

Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
der Technischen Universität München

**Qualitätssicherung bei der automatisierten  
Applikation hochviskoser Dichtungen**

**Josef Gartner**

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. Hartmut Hoffmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ-Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Die Dissertation wurde am 19. September 2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 7. Dezember 2001 angenommen.



***Forschungsberichte***

---

***iwb***

***Band 160***

***Josef Gartner***

***Qualitätssicherung bei der  
automatisierten Applikation  
hochviskoser Dichtungen***

---

***herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

---

***Herbert Utz Verlag***

**UTZ**

# Forschungsberichte iwb

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

herausgegeben von

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

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist  
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

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 2001

ISBN 3-8316-0096-1

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01



## **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, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, dem Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Klebtechnik der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben.

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

München, im Dezember 2001

*Josef Gartner*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Vor- und Nachteile hochviskoser Klebdichtstoffe .....	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	7
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>9</b>
2.1	Grundlagen der Dichtungstechnik .....	10
2.1.1	Überblick über Dichtungsarten .....	10
2.1.2	Funktionsweise statischer Dichtelemente .....	11
2.1.3	Werkstoffeigenschaften elastomerer Dichtungen .....	16
2.1.4	Unterscheidungsmerkmale flüssig aufgetragener, statischer Dichtungen .....	20
2.2	Anforderungsspektrum und Randbedingungen beim Einsatz von CIP-Dichtungen .....	23
2.2.1	Form- und Lagegenauigkeit .....	23
2.2.2	Form- und Lagefehler .....	26
2.2.3	Rheologische Randbedingungen .....	28
2.3	Applikation von Dichtungen .....	32
2.3.1	Anforderungen an die Steuerung des Handhabungsgerätes .....	35
2.3.2	Anforderungen an Dosiereinrichtungen zum Auftrag hochviskoser Medien .....	37
2.3.3	Sensorische Qualitätssicherung während des Auftragsprozesses .....	39
2.4	Schwachstellenanalyse.....	43
<b>3</b>	<b>Dosierfehler als Ursache von Qualitätsproblemen.....</b>	<b>45</b>
3.1	Ursachen von Qualitätsproblemen bei CIP-Dichtungen.....	45
3.2	Einflüsse auf die Qualität von Dichtungen .....	47
3.3	Ursachen der systematischen Fehldosierung .....	52
3.3.1	Einflussgrößen systematischer Fehldosierungen .....	56
3.3.2	Berechnung der systematischen Fehldosierung .....	57

3.4 Zusammenfassung und Konsequenzen für die Versuchsmethodik .....	63
<b>4 Versuchsplanung .....</b>	<b>67</b>
4.1 Eingesetzte Medien .....	69
4.1.1 Hochviskose Dichtmedien .....	69
4.1.2 Ersatzsubstanz .....	70
4.2 Beschreibung der Versuchsbauteile .....	72
4.3 Eingesetztes Handhabungsgerät und Steuerung .....	74
4.4 Simulationsumgebung .....	75
4.5 Datenerfassung und Auswertung .....	76
<b>5 Systematische Dosierfehler und deren Beeinflussungsfaktoren .....</b>	<b>81</b>
5.1 Qualifikation der Simulationsumgebung durch Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen mit der realen Anlage .....	81
5.1.1 Geschwindigkeitsänderungen beim Bauteil mit trapezförmigen Konturelementen .....	82
5.1.2 Geschwindigkeitsänderungen beim Bauteil mit runden Konturelementen .....	83
5.1.3 Ergebnis .....	84
5.2 Einfluss der Bauteilgeometrie auf die systematische Fehldosierung .....	85
5.3 Einfluss der Bahngeschwindigkeit auf die systematische Fehldosierung .....	87
5.3.1 Fehldosierungen beim Bauteil mit trapezförmigen Konturelementen .....	88
5.3.2 Fehldosierungen beim Bauteil mit runden Konturelementen .....	89
5.4 Ergebnis .....	90
<b>6 Strategien zur Verringerung systematischer Dosierfehler .....</b>	<b>95</b>
6.1 Verringerung von Geschwindigkeitsveränderungen durch die antizipierte Orientierungsänderung .....	95
6.1.1 Darstellung der Strategie der antizipierten Orientierungsänderung .....	95

