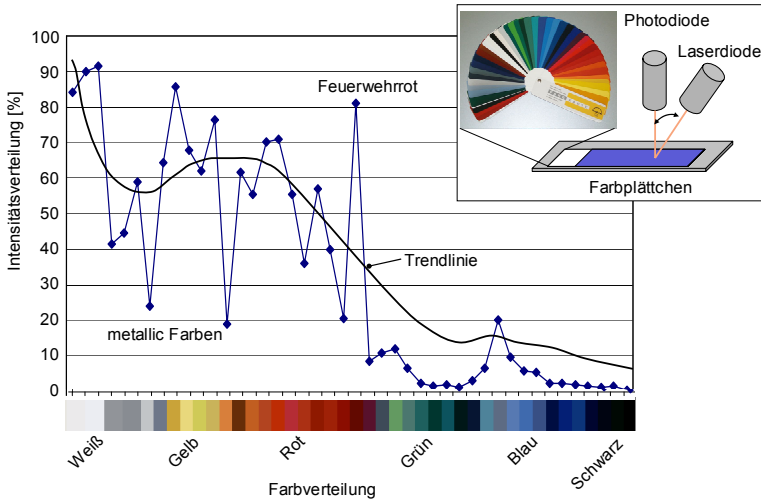


Abbildung 5-2: Verteilung der remittierten Intensitäten

Die jeweils gemessenen Lichtanteile werden den entsprechenden Farben zugeordnet. Die erste Einordnung erfolgt dabei nach dem visuellen Eindruck von hellen nach dunkeln Grundfarbtönen, welche auch bei der Einteilung nach dem RAL-Standard vorgeschlagen wird. Der Beginn des dunklen Farbbereichs wird ab den grünen Farben festgelegt. Die Grundfarbtöne selbst sind wiederum von Hell nach Dunkel eingestuft.

Bei der gewählten Reihenfolge zur Farbeneinteilung nehmen die jeweiligen Reflexionsgrade grundsätzlich ab (vgl. Abbildung 5-2). Da die einzelnen Metallic-Farben den entsprechenden Farbgrundtönen zugewiesen wurden, ergeben sich in diesem Bereich starke Abweichungen im Reflexionsverhalten. Die gewünschten Glanzeffekte bei Metallic-Lackierungen beruhen auf einem hohen Anteil an

gerichteten beziehungsweise teilgerichteten Reflexionen an der Werkstückoberfläche (vgl. Abbildung 4-8). Der diffus reflektierte verbleibende Rest ist dementsprechend gering. Insbesondere bei hellen Farben, wie Silbermetallic-Lackierungen ist dieser Effekt deutlich zu erkennen. Die starke Abweichung im roten Abschnitt ist auf die Signalfarbe Feuerwehrröt zurückzuführen, die durch Lumineszenz die Leuchterscheinung der Farbe stark erhöht.

Aus der ermittelten Intensitätsverteilung geht hervor, dass für die betrachteten Farben eine große Bandbreite an unterschiedlichen Reflexionsgraden besteht. Da sich eine Einteilung nach der Intensitätsverteilung in der Praxis aufgrund des hohen Messaufwands als unhandlich gestaltet, wird für die folgenden Untersuchungen die bereits vorgeschlagene RAL-Einteilung als Bezugsgröße herangezogen.

### 5.1.1.2 Versuche zur Parametereinstellung

Zur Ermittlung der möglichen Parametereinstellungen wird in zwei Stufen vorgegangen. In der ersten Stufe werden die optimalen Einstellwerte der Parameter bestimmt. Die zweite Stufe dient zur Festlegung der jeweiligen Ober- und Untergrenzen, bei der noch eine gültige Parametereinstellung erreicht werden kann. Für die Untersuchungen wird der kommerziell erhältliche Mehrlinien-Lichtschnittsensor SCOUT eingesetzt [BARTHEL 2001]. Dieser stellt mit den Verstellparametern Helligkeit, Kontrast, Schwelle und Pixeltoleranz die geforderten Systemvariablen zur Parameteranpassung bereit. Da die Probekörper alle die gleiche Oberflächenrauigkeit von  $0,046 \mu\text{m}$  aufweisen, kann dem Parameter Pixeltoleranz ein fester Wert zugewiesen werden. Zur Abschirmung von Streulicht wurde der Messaufbau so gestaltet, dass der Versuchsraum wahlweise vollständig abgedunkelt werden kann.

Um in der ersten Stufe Art und Höhe der Beeinflussung der Parameter Helligkeit, Schwelle und Kontrast zu bestimmen, wurden anhand geplanter Versuchsreihen [REINHART U.A. 1996] folgende Einstellungsversuche mit ausgewählten Werkstofffarben konzipiert (vgl. Tabelle 5-1). Der externe Beleuchtungszustand wird dabei als Störgröße betrachtet. Die Begrenzung des Sensoranstellwinkels auf  $13^\circ$  ergibt sich aus der Triangulationsbeziehung zwischen dem eigentlichen Betrachtungswinkel und dem Triangulationswinkel des verwendeten Sensorsystems nach dem Scheimpflug-Prinzip.

Sensoranstellwinkel			Beleuchtungszustand	
-13°	0°	+13°	Abgedunkelt	Umgebungsbeleuchtung
+	--	--	+	--
--	+	--	+	--
--	--	+	+	--
+	--	--	--	+
--	+	--	--	+
--	--	+	--	+
Legende:                                    +: durchgeführt                                    --: nicht durchgeführt				

*Tabelle 5-1: Versuchsplan zur Ermittlung des Einflusses von Sensoranstellwinkel und Beleuchtungszustand*

Als Kennwert zur Beurteilung der Güte der Einstellparameter wird die Bildqualität herangezogen. Diese wird automatisch von der Software der Bildauswertung des Sensorsystems am Ende der Bearbeitungsaufgabe ermittelt und ist definiert als:

$$\text{Bildqualität} = \frac{\sum \text{gültige Bilder}}{\sum \text{gültige Bilder} + \sum \text{ungültige Bilder}} \quad (\text{Gleichung 5-3})$$

Eine optimale Parametereinstellung liegt dann vor, wenn die erreichte Bildqualität über 95% liegt [BARTHEL 2001].

Zur Durchführung der Versuche zur Parameteranpassung wurde der Sensorkopf an einer manuell einstellbaren Dreiachskinematik des Roboterwerkzeugs montiert, die neben einer variablen Einstellung des Sensorvorlaufs auch eine Veränderung der Seiten- und Höhenlage sowie des Anstellwinkels erlaubt (vgl. Abbildung 5-3).

## 5 Methode zur Parameteranpassung

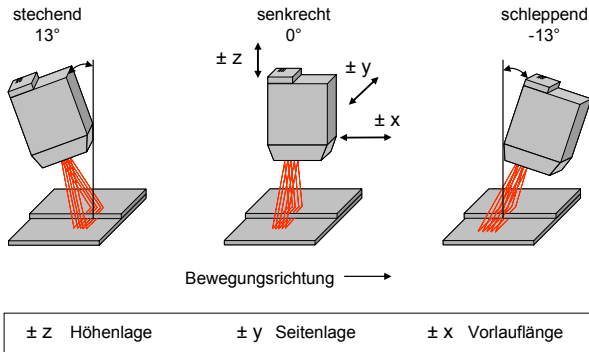


Abbildung 5-3: Verstellmöglichkeiten des Sensorkopfs

Die zu untersuchenden Probekörper werden auf einer Trägerplatte positioniert. In Abbildung 5-4 sind die geometrischen Abmessungen der Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Der Sensorkopf wird mit Hilfe eines Roboters über die Probekörper bewegt. Als Suchbereich des Sensors wird hier der Bereich verstanden, in dem die Bildverarbeitung die vorgegebene Kontur in ihrem spezifischen Umfeld zum ersten Mal erkannt haben muss.

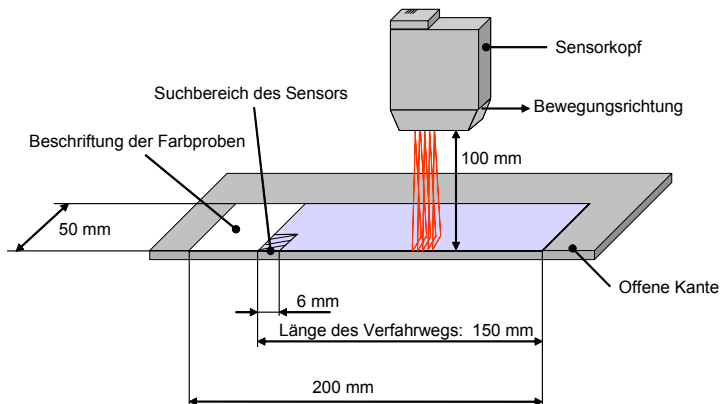


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

Neben den zu ermittelnden Einstellparametern müssen noch eine Reihe weiterer sensorspezifischer Parameter festgelegt werden. Diese sind für die Reproduzier-



barkeit der Messergebnisse notwendig. Die jeweiligen Einstellwerte und Randbedingungen sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

<b>Einstellparameter</b>	<b>Einstellwert</b>
Konturtyp	Offene Kante
Lichtleistung der Laserdiode	Konstant mit 1 mW
Oberflächenstruktur	Klarlack mit 0,046 $\mu\text{m}$ Rauheit
Oberflächenfarben	40 Farben nach RAL-Standard
Sensorabstand zum Bauteil	100 mm
Sensorvorlauf	44 mm
Pixeltoleranz	0,2
Suchbereich links	15 mm
Suchbereich rechts	15 mm
Skalierung der Einstellparameter	0,1
Weglänge	150 mm
Verfahrgeschwindigkeit	2 m/min

*Tabelle 5-2: Überblick über Einstellwerte für die Versuchsdurchführung*

Für die systematische Versuchsdurchführung wurde ein detaillierter Versuchablauf in Form eines Blockdiagramms festgelegt (vgl. Abbildung 5-5). Zu Beginn wird der Sensor durch den Roboter automatisch an die Versuchskörper im Bereich des Sensorsuchfelds herangefahren. Dort erfolgt die manuelle Eingabe der Einstellparameter Helligkeit, Schwelle und Kontrast innerhalb der vom Sensorsystem vorgegebenen Skalierung. Dies wird solange durchlaufen bis eine erste Bilderkennung möglich ist. Nach dem Start des Konturfolgeprogramms findet die sensorinterne Bildauswertung statt. Bei dem automatischen Abfahren wird eine genau definierte Strecke mit konstanter Geschwindigkeit zurückgelegt, um eine Vergleichbarkeit der erhaltenen Bildqualitäten sicher zu stellen. Wird bei der Bildauswertung in der ersten Stufe eine Bildqualität von über 95% erhalten, so wird der entsprechende Farbton mit den dazugehörigen optimalen Einstellpa-

## 5 Methode zur Parameteranpassung

---

parametern für die spätere Auswertung tabellarisch zusammengefasst. Am Ende einer Versuchsreihe werden die Beleuchtungsbedingungen oder/und der Sensorstellwinkel geändert und ein neuer Testlauf gestartet.

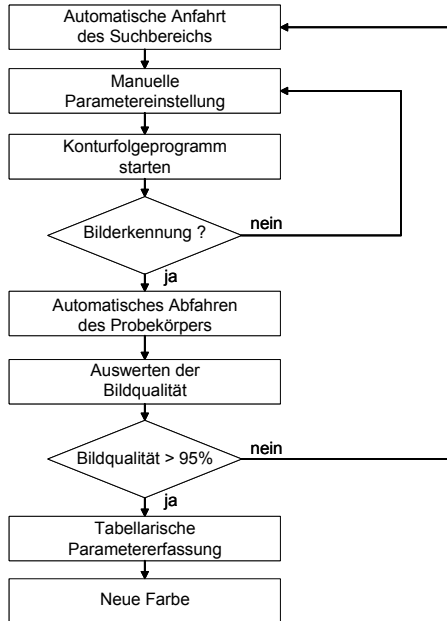


Abbildung 5-5: Blockdiagramm zum Versuchsablauf

Basierend auf den optimalen Einstellparametern werden in der zweiten Stufe die einzelnen Werte für deren Ober- und Untergrenze bestimmt. Die Untersuchung wird dabei mit der Einfaktormethode durchgeführt [PFEIFER 1993, S. 102]. Dazu werden jeweils zwei Parameter bei optimaler Einstellung festgehalten und der dritte Parameter variiert. Die zu erreichende Bildqualität wird hierbei auf 85% herabgesetzt. Bis zu diesem Grenzwert ist noch eine zuverlässige Prozessführung möglich [BARTHEL 2001]. Durch die Ermittlung der Grenzbereiche kann der größtmögliche Lösungsraum für die einzelnen Einstellparameter aufgespannt werden. Innerhalb dieses Lösungsraums sollen anschließend geeignete Parameterkombinationen identifiziert werden, welche die Bearbeitung eines breiten Spektrums an Farben zulassen.

5.1.2 Datenanalyse

Innerhalb der Datenanalyse werden die zuvor erfassten Datenmengen strukturiert und ausgewertet. Für die unterschiedlichen Versuchsbedingungen wurden den jeweiligen Farbtönen feste Parameterwerte zugewiesen (vgl. Tabelle 5-3). Der Wertebereich der Einstellparameter entspricht der Skalierung des Softwaresystems [BARTHEL 2001]. Die Parameter können zwischen den Werten 0 und 1 variiert werden. Somit können die Höhe der Einflussnahme der Oberflächeneigenschaften und die Produktionsbedingungen auf die Kenngröße Bildqualität sowie deren Wechselwirkung untereinander eindeutig beschrieben werden. Für die betrachteten Farben wurde mindestens eine gültige Parametereinstellung gefunden.

Lackfarbe	Helligkeit			Schwelle			Kontrast			Bildqualität	
	Optimum	Untergrenze	Obergrenze	Optimum	Untergrenze	Obergrenze	Optimum	Untergrenze	Obergrenze	Optimum	Grenze
Cremeweiß	0,3	0,0	0,6	0,5	0,3	0,9	0,7	0,3	1,0	99%	89%
Reinweiß	0,3	0,0	0,6	0,5	0,3	0,9	0,7	0,3	1,0	98%	88%
Verkehrsweiß	0,3	0,0	0,6	0,5	0,3	0,9	0,7	0,3	1,0	98%	88%
Weißaluminium	0,4	0,1	0,8	0,5	0,1	0,8	0,7	0,2	1,0	98%	88%
Platin-Metallic	0,4	0,2	0,9	0,5	0,0	0,7	0,7	0,3	1,0	99%	89%
Lichtgrau	0,3	0,0	0,8	0,5	0,1	0,9	0,8	0,3	1,0	98%	88%
Silverstone-Metallic	0,5	0,3	0,9	0,5	0,1	0,7	0,7	0,1	1,0	98%	88%
Narzissengelb	0,3	0,0	0,7	0,5	0,1	0,9	0,7	0,3	1,0	99%	89%
Zinkgelb	0,3	0,0	0,6	0,5	0,2	0,9	0,7	0,3	1,0	98%	88%
Rapsgelb	0,3	0,0	0,7	0,4	0,1	0,9	0,7	0,3	1,0	98%	88%
Gintergelb	0,3	0,0	0,7	0,5	0,1	0,9	0,7	0,3	1,0	98%	88%
Tieforange	0,4	0,0	0,6	0,5	0,3	0,9	0,7	0,2	1,0	98%	88%
Gold-Orange-Metallic	0,4	0,2	0,9	0,5	0,0	0,6	0,6	0,4	1,0	98%	88%
Reinorange	0,4	0,0	0,6	0,5	0,3	0,9	0,7	0,2	1,0	99%	89%
Tieforange	0,4	0,0	0,6	0,5	0,3	0,9	0,7	0,2	1,0	98%	88%
Verkehrsrot	0,3	0,0	0,5	0,5	0,2	0,9	0,7	0,3	1,0	98%	88%

Tabelle 5-3: Ausschnittsweise Darstellung der ermittelten Parametereinstellungen bei 0° und abgedunkeltem Versuchsraum

Im Weiteren werden die erfassten Daten auf ableitbare Tendenzen beziehungsweise Regelmäßigkeiten in der Verteilung der Einstellparameter in Bezug zur gewählten Farbeinteilung untersucht. Mit Hilfe der Regressionsanalyse [PFEIFFER 1993, S. 111] werden die jeweiligen Trendkurven für die Parameter Helligkeit, Schwelle und Kontrast bestimmt.

In Abbildung 5-6 ist der Verlauf für die optimale Einstellung des Parameters Helligkeit bei einem Anstellwinkel von 0° und Abschirmung gegenüber der Außenbeleuchtung dargestellt.

## 5 Methode zur Parameteranpassung

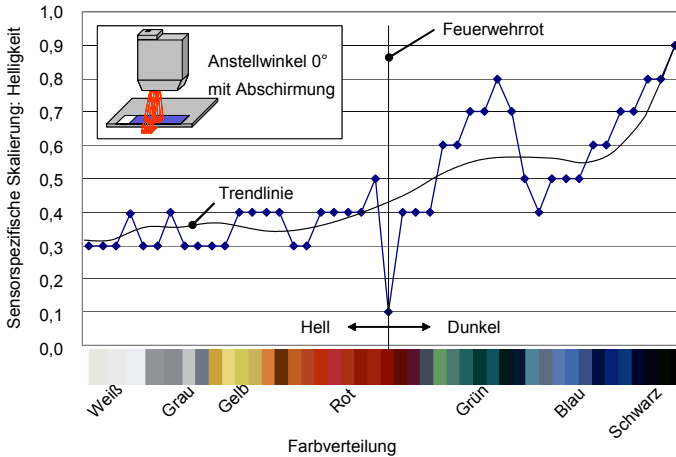


Abbildung 5-6: Darstellung des optimalen Einstellparameters Helligkeit

Es ist zu erkennen, dass der Einstellparameter Helligkeit über das untersuchte Farbenspektrum erheblich variiert. Dennoch lässt sich eine grobe Einteilung in die Bereiche helle und dunkle Farben vornehmen, da nach den rötlichen Farben die Einstellwerte signifikant steigen. Bei den hellen Farbtönen müssen die Parameter nur in einem engen Bereich angepasst werden. Für die dunklen Farbtöne hingegen ist eine ausgedehnte Anpassung notwendig. Das Absinken der Einstellwerte im dunklen Bereich ist auf die hellen Farbtöne bei den dunklen Grundfarben, zum Beispiel Hellblau, zurückzuführen.

Ein eindeutiger und fester Zusammenhang zwischen Einstell- und Farbwert ist nicht herstellbar. Dies gilt in gleicher Weise für die Einstellparameter Schwelle und Kontrast (vgl. Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8).

## 5.1 Beschreibung der Versuchsmethode

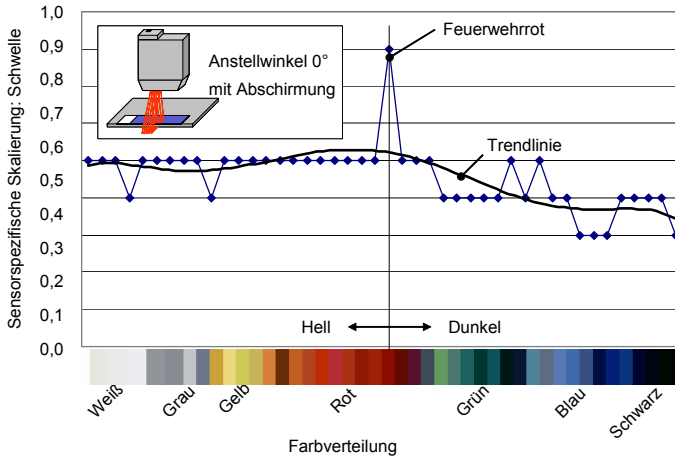


Abbildung 5-7: Darstellung des optimalen Einstellparameters Schwelle

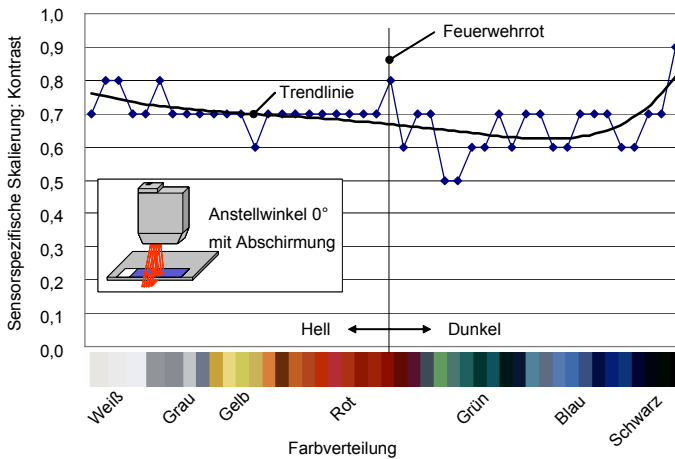


Abbildung 5-8: Darstellung des optimalen Einstellparameters Kontrast

Aus den oben aufgeführten Diagrammen ist ersichtlich, dass der Parameter Helligkeit aufgrund der beträchtlichen Schwankungen im Kurvenverlauf den größten Einfluss auf die Bildqualität hat. Als Tendenzen für eine spätere Bearbeitung der Daten können eine Erhöhung der sensorspezifischen Helligkeitswerte sowie eine

Erniedrigung der Schwellen- und Kontrastwerte hin zu den dunklen Farben abgeleitet werden. Bei sehr dunklen Farben müssen jedoch die Kontrastwerte nach oben korrigiert werden.

Im Weiteren wird untersucht, ob die ermittelten sensorinternen Einstellparameter mit der extern gemessenen Intensität korrelieren. Die allgemeinen Kennzahlen für die Materialeinwirkung auf Strahlung [NAUMANN & SCHRÖDER 1992, DIN 5036A] können nur sehr begrenzt zur Beurteilung dieser Zusammenhänge herangezogen werden, da diese ohne Empfängereinfluss dargestellt werden. Am Beispiel des Einstellwerts Helligkeit werden deshalb die ermittelten optimalen Parametereinstellungen und die remittierte Intensität gegenübergestellt und verglichen. Abbildung 5-9 zeigt, dass bestimmte Tendenzen aus extern gemessenen und sensorinternen Parametereinstellung dargestellt werden können. So gilt für den Parameter Helligkeit: Je höher die remittierte Intensität an der Farboberfläche, desto niedriger ist dieser zu wählen. Ein fester funktionaler Zusammenhang zwischen den gezeigten Kurven kann nicht hergestellt werden. Hauptsächlich die Metallic-Lackierungen und Sonderfarben erschweren eine allgemeingültige Aussage zwischen Intensitätsverlauf und sensorinternen Parametern.

Im Gegensatz zu standardisierbaren externen Messmethoden, arbeitet die sensorinterne Messtechnik mit individuellen optischen Filtern und Linsen sowie eigenen Algorithmen zur Signalverarbeitung. Diese definieren die jeweiligen Produkteigenschaften des Sensorsystems. Insbesondere das Empfängersystem mit der CCD-Kamera und ihren unterschiedlichen Kennlinien, Shutter- und Blenden-einstellungen ist nur spezifisch kalibrierbar.

Zur weiteren Datenanalyse werden deshalb ausschließlich die sensorspezifischen Einstellparameter näher untersucht.