6.1.2	Einfluss der Bahngeschwindigkeit und des Vororientierungswinkels .....	97
6.1.3	Ergebnisse .....	103
<b>6.2</b>	<b>Verringerung des Zeitversatzes zwischen Bahngeschwindigkeit und Signalausgabe mittels steuerungsinterner Algorithmen .....</b>	<b>107</b>
6.2.1	Einsatz unterschiedlicher Bahnschaltfunktionen .....	107
6.2.2	Feststellung des zeitlichen Versatzes .....	110
6.2.3	Ergebnisse .....	112
<b>6.3</b>	<b>Verringerung des Zeitversatzes durch automatisiert selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen .....</b>	<b>115</b>
6.3.1	Erläuterung des Verfahrens .....	117
6.3.2	Anpassung der Koeffizienten .....	125
6.3.3	Ergebnisse .....	127
6.3.4	Kombination der antizipierten Orientierungsänderung mit selbst optimierbaren, bahndatenabhängigen Parameterfunktionen .....	132
6.3.5	Optischer Vergleich der Qualitätsverbesserung durch das entwickelte Kompensationsverfahren .....	137
6.3.6	Verbesserungspotential durch Spline-Interpolation .....	138
6.3.7	Verbesserungspotential durch Messung des aufgenommenen Dosierpumpenstromes .....	140
<b>7</b>	<b>Bewertung der Strategien zur Verringerung systematischer Dosierfehler .....</b>	<b>143</b>
<b>7.1</b>	<b>Technische Bewertung und Potentiale der Methoden .....</b>	<b>143</b>
7.1.1	Orthogonaler Auftrag mit geringer Bearbeitungsgeschwindigkeit .....	143
7.1.2	Antizipierte Orientierungsänderung .....	143
7.1.3	Steuerungsinterne Verzögerungsfunktion .....	144
7.1.4	Selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen .....	144
<b>7.2</b>	<b>Wirtschaftliche Bewertung der Methoden .....</b>	<b>146</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>149</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>153</b>

### Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

$a_n$ :	Zur Bearbeitungsbahn tangentielle Beschleunigungskomponente [ $\frac{m}{s^2}$ ]
$a_t$ :	Zur Bearbeitungsbahn normale Beschleunigungskomponente [ $\frac{m}{s^2}$ ]
$A_{Düse}$ :	Querschnittsfläche der Dosierdüsenöffnung [ $m^2$ ]
$V$ :	Vorpressung
$b_0$ :	Breite der Dichtung im unbelasteten Zustand [mm]
$b_1$ :	Breite der Dichtung im belasteten Zustand [mm]
$b_D$ :	Tragende Breite der Dichtung [mm]
$d_D$ :	Auflagedurchmesser der Dichtung [mm]
$d_0$ :	Durchschnittliche Höhe der Leckagekanäle der Flanschverbindung ohne Dichtung [mm]
$d_{1/2}$ :	Durchschnittliche Höhe der Leckagekanäle der Flanschverbindung mit eingebauter Dichtung [mm]
$E_{(\sigma,\varepsilon)}$ :	Verformungs- bzw. Spannungsabhängiger Elastizitätsmodul des Werkstoffes [ $\frac{N}{mm^2}$ ]
$E_0$ :	Elastizitätsmodul des Flansches bei Einbautemperatur [ $\frac{N}{mm^2}$ ]
$E_\vartheta$ :	Elastizitätsmodul des Flansches bei Betriebstemperatur [ $\frac{N}{mm^2}$ ]
$F_D$ :	Dichtkraft, führt zu einer Verformung der Dichtung [N]
$F_F$ :	Ringflächenkraft, resultiert aus dem an der Fläche zwischen Rohrinne- und Dichtungsdurchmesser angreifenden Innendruck [N]
$F_R$ :	Rohrkraft, greift infolge des Innendrucks oder Biegemomenten am Flansch an [N]
$F_{RZ}$ :	Komponente der Rohrkraft die zu einer Belastung der Schrauben führt [N]
$F_{RD}$ :	Komponente der Rohrkraft die zu einer Entlastung der Schrauben führt [N]

$F_S$ :	Schraubenkraft, wird von den Schrauben auf den Flansch übertragen [N]
$h_0$ :	Ausgangshöhe der Dichtraupe im unbelasteten Zustand [mm]
$h_1$ :	Höhe der Dichtraupe im verformten Zustand [mm]
$h_2$ :	Höhe der Dichtraupe im entlasteten Zustand nach der Verformung [mm]
$I$ :	Vom Antriebsmotor der Dosiereinheit aufgenommener Strom [A]
$K_L$ :	Lohnkosten pro Betrachtungsintervall [ $\frac{€}{s}$ ]
$K_A$ :	Abschreibungsbetrag pro Betrachtungsintervall [ $\frac{€}{s}$ ]
$K_Z$ :	Kalkulatorische Zinsen pro Betrachtungsintervall [ $\frac{€}{s}$ ]
$\Delta K$ :	Einsparungspotential der Betrachteten Bearbeitungsstrategie gegenüber betrachtetem Referenzprozess [%]
$l_i$ :	Betrachtetes Streckeninkrement der Bearbeitungsbahn [mm]
$L$ :	Länge des Leckagekanals der Flanschverbindung [mm]
$m$ :	Verhältniszahl zwischen Innendruck und Flächenpressung der Dichtung
$m$ :	Rheologische Stoffkonstante
$m_i$ :	Aufgetragene Masse des Dichtmediums zum betrachteten Zeitpunkt [kg]
$n$ :	Rotordrehzahl der Exzentrerschneckenpumpe [ $\frac{1}{s}$ ]
$\bar{n}_{ist}$ :	Dimensionslose Ist-Drehzahl der Exzentrerschneckenpumpe
$p$ :	Druck [ $\frac{N}{m^2}$ ]
$p_{Betrieb}$ :	Druck im Betriebszustand [ $\frac{N}{m^2}$ ]
$p_1$ :	Partialdruck an der Innenseite der Flanschverbindung [ $\frac{N}{m^2}$ ]
$p_2$ :	Partialdruck an der Außenseite der Flanschverbindung [ $\frac{N}{m^2}$ ]
$P$ :	Proportionalitätsglied zwischen der Geschwindigkeit der Dosiernadelspitze und dem dosierten Volumenstrom

## Formel- und Abkürzungsverzeichnis

---

P:	Kosten pro Meter aufgetragene Dichtraupe [ $\frac{m}{m}$ ]
$\dot{Q}$ :	Pro Zeiteinheit dosiertes Medienvolumen [ $\frac{m^3}{s}$ ]
$\dot{Q}_{i,Soll}$ :	Pro Zeiteinheit zu dosierendes Medienvolumen [ $\frac{m^3}{s}$ ]
$\Delta\dot{Q}_{Rel}$ :	Relative Volumenstromabweichung
$\overline{\Delta\dot{Q}_{Rel}}$ :	Relative, gemittelte Volumenstromabweichung
r:	Vom Medium durchströmter Querschnittsradius [mm]
R:	Krümmungsradius der Bauteilbahn [mm]
t:	Betrachtungszeitpunkt [s]
$t_{Index}$ :	Zeit (indiziert) [s]
U:	Zur Ansteuerung der Dosiereinheit von der Robotersteuerung ausgegebene Spannung [V]
$U_{S0}$ :	Unsicherheitsfaktor
v:	Fließgeschwindigkeit des Mediums [ $\frac{m}{s}$ ]
v:	Reale Geschwindigkeit des TCP [ $\frac{m}{s}$ ]
$v_{Ist}$ :	Ist-Geschwindigkeit des TCP [ $\frac{m}{s}$ ]
$v_{Soll}$ :	Soll-Geschwindigkeit des TCP [ $\frac{m}{s}$ ]
$\bar{v}_{Ist}$ :	Dimensionslose Ist-Geschwindigkeit des TCP
$v_{Düse}$ :	Relative Geschwindigkeit der Auftragsdüse über der Auftragsbahn [ $\frac{m}{s}$ ]
$v_{Max}$ :	Maximale Verfahrensgeschwindigkeit der Auftragsanlage [ $\frac{m}{s}$ ]
$v_{\emptyset}$ :	Durchschnittsgeschwindigkeit beim Applikationsvorgang [ $\frac{m}{s}$ ]
$\dot{V}$ :	Volumenstrom des Mediums im durchströmten Querschnitt [ $\frac{m^3}{s}$ ]
u:	Die von der Steuerung gemessene Geschwindigkeit des TCP [ $\frac{m}{s}$ ]
U:	Zur Ansteuerung der Dosiereinheit von der Robotersteuerung ausgegebene Spannung [V]