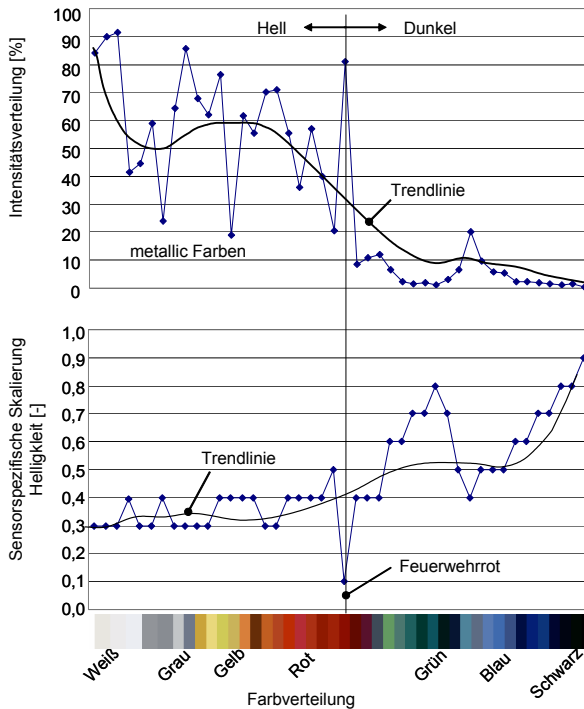


Abbildung 5-9: Beispielhafte Gegenüberstellung der extern gemessenen Intensitätsverteilung und dem sensorinternen Einstellparameter Helligkeit

Neben der Ermittlung der optimalen Einstellparameter, bei der eine Bildgüte von über 95% erreicht werden kann, wurden daher in der zweiten Stufe die Grenzbereiche zu den jeweiligen Einstellungen erfasst. Die Festlegung einer Unter- und Obergrenze für die Einstellwerte vergrößert den zur Anpassung in Frage kommenden Lösungsraum beträchtlich. In Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 sind die wesentlichen Ergebnisse mit den Anstellwinkeln  $0^\circ$  und  $13^\circ$  bei einer äußeren Abschirmung für die Parameter Helligkeit und Schwelle beispielhaft zusammengefasst und gegenübergestellt. Eine eindeutige Wechselwirkung der Einstellparameter untereinander ist hierin nicht erkennbar. Tendenziell erfordern niedrigere Helligkeitswerte eine Erhöhung der Parameterwerte Schwelle und Kontrast.

## 5 Methode zur Parameteranpassung

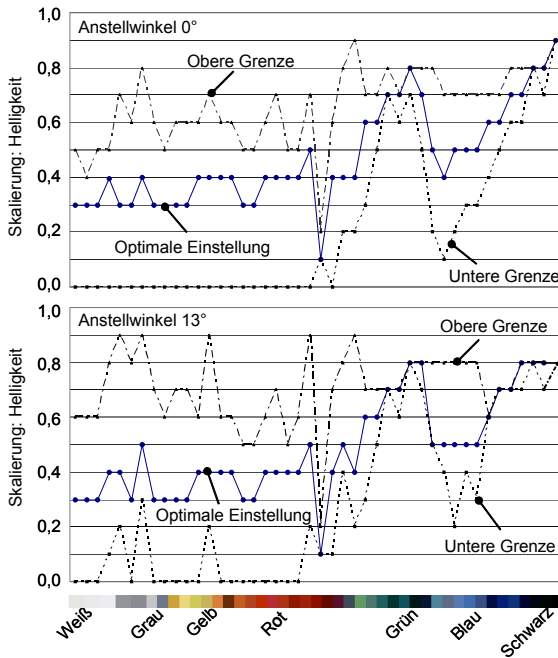


Abbildung 5-10: Gegenüberstellung der ermittelten Ober- und Untergrenzen des Einstellparameters Helligkeit bei verschiedenen Anstellwinkeln



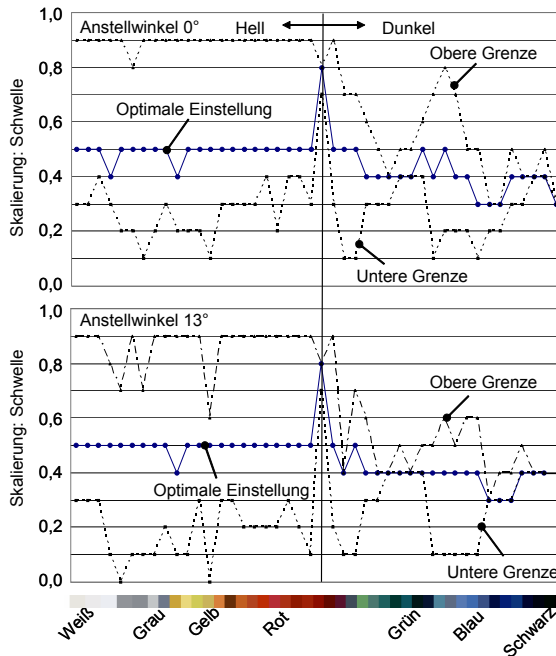


Abbildung 5-11: Gegenüberstellung der ermittelten Ober- und Untergrenzen des Einstellparameters Schwelle bei verschiedenen Anstellwinkeln

Die erhaltenen Ober- und Untergrenzen sind vor allem im hellen Farbbereich sehr breit aufgefächert. Hier steht eine Vielzahl an unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten von Einstellparametern zur Verfügung. Deutlich eingeschränkt werden diese Grenzwerte bei den Metallic-Farben und den dunklen Farben. Hier sind nur wenige oder teilweise nur eine Parameterkombination zulässig.

Insgesamt sind zwischen den einzelnen Anstellwinkeln keine charakteristischen Unterschiede sichtbar. Bei der optimalen Parameterzuordnung verlaufen die Einstellkurven ähnlich (vgl. Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11). Auch für die jeweiligen Grenzwerte ergeben sich keine größeren Verschiebungen. Lediglich bei dunklen und damit stark absorbierenden Farben, insbesondere bei schwarzen Metallic-Lackierungen, sind bei einem Anstellwinkel von 13° nur exakt definierte Einstellwerte erlaubt.

## 5 Methode zur Parameteranpassung

---

Die Untersuchungen ohne Abschirmung innerhalb der Fertigungsumgebung ergaben folgende Ergebnisse:

- Der Rotlichtanteil aus der Umgebung verursacht keine oder nur eine leichte Verschiebung der Parameter. Die schwarzen Metallic-Lackierungen sind hiervon am meisten betroffen. Diese Verschiebung hängt vom Tagesverlauf und der Höhe der direkten Sonneneinstrahlung ab. Zudem vermindern die optischen Filter des Sensorsystems, die nur für einen bestimmten Wellenlängenbereich durchlässig sind, das Eindringen von Störlicht.
- Bei Hallenlicht treten keine Veränderungen auf, da bei Leuchtröhren der Rotlichtanteil vernachlässigt werden kann [FALK 1990].

Somit ist festzustellen, dass die lichttechnischen Umgebungseinflüsse in der Produktion keine nennenswerten Störungen verursachen und deshalb nur bedingt berücksichtigt werden müssen.

Die erhaltenen Einstellwerte der Parameter wurden in Tabellenform katalogisiert (vgl. Tabelle 5-3). Mit Kenntnis dieser Werte sind die derzeitigen Einsatzgrenzen der verwendeten Sensorik eindeutig bestimmt. Durch die Überlagerungstechnik [PFEIFFER 1993, S. 119] werden die gesammelten Tabellen im Hinblick auf einen gemeinsamen Wertebereich der ermittelten Einstellparameter untersucht. Für die ausgewählten Farben können bei einer geforderten Bildqualität von über 85% fünf feste Parametereinstellungen abgeleitet werden (vgl. Tabelle 5-4).

	Parameterwert		
	Helligkeit	Kontrast	Schwelle
1	0,1	0,5	0,3
2	0,4	0,7	0,5
3	0,6	0,7	0,4
4	0,8	0,7	0,4
5	0,9	0,9	0,3

*Tabelle 5-4: Extrahierte Parametereinstellungen*

Eine Zuordnung dieser Werte zu bestimmten Farbbereichen ist nicht mehr möglich. Die extrahierten Einstellwerte gelten nur für das untersuchte Sensorsystem. Alternative optische Systeme, die aus Sende-, Empfänger- und Auswertungseinheit bestehen [MEL 2003, PRECITEC 2003, QUISS 2003, SCANSONIC 2003], beinhalten ebenfalls die Möglichkeit zur Parameteranpassung. Diese stellen eigene Systemvariablen zur Verfügung, die in ähnlicher, aber nicht standardisierter Weise in die Empfangseinheit bzw. Auswertungssoftware eingreifen. Für die Endkontrolle von Spaltmaßen an lackierten Karossen wird bereits ein Verfahren zur Anpassung der Belichtungszeit der Sensorkamera an die jeweiligen Lackfarben eingesetzt [PERCEPTRON 2003]. Bei diesem diskontinuierlichen Messverfahren wird lediglich ein spezifischer Hardwareparameter für die Belichtungszeit variiert. Dabei werden voreingestellte, bedienerdefinierte Belichtungsschritte durchlaufen. Dieser Vorgang ist jedoch zeitlich unabhängig von der eigentlichen Bildauswertung und der anschließenden Datenweiterverarbeitung.

Deshalb werden im folgenden Abschnitt Lösungswege aufgezeigt, die es optischen Konturfolgesensoren ermöglichen, eine schnelle, automatische Parameteranpassung an die jeweiligen Oberflächeneigenschaften der Bauteile auszuführen.

### 5.2 Verfahren zur Parameteranpassung

Nach der experimentellen Erfassung der Daten müssen diese in das Sensorsystem integriert werden. Für die Bereitstellung der gewonnenen Kennwerte zur Kompensation der Farbeinflüsse sind verschiedene Konzepte denkbar. Diese unterscheiden sich in erster Linie hinsichtlich der Frage zu welchem Zeitpunkt und in welcher Form die jeweiligen Informationen dem Sensorsystem übergeben werden. Die Bestimmung der relevanten Bauteilmerkmale kann dabei grundsätzlich

- vor dem Prozess oder
- während des Prozesses

durchgeführt werden.

Vor dem Prozess können die produktspezifischen Oberflächeneigenschaften durch den Einsatz von Farbmesssystemen oder durch Produktidentifikationssysteme, wie zum Beispiel Barcode-Lesesysteme, ermittelt werden.

Bei den **Farbmesssystemen** werden die Oberflächenfarben von jedem Bauteil an einer separaten Messstation erfasst. Anhand der erkannten Farbe kann eine Zuordnung zu den tabellarisch hinterlegten Einstellparametern vorgenommen und

dem Sensorsystem zugeschrieben werden. Die Farbmessung ist für eine technische Umsetzung allerdings nicht geeignet. Neben den hohen Kosten weisen diese Systeme noch eine Reihe von Funktionseinschränkungen auf [AMIS 2002, DIN 5033B]. Kleine oder schwer zugängliche Bauteile können ohne zusätzliche Hilfsmittel gar nicht oder nur unter Schwierigkeiten gemessen werden. Des Weiteren ist die Handhabung der Steuerungs- und Auswertungseinheit des Messkopfs stark eingeschränkt. Zudem sind für farbmetrische Messaufgaben vor allem gleich bleibende Umgebungsbedingungen notwendig. Innerhalb einer industriellen Fertigung werden diese Anforderungen in der Regel nicht erfüllt.

Durch eine eindeutige Produktkennzeichnung wird bei der Verwendung von **Produktidentifikationssystemen**, ähnlich dem Verfahrensablauf bei den Farbmesssystemen, dem Sensorsystem die Bauteildaten von außen übermittelt. Als Voraussetzung dafür muss die Zuordnung zwischen relevanten Bauteilattributen und Einstellparametern des Sensors zuvor festgelegt werden. Auf dem Markt ist eine Reihe von technisch ausgereiften und kostengünstigen Einlesesystemen verfügbar.

Beide Konzepte gehen davon aus, dass sich eine eindeutige Zuordnung in Form von vorherbestimmten Kennwerten in Tabellenfunktionen und den Oberflächeneigenschaften der Bauteile **vor** dem eigentlichen Prozess der Sensorführung durchführen lässt. Diese Art der Zuweisung ist nur bei konstanten Produktionsbedingungen möglich. Eine Reaktion auf äußere Störgrößen oder die Einpflegung von neuen Oberflächeneigenschaften gestaltet sich als sehr aufwändig und wenig praktikabel.

Die Anpassung des Sensorsystems an die unterschiedlichen Bauteiloberflächen kann auch **während** des Prozesses der Sensorführung durchgeführt werden. Der Sensor wird dabei gleichzeitig als Detektionssystem verwendet. Allerdings werden hierbei keine Farben erkannt beziehungsweise zugeordnet, sondern die jeweiligen Parameter direkt mit Hilfe der Auswertungssoftware des Sensorsystems angeglichen. Dabei bieten sich die folgenden Vorgehensweisen an:

- Abgleich der experimentell ermittelten Kennwerte, die im Sensorsystem als Tabellenfunktionen hinterlegt sind, mit der aktuellen Bauteiloberfläche
- Automatisches Anpassen der Einstellparameter durch intelligente Algorithmen, die im Bahnbearbeitungsprogramm hinterlegt sind

Ein wesentlicher Vorteil dieser Strategien zur automatischen Parametervariation besteht darin, dass kein Mehraufwand bezüglich zusätzlicher Anlagen- und Datenübertragungssysteme im Vergleich zu den oben beschriebenen Methoden, die vor dem Prozess zur Sensorführung eingreifen, notwendig ist. Zudem kann eine flexiblere Anpassung an die Bauteiloberflächen leichter umgesetzt werden. Im Weiteren werden deshalb die Möglichkeiten zum sensorinternen Parameterabgleich mit besonderer Berücksichtigung der erarbeiteten Grundlagen zwischen Einstellparametern und Oberflächenfarben untersucht.

### 5.3 Sensorinterne Parameteranpassung

In diesem Abschnitt werden Algorithmen entworfen, die es optischen Konturfolgesystemen erlauben, eine interne und automatische Anpassung an wechselnde Oberflächeneigenschaften der Bauteile sowie der produktionstechnischen Umgebung auszuführen. Die dazu notwendigen Prozessschritte sind während der Sensorführung zu realisieren. Dazu werden zunächst Anforderungen definiert, um die erarbeiteten Konzepte hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit beurteilen zu können.

#### 5.3.1 Anforderung an die automatische Parameteranpassung

Eine automatische Parameteranpassung der Sensoreinstellwerte für den industriellen Einsatz muss einer Reihe von fertigungstechnischen Randbedingungen genügen. Die wesentlichen Anforderungen an die Funktionalität der jeweiligen Konzepte sind:

- Geringe Anpassungszeit
- Hohe Anwendungsflexibilität

Um eine ausreichend schnelle sensorgeführte Bearbeitung zu gewährleisten, sollte die maximale Anpassungszeit - inklusive der Zeit zur Kantendetektion - möglichst gering gehalten werden. Für den sensorinternen Bearbeitungszyklus zur Kantenerkennung wird eine bestimmte Zeitspanne benötigt. Das gleiche Zeitintervall ergibt sich demnach auch für das Einlesen und Überprüfen einer bestimmten Parametereinstellung.

Für eine universelle Einsetzbarkeit ist auf eine hohe Anwendungsflexibilität hinsichtlich der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen und -farben der Werkstücke zu achten.

### 5.3.2 Methoden zur automatischen Parameteranpassung

Um eine einfache Einbindung in das spätere Bahnbearbeitungsprogramm des ausgewählten Sensorsystems zu gewährleisten, basieren die Algorithmen auf den darin vorgegebenen softwaretechnischen Randbedingungen. Zudem wird als Grundelement der Parameteranpassung die von der Auswertungssoftware zur Verfügung gestellte Funktionalität zur Ermittlung der Bildqualität herangezogen. Die sensorinterne Auswertungssoftware entscheidet innerhalb des Programmmoduls „Bildauswertung“, ab wann ein Bild die erforderliche Güte aufweist.

Bei aktivierter Bildauswertung werden im ersten Schritt die von der Bildverarbeitungskarte erkannten Segmentstücke in Abhängigkeit von den eingestellten Parametern Helligkeit, Schwelle und Kontrast eingelesen. Dieser Schritt stellt somit die Schnittstelle, die als Einlesemodul definiert wird, zur Parameteranpassung dar. Im zweiten Schritt werden die jeweiligen Endpunkte der Lichtbalken berechnet und dadurch die geometrische Zuordnung zur Bezugskontur im Videobild festgelegt. Sobald diese Schritte erfolgreich durchlaufen sind, kann der Sensor im Automatikbetrieb eigenständig verfahren.

Für die sensorinternen Prozeduren im Bahnbearbeitungsprogramm bieten sich vier Grundalgorithmen zur automatischen Parameteranpassung an:

- Tabellenfunktion
- Feste Parametervariation
- Vollständige Parametervariation
- Bedingte Parametervariation

Diese Grundlagenalgorithmen lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. In der ersten Gruppe sind die Verfahren Tabellenfunktion und feste Parametervariation eingeordnet, die im Wesentlichen auf den in den Voruntersuchungen gewonnenen Ergebnissen aufbauen. Die zweite Gruppe mit der vollständigen und bedingten Parametervariation zeigt mögliche Strategien zur Eigenoptimierung der Einstellparameter auf, bei denen keine oder nur wenige Vorversuche notwendig sind. Ausgehend von diesen Basisalgorithmen sind kombinierte Verfahren wie beispielsweise die bereichsweise Parametervariation denkbar. Um die jeweiligen Kennwerte programmtechnisch in das Sensorsystem einbinden zu können, müssen die nachstehenden sensorspezifischen Randbedingungen berücksichtigt werden.

Nach dem automatischen Anfahren des Suchbereichs und dem Starten des Bahnbearbeitungsprogramms werden im Einlesemodul die unterschiedlichen Grundalgorithmen abgearbeitet. Die anschließende Bilderkennung, Speicherung der gültigen Einstellparameter und eigentliche Bahnführung des Handhabungsgeräts bilden den grundlegenden Rahmen für die Integration der alternativen Verfahren in diese Programmstruktur und ist für alle Konzepte gleich (vgl. Abbildung 5-12).

Die einzelnen Algorithmen werden im Folgenden eingehend erläutert.

#### Tabellenfunktion:

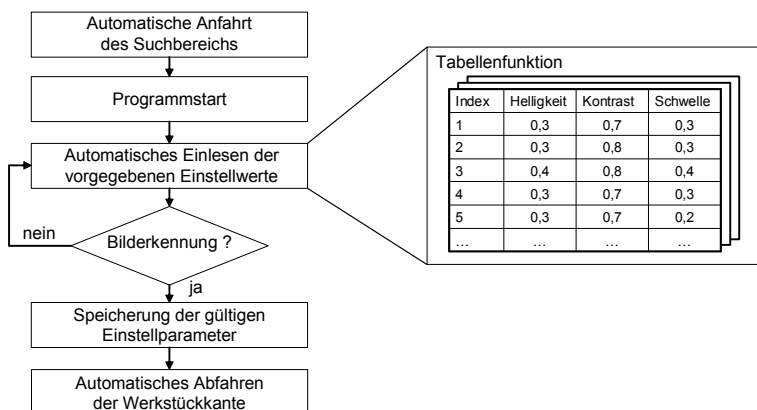


Abbildung 5-12: Schematischer Ablauf des Algorithmus „Tabellenfunktion“

Bei dem Algorithmus „Tabellenfunktion“ werden die in den Voruntersuchungen ermittelten Einstellparameter sequenziell in das Bahnbearbeitungsprogramm des Sensorsystems eingelesen (vgl. Abbildung 5-12). Dazu müssen alle erfassten Einstellwerte in Tabellenform katalogisiert werden. Um einen geringen Einleseaufwand zu erreichen, wurde bei der Gestaltung der Tabellenfunktion auf eine günstige Reihenfolge der jeweiligen Datensätze geachtet. Da die hellen Farben eine größere Bandbreite an möglichen Einstellparametern zulassen, wurde eine Einteilung von hellen zu dunklen Farben hin vorgenommen. Dadurch wird die Trefferwahrscheinlichkeit für die richtige Einstellung deutlich erhöht.

Die Definition und Datenpflege der Tabellenfunktionen ist jedoch sehr aufwändig und erfordert umfangreiche Voruntersuchungen zu den jeweiligen Oberflä-

## 5 Methode zur Parameteranpassung

cheneigenschaften. Das vollständige Abfragen der in Frage kommenden Einstellparameter kann beispielsweise bei Sonderfarben relativ lange dauern. Bei wenigen Oberflächenvarianten und konstanten Umgebungsbedingungen kann durch die Zuteilung der optimalen Einstellwerte zu den einzelnen Farben eine schnelle Anpassungszeit sichergestellt werden. Zudem ist eine Ordnung der Tabelle nach der Häufigkeitsverteilung der Bauteilvarianten denkbar, was die mittlere Anpassungszeit weiter verkürzen kann.

### Feste Parametervariation:

Durch eine Überlagerung der Kennlinien für die untersuchten Farben mit den dazugehörigen Einstellparameter - einschließlich deren Grenzbereiche - lassen sich in dem vorliegenden Fall fünf feste Einstellwerte ableiten (vgl. Abschnitt 5.1.2). Damit ergibt sich eine stark verkürzte Tabellenfunktion, was einen schnelleren Zugriff auf diese Daten durch das Bahnprogramm ermöglicht (vgl. Abbildung 5-13).

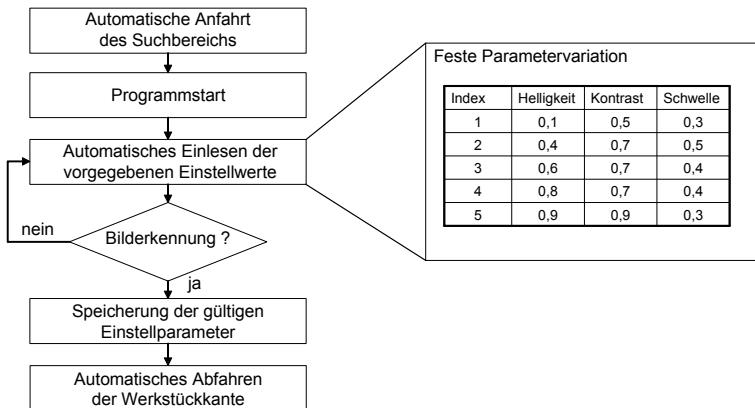


Abbildung 5-13: Schematischer Ablauf des Algorithmus „feste Parametervariation“

Insgesamt findet bei diesem Algorithmus eine erhebliche Reduzierung der Datenmenge statt und führt zu wesentlich kürzeren Anpassungszeiten. Wie bei der Vorgehensweise zur Tabellenfunktion sind für die Ermittlung der Kennwerte umfassende Voruntersuchungen notwendig, um den Lösungsraum festzulegen. Durch die Einschränkung der zur Verfügung stehenden Einstellparameter vereinfacht sich jedoch die Verwaltung und Pflege der aktuellen Datenbestände.



### Vollständige Parametervariation:

Bei der ersten Strategie zur Eigenoptimierung wird eine systematische Variation der jeweiligen Parameter durchgeführt, bis eine geeignete Einstellung erzielt wird. Dazu werden Initialwerte für die Laufvariablen deklariert, die auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen basieren. Des Weiteren werden die Parameter Helligkeit, Kontrast und Schwelle bezüglich ihrer Größe zur Einflussnahme gewichtet und eine Reihenfolge zur Parametervariation festgelegt (vgl. Abschnitt 5.1.2). Anschließend können die drei Einstellparameter vollständig durchgespielt werden (vgl. Abbildung 5-14).

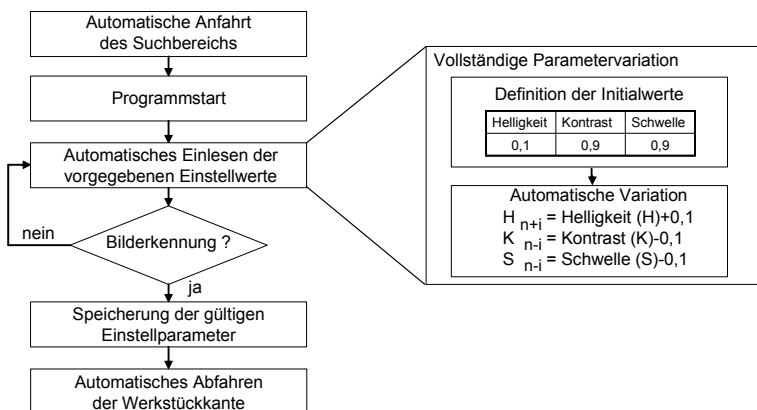


Abbildung 5-14: Schematischer Ablauf des Algorithmus „vollständige Parametervariation“

Mit diesem Verfahren können prinzipiell für alle Oberflächenstrukturen und Farben ohne Voruntersuchungen die entsprechenden Einstellparameter automatisch erzeugt und eingelesen werden. Zur Parameteranpassung kann insbesondere bei komplexen Oberflächeneigenschaften mehr Zeit beansprucht werden.

### Bedingte Parametervariation

Für die „bedingte Parametervariation“ werden bestimmte Start- und Endwerte vorgeben, die sich aus den Vorarbeiten ableiten. Innerhalb dieser Grenzen wird anschließend wiederum eine systematische Variation der Parameter ausgeführt, bis eine geeignete Einstellung erreicht ist (vgl. Abbildung 5-15).

## 5 Methode zur Parameteranpassung

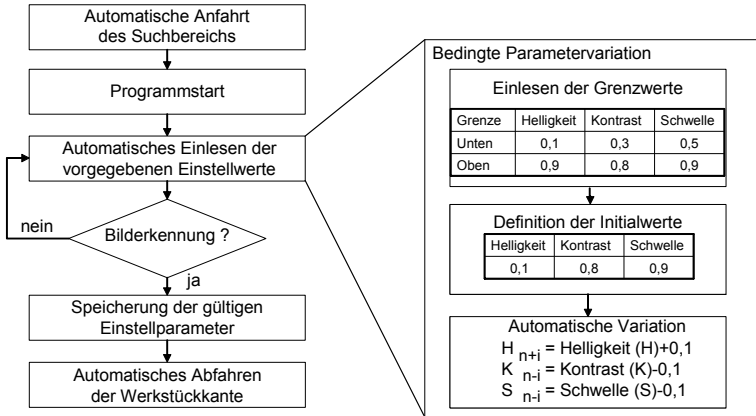


Abbildung 5-15: Schematischer Ablauf des Algorithmus „bedingte Parametervariation“

Auch mit diesem Verfahren können eine Vielzahl unterschiedlicher Werkstückoberflächen ohne aufwändige Voruntersuchungen bearbeitet werden. Durch die Festlegung der Grenzwerte wird die Anpassungszeit vermindert.

Darüber hinaus können die vorgeschlagenen Algorithmen kombiniert werden. Im Folgenden wird beispielhaft eine mögliche Kombination erläutert.

### Bereichsweise Parametervariation:

Innerhalb der bereichsweisen Parametervariation werden die Einstellparameter in die Gruppen „Hell“ und „Dunkel“ eingeteilt. Nach der Definition der jeweiligen Grenzwerte wird eine eigenständige Parametervariation im Einlesemodul durchgeführt. Den zu durchlaufenden Schleifenfunktionen können definierte Start- und Abbruchwerte zugewiesen werden, innerhalb derer die Feinanpassung durchgeführt wird (vgl. Abbildung 5-16).

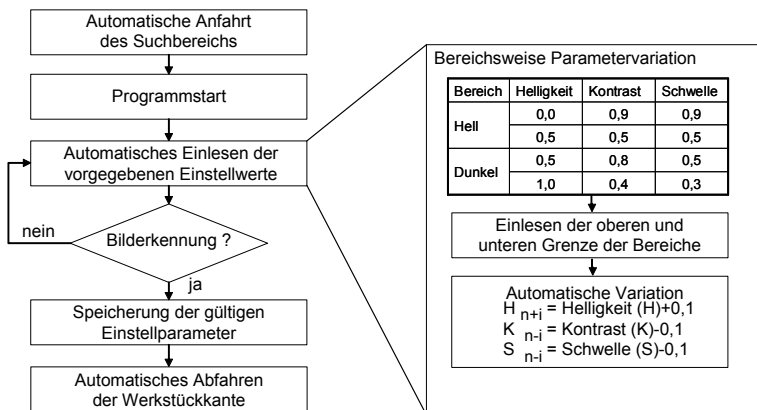


Abbildung 5-16: Schematischer Ablauf des Algorithmus „bereichsweise Parametervariation“

Mit Hilfe von kombinierten Verfahren können die spezifischen Nachteile der Grundalgorithmen zum Teil kompensiert werden. Durch eine genauere Festlegung des zur Verfügung stehenden Lösungsraums soll im Wesentlichen eine geringere Zykluszeit zur Parameteranpassung gewährleistet werden.

### 5.3.3 Beurteilung der Verfahren zur Parameteranpassung

Die prinzipiellen Vor- und Nachteile, sowie die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der jeweiligen Verfahren zur automatischen Parameteranpassung sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst. Nach der Implementierung der erarbeiteten Algorithmen in das jeweilige Bahnprogramm wurden diese hinsichtlich der Erfüllung der in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Anforderungen beurteilt.

## 5 Methode zur Parameteranpassung

	Tabellenfunktion	Parametervariation			
		fest	vollständig	bedingte	bereichsweise
geringe Anpassungszeit	○	●	○	◐	●
Anwendungsflexibilität	○	○	●	◐	◐
Legende:	○: Kriterium nicht erfüllt	◐: Kriterium meist erfüllt	●: Kriterium voll erfüllt		

Tabelle 5-5: Bewertung der vorgestellten Algorithmen zur automatischen Parameteranpassung

Dazu wurden als Referenzbauteile die schon in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Farbproben herangezogen. Die Versuchsumgebung entspricht ebenfalls den in den Voruntersuchungen aufgestellten Rahmenbedingungen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die vorgestellten Algorithmen grundsätzlich eine automatische Parameteranpassung an unterschiedliche Oberflächeneigenschaften erlauben. Alle Farben konnten mit dem Sensorsystem bearbeitet werden. Unterschiede ergeben sich vor allem in der Anpassungszeit, da insbesondere bei Farben mit nur einem möglichen Einstellwert längere Auswahlzyklen durchlaufen werden. Die größte Abweichung tritt bei der Anwendungsflexibilität der jeweiligen Konzepte auf. Die Algorithmen, die auf der Vorgabe von festen Einstellparametern beruhen, weisen eine deutlich niedrigere Flexibilität auf. Zudem müssen die erforderlichen Werte in zum Teil aufwändigen Vorversuchen bestimmt werden. Die endgültige Entscheidung für einen der vorgeschlagenen Algorithmen hängt jedoch in erster Linie von dem jeweiligen spezifischen Anwendungsfall ab.

Neben den in Abschnitt 4.1.4 erläuterten Verfahren zur Kompensation von Störeinflüssen sollen die bisher vorgestellten Algorithmen es auch anderen optischen Systemen ermöglichen, eine automatische Anpassung an ausgewählte Oberflächeneigenschaften durchzuführen. Dazu wird im Folgenden eine Vorgehensweise entwickelt, die den Anwender bei der Qualifizierung von optischen Konturfolgesystemen unterstützt.

## 5.4 Ableitung einer allgemeinen Vorgehensweise

Die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Möglichkeiten zur Parameteranpassung können zu einer allgemeinen Vorgehensweise zusammengefasst werden. Neben dem Einsatz in der Klebtechnik sollen auch Arbeitsgebiete mit ähnlichen Anforderungen berücksichtigt werden. Als Beispiel kann das sensorgeführte Entlacken von Bauteilen als Vorbereitungsmaßnahme für Strukturklebungen genannt werden.

Die Vorgehensweise zur Qualifizierung von optischen Konturfolgesystemen wird in die Phasen Auswahl von optischen Sensorsystemen, Verfahren zur Parameteranpassung sowie Realisierung und Inbetriebnahme unterteilt (vgl. Abbildung 5-17).

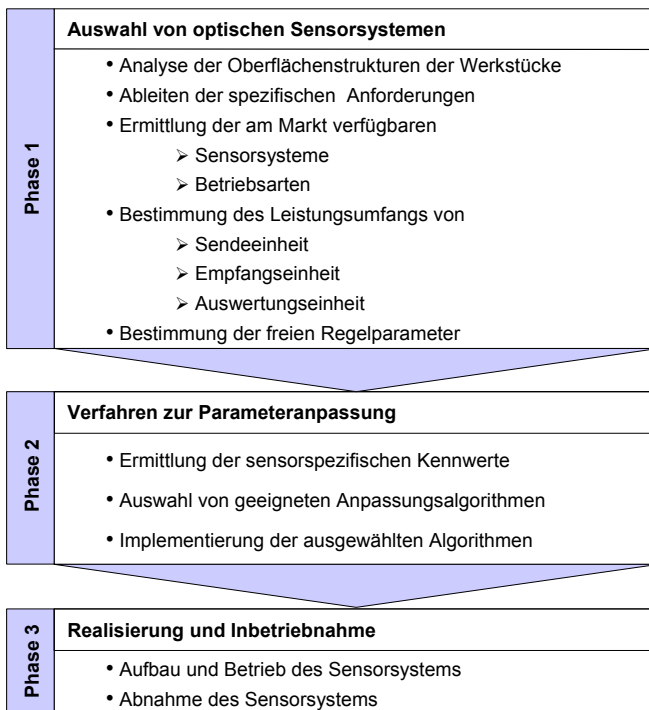


Abbildung 5-17: Vorgehensweise zur Qualifizierung von optischen Konturfolgesystemen

# 5 Methode zur Parameteranpassung

## Phase 1:

Die Methoden zur Sensorauswahl basieren auf der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Systematik und werden hinsichtlich der Verwendung von optischen Sensoren modifiziert. Hervorzuheben ist dabei die Bestimmung des Leistungsumfangs von Sende-, Empfangs- und Auswertungseinheit, da diese einen entscheidenden Einfluss auf die zur Verfügung stehenden freien Regelparameter darstellen. Diese bilden die variablen Eingangsgrößen für die spätere Parameteranpassung.

## Phase 2:

In der zweiten Phase erfolgt die eigentliche Parameteranpassung. Dabei stellt die Ermittlung der sensorspezifischen Kennwerte den Hauptschwerpunkt dar. Dazu wurde eine geeignete Methode entwickelt, die eine systematische Auswahl von relevanten Parametereinstellungen erlaubt (vgl. Abbildung 5-18):

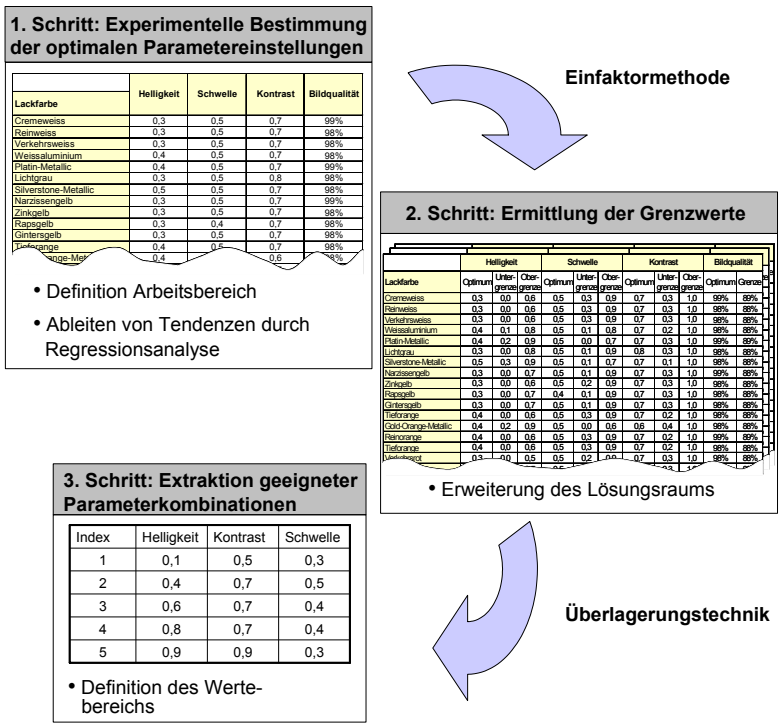


Abbildung 5-18: Vorgehensweise zur Parameterbestimmung

- Im ersten Schritt muss der Arbeitsbereich der Sensorik definiert werden. Hier werden beispielsweise die jeweiligen Umgebungsbedingungen und/oder Sensoranstellwinkel festgelegt. Basierend auf diesen Randbedingungen werden mit den verfügbaren Regelparametern die sensorspezifischen, optimalen Kennwerte experimentell ermittelt und im Hinblick auf ableitbare Tendenzen über den zuvor festgelegten Farbverlauf untersucht.
- Ausgehend von den optimalen Einstellwerten sind im zweiten Schritt zweckmäßige Grenzwerte für eine gültige Bildverarbeitung zu bestimmen. Damit können eine Vielzahl an denkbaren Lösungsmöglichkeiten abgebildet werden.
- Innerhalb des dadurch aufgespannten Lösungsraums können dann im dritten Schritt entweder geeignete Parameterkombinationen oder Wertebereiche herausgefiltert werden, die eine Anpassung an ein breites Farbenspektrum erlauben. Hiermit sind alle relevanten Eingangsgrößen definiert.

In Abhängigkeit der extrahierten Kennwerte beziehungsweise Wertebereiche können anschließend alternative Algorithmen zur automatischen Parameteranpassung entwickelt, einander gegenübergestellt und ausgewählt werden.

Bei der abschließenden Implementierung sind neben diesen Kennwerten und Wertebereichen auch die softwarespezifischen Randbedingungen der Sensorsysteme zu berücksichtigen.

### **Phase 3:**

Die Realisierung und Inbetriebnahme in der dritten Phase erfolgt anhand der in der Montageplanung üblichen Systematik [REINHART & ZÄH 2002]. Kernpunkte stellen hierbei der Aufbau und die Abnahme des Sensorsystems dar.

Die Vorgehensweise kann prinzipiell auf alle Sensorsysteme übertragen werden, die ähnliche Methoden zur Lichtschnittauswertung aufweisen. Dadurch kann das Leistungsspektrum der Sensortechnik in Hinblick auf eine Unabhängigkeit gegenüber unterschiedlichen Oberflächenstrukturen und -farben deutlich erweitert und verbessert werden.

### 5.5 Zusammenfassung

Während der Inbetriebnahmephase ist es bei handelsüblichen optischen Sensorsystemen unbedingt erforderlich, die jeweiligen Bildverarbeitungsparameter an den vorliegenden Anwendungsfall anzupassen. Weisen die zu bearbeitenden Bauteile dabei große Unterschiede in ihrer Oberflächenstruktur und -farbe auf, ist eine einmalige Anpassung nicht ausreichend. Für die Untersuchung der Reflexionseigenschaften unterschiedlicher Materialien und Farben fehlen heute noch kompakte, multifunktionale Messgeräte, die unter Fertigungsbedingungen prozesssicher eingesetzt werden können.

Durch die experimentelle Erfassung der relevanten Einflussgrößen auf die eingesetzte Sensorik und Gegenüberstellung mit externen Messgrößen konnte nachgewiesen werden, dass die sensorspezifischen Systemvariablen nicht allgemeingültig abgebildet werden können. Die durch externe Messsysteme ermittelten Reflexionskurven eignen sich nur bedingt zur Übertragung auf kommerzielle optische Systeme und können nur zur Referenzierung sinnvoll eingesetzt werden. Deshalb müssen die jeweiligen Einstellwerte der Sensorsysteme individuell angepasst werden.

Neben der Ermittlung und Zuordnung der einzelnen Parametereinstellungen zu bestimmten Farbtönen wurden die Möglichkeiten zur Einbindung der erfassten Prozessdaten in den Fertigungsprozess untersucht. Als geeignete Lösung zum flexiblen Sensoreinsatz wurde die automatische Parameteranpassung identifiziert. Mit Hilfe der entwickelten Algorithmen zur variablen Parameteranpassung werden Strategien zur Verfügung gestellt, die eine automatische Anpassung der Einstellwerte des Sensorsystems auf unterschiedliche Oberflächeneigenschaften von Werkstücken erlauben. Die vorgestellten alternativen Algorithmen unterscheiden sich im Wesentlichen in der zu verarbeitenden Datenmenge und Anpassungszeit zur Parametereinstellung. Die endgültige Auswahl einer der dargestellten Alternativen hängt in erster Linie von dem betrachteten Anwendungsfall ab. Dabei ist als entscheidendes Bewertungskriterium die Menge der zu bearbeitenden Oberflächenvarianten heranzuziehen.



### 6 Aufbau und Betrieb des Anwendungsbeispiels

Hohe Bauteil- und Fertigungstoleranzen innerhalb einer industriellen Serienfertigung erweisen sich im Hinblick auf eine optimale Raupenqualität als problematisch. In der Regel kommen automatisierte Auftragsprozesse zum Einsatz, welche die auftretenden Ungenauigkeiten bezüglich der Bauteillage nicht kompensieren können. Als Testanwendung wurde der Klebstoffauftrag am Dachflansch einer LKW-Fahrerkabine ausgewählt [MOSANDL & GOLLING 2002]. Bisher wird der Klebstoff in dreieckiger Raupenform starr automatisiert durch Roboter aufgetragen. Das Auftragsergebnis beinhaltet im Wesentlichen die Auswirkungen der Fehlereinflussfaktoren, wie in Kapitel 2 eingehend beschrieben.

Deshalb wird in diesem Kapitel untersucht, inwieweit das ausgewählte Sensorsystem die klebtechnischen Randbedingungen in der Produktion erfüllt. Dazu wird anhand des vom folgenden Produktbeispiel vorgegebenen Produktionsablaufs eine fertigungsnahe Bearbeitungszelle mit den dazugehörigen Systemkomponenten aufgebaut und die Prozesssensorik integriert. Die Planung des Anlagenlayouts soll mit Unterstützung eines Kinematik-Simulationswerkzeugs durchgeführt werden. Abschließend werden mit Hilfe des eingesetzten Konturfolgesystems Strategien entwickelt, die neben einer Verringerung von systematischen Dosierfehlern auch die Möglichkeiten zur sensorischen Qualitätsüberprüfung des Klebstoffauftrags beinhalten.

### 6.1 Beschreibung des Produktbeispiels

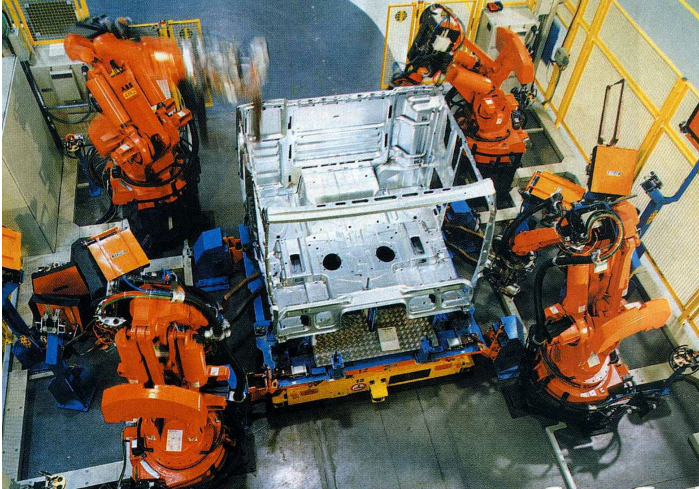
Steigende Anforderungen in Bezug auf Leichtbau bei gleichzeitiger Steifigkeitserhöhung haben auch im Nutzfahrzeugbau zum erhöhten Einsatz von unterschiedlichen Materialien geführt. Als geeignete Fügetechnologie zur Verbindung dieser Werkstoffe wurde das Kleben im Bereich der LKW-Fahrerhausmontage ausgewählt. Insgesamt werden täglich im Zweischichtbetrieb 150 Einheiten in den unterschiedlichsten Farben gefertigt.

Die aus der Schweißtechnik übernommene Konstruktion erhält die notwendige Steifigkeit zur weiteren Montage erst nach dem Aufsetzen des Daches auf die Fahrerkabine (vgl. Abbildung 6-1). Das Dachelement besteht je nach Ausführungsvariante aus Stahl oder Kunststoff. Fahrerkabine und Dachelement werden für das Endmontageband bereits fertig lackiert bereitgestellt. Vor dem Klebprozess ist die stählerne Rahmenstruktur der Kabine konstruktionsbedingt relativ instabil. In der untersuchten Fertigungszelle ist das nachgiebige Spannmittel, das

## 6 Aufbau und Betrieb des Anwendungsbeispiels

---

gleichzeitig als Werkstückträger maßgeblich die flexible Transportfunktion übernimmt, als Hauptursache für die unpräzise Positionierung des Werkstücks verantwortlich. Aufgrund der hier betrachteten großen Werkstückabmessungen machen sich dabei schon kleine Verschiebungen stark bemerkbar.



*Abbildung 6-1: Nutzfahrzeugfahrererkabine in der Produktionsumgebung [MAN Nutzfahrzeuge AG]*

Der Klebstoff wird in Raupenform gleichzeitig auf den linken und rechten Dachflansch von jeweils einem Roboter aufgetragen. Die gesamte Flanschlänge am Dach liegt bei ungefähr neun Metern, was einer Klebstoffmenge von 650 ml entspricht. Dabei weist der Flanscbereich eine komplexe dreidimensionale Kontur auf. Trotz der geringen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit der Raupenlage musste aufgrund der eingangs beschriebenen Fertigungstoleranzen eine größere Flanscbreite vorgesehen werden. Am Dachflansch befinden sich zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Klebstofffuge jeweils zwei Abstandshalter, die derzeit vom Roboter umfahren werden müssen (vgl. Abbildung 6-2).

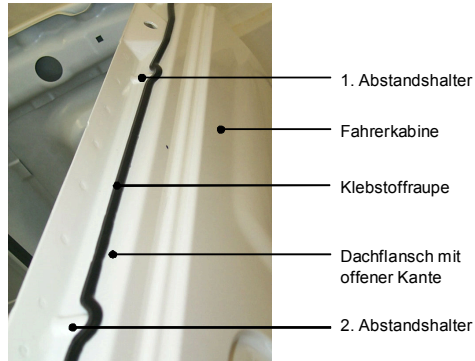


Abbildung 6-2: Dachflansch mit Abstandshaltern und Klebstoffraupe

In Tabelle 6-1 sind die Eigenschaften beziehungsweise Anforderungen zur Charakterisierung der Flanschgestalt zusammengefasst.

Eigenschaft/Anforderung:	Ausprägung:
Oberflächenstruktur	Decklackierung
Flanschfarbe	Beliebig innerhalb des Farbsortimentes
Betrachtete Flanschlänge	3000 mm
Minimale Flanschbreite	20 mm
Flanschform	Offene Kante
Positioniergenauigkeit der Raupe	$\pm 0,5$ mm
Raupenabstand zur Kante	Mindestens 5 mm

Tabelle 6-1: Charakterisierung der Flanschgestalt am Dach der Fahrerkabine

## 6.2 Simulationsumgebung

Im Rahmen der präventiven Qualitätssicherung soll die Auslegung und Gestaltung der Versuchsanlage zunächst innerhalb einer geeigneten Simulationsumgebung erfolgen. Der Nutzen der Simulationstechnologien liegt in der schnellen und wirtschaftlichen Planung und Optimierung von Produktionsanlagen, Produk-

ten und Prozessen. Die verschiedenen Betrachtungsebenen führen zu unterschiedlichen Simulationsmodellen, deren Abstraktionsgrad und Genauigkeit auf die jeweiligen Fragestellungen abgestimmt sind [REINHART U. A. 2003].

Das in der vorliegenden Arbeit betrachtete 3D-Kinematik-Simulationssystem soll für die Planung und Überprüfung der jeweiligen Zellenkomponenten, der räumlichen Bewegungsplanung des Handhabungsgeräts und der Installation von technischen Anlagen eingesetzt werden. Die Simulation dient damit zur Visualisierung der komplexen Bewegungsabläufe. Daneben sind Kollisionsüberprüfungen und Abstandsuntersuchungen möglich. Da in der Simulation auch das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten von Körpern berücksichtigt werden kann [GARTNER 2001], können Aussagen über Takt- bzw. Durchlaufzeiten generiert werden. Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich der Kinematik-Simulation ist die Offline-Programmierung von bewegungsgesteuerten Maschinen und Handhabungsgeräten [BAUER 1998].

### 6.2.1 Aufbau der Simulationsumgebung

Voraussetzung für die Durchführung von Simulationsuntersuchungen ist die Modellierung der beteiligten Komponenten in einem Simulationssystem. Auf dem Markt werden verschiedene Systeme, wie beispielsweise RobCAD, AnySim, USIS, IGRIP oder KRSIM, zur Bewegungsplanung von Robotern angeboten. Der Hauptvorteil des Simulationssystems KRSIM besteht darin, dass roboterspezifische Singularitäten erkannt werden und das Bearbeitungsprogramm direkt an dem Steuerungsrechner des Roboters erzeugt wird. Dieses kann anschließend einfach in die reale Fertigungszelle übertragen werden. Für die weiteren Arbeiten wird deshalb die Software KRSIM herangezogen.

Der Grundaufbau des eingesetzten Kinematik-Simulationssystems wird durch zwei Rechner gebildet. Der erste Rechner dient zur graphischen Darstellung der virtuellen Anlagenumgebung und zum Erzeugen so genannter Frames (Koordinatensysteme), welche die abzufahrenden Punkte darstellen. Der zweite Rechner ist ein Steuerungsrechner für KUKA-Roboter. Durch eine Netzwerkkopplung mittels TCP/IP können Daten zwischen Steuerungsrechner und Simulationsrechner übertragen werden, um Punktkoordinaten aus der Simulation zu übernehmen und die Bewegung in der Simulation zu visualisieren. Durch einen Postprozessorlauf wird ein roboterspezifisches Verfahrenprogramm erzeugt.

Zur Abbildung der Versuchsanlage müssen die Zellenkomponenten in das Simulationsprogramm integriert werden. Diese können über eine Reihe von Schnittstellen wie zum Beispiel STL, IGES, STEP und VDA aus CAD-Systemen importiert werden. Für die aufzubauende Simulationsumgebung wurden Halterungen und Werkstücke aus den CAD-Programmen ProEngineer und CATIA eingelesen. Zur Generierung einfacher Geometrien, wie beispielsweise Adapterplatten, stellt das Simulationssystem elementare geometrische Grundkörper wie Zylinder, Quader, Sphären oder entlang einer Linie extrudierte Polygone zur Verfügung. In Abbildung 6-3 ist das Zellenlayout zum Klebstoffauftrag am Dachflansch und zur Scheibenverklebung dargestellt.

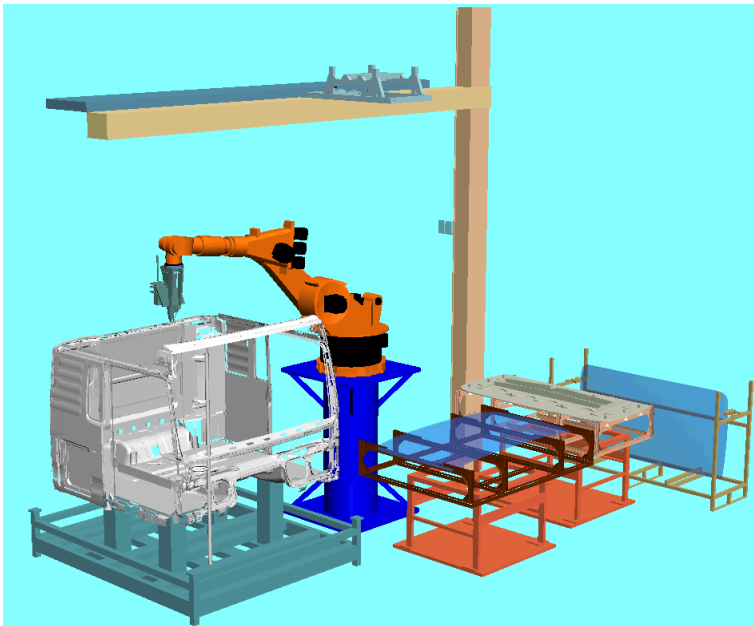


Abbildung 6-3: Darstellung des Zellenlayouts im 3D-Kinematik-Simulationssystem KRSIM

Zu Beginn der Bearbeitungsversuche wurde untersucht, ob grundsätzlich eine Klebstoffapplikation mit einem Roboterprogramm möglich ist, das durch ein Offline-Programmiersystem generiert wird. Die genauen CAD-Daten der Karosserie der Fahrekabine standen zur Verfügung. Die Positionierungstoleranzen der

Spannvorrichtung, des Transportsystems und die Fertigungstoleranzen des Werkstücks machen jedoch die exakte Implementierung eines Bahnbearbeitungsprogramms auf Basis von KRSIM unmöglich. Die gemessenen Positionsabweichungen des Dachflansches betragen bis zu 15 mm. Das 3D-Kinematik-Simulationssystem ist dadurch zur Erzeugung von Bewegungsbahnen in der realen Roboterzelle nur bedingt einsetzbar, hingegen für die statische Optimierung der Zellenperipherie sehr gut geeignet. Der größte Vorteil ergibt sich jedoch für die Adaption des Sensorkopfs an die Auftragseinheit. Beispielsweise hätte die Bestimmung der optimalen Sensorvorlaufänge die Fertigung einer Vielzahl von Testkonturen erfordert. In der Simulationsumgebung beschränkt sich dies auf die Erzeugung einfacher CAD-Modelle. Die Bestimmung der Einsatzgrenzen in Bezug auf maximale Bahngeschwindigkeiten oder minimale Krümmungsradien kann in der Simulation wesentlich schneller erfolgen.

### 6.2.2 Optimierung der Auftragseinheit

An der letzten Achse des Roboters wird die Auftragseinheit angeflanscht. Grundsätzlich sind dazu zwei unterschiedliche Konzepte denkbar [WENK 2002]. Zum einen wird die Dosierpumpe derart an den Roboterflansch befestigt, dass der Klebstoffauftrag im rechten Winkel zur Drehachse der sechsten Achse des Roboters steht (vgl. Abbildung 6-4 links). Alternativ dazu kann die Dosierpumpe auch parallel zur sechsten Roboterachse montiert werden (vgl. Abbildung 6-4 rechts).

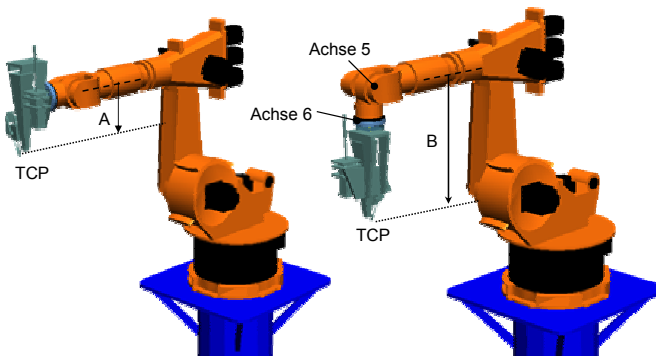


Abbildung 6-4: Unterschiedliche Möglichkeiten zur Adaption der Auftragseinheit an die sechste Achse des Industrieroboters

Die zuerst genannte Möglichkeit des Systemaufbaus hat den Vorteil, dass der Hebel (A) zwischen dem Werkzeugbezugspunkt (TCP) und der Handgelenkchse des Roboters (Achse 5) sehr klein gewählt werden kann. Der gesamte Systemaufbau gewinnt dadurch an Steifigkeit. Zudem ergibt sich eine größere konstruktive Flexibilität hinsichtlich der Gestaltung der Auftragseinheit nach oben. Ein Mitführen der asymmetrischen Dosierdüse erfordert allerdings große Ausgleichsbewegungen bei Kurvenfahrten des Roboters sowohl in den Handachsen als auch in den Grundachsen. Außerdem sind die möglichen Verfahrrichtungen und damit auch der erreichbare Arbeitsraum stark eingeschränkt. So sind beispielsweise mit zunehmendem Abstand zwischen TCP und Robotersockel nur Bewegungen bei begrenzten Drehwinkeln möglich.

Die zweite, in Abbildung 6-4 rechts gezeigte Art der mechanischen Kopplung erlaubt ein Mitführen der Klebdüse durch Drehung von in der Regel nur einer Handachse ohne weitere Ausgleichsbewegungen in den Grundachsen. Ein derartiger Systemaufbau führt jedoch zu einem großen Abstand (B) zwischen Werkzeugbezugspunkt und der fünften Achse. Daraus resultieren höhere Drehmomentbelastungen auf den Roboterhandflansch und allgemein ein weniger steifer Systemaufbau. Besonders nachteilig wirkt sich dies bei der Bestimmung des TCPs aus. Eine Rotation um einen ungenau vermessenen TCP führt in dem Fall dazu, dass die Klebdüse von der Bearbeitungskontur wegbewegt wird. Bei Orientierungsänderungen der Dosiereinheit ist dieser Fehlereinfluss besonders groß.

Neben der theoretischen Betrachtung wurden in der kinematischen Simulationsumgebung beide Anbringungsalternativen modelliert und entsprechende Bewegungsprogramme erzeugt. Dadurch konnte nachgewiesen werden, dass eine Adaption, wie im ersten Fall ausgeführt, aufgrund von roboterseitigen Bewegungsrestriktionen im Bereich der hinteren Fahrerkabine nicht umsetzbar ist. Bei der Realisierung des zweiten Konzepts wurde der Werkzeugbezugspunkt mit größter Sorgfältigkeit vermessen, um die oben beschriebenen Problempunkte so gering wie möglich zu halten.

### 6.2.3 Optimierung der Sensorvorlauflänge

Der Sensorvorlauf hat im Rahmen der gewählten Bahnplanungsstrategie den entscheidenden Einfluss auf die Bestimmung der Bahnstützpunkte. Der Sensor kann dazu prinzipiell in drei verschiedenen Stellungsbereichen am Bearbeitungswerkzeug angeordnet werden (vgl. Abbildung 5-3). Bei senkrechter Anordnung des Sensors über dem Bauteil kann der Vorlauf aufgrund der baulich be-

dingten Sensorgröße und dessen Abstand zur Werkzeugspitze beispielsweise nicht mehr verkleinert werden. Um den Sensorvorlauf dennoch bei der bestehenden Sensorgeometrie zu variieren, kann dieser bei einer entsprechend gestalteten Sensorhalterung in eine stechende oder schleppende Position gebracht werden. In diesen Fällen kann der Sensorvorlauf in positiver Bewegungsrichtung entweder noch weiter verkürzt oder verlängert werden. Eine Verkürzung des Vorlaufs erlaubt das Abfahren engerer Bauteilkanten und -radien, da bei einer Umorientierung des Bearbeitungswerkzeugs das Sensorsichtfeld länger an der Werkstückkante verbleibt.

In der Literatur werden verschiedene Möglichkeiten zur Herleitung einer quantitativen Beziehung für den erforderlichen Sensorvorlauf als Funktion relevanter Kenngrößen formuliert [HORN 1994, WENK 2002, HAUG 2002]. Eine fundamentale Bedingung für die Durchführbarkeit einer Bahnplanung auf Basis der sensorgestützt erfassten Sollbahnstützstellen ist, dass der Sensorvorlauf grundsätzlich größer sein muss, als die in der Zeitspanne zwischen einer Messwertaufnahme und der Verfügbarkeit der zugehörigen Sensordaten für eine Bahninterpolation zurückgelegte Wegstrecke der Werkzeugspitze. Außerdem muss eine sensorgestützt ermittelte Sollbahnstützstelle mindestens einen Interpolationstakt früher als für die Bahninterpolation benötigt in den Bahn Speicher eingetragen werden.

Der minimale Sensorvorlauf wird wie folgt angegeben [HORN 1994]:

$$x_{\text{vormin}} \geq u_{\text{max}} * \left( T_{\text{t, sen}} + T_{\text{IPO}} + S_{\text{a}} \right) \quad (\text{Gleichung 6-1})$$

Mit:

$x_{\text{vormin}}$	Erforderlicher Mindestvorlauf
$u_{\text{max}}$	Maximale Auftragsgeschwindigkeit
$T_{\text{t, sen}}$	Sensortotzeit
$T_{\text{IPO}}$	Totzeit der Steuerung (IPO-Takt)
$S_{\text{a}}$	Schleppabstand

Die zur rechnerischen Bestimmung des minimalen Sensorvorlaufs notwendigen Variablen Schleppabstand [ZELLER 1995] und Sensortotzeit sind in der Regel aufwändig zu ermitteln. Auch die von WENK [2002, S. 123-128] vorgeschlagene simulationsgestützte Berechnung erfordert detaillierte sensorspezifische Kennwerte.



Bei kommerziellen Systemen wird der Wert zum minimalen Sensorvorlauf im Allgemeinen vom Hersteller vorgegeben, so dass nur noch eine einfache Anpassung der Vorlaufstrecke an die fertigungstechnischen Randbedingungen nötig ist. Mit der maßstabsgetreuen Modellierung der Versuchsanlage sind die Voraussetzungen für die Bestimmung der optimalen Vorlauflänge innerhalb des Kinematik-Simulationssystems gegeben. Durch die graphische Vorgabe eines definierten Grenzkorridors um die eigentliche Vorlaufstrecke können kritische Ecken und Radien visuell untersucht werden (vgl. Abbildung 6-5). Der Grenzbereich wird durch die Abmessung des Sensorgehäuses und den Verstellmöglichkeiten der Sensorhalterung festgelegt. Somit kann der Sensorvorlauf manuell angepasst und bei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten überprüft werden. Für den hier vorliegenden Anwendungsfall ergibt sich damit eine optimale Vorlaufsstrecke von 44 mm.

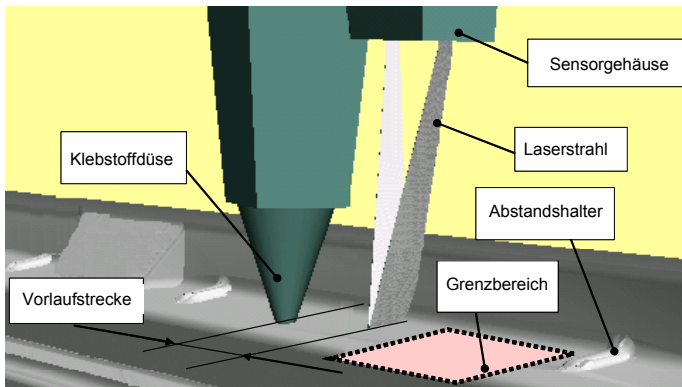


Abbildung 6-5: Dachflansch mit möglichem Grenzkorridor zur Bestimmung des optimalen Sensorvorlaufs

## 6.3 Eingesetzte Zellenkomponenten

Basierend auf den in der Simulation gewonnenen Ergebnissen wurde die entsprechende fertigungsnahe Versuchsanlage aufgebaut (vgl. Abbildung 6-6). Für die Untersuchungen zum Prozessverhalten am realen Bauteil standen zwei Fahrerkabinen in den Farben Weiß (helle Farbe) und Blau (dunkle Farbe) zur Verfügung. Der Farbschichtaufbau der Fahrerkabine entspricht dem der Kunststoffplättchen

## 6 Aufbau und Betrieb des Anwendungsbeispiels

---

des Farbfächers. Farbpigmente, Bindemittel und Grundierung des Trägermaterials sind identisch.

Der Zellenaufbau zum sensorgeführten Klebstoffauftrag auf dem Dachflansch besteht aus den folgenden Komponenten:

- Handhabungsgerät
- Auftragseinheit
- Sensorsystem zur Konturverfolgung

Um die transportbedingten Fehlereinflussgrößen darstellen zu können, wurde die Fahrerkabine einschließlich des Transportgestells auf ein Schienensystem gesetzt. Damit können die allgemeinen Transportbedingungen im Montageablauf sowie das Anfahr- und Bremsverhalten bei den jeweiligen Bearbeitungsstationen produktionsnah nachgebildet werden. Das Schienensystem wird über die Robotersteuerung betrieben. Um das Transportsystem wurden die im Weiteren näher beschriebenen Systemkomponenten aufgebaut. Darüber hinaus wurde die Anlage für Untersuchungen zum Verkleben der Windschutzscheibe und des Systemträgers herangezogen.

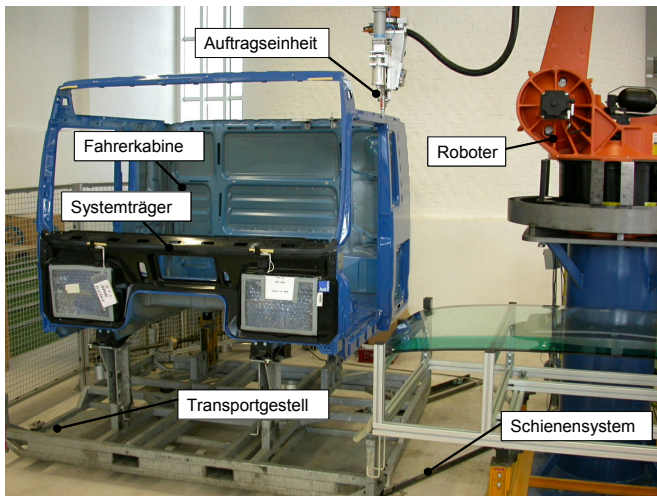


Abbildung 6-6: Realisierte Versuchsanlage mit Schienensystem

### 6.3.1 Handhabungsgerät

Zur Durchführung der Untersuchungen wurde als Handhabungssystem ein 6-Achsen-Knickarm Industrieroboter KUKA KR 150 mit 400 mm Armverlängerung mit einer KR C1 Steuerung eingesetzt. Bedingt durch die Verlängerung der vierten Roboterachse wird die maximale Traglast an der sechsten Achse von 150 kg auf 120 kg herabgesetzt. Die Gesamtmasse der Auftragseinheit inklusiv aller Anbauten und vollem Vorratsbehälter beträgt ca. 30 kg und kann daher ohne kinematische Einschränkungen von dem Roboter aufgenommen werden.

Die wichtigsten Anforderungen hinsichtlich ausreichendem Arbeitsraum aufgrund der großen Bauteilabmessungen, hinreichende Beweglichkeit und geeignete Bahnengenauigkeit werden von dem ausgewählten Handhabungssystem erfüllt. Laut Herstellerangabe beträgt die Wiederholgenauigkeit  $\pm 0,2$  mm [KUKA 2002].

Die Steuerung ist PC-basiert und im Hinblick auf Hardware- sowie Softwareerweiterungen prinzipiell offen. Zudem stellt die Robotersteuerung eine geeignete Schnittstelle für das verwendete Sensorsystem bereit. Neben der Abfrage der jeweiligen Robotergerätschwindigkeit und entsprechender Ansteuerung der analogen Ausgangskarte, ist die Robotersteuerung darüber hinaus mittels der Programmiersprache KUKA Roboter Language (KRL) frei programmierbar. Damit können Systemvariablen wie zum Beispiel die Zykluszeit, die aktuelle Roboterposition und die Geschwindigkeit ausgelesen und in entsprechenden Unterprogrammen weiterverarbeitet werden.

### 6.3.2 Auftragseinheit

Die eingesetzte Auftragseinheit besteht (vgl. Abbildung 6-7) aus einer stabilen Grundplatte, der Exzentrerschneckenpumpe als Dosiereinheit [VISCOTEC 2001], der Bevorratungseinrichtung zur Aufnahme der Klebstoffkartuschen einschließlich der Druckversorgung, der zur Verbindung dieser Komponenten notwendigen Förderleitung, zwei verstellbaren Halterungen für das Sensorsystem sowie zwei Greiferwechselsystemen.

## 6 Aufbau und Betrieb des Anwendungsbeispiels

---

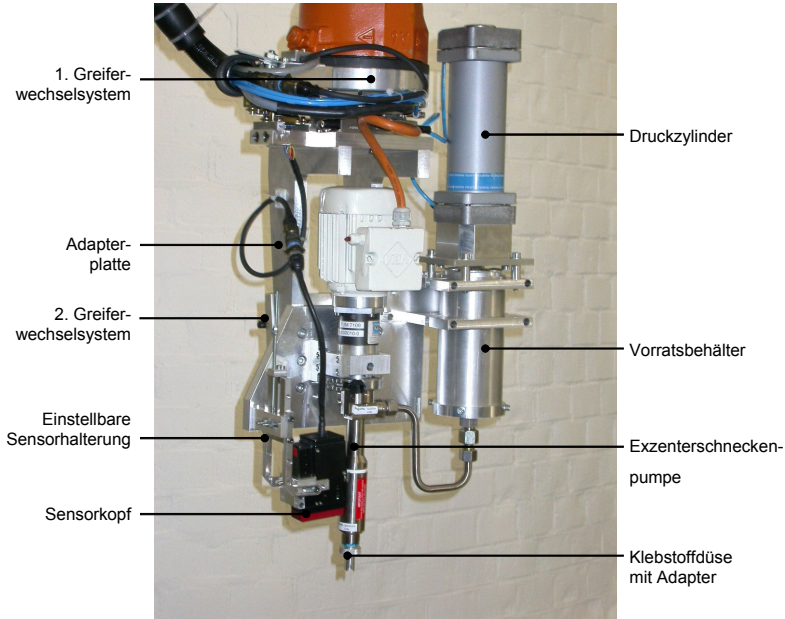


Abbildung 6-7: Aufbau der Auftragseinheit

Um den technischen und finanziellen Aufwand möglichst gering zu halten, wurde anstelle der industriell eingesetzten Bevorratungs- und Fördersysteme mit ihren aufwändigen Zuführleitungen für die Bereitstellung des Klebstoffs zur Dosierung eine spezielle Vorrichtung zur Kartuschenaufnahme entwickelt. Da für die einzelnen Auftragsversuche nur geringe Klebstoffmengen benötigt werden und zwischen den Versuchsreihen relativ große Zeitabstände aufgrund der notwendigen Aushärtezeit des Klebstoffs liegen, stellt dieses Konzept eine sinnvolle Alternative zu den herkömmlichen Bevorratungssystemen dar. Neben den geringen Realisierungskosten der Vorrichtung bestehen weitere Vorteile in den kurzen Reinigungs- und Spülzeiten der Auftragseinheit sowie in der Möglichkeit zur aufwandsarmen Untersuchung verschiedener Klebstoffsysteme. Der druckluftgesteuerte Zylinder gewährleistet eine optimale Entleerung der Kartuschen.

### 6.3.2.1 Exzentrerschneckenpumpe

Als Dosiersysteme kommen grundsätzlich wie in Abschnitt 2.1.2 bereits dargestellt Membran-, Zahnrad- und Schneckenpumpen, Kolbendosierer, Proportionalventile oder Exzentrerschneckenpumpen in Betracht. Durch den Einsatz geeigneter Dosiereinrichtungen kann erreicht werden, dass der auf den Auftragsprozess verbleibende Einfluss vernachlässigbar bleibt [BRANDENBURG 1996, SCHULLER 1998]. Bei Exzentrerschneckenpumpen können die vom Handhabungssystem in Form eines analogen Spannungssignals vorgegebenen Sollwerte direkt an die Dosierpumpe übergeben werden. Der Phasenversatz zwischen der realen Geschwindigkeitsänderung, beispielsweise infolge einer starken Bahnkrümmung, und des geförderten Volumenstroms fällt im Vergleich zu den anderen genannten Dosiersystemen am geringsten aus [GARTNER 2001]. Mit dieser so genannten Pumpendosierung ergeben sich weitere Vorteile:

- Das Auslassventil kann bei der Pumpendosierung als einfaches Auf/Zu-Ventil ausgeführt sein, das bei Prozessbeginn vollständig geöffnet und bei Prozessende vollständig geschlossen wird.
- Die bei Exzentrerschneckenpumpen verwendeten Antriebe sind in der Regel von hoher Steifigkeit und erfüllen die Anpassung an die vorgegebenen Bahngeschwindigkeiten [SCHULLER 1998].
- Durch die kontinuierliche und von den rheologischen Materialeigenschaften unabhängige Förderung bleibt der geförderte Volumenstrom auch bei Veränderungen der Druckverhältnisse im mitgeführten Vorratsbehälter konstant.
- Mit Hilfe der Exzentrerschneckenpumpe lassen sich über die Robotersteuerung reproduzierbare Fehlerbilder erzeugen. Diese werden zur Verifikation des Sensorsystems für eine abschließende Prozesskontrolle benötigt.
- Die Exzentrerschneckenpumpe erlaubt durch eine kurze Drehrichtungsumkehr am Ende des Dosiervorgangs einen so genannten Rückzugeffekt, der ein Nachlaufen oder Nachtropfen der eingesetzten Medien verhindert.

Nachteile ergeben sich beim Anfahren der Pumpe aus dem Stillstand. Das Ansprechverhalten des Pumpenantriebs ist aufgrund der hohen Fördermenge zu träge und muss durch eine geeignete Anfahrtsrampe angepasst werden. Die Ansteuerung der Dosiereinheit wird durch eine analoge Ausgangskarte der Robotersteuerung vorgenommen, die mit der Steuerung des Handhabungsgeräts daten-

technisch verbunden ist. Über einen externen Frequenzumrichter wird die von der Ausgabekarte vorgegebene Gleichspannung proportional in den für den Betrieb der Exzentrerschneckenpumpe erforderlichen Drehstrom übersetzt.

Zur Erzeugung der Dreiecksform wird eine Düse mit V-förmigem Ausschnitt an die Auslassvorrichtung der Exzentrerschneckenpumpe aufgeschraubt. Dazu wurde ein Adapter konzipiert, der einen schnellen und lagerichtigen Austausch von alternativen Düsenausführungen sowie der Kalibrierspitze gewährleistet. Die Kalibrierspitze dient zur Kalibrierung von Werkzeug- und Sensorbezugspunkt. Damit ist die exakte Vorlaufänge des Sensors bestimmbar.

### 6.3.2.2 Auftragsmedium

Das rheologische Verhalten des aufzutragenden Klebstoffs ist für die Ausprägung von systematischen Dosierfehlern von entscheidender Bedeutung. So ist beispielsweise für die Sicherstellung einer gleichmäßigen Dreiecksform der Klebstoffraupe eine bestimmte minimale Viskosität erforderlich.

In der Serienfertigung wird ein Klebstoff auf Polyurethanbasis mit Quickfixsystem eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.1.1). Für die Überprüfung der erarbeiteten Methoden zur Qualitätsverbesserung des Klebstoffauftrags sind eine Reihe von Auftragsversuchen am realen Bauteil notwendig. Dazu kann der Dachflansch mit einem handelsüblichen Isolierband oder ähnlichem Material abgedeckt werden, um eine unerwünschte Verklebung zu verhindern. Dieses Vorgehen erweist sich aufgrund der damit einhergehenden optischen Beeinflussungen der Werkstückoberfläche als nicht geeignet. Zum einen wird durch das Aufkleben mindestens eine weitere Kontur erzeugt. Der Sensor kann bei dieser Methode nicht zwischen der eigentlichen Werkstückkontur und dem Klebebandstreifen unterscheiden. Zum anderen treten bei der Verwendung von transparenten Klebebändern unerwünschte optische Reflexionen auf.

Im Rahmen der durchgeführten Auftragsversuche wurde deshalb anstelle des industriell eingesetzten Polyurethanklebstoffs eine neu entwickelte Ersatzsubstanz verwendet. An das Medium wurden die folgenden Bedingungen gestellt:

- Keine Haftung des Mediums auf der Bauteiloberfläche
- Vollständige Aushärtung des Mediums (innere Vernetzung)
- Vergleichbare rheologische Eigenschaften wie beim Originalklebstoff
- Identische Farb- und Reflexionseigenschaften

## 6.4 Eingesetzte Sensorik zur Konturverfolgung

Das Farb- und Reflexionsverhalten der Ersatzsubstanz ist zur Erkennung der bereits aufgetragenen Klebstoffraupe von großer Bedeutung. Die weiteren charakteristischen Eigenschaften von Originalklebstoff [DOW AUTOMOTIV 1998] und Ersatzsubstanz [OTTO CHEMIE 2003] sind in Tabelle 6-2 gegenübergestellt. Das eingesetzte Medium erfüllte die gestellten Anforderungen in vollem Umfang und hat sich bei den Auftragsuntersuchungen sehr bewährt.

	Polyurethan Betaseal Dow NC-1	Ersatzmedium Novasil VP5307
Spezifisches Gewicht	1,29 g/ml	1,18 g/ml
Chemische Basis	Polyurethanprepolymer	Neutralvernetzendes Silikon
Aushärtevorgang	Luftfeuchtigkeitshärtend	Luftfeuchtigkeitshärtend
Viskosität	3500 mPa s bei 35°C	ca. 2500 mPa s bei 25°C
Verarbeitungstemperatur	60°C	25°C
Hautbildezeit bei 23°C/50% rel. Luftfeuchte	unter 10 Minuten	10-15 Minuten
Aushärtezeit bei 23°C/50% rel. Luftfeuchte	2-3 mm in 24 h	0,5-1 mm in 24 h
Farbe	Schwarz	Schwarz
Reflexionsverhalten im nassen Zustand	glänzend	glänzend

*Tabelle 6-2: Gegenüberstellung der Eigenschaften von Originalklebstoff und Ersatzmedium*

## 6.4 Eingesetzte Sensorik zur Konturverfolgung

Die auftretenden Lage- und Werkstücktoleranzen beim Klebstoffauftrag verursachen erhebliche Qualitätseinschränkungen für die Klebstoffraupe. Mit Hilfe eines Sensorsystems können die in Abschnitt 2.3.2.2 beschriebenen Abweichungen kompensiert werden. Für die Untersuchungen zur Konturerkennung und Ermittlung des Farbeinflusses wird das zuvor ausgewählte Konturfolgesystem SCOUT der Firma „Dr. Barthel Sensordysteme“ eingesetzt. Das Sensorsystem besteht aus

Sensorkopf, Sensorrechner, Benutzeroberfläche und einem Kameramonitor zur Sensoreinrichtung in der Inbetriebnahmephase.

### 6.4.1 Aufbau und Integration des Sensorsystems

Der Sensorkopf ist am Bearbeitungswerkzeug vorlaufend befestigt und projiziert ein Muster von fünf parallelen Lichtbalken auf die zu erfassende Kontur. Eine im Sensorkopf integrierte CCD-Kamera erfasst die Verformung des Lichtbalkenmusters im Naht- beziehungsweise Kantenbereich des Werkstücks. Der Sensorrechner wertet die Messinformationen aus. Alle vier Millisekunden wird ein vollständiger Datensatz eines Messpunkts auf der Naht oder Kante mit der Werkzeugposition (X, Y, Z) und -orientierung (A, B, C) sowie der beiden Winkel der Flächennormalen bezogen auf das Koordinatensystem des vorlaufenden Sensors erzeugt und in das Basis-Koordinatensystem des Handhabungsgeräts umgerechnet. Diese Datensätze werden in einem Ringspeicher abgelegt und für die Positionierung des Werkzeugeingriffspunkts des Roboters verwendet. Mit diesen Informationen kann das Sensorsystem den Roboter führen. Es müssen lediglich Start- und Endpunkt der Bearbeitungsaufgabe vom Bediener definiert werden. Die Einbindung des Sensorsystems in die Robotersteuerung ist in Abbildung 6-8 schematisch dargestellt. Die Netzwerkverbindung der Systemkomponenten der Sensorik wird über einen Hub realisiert.

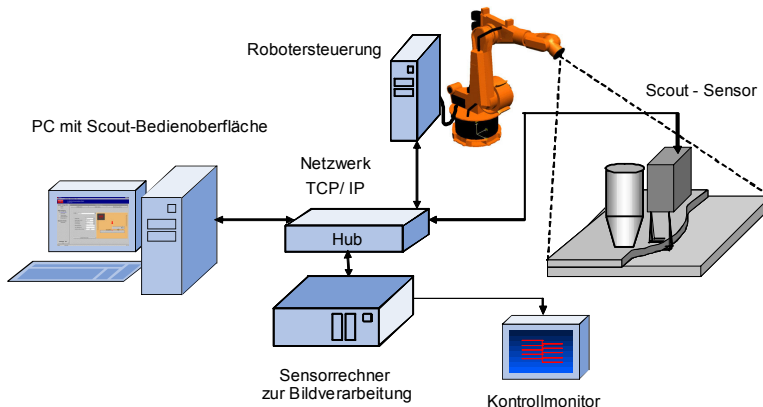


Abbildung 6-8: Schematische Darstellung der Sensorvernetzung



### 6.4.2 Sensorrechner zur Verarbeitung der Sensordaten

Das Sensorsystem besteht aus dem eigentlichen Messkopf und einem zugehörigen VME-Bus-Rechner, der sowohl die Auswertung der Sensordaten als auch die Führung des Roboters während der Konturverfolgung übernimmt. Die Anbindung des Scout-Sensors-Systems an die Robotersteuerung wird über Ethernet und TCP/IP realisiert. Das Scout-Sensors-System übernimmt dabei die Rolle des Servers, der Roboter die des Clients. Der Datenaustausch zwischen Roboter und Scout-Sensor-System erfolgt zyklisch im 12 ms Takt und beinhaltet neben der Soll- und Ist-Position des Roboters auch alle notwendigen Betriebsparameter, wie beispielsweise die Bahndateinummer, sowie Informationen über den Zustand des Systems. In der Robotersteuerung wird ein spezieller Task zur Sensordatenakquisition und -bearbeitung, der so genannte SDB-Task, zur Verfügung gestellt. In diesem Task erfolgen zum einen die Kommunikation mit dem Scout-Sensor-System und zum anderen das Einlesen der empfangenen Soll-Position in den entsprechenden Signalpfad der Steuerung, so dass der Roboter die vom Scout-Sensor-System vorgegebene Position einnehmen kann (vgl. Abbildung 6-9).

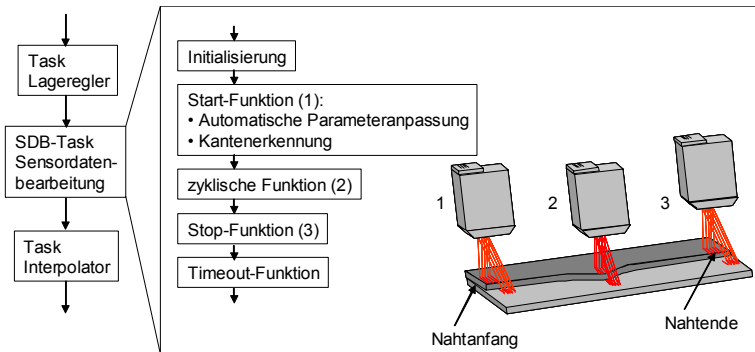


Abbildung 6-9: Roboterinterne Task zur Sensordatenbearbeitung (SDB-Task)

Neben einer Funktion zur Initialisierung können Funktionen eingebunden werden, die einmalig beim Starten und Stoppen der Kommunikationsverbindung mit dem Sensorrechner abgearbeitet werden sollen. In diesen Bereich wurden die Algorithmen zur automatischen Parameteranpassung eingearbeitet. Zudem können eine Funktion zur Timeoutbehandlung bei Zyklusüberschreitung und eine zyklische Funktion, die im Interpolationstakt abgearbeitet wird, integriert werden. Die Timeout-Funktion ermöglicht die Einleitung geeigneter Notfallstrate-

gien bei unzureichender Bilderkennung. Über die zyklische Funktion können aktuelle Parameter des Roboters, wie beispielsweise die momentane kartesische Position und Orientierung des TCP, ausgelesen werden. Dadurch kann die Dosisleistung indirekt über das Sensorsystem gesteuert werden. In der Gegenrichtung kann die aktuelle Roboterbahn beeinflusst werden, indem entweder auf die Stützstellen einer programmierten Bahn Korrekturwerte addiert, oder indem von der Bahnplanung des Sensorrechners neue Stützwerte vorgegeben werden.

### 6.4.3 Kalibrierung des Lichtschnittsensors

Die Kalibrierung des Sensorsystems hat die Aufgabe, den Anbau des Sensorkopfes an ein beliebiges Bearbeitungswerkzeug in allen Freiheitsgraden eigenständig zu vermessen. Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Sensor wird in der ersten Stufe durch den Hersteller und in der zweiten Stufe durch den Anwender vor Ort kalibriert. Bei der Montage des Sensorkopfes beim Hersteller wird die Optik vollständig vermessen. Mit Hilfe dieser Eichdaten kann das Sensorsystem in der zweiten Stufe den geometrischen Anbau des Sensorkopfes an einem Werkzeug vermessen. Dazu ist eine vom Hersteller mitgelieferte Kalibrierplatte notwendig, die exakt zum Welt-Koordinatensystem des Roboters ausgerichtet werden muss. Um eine reproduzierbare Kalibrierung über die verschiedenen Anstellwinkel des Sensors zu gewährleisten, wurde die Kalibrierplatte fest in die Versuchszelle installiert. Bei der Kalibrierung wird die Lot-Orientierung des Sensorkopfes sowie dessen Anbau in Bezug auf die Werkzeugschulter vermessen. Damit wird eine geometrische Verknüpfung zwischen den Koordinatensystemen des Sensors und des Roboters hergestellt. Dies ist notwendig, um dem eingesetzten Sensorsystem die Position des Roboters vorgeben zu können.

Die Sensorkalibrierung und das Vermessen der Werkzeugschulter haben einen entscheidenden Einfluss auf die spätere Qualität der Bahnbearbeitung. Insbesondere bei räumlich gekrümmten Bauteilen mit Umorientierung des Bearbeitungswerkzeugs führen kleinste Ungenauigkeiten beim Vermessen der jeweiligen Einheiten zu großen Bahnabweichungen (vgl. Abschnitt 6.2.2).

### 6.4.4 Implementierung

Die erarbeiteten Algorithmen zur automatischen Parameteranpassung wurden in das Bahnbearbeitungsprogramm des Scout-Sensorsystems implementiert. Die grafische Bedienoberfläche ist unter JAVA programmiert und unterstützt die gängigen Betriebssysteme unter MS-Windows und LINUX. Innerhalb der Be-

dienoberfläche werden die Erstellung, der Test und die Verwaltung der Anwenderprogramme für die sensorgeführte Robotersteuerung ermöglicht [BARTHEL 2001]. Mit Hilfe des Programmiersystems können neben der eigentlichen sensorischen Roboterführung auch die unterschiedlichen Konzepte zur automatischen Parameteranpassung implementiert werden. Die Funktionalität und die Syntax der sensorspezifischen Programmiersprache lehnen sich an die Hochsprache Turbo Pascal an und erlauben ähnliche Befehlsstrukturen. Abbildung 6-10 gibt ein typisches Beispiel eines Roboterprogramms für sensorgestützte Applikationen wieder.

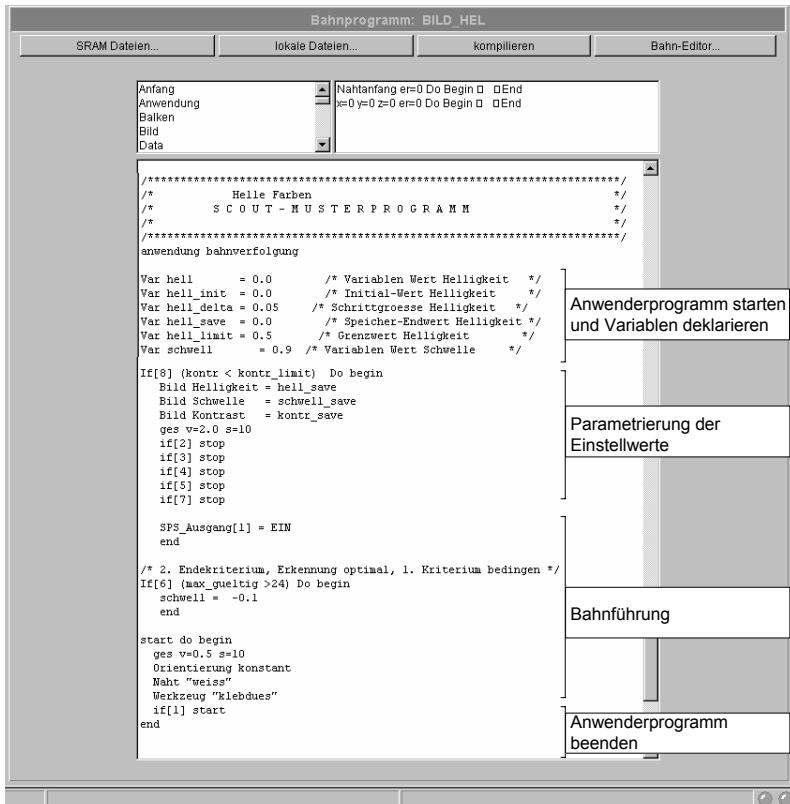


Abbildung 6-10: Beispielhafte Programmstruktur eines Bahnprogramms

Darin ist eine Struktur mit dem Abschnitten Starten, Parametrieren, Bahnführung und Beenden des Anwenderprogramms zu erkennen. Nach dem Programmaufruf werden beim Start die jeweiligen Einstellparameter als Variablen definiert. Die zuvor erarbeiteten Algorithmen sind jeweils im Programmteil Parametrieren eingeordnet. Das eigentliche Programm zur Bahnführung beinhaltet die autonome Sensorführung unter Berücksichtigung der vorgegebenen geometrischen Randbedingungen. Das Programmende wird über ein geometrisches oder boolesches Abbruchkriterium bestimmt. Die Programmstruktur innerhalb des Anwenderprogramms wurde so aufgebaut, dass eine einfache Übertragung auf die Quellcodeebene des Sensors möglich ist. Aufgrund von softwarebedingten Sicherheitsaspekten kann diese Ebene von dem Hersteller des Sensorsystems nicht für den Anwender frei gegeben werden.

### 6.5 Strategien zur Verringerung systematischer Dosierfehler

Eine automatisierte klebtechnische Fertigungszelle besteht mindestens aus den Teilsystemen Klebstoffdosierung und Handhabungseinheit. Bei Roboterzellen ohne Konturfolgesensorik erzeugt die Steuerung des Handlingsystems als Führungsgröße für die Dosiersteuerung ein Analogsignal, welches der Geschwindigkeit im TCP proportional ist. In der Praxis wird durch eine iterative Programmierung der Robotersteuerung eine ausreichende Synchronisierung erreicht, deren Qualität allerdings stark von den individuellen Fähigkeiten des Programmierers abhängt. Mit steigender Robotergeschwindigkeit und Komplexität des Bauteils gelangt die intuitive Synchronisierung an ihre Grenze. Selbst kleine Abweichungen führen auf dem Bauteil zu starken Unter- oder Überdosierungen. Die von GARTNER [2001, S. 125-127] vorgeschlagenen Methoden zur Reduzierung der Dosierfehler durch selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen gehen von einer exakt definierten Bauteillage aus und können daher nicht angewendet werden.

Die eingesetzte Sensorik zur Konturverfolgung ist neben der Verbesserung der Bahnführung beim Klebstoffauftrag auch zur Funktionssteuerung der Dosiereinheit und Qualitätsüberprüfung geeignet. Anhand von Auftragsversuchen können die dynamischen Eigenschaften des Systems Roboter-Sensor dargestellt werden. Zudem können die Umsetzbarkeit der zusätzlich eingebundenen Funktionen und Bearbeitungsstrategien innerhalb dieser Versuche im Hinblick auf eine Verringerung der systematischen Dosierfehler überprüft werden.

### 6.5.1 Dynamische Eigenschaften des Systems Roboter-Sensor

Das dynamische Verhalten von Handhabungsgerät und integriertem Sensorsystem hat großen Einfluss auf die zulässige Vorschubgeschwindigkeit beim Klebstoffauftrag [HOLLING 1990]. Die Auswirkungen auf die erreichbaren Bahngeschwindigkeiten und Genauigkeiten bei einer vorgegebenen Richtungsänderung wurde in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht, die sich mit der Entwicklung von Konturfolgesensoren beschäftigen [PRITSCHOW U. A. 1992, LANGE & HIRZINGER 1994, HORN 1994, REEK 2000, WENK 2002]. Darin werden verschiedene Richtwerte und Einsatzgrenzen für den zulässigen Bahnkrümmungsradius und -knickwinkel in Abhängigkeit von der jeweiligen Bahngeschwindigkeit vorgeschlagen. Der ausgewählte Dachflansch weist komplexe, aber stetige Kurvenverläufe auf, die deutlich unter den vorgegebenen Grenzwerten liegen [WENK 2002, REEK 2000]. Diese Ergebnisse können trotz der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit beim Klebstoffauftrag auf die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Bauteilgeometrien übertragen werden. Die lagerichtige Positionierung der Klebstoffdüse zum Bauteil ist somit bei streckenkonstanter Dosierung gewährleistet.

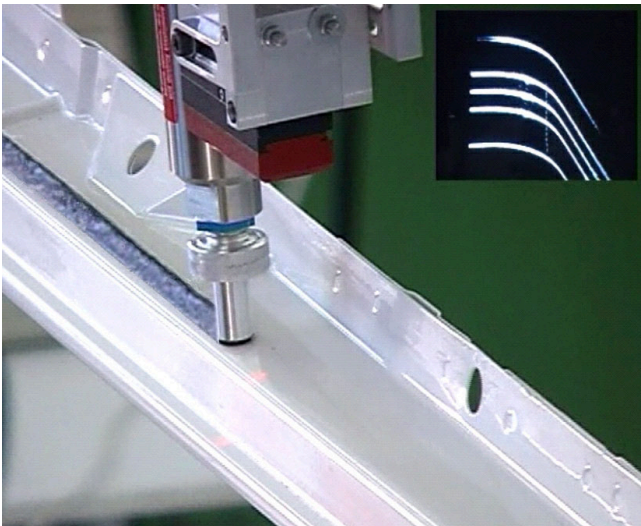


Abbildung 6-11: Realisierter sensorgeführter Klebstoffauftrag mit eingeblendetem Multilichtschnitt

Bei gekrümmten Bahnen kann eine konstante Bearbeitungsgeschwindigkeit aufgrund von kinematischen Restriktionen des Handhabungsgerätes nicht immer verwirklicht werden. Die zur Richtungsänderung beziehungsweise Umorientierung der Auftragsdüse erforderlichen Winkelgeschwindigkeiten und Winkelbeschleunigungen können von den Antrieben des Handhabungssystems nicht mehr erzeugt werden. Um die Sollbahn einhalten zu können, muss die Vorschubgeschwindigkeit herabgesetzt und die Dosierleistung angepasst werden.

Im Weiteren wird deshalb die Möglichkeit zur Steuerung der Dosierleistung durch den Sensor in Abhängigkeit von der Bahngeschwindigkeit untersucht. Die eingesetzte Sensorsteuerung verfügt dabei über die notwendigen Funktionalitäten, um diese Strategie umzusetzen.

### 6.5.2 Einsatz des Sensors zur Funktionssteuerung

Im Hinblick auf den Bearbeitungsprozess, der von der sensorgeführten Roboterzelle durchgeführt werden soll, sind grundsätzlich zwei Funktionen erforderlich. Die primäre Aufgabe besteht darin, die Bahn des Roboters so zu steuern, dass die Auftragsinheit exakt über dem Werkstück positioniert wird (vgl. Abbildung 6-11). Neben der optimalen Positionierung des Werkzeugs ist die Steuerung der Werkzeugfunktionalität die sekundäre Aufgabe des Softwaresystems. Dies umfasst sowohl binäre Steuerdaten, wie zum Beispiel das Aktivieren beziehungsweise Deaktivieren der Dosiereinheit, als auch analoge Steuerdaten, wie beispielsweise das Steuern der Dosierleistung. Durch die Funktionssteuerung können somit Dosierfehler, die aus Abstimmungsfehlern zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Dosierleistung resultieren, verringert werden. Als mögliche Kompensationsstrategien kommen das

- vorzeitige Anstellen der Dosiereinheit (antizipierte Orientierungsänderung) und
- das Absenken der Bahngeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verminderung der Dosierleistung

in Betracht [GARTNER 2001]. Die antizipierte Orientierungsänderung ist nur bedingt möglich, da zur Erzeugung einer gleichmäßigen dreieckförmigen Raupengeometrie die Düse immer orthogonal zur Bauteiloberfläche ausgerichtet werden muss. Zudem wird bei einer Vororientierung die in Bewegungsrichtung nach hinten gerichtete, V-förmige Düsenöffnung aus der Vorschubrichtung gedreht (vgl. Abbildung 2-3). Dadurch kommt es zu Unregelmäßigkeiten in der

Raupenform. Aufgrund der großen Bauteilabmessungen treten weiterhin Einschränkungen in den Achsbewegungen auf, die eine zusätzliche Bewegungsänderung nicht zulassen.

Die relevante Bearbeitungsstrecke wird mit den jeweiligen maximalen Bearbeitungsgeschwindigkeiten abgefahren und die Bahndaten mit Hilfe des Konturfolgesensors abgespeichert. In anwenderspezifischen Tabellen können damit von der Software Bahndateien referenziert werden. Dadurch werden die ermittelten funktionalen Ausdrücke eines Indexwerts in beliebiger Form einem daraus ableitbaren Wert zugewiesen. Die erzeugten Tabellenwerte können anschließend auf den Analogausgang des Sensorsystems übertragen werden. Dabei werden Stützwerte für die Funktion angegeben, zwischen denen die Software linear interpoliert, was einer guten Näherung der realen Dosiercharakteristik entspricht.

Wegen des trägen Ansprechverhaltens der Dosiereinheit wurden drei Geschwindigkeitsverläufe generiert. Mit der Anfahrts- und Verzögerungsrampe werden der Start- und Endpunkt der Klebstoffbahn definiert. Bei der größten Bearbeitungsgeschwindigkeit wird die maximale Dosierleistung festgelegt (vgl. Abbildung 6-12).

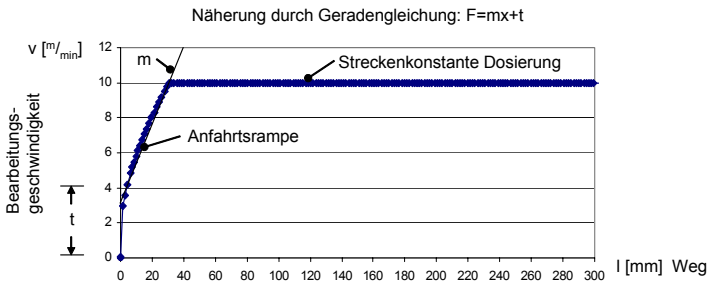


Abbildung 6-12: Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs „Anfahrtsrampe“

Die Verschiebung „t“ ergibt sich aus dem Trägheitsverhalten der Motorleistung und der inneren Reibung der Dosierpumpe. Nach dem ersten Hochfahren kann die Geschwindigkeit linear erhöht werden. Bei der Verzögerungsrampe wird eine Verschiebung „-t“ durchgeführt, um Endkleckse beziehungsweise das Nachziehen von Klebstoff zu vermeiden. Die Spannungsausgabe erfolgt direkt über dem analogen Ausgang der Sensoreinheit und wird durch den Frequenzwandler in die entsprechende Leistungskurve der Dosiereinheit übersetzt.

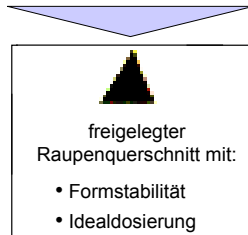
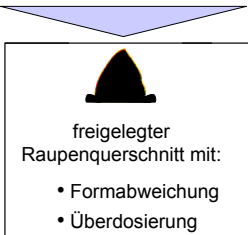
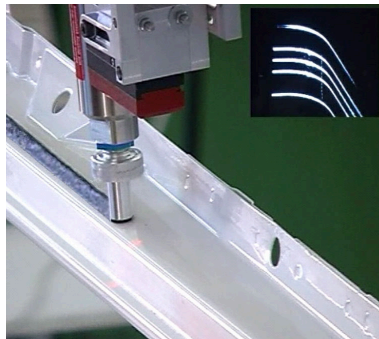
### 6.5.3 Auftragsergebnisse

Die Wirksamkeit des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten sensorgeführten Klebstoffauftrags konnte innerhalb von Auftragsversuchen verifiziert werden. Beim starr automatisierten Klebstoffauftrag wurde bei der Programmierung der Bearbeitungsbahn ein Sicherheitsabstand von zwei Millimetern über der Bauteiloberfläche eingehalten. Dadurch sollen Kollisionen mit dem Bauteil verhindert werden. Für den sensorgeführten Auftragsprozess wurden nur die obligatorischen Start- und Endpunkte programmiert. Die Verfahrensgeschwindigkeit wurde für beide Auftragsalternativen auf 10 m/min festgesetzt. In Abbildung 6-13 sind die Qualitätsunterschiede der aufgetragenen Klebstoffraupen deutlich erkennbar.

**Starr automatisierter Auftrag**



**Sensorgeführter Auftrag**



*Abbildung 6-13: Darstellung des Auftragsergebnis ohne und mit Sensorführung*

Neben dem äußeren optischen Vergleich der aufgetragenen Klebstoffraupen hinsichtlich der erreichbaren Lagegenauigkeit wurden auch die jeweiligen Raupenquerschnitte näher untersucht. Dazu wurden die ausgehärteten Klebstoffraupen



pen von den Bauteilen abgetrennt und in dünne Scheiben zerschnitten. Die so erhaltenen Raupenquerschnitte wurden abfotografiert.

Dabei ist eine deutliche Verbesserung der Auftragsqualität bei der sensorgeführten Applikation zu erkennen. Somit konnte die industrielle Einsatzfähigkeit des Sensorsystems bei klebtechnischen Anwendungen mit hohen Fertigungstoleranzen eindeutig nachgewiesen werden.

### 6.5.4 Einsatz des Sensors zur Qualitätsüberprüfung

Neben der umfangreichen Prozesssteuerung **während** des Klebstoffauftrags kann der Sensor auch zur Qualitätsüberprüfung der Klebstoffraupe **nach** dem Auftrag herangezogen werden. Basierend auf dieser Überprüfung können dann geeignete Maßnahmen zur Fehlerkompensation entwickelt werden. Die Software des Sensorsystems stellt dabei ein Messmodul zur Verfügung, das die Aufnahme von unterschiedlichen Raumpunkten erlaubt. Die geometrische Auswertung der Messdaten erfolgt nach dem bekannten Lichtschnittprinzip. Der Sensor wird von dem Handhabungsgerät an die jeweiligen Messpunkte geführt. Die Bahnplanung des Sensors ist hierbei deaktiviert.

Bei der Messung ist zu beachten, dass die Verfahrensgeschwindigkeit deutlich niedriger ist als beim Klebstoffauftrag, um eine möglichst hohe Messrate zu erhalten. Insbesondere kurze Unterbrechungen und Einschnürungen der Klebstoffraupe erfordern eine große Messauflösung. Allgemein gilt, je schneller die Messung, desto weniger Messpunkte stehen zu Verfügung. Daher ist es sinnvoll nur markante Stellen, wie beispielsweise enge Radien oder Knicke, partiell zu untersuchen. Diese Bereiche müssen vorher definiert werden.

Das Sensorsystem kann gleichzeitig nur zwei unterschiedliche Konturverläufe detektieren, die als Flanschüberstand oder Fügespalt erkannt werden. Diese müssen außerdem im Messbereich des Sensors liegen, der durch die Breite der Lichtbalken vorgeben ist. Die Sensorfeldbreite weist standardmäßig einen Wert von 16 mm auf, kann jedoch bis auf 35 mm erweitert werden [BARTHEL 2001]. Bei der Auswertung der Messergebnisse erhält man entweder den Abstand einer Bezugskante zu dem Verlauf der äußeren Klebstoffraupe oder dem Verlauf der Raupenbreite (vgl. Abbildung 6-14). Für eine vollständige Positionsbestimmung sind demnach zwei Messungen am gleichen Messort erforderlich.

## 6 Aufbau und Betrieb des Anwendungsbeispiels

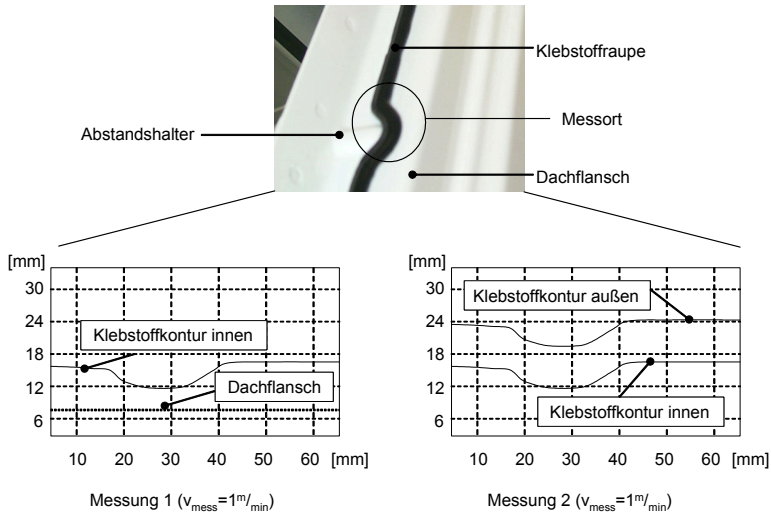


Abbildung 6-14: Darstellung der Messergebnisse eines ausgewählten Konturverlaufs der Klebstoffraupe

Der Messort und somit die Lage von etwaigen Fehlstellen sind durch die Vermessung innerhalb des sensorspezifischen Koordinatensystems geometrisch eindeutig bestimmt. Anhand dieser Daten können dann in weiterführenden Arbeiten Strategien zur Fehlerbehebung entwickelt und überprüft werden.

Am Beispiel des Dachflanschs wurde ein möglicher Fehlerkatalog erstellt und hinsichtlich der Erkennbarkeit dieser Fehlstellen mit Hilfe des eingesetzten Sensorsystems umfassend untersucht. Dieser soll als Basiskatalog für die zukünftigen Untersuchungen herangezogen werden. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

Fehlstelle	Fehlererkennung
Anfangs-/Endklecks	◐
Abstand von der Raupe zur Bauteilkante	●
Unterdosierung (dünne Raupe)	●
Überdosierung (dicke Raupe)	●
Raupenhöhe	○
Unterbrochene Raupe	◐
Legende:	○: niedrig      ◐: mittel      ●: hoch

Tabelle 6-3: Fehlerkatalog und mögliche Fehlererkennung

Bis auf die Raupenhöhe, die bei senkrechter Betrachtung nicht erkennbar ist, konnten alle Fehlstellen ermittelt werden. Kleine Anfangs-/Endkleckse sowie kurze Raupenunterbrechungen konnten nur bei Verwendung einer hohen Messrate erfasst werden. Mit dem hier eingesetzten Sensorsystem können damit die ausgewählten Fehlstellen grundsätzlich nachgewiesen werden. Für eine vollständige Kontrolle der gesamten Klebstoffraupe ist das Sensorsystem allerdings zu langsam. In der Industrie werden beispielsweise kostengünstige optische Systeme im Nachlauf der Klebstoffdüse installiert, die eine eindimensionale Anwesenheitskontrolle der Klebstoffraupe durchführen. Eine Vermessung der Klebstoffraupe nach Lage und Form findet dabei nicht statt. Eine Kombination der unterschiedlichen Sensorsysteme kann zu einer erheblichen Verbesserung der Qualitätskontrolle des Klebstoffauftrags beitragen und sollte daher in weiteren Arbeiten vertieft werden.

## 6.6 Zusammenfassung

Der Einsatz des Sensorsystems zur Konturverfolgung erlaubt den qualitativ hochwertigen Klebstoffauftrag auch bei großen Fertigungstoleranzen. Im Rahmen eines fertigungsnahen Versuchsstands wurde die Sensorik in den Bearbeitungsprozess eingebunden. Dazu wurden alle wesentlichen Komponenten einer automatisierten Klebezelle berücksichtigt.

Der Aufbau des Demonstrators wurde maßgeblich durch die Verwendung eines Simulationssystems unterstützt. Diese wurde zur Planung, Programmierung und Optimierung der Zellelemente herangezogen. Es konnte gezeigt werden, dass damit die Einstellung der richtigen Vorlaufänge des Sensors auch ohne aufwändige Berechnungen durchgeführt werden kann.

Mit den implementierten Algorithmen zur automatischen Parameteranpassung konnten neben den untersuchten Probekörpern auch die Fahrerkabinen unter realen Fertigungsbedingungen mit dem Sensorsystem bearbeitet werden. Somit ist ein Klebstoffauftrag, unterstützt durch eine optische Sensorführung, auf beliebigen Oberflächen grundsätzlich realisierbar.

Zudem wurden Strategien entwickelt, die zu einer erheblichen Verringerung der systematischen Dosierfehler beim Klebstoffauftrag beitragen. Dazu wurde das dynamische Verhalten von Handhabungsgerät und integriertem Sensorsystem untersucht und daraus eine geeignete Funktionssteuerung der Dosiereinheit abgeleitet. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass durch die Sensorsteuerung die Qualität der Raupenlage und -form deutlich gesteigert werden kann.

Im Hinblick auf eine abschließende Qualitätsüberprüfung konnten spezifische Dosierfehler an ausgewählten kritischen Stellen mit dem Sensorsystem identifiziert werden. Einschränkungen gelten nur für die Vermessung der Raupenhöhe und die maximale Messgeschwindigkeit.

Mit der Realisierung der roboterbasierten und sensorgestützten Versuchsanlage zum automatisierten Klebstoffauftrag auf lackierte Dachflansche konnte die Funktionalität des Gesamtsystems unter industriellen Einsatzbedingungen nachgewiesen werden. Die erzielte Bearbeitungsqualität entsprach den industriellen Anforderungen.

## **7 Wirtschaftliche Bewertung**

Die Integration von Prozesssensorik ist trotz der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Methoden zur automatischen Parameteranpassung und Programmierung von Konturfolgesensoren mit einem hohen technologischen und finanziellen Aufwand verbunden. Neben den Investitionskosten für die Beschaffung der eingesetzten Sensorik ist darüber hinaus der Aufwand für die individuelle Inbetriebnahme, Wartung und Bedienung der in der Regel komplexen Sensorsysteme zu nennen. Deshalb werden in diesem Kapitel die wirtschaftlichen Gesichtspunkte zum Einsatz von optischen Konturfolgesystemen diskutiert.

Für eine wirtschaftliche Bewertung zum Einsatz von Konturfolgesensorik sind zum einen die Kosten zur Inbetriebnahme einer automatisierten Klebstoffauftragszelle und zum anderen die Kosten für das eigentliche Betriebsverhalten der Anlage zu untersuchen. Bei der Kostenermittlung werden nur die voneinander abweichenden Systemkomponenten betrachtet. Die Investitions- und Betriebskosten für die Grundelemente der Klebstoffauftragszelle werden als gleich angenommen.

### **7.1 Inbetriebnahme**

Die Inbetriebnahme einer Roboterzelle erfordert neben dem Aufbau der Systemhardware auch die Programmierung der Anlage hinsichtlich ihrer speziellen Bearbeitungsaufgabe. Für die herkömmliche Programmierung der Roboteranlage kommen die in Abschnitt 2.3.2.3 erläuterten Verfahren zur Online- und Offline-Programmierung in Frage. Sensorgestützte Applikationen müssen in der Regel auch programmiertechnisch bearbeitet werden. Bei der Online-Programmierung erfolgt die detaillierte Anpassung der Bearbeitungsbahn direkt an der Roboteranlage. Der Einsatz von Offline-Verfahren setzt zum Teil sehr leistungsfähige Rechner voraus, die zu erheblichen Kostensätzen für den Programmierplatz führen können. Die Stundensätze eines Rechnerarbeitsplatzes sind dabei im Mittel erheblich höher als die einer Roboteranlage. Aufgrund der komplexen Modellierungs- und Programmiersysteme ist für die Offline-Programmierung eine höhere Mitarbeiterqualifikation erforderlich, was höhere Personalkosten im Vergleich zur Online-Programmierung bedingt. Die Zeiten, die zur Erstellung eines Roboterprogramms unter Anwendung der sensorgestützten Programmierung benötigt werden, beschränken sich in der Regel auf wenige Minuten.

## 7 Wirtschaftliche Bewertung

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Programmierzeiten stark von der Komplexität der Bauteilgeometrie abhängen. Insbesondere bei der Programmierung von komplizierten Bewegungsbahnen können mit einer automatischen Bahnadaption durch Konturfolgesysteme die Zeiten für das Feinprogrammieren deutlich gesenkt werden.

Anhand des Anwendungsbeispiels wurden die unterschiedlichen Zeiten zur Programmierung mit den jeweiligen Programmierverfahren ermittelt. Betrachtet wurde dabei der Klebstoffauftrag auf den Dachflansch für die linke Seite der Fahrerkabine. Die Anwendungsprogramme wurden durch einen erfahrenen Programmierer erstellt und mit den aktuellen Stundensätze aus der Industrie verrechnet (vgl. Tabelle 7-1).

	Online- Verfahren (On)	Offline- Verfahren (Off)	Sensorgestützte Verfahren (Sens)
Programmierzeit ( $T_{\text{Prog}}$ )	8 [h]	3 [h]	1 [h]
Modellierungszeit ( $T_{\text{Mod}}$ )	-	6 [h]	-
Programmkorrektur ( $T_{\text{Kor}}$ )	-	1 [h]	-
Stundensätze (S)	120 [€/h]	135 [€/h]	125 [€/h]
Programmierkosten (K)	960 €	1.350 €	125 €

*Tabelle 7-1: Vergleich der notwendigen Programmierzeiten und -kosten der vorgestellten Programmierverfahren*

Der Kostenmehraufwand durch Simulationshard- und -software wurde anteilig auf die Stundensätze der Offline-Programmierung zugeschlagen. Die Gesamtprogrammierkosten zur Inbetriebnahme können wie folgt berechnet werden [ZELLER 1995]:

$$K_{\text{On}} = S_{\text{Rob}} * T_{\text{ProgOn}} \quad (\text{Gleichung 7-1})$$

$$K_{\text{Off}} = S_{\text{Prog}} * T_{\text{Mod}} + S_{\text{Prog}} * T_{\text{ProgOff}} + S_{\text{Rob}} * T_{\text{Kor}} \quad (\text{Gleichung 7-2})$$

$$K_{\text{Sens}} = S_{\text{Sens}} * T_{\text{ProgSens}} \quad (\text{Gleichung 7-3})$$

Sämtliche Programmierstätigkeiten werden in der Regel außerhalb der Produktionszeit durchgeführt, so dass keine Stillstandszeiten entstehen. Die hohen Kosten bei der Offline-Programmierung werden durch den in diesem Fall vergleichsweise großen Aufwand zur Modellierung und Vermessung des Anlagenlayouts verursacht. Bei einer Mehrfachnutzung des erstellten Modells, beispielsweise durch die Integration der Prozessschritte zur Scheibenverklebung, fällt der Kostenanteil deutlich niedriger aus.

## 7.2 Betriebsverhalten

Die wesentlichen Kosten beim Raupenauftrag werden durch die Betriebskosten der automatisierten Roboteranlage bewirkt. Als Bewertungsgröße für eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsrechnung zwischen starrem und sensorgeführtem Klebstoffauftrag werden die Kosten pro Meter aufgetragener Klebstoff  $K_{Kleb}$  herangezogen. Diese berechnen sich aus dem jeweiligen Maschinenstundensatz  $K_M$  und den für die Nachbearbeitung notwendigen Lohnkosten  $K_L$  bezogen auf die Auftragsgeschwindigkeit  $u_A$  mit 10 m/min nach

$$K_{Kleb} = \frac{K_M + K_L}{u_A} \quad (\text{Gleichung 7-4})$$

Für den Aufbau einer realen Fertigungszelle werden folgende Investitionskosten veranschlagt (vgl. Tabelle 7-2).

<b>Handhabungsgerät mit</b>	<b>€</b>	<b>70.000</b>
Steuerung und Schnittstellen		
<b>Systemperipherie mit</b>	<b>€</b>	<b>300.000</b>
Bevorratungseinheit		
Förder- und Schlauchsystem		
Dosiereinheit		
<b>Sensorsystem</b>	<b>€</b>	<b>30.000</b>

Tabelle 7-2: Investitionskosten

## 7 Wirtschaftliche Bewertung

---

Damit können die Maschinenstundensätze in Abhängigkeit der einzelnen Investitionskosten  $K_{\text{Invest}}$  für die beiden Konzepte nach VDI-RICHTLINIE 3258A und VDI VDI-RICHTLINIE 3258B berechnet werden. Die Nutzungsdauer  $N_D$  wird nach Angaben des Nutzfahrzeugherstellers mit 8 Jahren bei einem kalkulatorischen Zinssatz  $Z_s$  von 7% festgesetzt. Die Verfügbarkeit  $V$  der Auftragsanlage wird auf 95% angesetzt. Die Einsatzzeit  $T_E$  beträgt im Zweischichtbetrieb bei 245 Arbeitstagen ca. 3.900 h/a. Die Raumkosten  $K_R$  werden mit 2,50 €/h und die Betriebskosten  $K_B$  mit 1,30 €/h pauschal veranschlagt. Die Instandhaltungskosten  $K_I$  berechnen sich mit 7% der kalkulatorischen Abschreibungen. In Anlehnung an die Richtlinie VDI 3258A folgt:

$$K_M = K_A + K_Z + K_R + K_B + K_I \quad (\text{Gleichung 7-5})$$

$$K_A = \frac{K_{\text{Invest}}}{N_D * T_E * V} \quad (\text{Gleichung 7-6})$$

$$K_Z = \frac{K_{\text{Invest}} * Z_s}{2 * T_E * 100 * V} \quad (\text{Gleichung 7-7})$$

Durch die schlechte Auftragsqualität müssen im Jahresmittel zwischen 12 und 15% der Fahrerkabinen mit einer durchschnittlichen Bearbeitungszeit von 4 Minuten je Kabinenseite nachbearbeitet werden. Der Arbeitslohn  $K_L$  liegt einschließlich sämtlicher Fertigungsnebenkosten bei 80 €/h. Die anteiligen Lohnkosten ergeben sich daher zu 2,50 €/h. Aus den ermittelten kostenspezifischen Daten können die Kosten pro Meter aufgetragenem Klebstoff berechnet werden (vgl. Tabelle 7-3).



	Starr automatisierter Auftrag	Sensorgeführter Auftrag
Investitionskosten ( $K_{\text{Invest}}$ )	370.000 €	400.000 €
Abschreibungskosten ( $K_{\text{A}}$ )	12,48 €/h	13,50 €/h
Kalk. Zinskosten ( $K_{\text{Z}}$ )	3,50 €/h	3,77 €/h
Instandhaltungskosten ( $K_{\text{I}}$ )	0,87 €/h	0,95 €/h
Maschinenstundensatz ( $K_{\text{M}}$ )	20,65 €/h	22,02 €/h
Nachbearbeitungskosten ( $K_{\text{L}}$ )	7,50 €/h	-
Kosten pro Meter aufgetragenen Klebstoff ( $K_{\text{Kleb}}$ )	0,047 €/m	0,037 €/m

*Tabelle 7-3: Vergleich der Auftragskosten zwischen einer starr automatisierten und einer sensorgeführten Klebstoffapplikation*

### 7.3 Bewertung

Die Berechnungen zu den Programmier- und Auftragskosten zeigen, dass nur bei häufig auftretenden Anpassungstätigkeiten eine sensorgestützte Programmierung Vorteile bringt. Hingegen kann der eigentliche Betrieb durch eine Sensorführung um bis zu 21,4% anlagentechnisch günstiger gestaltet werden. In dieser Berechnung ist die Reduzierung der Klebstoffmenge bei einer qualitativ hochwertigen Klebstoffraupe nicht enthalten. Bedingt durch die Fertigungstoleranzen muss ein Sicherheitsabstand von zwei Millimetern über dem Dachflansch eingehalten werden. Durch das Wegfallen des dadurch erzeugten Klebstoffsockels können zwischen 5 und 8% der gesamten Klebstoffmenge eingespart werden. Bei einem Klebstoffpreis von 3,50 € pro Liter ergibt sich damit eine durchschnittliche Ersparnis von 5.070 € im Jahr, was 0,015 €/m pro Meter aufgetragenem Klebstoff entspricht.

Darüber hinaus können noch Vorteile bei der konstruktiven Gestaltung des Dachflanschs abgeleitet werden, da durch einen genaueren Klebstoffauftrag auch die jeweiligen Flanschbreiten verringert werden können.



## **8 Zusammenfassung**

In derzeitigen Industrierobotern sind Bewegungsanweisungen zur Ausführung der Fertigungsaufgabe in der Regel durch explizite Bewegungsvorgaben programmiert. Der Einsatz von Industrierobotern in der Klebtechnik zum raupenförmigen Auftrag von Klebstoff auf unterschiedliche Bauteilgeometrien ist prinzipiell möglich und wird in immer größerem Umfang angewandt. Durch die hohen fertigungsbedingten Toleranzen, vor allem bei großvolumigen Bauteilen, lassen sich oftmals keine ausreichenden Auftragsergebnisse des Klebstoffs erzielen. Eine alleinige Bahngenerierung durch Teach-In oder Offline-Programmierung ist daher nicht Erfolg versprechend, so dass intelligente Konturfolgesensoren für einen automatisierten Klebstoffauftrag eingesetzt werden müssen. Insbesondere optische Sensoren weisen dafür ein hohes Einsatzpotenzial auf. Die klebtechnischen Produktionsbedingungen unterscheiden sich wesentlich von denen der Schweißtechnik, wo optische Konturfolgesensoren bereits prozesssicher in die Fertigung eingebunden sind. Im Gegensatz zur traditionellen Schweißtechnik im Karosserierohbau mit gleich bleibenden Werkstoffoberflächen und Reflexionseigenschaften der Bauteile, wird in der Klebtechnik häufig auf bereits fertig lackierte Komponenten in der Endmontage Klebstoff aufgetragen. Neben den unterschiedlichen Werkstoffoberflächen und -strukturen stellt die Vielzahl an Farbvarianten mit ihrem erheblich variierenden Reflexionsverhalten hohe Anforderungen an die prozessrobuste Einstellung der Sensorparameter dar.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, durch die Betrachtung der systemtechnischen Möglichkeiten eine nachhaltige Qualitätssteigerung durch eine lage- und formgenaue Dosierung beim automatisierten Klebstoffauftrag zu erreichen. Zu diesem Zweck wurden Lösungen erarbeitet, mit deren Hilfe die Einsatzfähigkeit optischer Konturfolgesensoren, die nach dem Triangulationsprinzip arbeiten, unabhängig von den Oberflächeneigenschaften der Werkstücke erheblich verbessert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Fehlerursachen beim Klebstoffauftrag ermittelt und geeignete optische Sensorsysteme zur Fehlerkompensation vorgestellt. Durch die experimentelle Erfassung der relevanten Einflussgrößen auf die eingesetzte Sensorik und Gegenüberstellung mit externen Messwerten wurde nachgewiesen, dass die sensorspezifischen Systemvariablen nicht allgemeingültig abgebildet werden können. Deshalb müssen die jeweiligen Einstellwerte individuell an die Fertigungsumgebung angepasst werden.

Als geeignete Lösung zum flexiblen Sensoreinsatz wurde die automatische Parameteranpassung identifiziert. Dafür wurden vier Grundalgorithmen entwickelt, die eine automatische Anpassung der Einstellparameter erlauben. Diese lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. In der ersten Gruppe sind die Verfahren eingeordnet, die auf den in den Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnissen aufbauen. Die zweite Gruppe zeigt mögliche Strategien zur Eigenoptimierung der Einstellparameter auf, bei denen keine oder nur wenige Vorversuche notwendig sind. Ausgehend von diesen Basisalgorithmen sind auch Verfahrenskombinationen untereinander denkbar, welche die spezifischen Nachteile der einzelnen Grundalgorithmen kompensieren können. Abschließend wurde eine allgemeine Vorgehensweise zur Parameteranpassung von optischen Sensoren abgeleitet, die prinzipiell auf alle Sensorsysteme übertragen werden kann, die ähnliche Methoden zur Lichtschnittauswertung aufweisen.

Um den sensorgeführten Klebstoffauftrag zu verifizieren, wurde ein modifiziertes Sensorsystem innerhalb eines fertigungsnahen Versuchsstands in den Bearbeitungsprozess eingebunden. Dazu wurden alle erforderlichen Komponenten einer automatisierten Klebezelle berücksichtigt. Die Planung, Programmierung und Optimierung der Zellelemente für die Beispielapplikation wurden mit einem Kinematik-Simulationssystem durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Einstellung der richtigen Vorlauflänge des Sensors auch ohne aufwändige Berechnungen durchgeführt werden kann.

Neben der Verifizierung der Leistungsfähigkeit der vorgestellten Algorithmen zur automatischen Parameteranpassung wurden Strategien entwickelt, die zu einer erheblichen Verringerung der systematischen Dosierfehler beim Klebstoffauftrag beitragen. Dazu wurde das dynamische Verhalten von Handhabungsgerät und integriertem Sensorsystem untersucht und daraus ein geeignetes Vorgehen zur Funktionssteuerung der Dosiereinheit abgeleitet. Durch die Sensorsteuerung konnte die Qualität der Raupenlage und -form deutlich gesteigert werden. Abschließend wurde gezeigt, dass mit dem eingesetzten Sensorsystem eine Qualitätsüberprüfung der Klebstoffraupe durchgeführt und spezifische Dosierfehler identifiziert werden können.

Wie in der Arbeit herausgestellt wurde, werden die Grenzen des Einsatzes der Klebtechnik heute noch stark durch die zur Verfügung stehende Systemtechnik vorgegeben. Eine erhöhte industrielle Akzeptanz des Sensoreinsatzes ist sicherlich dann zu erwarten, wenn die Integration und Verarbeitung von Sensordaten in Robotersteuerungen in einem vertretbaren technischen und wirtschaftlichen

Aufwand realisierbar ist. Fehlende Schnittstellenstandards und restriktive Bereitstellung von Zugriffsrechten auf roboter- und sensorspezifische Programmstrukturen erfordern einen unverhältnismäßig hohen Engineeringaufwand. Die Umsetzung einer Sensoranbindung wird deshalb in der Regel an die jeweilige Problemstellung adaptiert und verfügt nur über einen geringen Wiederverwendungsgrad. Mit dieser Arbeit wurde ein Beitrag zur Förderung des Sensoreinsatzes in der Klebtechnik geleistet, um eine höhere Qualität der aufgetragenen Klebstoffraupen und eine Verbesserung der Klebverbindung zu erzielen.

Zukünftige Arbeiten müssen sich vor allem mit der Steigerung der sensorgeführten Bearbeitungsgeschwindigkeit, auch für alternative Auftragsprozesse, beschäftigen. Ansatzpunkte sind hierbei speziell in der Erweiterung der Leistungscharakteristik der Kameratechnik auf Seiten der Empfangseinheit und in der schnellen Signalverarbeitung durch die Auswertungseinheit zu sehen.



## 9 Literaturverzeichnis

ABMAYR 1994

Abmayr, W.: Einführung in die digitale Bildverarbeitung. Stuttgart: Teubner 1994.

ADHÄSION 2003

Doobe, M. (Red.): Vertikal und horizontal exakt positioniert. Adhäsion 47 (2003) 7-8, S. 36-73.

AHLERS & WARNECKE 1991

Ahlers, R.-J.; Warnecke H.-J.: Industrielle Bildverarbeitung. Bonn: Addison-Wesley 1991.

AMIS 2002

Abschlussbericht der FH-Hannover: Angewandte Mikrosystemtechnik für die Mittelständische Industrie (AMIS). In: <<http://www.serv1.rz.fh-hannover.de/amis/Abschlussbericht/abschlussbericht.html>> (2002)

ANSI/RIA 1989

ANSI/RIA: Robot systems – Point to Point and Static Performance Characteristics. New York: 1989.

ASNT 2002

American Society for Nondestructive Testing: Classification of ndt methods. In <<http://www.asnt.org/whatndt/primer4.html>> (2002)

BACKES 1997

Backes, F.: Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung. Bamberg: Meisenbach 1997.

BÄR U. A. 2000

Bär, C.; Adams, C.; Bruhns, A.: Applikation von PUR-Klebstoffen: Prozesssicher rheologisch simulieren. Adhäsion 44 (2000) 4, S. 27-31.

BARTHEL 2001

Dr. Barthel Sensordysteme (Hrsg.): User Manual. München: 2001.

BARTHEL & TRUNZER 1994

Barthel, K.; Trunzer, W.: Sensor verfolgt die Schweißbahn. Laser-Praxis (1994) 8, S. 18-21.

BAUER 1991

Bauer, H.: Lasertechnik – Grundlagen und Anwendungen. Würzburg: Vogel 1991.

## 9 Literaturverzeichnis

---

BAUER 1998

Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen. Berlin: Springer 1998. (iwb Forschungsberichte 119)

BASF 2003

BASF AG 2003: <[http://www.basf-coatings.basf.de/kernkompetenzen/coil/02\\_de.htm](http://www.basf-coatings.basf.de/kernkompetenzen/coil/02_de.htm)>

BEITZ & GROTE 1997

Beitz, W.; Grote, K.-H.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 19. Auflage. Berlin: Springer 1997.

BEUTHNER 1991

Beuthner, A.: Sehhilfe für Roboter - Kapazitive Sensorik unterstützt den Schweiß- und Schneidprozess. Roboter (1991) 8, S. 24-26.

BIERMANN U. A. 1992

Biermann, S.; Topkaya, M.; Jagiella, M.: Capacitive Clearance Sensor System for High Quality Nd:YAG Laser Cutting and Welding of Sheet Metals. In: Mordike, B.-L. (Hrsg.): European Conference on Laser Treatment of Materials, Oberursel. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft 1992, S. 51-55.

BIMBERG 2003

Bimberg, N.: Nahtfolgesystem für alle Roboter. Laser 17 (2003) 2, S. 6-8.

BÖHM 2003

Böhm, S.: Hybridfügen mittels mechanischer Fügeverfahren in Kombination mit vorbeschichteten reaktiven Hotmelts. In: Zäh, M.-F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Mischverbindungen: Einsatz und Innovationspotential. München: Utz 2003. (iwb Seminarberichte 64)

BONGARDT 2003

Bongardt, T.: Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern. München: Utz 2003. (iwb Forschungsberichte Nr. 184)

BORN 2003

Born, P.: Feuchtehärtende Klebstoffe für Anwendungen in der Automobil-Endmontage: Konzepte integrierter Entwicklung. In: Schindel-Bidimelli, E. (Hrsg.): 17. Internationales Symposium Swiss Bonding, Rapperswil. Rapperswil: Eigenverlag 2003, S. 193-199.



BRABENDER 1999

Brabender, W.: Klebstoff- und Dichtmittelauftrag optisch unter Kontrolle. Adhäsion 43 (1999) 4, S. 26.

BRANDENBURG 1996

Brandenburg, A.: Automatisierte Kleb- und Dichtstoffapplikation unter Berücksichtigung der rheologischen Eigenschaften der Polymere. Aachen: Shaker, 1996. (Aachener Berichte Fügetechnik 6/96)

BRUNS 2002

Bruns, A.: Rheologische Charakterisierung industrieller Klebstoff-Suspensionen. Paderborn: Shaker 2002.

CLASSE 1988

Classe, D.: Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte. München: Carl Hanser 1988.

DILTHEY U. A. 1998

Dilthey, U.; Brandenburg, A.; Möller, M.: Optimierung des Klebstoffauftrags durch ein neues Steuerungskonzept für geschwindigkeitsgeregeltere Auftragsdüsen. Schweißen & Schneiden 50 (1998) 6, S. 356.

DILTHEY U. A. 2003

Dilthey, U.; Willms, K.; Pritschow, G.; Horber, H.: Optische Sensoren für mechanisiertes und automatisiertes Schweißen. Der Praktiker 55 (2003) 7, S. 202-207.

DILGER & HASENBERG 2000

Dilger, K.; Hasenberg, D.: Exakt und reproduzierbar Dosieren in der automatisierten Klebstoffverarbeitung. Der Praktiker 52 (2000) 7, S. 256.

DIN 1319

DIN 1319, Teil 1: Grundbegriffe der Messtechnik: Messen, Zählen, Prüfen. Berlin: Beuth 1971.

DIN 3771A

DIN 3771, Teil 1: Fluidtechnik, O-Ringe; Maße nach ISO 3601/1. Berlin: Beuth 1984.

DIN 3771B

DIN 3771, Teil 4: Fluidtechnik, O-Ringe; Form- und Oberflächenabweichungen. Berlin: Beuth 1984.

## 9 Literaturverzeichnis

---

DIN 5032

DIN 5032, Teil 1: Lichtmessung: Photometrische Verfahren. Berlin: Beuth 1978.

DIN 5033A

DIN 5033, Teil 9: Farbmessung. Weißstandard für Farbmessung und Photometrie. Berlin: Beuth 1982.

DIN 5033B

DIN 5033, Teil 4: Farbmessung: Spektralverfahren. Berlin: Beuth 1992.

DIN 5036A

DIN 5036, Teil 1: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien. Berlin: Beuth 1977.

DIN 5036B

DIN 5036, Teil 3: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien. Berlin: Beuth 1978.

DIN 5036C

DIN 5036, Teil 4: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien. Berlin: Beuth 1979.

DIN 8593

DIN 8593, Teil 0: Fertigungsverfahren Fügen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 1985.

DIN 16920

DIN 16920: Klebstoffe, Klebstoffverarbeitung, Begriffe. Berlin: Beuth, 1981.

DIN 32877

DIN 32877: Optoelektrische Längenmessung mit berührungsloser Erfassung der Messgröße: Begriffe, Anforderungen, Prüfung. Berlin: Beuth 1992.

DIN 50100

DIN 50100: Werkstoffprüfung; Dauerschwingversuch, Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung. Berlin: Beuth 1978.

DIN 53281

DIN 53281: Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen. Berlin: Beuth 1979.

DIN 54451

DIN 54451: Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen; Zugscher-Versuch zur Ermittlung des Schubspannungs-Gleitungs-Diagramms eines Klebstoffs in einer Klebung. Berlin: Beuth 1978.

DIN EN 26922

DIN EN 26922: Klebstoffe; Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen. Berlin: Beuth 1993.

DIN EN ISO 9664

DIN EN ISO 9664: Klebstoffe - Verfahren zur Prüfung der Ermüdungseigenschaften von Strukturklebungen bei Zugscherbeanspruchung. Berlin: Beuth 1995.

DONGES & NOLL 1993

Donges, A.; Noll, R.: Lasermesstechnik: Grundlagen und Anwendungen. Heidelberg: Hüthig 1993.

DÖRFLER 2002

Dörfler, P.: Prüftechnik zur Charakterisierung der Eigenschaften von Klebungen bei hochdynamischer Beanspruchung. Aachen: Shaker 2002. (bonding and joining 2)

EIS 2003

Eis, M.: Qualitätsüberwachung beim Kleben. In: Schindel-Bidimelli, E. (Hrsg.): 17. Internationales Symposium Swiss Bonding, Rapperswil. Rapperswil: Eigenverlag 2003, S. 385-392.

ELBEL 1996

Elbel, T.: Mikrosensorik. Wiesbaden: Vieweg 1996.

ELSNER 1999

Elsner, H.: Qualität beginnt mit der Konstruktion. Adhäsion 43 (1999) 10, S. 32-36.

ENDLICH 1995

Endlich, W.: Fertigungstechnik mit Kleb- und Dichtstoffen. Braunschweig: Vieweg 1995.

ERNE 1982

Erne, H.: Taktile Sensorführung für Handhabungseinrichtungen. Berlin: Springer 1982. (Berichte aus dem ISW 45)

## 9 Literaturverzeichnis

---

### FABER & LINDENAU 1985

Faber, W.; Lindenau, D.: Taktile Sensoren zur Automatisierung in der Schweißtechnik. ZIS-Mitteilungen 27 (1985) 12, S. 1290-1296.

### FALK 1990

Falk, D.-S.: Ein Blick ins Licht. Basel: Birkhäuser 1990.

### FÄRBER 1991

Färber, M.: Beitrag zur Auswahl eines geeigneten Schneidverfahrens für Stahlwerkstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Laserstrahlschneidens. Aachen: Shaker 1991.

### FIEDER U. A. 1987

Fieder, O.; Kruse, K.; Luschinetz, T.: Induktiver Sensor zur Abstandsmessung unter rauen Bedingungen. Feingerätetechnik Berlin 36 (1987) 4, S. 150-152.

### FOUCKHARDT 1994

Fouckhardt, H.: Photonik: Einführung in die integrierte Optoelektronik und technische Optik. Stuttgart: Teubner 1994.

### GARTNER 2001

Gartner, J.: Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen. München: Utz 2001. (Forschungsberichte iw 160)

### GEIB 1998

Geib, H.: Generationenwechsel – CMOS statt CCD. Elektronik 25 (1998).

### GOLDBERG 1985

Goldberg, F.: Inductive Seam-tracking Improves Mechanized and Robotic Welding. In: Automation and Robotisation in Welding and Allied Processes. Proceedings of the International IIW Conference, Strasbourg. Strasbourg: Eigenverlag 1985, S. 393-400.

### GRÄSER 1999

Gräser R.-G.: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern. München: Utz 1999. (Forschungsberichte iw 125)

### GRÜNEKLEE 2000

Grünekle, A.: Qualitätssteigerung in den automatisierten klebtechnischen Fertigungsprozessen durch den Einsatz einer kontinuierlichen Dosierstromregelung. Aachen: Shaker 2000. (bonding and joining 1)

HABENICHT 1997

Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Berlin: Springer 1997.

HABENICHT 2001

Habenicht, G.: Kleben – erfolgreich und fehlerfrei. Braunschweig: Vieweg 2001.

HABERÄCKER 1995

Haberäcker, P.: Praxis der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. München: Hanser 1995.

HAFERKAMP & HÖFEMANN 1997

Haferkamp, H.; Höfemann, M.: Lasersystemtechnik für den Automobilbau. In: Jüptner, W.; Sepold, G. (Hrsg.): Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen. Bremen: Idee & Druck 1997, S. 7-20. (Strahltechnik 5)

HAFERKORN 1990

Haferkorn, H.: Lexikon der Optik. Hanau: Werner Dauskien 1990.

HAUG 2002

Haug, K.: Laser-Lichtschnittsensorik für die Automatisierung von Metall-Schutzgasschweißprozessen. Heimsheim: Jost Jetter 2002. (Berichte aus dem ISW 141)

HECHT 1998

Hecht, E.: Optik. Bonn: Addison-Wesley 1998.

HECKEL 1995

Heckel, W.: Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren. München: Hanser 1995. (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie LFT 43)

HEIDENREICH 1998

Heidenreich, B.: Optische Meßtechnik in der industriellen Fertigung. Aachen: Shaker 1998. (Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik)

HEISEL & REINHART 1995

Heisel, U.-L.; Reinhart, G.: Eine Fehlerquelle wird beseitigt: Einfluss des thermischen Verhaltens auf die Arbeitsgenauigkeit. Roboter (1995) 8.

HENTSCHEL 2002

Hentschel, H.-J.: Licht und Beleuchtung. Heidelberg: Hüthig 2002.

## 9 Literaturverzeichnis

---

HIRZINGER & DIETRICH 1986

Hirzinger, G.; Dietrich, J.: Multi-Sensor-System für Roboter. Tm 53 (1986) H. 7/8, S. 286-292.

HÖHN 2001

Höhn, M.: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme. München: Utz 2001. (iwb Forschungsberichte Nr. 149)

HOLLING 1990

Holling, G.-H.: Abschätzung von Bahnfehlern in Robotersystemen. Braunschweig: Vieweg 1990.

HORN 1994

Horn, A.: Optische Sensorik zur Bahnführung von Industrierobotern mit hohen Bahngeschwindigkeiten. Berlin: Springer 1994. (ISW Forschung und Praxis 103)

HÜSER 1995

Hüser, D.: Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Messunsicherheit von Triangulationssensoren in der Koordinatenmesstechnik. Aachen: Shaker 1995.

INDUSTRIEVERBAND KLEBSTOFFE 2003

Industrieverband Klebstoffe e. V.: <<http://www.klebstoffe.com>>, 2003.

ISO 9283

ISO 9283: Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. Berlin: Beuth 1998.

JACOB 2002

Jacob, D.: Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik. München: Utz 2002. (iwb Forschungsberichte 167)

KERN 1995

Kern-Liebers Dosiertechnik: Pressinformation „Foamed in place”. Schramberg: Eigenverlag 1995.

KIM U. A. 1996

Kim, J.-S.; Son, Y.-T.; Cho, H.-S.; Koh, K.-I.: A Robust Visual Seam Tracking System for Robotic Arc Welding. Mechantronics 6 (1996) 2.

KLEIN & FURTAK 1988

Klein, M.-V.; Furtak, T.-E.: Optik. Berlin: Springer 1988.

KRÜGER 1999

Krüger, G.: Messen und Prüfen in der Klebtechnik – ein Überblick. Adhäsion 43 (1999) 7-8, S. 24-29.

KROHN 2001

Krohn, N.; Busse, G.: Nichtlineare Vibrometrie zur Schadenscharakteristik. In: DGZfP-Jahrestagung, Zerstörungsfreie Materialprüfung 2001, Berlin. Berlin: DGZfP 2001. (Berichtsband 75-CD)

KÜPPERS 1978

Küppers, H.: Das Grundgesetz der Farbenlehre. Köln: DuMont 1978.

KUKA 2002

KUKA Roboter GmbH 2002: <<http://www.kuka-roboter.de/deutsch/index.html>>

KUROSCH 2003

Kurosch, H.: Kleben in der Fertigung: Dosier- und Applikationsverfahren für die Anwendung in der Automobilindustrie. In: Kleben im Automobilbau. Nürnberg: Baika 2003.

LAMBERT U. A. 2002

Lambert, G.; Wienand, S.; Ersü, E.: Schnelles Nachsehen - Bildverarbeitung während der Roboterbewegung durch mitgeführten Sensorkopf. Robotik 2002: Leistungsstand – Anwendungen - Visionen – Trends. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002. (VDI-Berichte 1679, S. 245-250)

LAMMEL 1997

Lammel, C.: Methoden zur Integration der Klebtechnik in einer modernen Serienfertigung. Technische Universität München, Diss. München: Lehrstuhl für Fügetechnik 1997.

LAMMEL & DILGER 2001

Lammel, C.; Dilger, K.: Dynamische und Hochdynamische Prüfung von Klebverbindungen. In: Schindel-Bidinelli, E. (Hrsg): 15. Internationales Symposium Swiss Bonding, Rapperswil. Rapperswil: Eigenverlag 2001, S. 315-333.

LEINWEBER 2001

Leineweber, M.: Untersuchung und Realisierung von taktilen Sensorsystemen unter Verwendung der Oberflächenmikromechanik. Düsseldorf: VDI 2002 (Fortschritt – Berichte VDI Reihe 9, 348)

## 9 Literaturverzeichnis

---

LEHNER 2001

Lehner, C.: Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss. München: Utz 2001. (iwb Forschungsberichte 147)

LEVI & VAJTA 1987

Levi, P.; Vajta, L.: Sensoren für Roboter. Robotersysteme 3 (1987), S. 1-15.

MATTHES U.A. 1992

Matthes, K.-J.; Schuricht, K.; Herrich, J.: Sensor-Einsatz beim Roboter-schweißen – Für und Wider. Düsseldorf: DVS 1992. (DVS-Berichte 143, S. 57-61)

MAURER & STARK 2001

Maurer, A.; Stark, W. A.: Steering Carmaking into the 21<sup>st</sup> Century <[http://www.bcg.com/publications/files/SteeringCarmaking\\_21\\_CenturyNov01\\_01.pdf](http://www.bcg.com/publications/files/SteeringCarmaking_21_CenturyNov01_01.pdf)> (15.11.2001)

MEL 2003

MEL Mikroelektronik 2003: <<http://www.melsensor.com>>

MINGE 1994

Minge, B.: Mehrzeilensensor für die Nahtverfolgung. In: Neue Sensoren und Aktoren in der Laserbearbeitung. Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts SALAS. Innovation in der Mikrosystemtechnik (1994) 16.

MOSANDL & GARTNER 2000

Mosandl, T.; Gartner, J.: Eignung von Fügeverbindungen für Mischverbindungen. In: Reinhart (Hrsg.): Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung. München: Utz 2000, S. 1-1 - 1-6. (iwb Seminarberichte 53).

MOSANDL & GOLLING 2002

Mosandl, T.; Golling, S.: New ways to achieve quality assurance - Assuring bonding processes in commercial vehicle construction. In: Ebert, F.: 6th Annual and 3rd European Expert Conference "Adhesive Bonding in Automobile Production", Bad Nauheim. Berlin: tci - Technik und Kommunikation 2002.



MOSANDL & SCHLICKENRIEDER 2003

Mosandl, T.; Schlickenrieder, K.: Gestaltung von prozesssicheren automatisierten Klebverbindungen. In: Zäh, M.-F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Mischverbindungen: Einsatz und Innovationspotential. München: Utz 2003, S. 8-1 - 8-23. (iwb Seminarberichte 64)

MÖHRKE 1991

Möhrke, G.: Mehrdimensionale Geometrieerfassung mit optoelektronischen Triangulationsverfahren. Aachen: Shaker 1991.

MUELLER & DULEY 1998

Mueller, R.-E.; Duley, W.-W.: Applications of a Capacitive Autofocus System to Laser Welding. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. A122-A131.

NAUMANN & SCHRÖDER 1992

Naumann, H.; Schröder, G.: Bauelemente der Optik. München: Hanser 1992.

NITIN & ASOK 1992

Nitin, N. & Asok, R.: Intelligent Seam Tracking for Robotic Welding. London: Springer 1993.

NÖKEN & KIRSCHKE 1998

Nöken, S.; Kirschke, R.: Mass Customization verbindet die große Serie mit Losgröße 1. Maschinenmarkt 104 (1998) 23, S. 58-60.

OSTER & OSTER 2000

Oster, E.; Oster, M.: Einsatzmöglichkeiten von taktilen und induktiven Sensorsystemen im Sondermaschinenbau. In: Workshop „Sensoren für die Schweißautomatisierung“, Stuttgart. Stuttgart: Eigenverlag 2000.

PERCEPTRON 2003

Perceptron (Hrsg.): Automatisierte In-Line-Messung der Spaltbreite und Bündigkeit nach dem Fügen von Anbauteilen. München: 2003.

PEREZ 1996

Perez, J.-P.: Optik. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1996.

PETRY 1992

Petry, M.: Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukasten für robotergeführte Klebprozesse. Berlin: Springer 1992 (iwb Forschungsberichte 44)

## 9 Literaturverzeichnis

---

PFEIFFER 1993

Pfeiffer, T.: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. München: Carl Hanser 1993.

PHILIPPS 2003

Philipps, M.: Leichtbau und Karosserietechnik. In: Neue Materialien für die Automobilindustrie und deren Zulieferer, Köln. Köln: Nema 2003.

PILLER 1997

Piller (Hrsg.): Taktiles Nahtverfolgungssystem SM 120. Mechnich: 1997.

PILLER 1998

Piller, F.: Kundenindividuelle Massenproduktion. Die Wettbewerbsstrategie der Zukunft. München: Hanser 1998.

PRECITEC 2003

Precitec (Hrsg.): Lösungen für die Lasermaterialbearbeitung. Gaggenau: 2003.

PRITSCHOW & HORN 1991

Pritschow, G.; Horn, A.: Schnelle adaptive Signalverarbeitung für Lichtschnittsensoren. Robotersysteme 7 (1991) 4, S. 194-200.

PRITSCHOW U. A. 1992

Pritschow, G.; Horn, A.; Grefen, K.: Dynamisches Verhalten und Grenzen sensorgeführter Industrieroboter mit vorausblickendem Sensor. Robotersysteme 8 (1992) 3, S. 155-161.

PURSCHE 1999

Purschke, M.: Radioskopie - Anwendungen und Ausbildung. ZfP-Zeitung (1999) 68, S. 56-59.

QU U. A. 1994

Qu, Z.; Kauppila, J.; Moisis, T.: A Seam Tracking System for Sheet Metal Pipe Fabrication by Laser Beam Welding. Erlangen: Proc. of Int. Conf. Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE) 1994.

QUISS 2003

Quiss GmbH 2003: <[http://www.quiss.com/de/home1\\_f.html](http://www.quiss.com/de/home1_f.html)>

RAL 2003

Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung 2003: <<http://www.ral.de>>

REEK 2000

Reek, A.: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen. München: Utz 2000. (iwb Forschungsberichte Nr. 138)

REINHART U. A. 1996

Reinhart, G.; Heinzl, J.; Lindemann, U.: Qualitätsmanagement – in Kurs für Studium und Praxis. Berlin: Springer 1996.

REINHART U. A. 2000A

Reinhart, G.; Mosandl, T.; Gartner, J.: Fügetechnologien für Mischverbindungen. Werkstattstechnik 90 (2000) 9, S. 354-358.

REINHART U. A. 2000B

Reinhart, G.; Effert, C.; Grunwald, S.; Piller, F.; Wagner, W.: Minifabriken für die marktnahe Produktion. ZWF 95 (2000) 12, S. 597-600.

REINHART U. A. 2001

Reinhart, G.; Mosandl, T.; Gartner, J.: Fügeverfahren für die marktnahe Produktion. Werkstattstechnik 91 (2001) 8, S. 474-478.

REINHART & GARTNER 2001

Reinhart, G.; Gartner, J.: Reduction of systematic dosing inaccuracies during the application of highly viscous substances. CIRP Annals 50 (2001) 1.

REINHART & ZÄH 2002

Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Montagetechnik, Handhabung, Industrieroboter. Vorlesungsskript des iwb der TU München 2002.

REINHART U. A. 2003

Reinhart, G.; Haag, M.; Fusch, T.; Wagner, W.: Mit der Digitalen Fabrik zur Virtuellen Produktion. Münchener Kolloquium: Grenzen überwinden – Wachstum der neuen Art. München: Utz 2003.

RÖSNER 2000

Rösner, H.: Zerstörungsfreie Charakterisierung von Ermüdungsschäden mittels Thermografie. In: Fraunhofer izfp Jahresbericht 2000. Saarbrücken, Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren izfp 2000.

ROOSEN 1997

Roosen, S.: Online-Prozessoptimierung beim MAG-Schweißen mit Hilfe eines Expertensystems. Heimsheim: Jost Jetter 1997

## 9 Literaturverzeichnis

---

RUOFF 1989

Ruoff, W.: Optische Sensorsysteme zur On-line-Führung von Industrierobotern. Berlin: Springer 1989 (Berichte aus dem ISW 81)

SCANSONIC 2003

Scansonic GmbH 2003: <<http://www.scansonic.de>>

SCHLICKENRIEDER & MOSANDL 2003A

Schlickenrieder, K.; Mosandl, T.: Klassifizierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren beim Kleben. iwv Newsletter 11 (2003) 3, S. 5-6.

SCHMALZ 1936

Schmalz, G.: Technische Oberflächenkunde. Berlin: Springer 1936.

SCHMID 1990

Schmid, D.: Sensor simuliert Werkzeug. Roboter (1990) 2, S. 14-17.

SCHNELL 1991

Schnell, M.: Kraft- und positionsgeregelte Roboterführung mit taktilen Handgelenksensoren. Düsseldorf: VDI 1992 (Fortschritt – Berichte VDI Reihe 8/281)

SCHRÖDER 1986

Schröder, G.: Technische Optik – Grundlagen und Anwendungen. Würzburg: Vogel 1986.

SCHULENBURG 2003

Schulenburg, J. O.: Hochstrukturelle Klebstoffe und clevere Abdichtmassen im Karosserierohbau. In: Schindel-Bidimelli, E. (Hrsg.): 17. Internationales Symposium Swiss Bonding, Rapperswil. Rapperswil: Eigenverlag 2003, S. 155-163.

SCHULLER 1998

Schuller, R.-W.: Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen. Berlin: Springer 1999. (iwv Forschungsberichte 117)

SCHWEIZER 1978

Schweizer, M.: Taktile Sensoren für programmierbare Handhabungsgeräte. Mainz: Krausskopf 1978. (IPA Forschung und Praxis)

SEIDEL 1992

Seidel, M.: Schnelle, sensorgeführte Konturbearbeitung mit Industrierobotern. Düsseldorf: VDI 1992. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2/277)

SEITZ 1990

Seitz, K.-G.: Lasergestützte Triangulationsmessverfahren für Produktions- und Montageanwendungen. Dissertation Universität Stuttgart 1990.

SHIOU 1998

Shiou, F.-J.: Strategien und Messverfahren zur Erfassung dimensioneller Bauteilgrößen für die Laserbearbeitung. Aachen: Shaker 1998. (Berichte aus der Produktionstechnik 98/19)

STEINBRECHER 1993

Steinbrecher, R.: Bilderverarbeitung in der Praxis. München: Oldenbourg 1993.

STETTNER 1994

Stettner, J.: Sensorgestützte Kollisionsvermeidung bei Industrierobotern. Aachen: Shaker 1994. (Berichte aus der Produktionstechnik 23/94)

STÖBEL 2002

Stöbel, S.: Ultraschall-Verfahren <[http://129.69.86.69/zfphome/ Ultraschall/Arbeitsgebiet\\_Ultraschall.htm](http://129.69.86.69/zfphome/Ultraschall/Arbeitsgebiet_Ultraschall.htm)> (2002)

SUPPES U. A. 2000

Suppes, A.; Niehe S.; Hötter, M.; Kunze, E.: Stereobasierte Videosensorik unter Verwendung einer stochastischen Zuverlässigkeitsanalyse. In: Sommer G.; Krüger, N.; Perwass, C. (Hrsg.): Mustererkennung 2000, 22. DAGM-Symposium, Kiel. Kiel: Springer 2000.

TAEYMANN 1997

Taeymanns, D.: CMOS v CCD – what we can expect, Image processing, October Issue 1997.

TOPKAYA 1992

Topkaya, A.; Biermann, S.; Jagiella, M.: Noncontact Clearance Control System for Nd:YAG Laser Cutting and Welding Systems. In: Beyer, E. (Hrsg.): Laser applications in the automotive industrie, Florenz. Florenz: ISATA 1992, S. 567-574.

TRÄNKLER & OBERMEIER 1998

Tränkler, H. R.; Obermeier, E.: Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft. Berlin: Springer 1998.

TRUNZER 1996

Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren. Berlin: Springer 1996. (iwb Forschungsberichte 94)

## 9 Literaturverzeichnis

---

### VDI-RICHTLINIE 2861A

VDI-Richtlinie 2861, Bl. 1: Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Achsbezeichnungen. Berlin: Beuth 1988.

### VDI-RICHTLINIE 2861B

VDI-Richtlinie 2861, Bl. 2: Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Einsatzspezifische Kenngrößen. Berlin: Beuth 1988.

### VDI-RICHTLINIE 3258A

VDI-Richtlinie 3258, Bl. 1: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen; Begriffe, Bezeichnungen, Zusammenhänge. Düsseldorf: VDI 1962.

### VDI-RICHTLINIE 3258B

VDI-Richtlinie 3258, Bl. 2: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen; Erläuterungen und Beispiele. Düsseldorf: VDI 1964.

### VODANOVIC 1996

Vodanovic, B.: Structured Light track seams. Sensor Review 16 (1996) 1.

### WAGNER U. A. 2003

Wagner, W.; Rudolf, H.; Zäh, M. F.: Minifabriken für die marktnahe Produktion individualisierter Produkte. In: Vernetzt planen und produzieren - VPP 2003. Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme 2003.

### WELLING 1994

Welling, A.: Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge. Berlin: Springer 1994. (iwb Forschungsberichte 73)

### WENK 2002

Wenk, M.: Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern. Bamberg: Meisenbach 2002. (Fertigungstechnik - Erlangen 131)

### WERN 1993

Wern, A.: Beitrag zur Automatisierung der Klebstoffdosierung durch Echtzeit-Volumenstrommessung. Aachen: Shaker 1993. (Aachener Berichte Fügetechnik 5)

### WU U. A. 1996

Wu, J.; Smith, J.; Lucas, J.: Weld bead placement system for multipass welding. IEE Proceeding – Science, Measurement and Technology 143 (1996) 2.

WYSZECKI & STILES 2000

Wyszecki, G.; Stiles, W.-S.: Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formula. New York: Wiley 2000.

YANG 1997

Yang, L.: Grundlagen und Anwendungen der Phasenschiebe-Shearografie zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, Dehnungsmessung und Schwingungsanalyse. Düsseldorf: VDI 1998. (VDI-Fortschrittsbericht 682)

YONG-UK 2001

Yong-Uk, K.: Visuell unterstütztes Lagerregelungssystem für Industrieroboter. Berlin: Druckhaus Berlin-Mitte 2001, (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin 83)

ZÄH U. A. 2003A

Zäh, M. F.; Schlickerrieder, K.; Mosandl, T.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren und ihre Eignung für die Klebtechnik. Adhäsion 47 (2003) 6, S. 26-30.

ZÄH U. A. 2003B

Zäh, M. F.; Kosteas, D.; Lammel, C.; Mosandl, T.; Michaloudaki, M.; Dirscherl, F.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren – Erzielbare Resultate und industrielle Umsetzbarkeit. Adhäsion 47 (2003) 7-8, S. 18-23.

ZÄH U. A. 2003C

Zäh, M. F.; Ulrich, C.; Wagner, W.; Wilke, M.: Reaktionsszenario Minifabrik. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 9, S. 646-650.

ZELLER 1995

Zeller, F.-J.: Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter. München: Carl Hanser 1995.

ZHAO 1990

Zhao, W.: Sensorgeführte Industrieroboter zur Bahnverfolgung. München: Carl Hanser 1990. (Produktionstechnik Berlin 79)

ZUNKER 1993

Zunker, L.: Transputerbasierter Lichtschnittsensor als Baustein eines Multisensor-Steuerungskonzepts zur Echtzeit-Schweißprozessführung und seine Integration in ein Roboterschweißsystem. Aachen: Shaker 1993.

### Technische Datenblätter

OTTO CHEMIE 2003

Hermann Otto Chemie GmbH (Hrsg.): Produktbeschreibung Novasil VP 5307. Fridolfing: 2003.

DOW AUTOMOTIV 1998

Dow Automotiv AG (Hrsg.): Produktbeschreibung Betaseal NC-1. Dillenburg: 1998.

SIKA 2000

Sika Chemie GmbH (Hrsg.): Produktbeschreibung Sikaflex®-254 Booster. Bad Urach: 2000.

VISCOTEC 2001

ViscoTec Pumpen- und Dosiertechnik GmbH 2001:  
<<http://www.viscotec.de/>>



## 10 Anhang

RAL-Nummer	Farbton	RAL-Nummer	Farbton
RAL 1000	Grünbeige	RAL 1021	Leuchtgelb
RAL 1001	Beige	RAL 1022	Purpurrot
RAL 1002	Sandgelb	RAL 1023	Weinrot
RAL 1003	Signalgelb	RAL 1024	Schwarzrot
RAL 1004	Goldgelb	RAL 1025	Oxidrot
RAL 1005	Honiggelb	RAL 1026	Braunrot
RAL 1006	Maisgelb	RAL 1027	Beigerot
RAL 1007	Narzissengelb	RAL 1028	Tomatenrot
RAL 1008	Braunbeige	RAL 1029	Altrosa
RAL 1009	Zitronengelb	RAL 1030	Hellrosa
RAL 1010	Perlweiß	RAL 1031	Korallenrot
RAL 1011	Elfenbein	RAL 1032	Rosé
RAL 1012	Hellelfenbein	RAL 1033	Erdbeerrot
RAL 1013	Schwefelgelb	RAL 1034	Verkehrsrot
RAL 1014	Safrangelb	RAL 1035	Lachsrot
RAL 1015	Zinkgelb	RAL 1036	Leuchtrot
RAL 1016	Graubeige	RAL 1037	Leuchthellrot
RAL 1017	Olivgelb	RAL 1038	Himbeerrot
RAL 1018	Rapsgelb	RAL 1039	Orientrot
RAL 1019	Verkehrsgelb	RAL 1040	Perlrubinrot
RAL 1020	Ockergelb	RAL 1041	Perlrosa

## 10 Anhang

---

RAL-Nummer	Farbton	RAL-Nummer	Farbton
RAL 1042	Rotlila	RAL 1064	Lachsorange
RAL 1043	Rotviolett	RAL 1065	Perlorange
RAL 1044	Currygelb	RAL 1066	Feuerrot
RAL 1045	Grünbeige	RAL 1067	Erikaviolett
RAL 1046	Melonengelb	RAL 1068	Bordeauxviolett
RAL 1047	Ginstergelb	RAL 1069	Blaulila
RAL 1048	Dahliengelb	RAL 1070	Verkehrspurpur
RAL 1049	Pastellgelb	RAL 1071	Purpurviolett
RAL 1050	Perlbeige	RAL 1072	Signalviolett
RAL 1051	Perlgold	RAL 1073	Pastellviolett
RAL 1052	Sonnengelb	RAL 1074	Telemagenta
RAL 1053	Gelborange	RAL 1075	Perlviolett
RAL 1054	Rotorange	RAL 1076	Perlbrombeer
RAL 1055	Blutorange	RAL 1077	Violettblau
RAL 1056	Pastellorange	RAL 1078	Grünblau
RAL 1057	Reinorange	RAL 1079	Ultramarinblau
RAL 1058	Leuchtorange	RAL 1080	Saphirblau
RAL 1059	Leuchthellorange	RAL 1081	Schwarzblau
RAL 1060	Hellrotorange	RAL 1082	Signalblau
RAL 1061	Verkehrsorange	RAL 1083	Brillantblau
RAL 1062	Signalorange	RAL 1084	Graublau
RAL 1063	Tieforange	RAL 1085	Azurblau

RAL-Nummer	Farbton	RAL-Nummer	Farbton
RAL 1086	Enzianblau	RAL 1095	Dahliengelb
RAL 1087	Stahlblau	RAL 1096	Pastellgelb
RAL 1088	Lichtblau	RAL 1097	Taubenblau
RAL 1089	Kobaltblau	RAL 1098	Himmelblau
RAL 1090	Signalrot	RAL 1099	Verkehrsblau
RAL 1091	Karminrot	RAL 1100	Türkisblau
RAL 1092	Rubinrot	RAL 1101	Capriblau
RAL 1093	Melonengelb	RAL 1102	Ozeanblau
RAL 1094	Ginstergelb	RAL 1103	Wasserblau

# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*  
**Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel**  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*  
**Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen**  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*  
**Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern**  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*  
**Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen**  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*  
**Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen**  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*  
**Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung**  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, J.*  
**Schneiderodierte Oberflächen**  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*  
**Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen**  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*  
**Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung**  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*  
**Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen**  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*  
**Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse**  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*  
**Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze**  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*  
**Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion**  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*  
**Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme**  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*  
**Klipsmontage mit Industrierobotern**  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*  
**Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung**  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*  
**Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems**  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*  
**Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung**  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*  
**Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme**  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
**Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen**  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*  
**Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen**  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*  
**Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung**  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*  
**Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems**  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*  
**Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage**  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Witba, P.*  
**Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik**  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*  
**Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung**  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*  
**Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie**  
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*  
**Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*  
**Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*  
**Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*  
**Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*  
**Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*  
**Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschränkungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*  
**Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*  
**3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*  
**Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*  
**Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*  
**Dynamisches Verhalten von Kreissägen**  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*  
**Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**  
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*  
**3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*  
**Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*  
**Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*  
**Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen**  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*  
**Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebprozesse**  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*  
**Integrierte Diagnose in Produktionszellen**  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*  
**Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*  
**Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*  
**Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*  
**Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*  
**Laserbearbeitung mit Robotern**  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*  
**Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*  
**Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*  
**Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*  
**Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*  
**Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*  
**Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*  
**Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*  
**Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*  
**Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von  
Zubringeinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer  
Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56889-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur  
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dindorfer, A.*  
**Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender  
Werkzeugmaschinen**  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-  
Layoutoptimierung**  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*  
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur  
Planung manueller Montagesysteme**  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen  
Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationsgestützte CAD/ICAM-Kopplung für die 3D-  
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
**Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
**Automatische Inbetriebnahme  
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von  
Produktionssystemen**  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
**Rechnergestütztes Projektinformations- und  
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur  
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*  
**Verfahren zur simulationsgestützten  
Produktionsregelung in der Einzel- und  
Kleinserienproduktion**  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*  
**Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung**  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer  
flexiblen Fertigung**  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*  
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in  
der Arbeitsvorbereitung**  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
**Strömungstechnische Optimierung von  
Produktionssystemen durch Simulation**  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*  
**Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen**  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*  
**Technologisches Prozeßmodell für die  
Kugelschleifbearbeitung**  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanov, P.*  
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von  
Werkzeugmaschinen**  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen  
Fertigungszellen**  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der  
Hartbearbeitung**  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in  
flexiblen Produktionszellen**  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung  
und logistisches Störungsmanagement**  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
**Systematische Planung anwendungsspezifischer  
Materialflußsteuerungen**  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in  
Montageanlagen**  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Limmer, St.*  
**Konzept einer integrierten Produktentwicklung**  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
**Integrierte Planung von Informationssystemen für  
rechnergestützte Produktionssysteme**  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deuschle, U.*  
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in  
mittelständischen Unternehmen**  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*  
**Recyclingintegrierte Produktentwicklung**  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
**Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte**  
 1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
**Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen**  
 1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
**Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren**  
 1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
**Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme**  
 1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
**Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen**  
 1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
**Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme**  
 1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
**Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung**  
 1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*  
**Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie**  
 1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
**Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**  
 1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
**Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten**  
 1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*  
**Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion**  
 1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
**Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten**  
 1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
**Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung**  
 1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
**Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem**  
 1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*  
**Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe**  
 1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
**Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen**  
 1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*  
**Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung**  
 1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
**Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service**  
 1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*  
**Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion**  
 1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
**Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen**  
 1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
**Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung**  
 1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
**Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz**  
 1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
**Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse**  
 1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*  
**Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen**  
 1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*  
**Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung**  
 1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
**Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen**  
 1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
**Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung**  
 1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
**Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen**  
 1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
 1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgleitete Planung von Laseranlagen**  
 1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 1 **Innovative Montagesysteme · Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell · Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen · Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation · Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser · von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement · der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Analysen und Konzepte**  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation · Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation · Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe · Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market · Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis · Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet · Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik · mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen · Plug & Play · Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping · Rapid Tooling · Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion · Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik · Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme · Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Abschlußseminar**  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) · Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD · Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion · Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation · Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung · Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit · Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping · Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling · Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie · Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit · ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage · Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken · Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion · Ablaufsimulation**  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8



- 49 **Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Füge-technologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**  
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Struktur- und Dynamik von Werkzeugmaschinen**  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**  
ISBN 3-89675-071-2 · erscheint 12/04
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**  
ISBN 3-89675-072-0 · erscheint 12/04
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**  
ISBN 3-89675-073-9 · erscheint 12/04
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**  
ISBN 3-89675-074-7 · erscheint 12/04
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**

# Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.de

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprenzel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme**  
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

189 Thomas Mosandl

**Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**

2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1