$U_{\text{Ist}}$ :	Zur Ansteuerung der Dosiereinheit von der Robotersteuerung ausgegebene Ist-Spannung [V]
$U_{\text{Soll}}$ :	Zur Ansteuerung der Dosiereinheit von der Robotersteuerung ausgegebene Soll-Spannung [V]
$\bar{U}_{\text{Ist}}$ :	Dimensionslose Ist-Spannung
$\dot{\gamma}$ :	Schergeschwindigkeit [ $\frac{1}{s}$ ]
$\varepsilon$ :	Relative Verformung des Werkstoffes [%]
$\varphi$ :	Relativer Winkel des Bearbeitungswerkzeuges gegenüber Bearbeitungsebene [rad]
$\kappa$ :	Rheologische Stoffkonstante
$\rho_i$ :	Dichte des aufgetragenen Mediums [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]
$\sigma_v$ :	Mindestflächenpressung an der Kontaktfläche der Dichtung zum Flansch [ $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ]
$\sigma_{\text{erf.}}$ :	Erforderliche Flächenpressung an der Kontaktfläche der Dichtung zum Flansch [ $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ]
$\sigma$ :	Durch Verformung eines Werkstoffes resultierende Spannung [ $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ]
$\tau$ :	Scherspannung [ $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ]
$\tau$ :	Integrationsvariable
$\vartheta$ :	Temperatur [K]
$\omega$ :	Orientierungs- beziehungsweise Schwenkgeschwindigkeit des vom Handhabungssystems geführten Bearbeitungswerkzeuges [ $\frac{1}{s}$ ]
$\dot{\omega}$ :	Orientierungs- beziehungsweise Schwenkbeschleunigung des vom Handhabungssystems geführten Bearbeitungswerkzeuges [ $\frac{1}{s^2}$ ]

## **Abkürzungsverzeichnis**

ASTM:	Association for the Standardization of Technical Matters
CIP:	Cured in place
CIPG:	Cured in place gasket
DIN:	Deutsches Institut für Normung
DVR:	Druckverformungsrest
EN:	Europäische Norm
FIP:	Formed in place
FIPG:	Formed in place gasket
IIP:	Injected in place
IIPG:	Injected in place gasket
IPO:	Interpolationsintervall
ISO:	International Standardization Organisation
TCP:	Tool centre point (Werkzeugspitze)
VDI:	Verein Deutscher Ingenieure

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Üblicherweise bestehen technische Produkte aus mehreren Einzelkomponenten, die miteinander verbunden werden müssen. Durch den zunehmenden Einsatz unterschiedlicher Materialkombinationen geraten bisherige Fügeverfahren an ihre Einsatzgrenzen. Neue, moderne Fügeverfahren wie beispielsweise das Laserstrahlschweißen oder das Kleben treten zunehmend in den Vordergrund [REINHART ET. AL. 2000, GARTNER & MOSANDL 2000].

## 1.1 Vor- und Nachteile hochviskoser Klebdichtstoffe

Die primäre Funktion einer Verbindung besteht in der Herstellung von Formstabilität und der Übertragung von Kräften. Zusätzlich müssen viele Verbindungen Dichtigkeit gewährleisten. Die Dichtigkeit kann durch den Einsatz geeigneter Fügeverfahren wie beispielsweise Schweißen, Löten und Kleben erreicht werden.

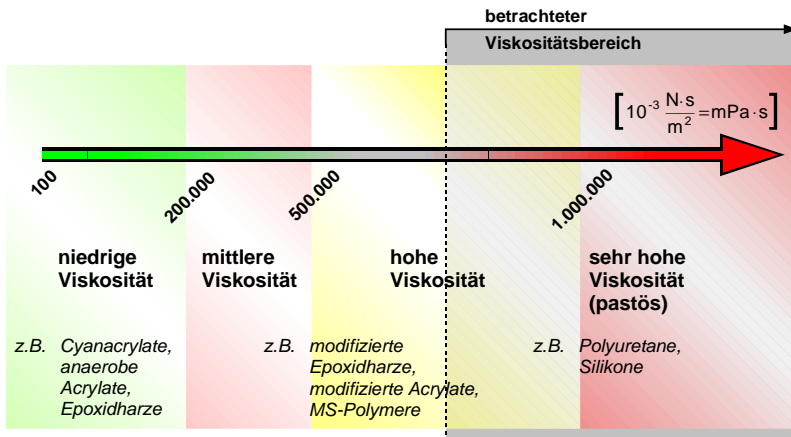


Abbildung 1-1: Schematischer Überblick über Viskositätsspektrum

## 1.1 Vor- und Nachteile hochviskoser Klebdichtstoffe

---

Bei der Verbindung unterschiedlicher Werkstoffkombinationen oder komplexer Bauteilgeometrien ist der Einsatz von Kleb- und Dichtstoffen im Bereich mittlerer Drücke ( $< 200$  bar) und gemäßigter Temperaturen ( $< 200$  °C) häufig eine flexible und kostengünstige Alternative. Dies gilt insbesondere für Kleb- und Dichtstoffe mit hohen Viskositäten (vgl. Abbildung 1-1), da diese aufgrund ihrer hohen Formstabilität im noch unvernetzten Zustand weitere produktionstechnische Vorteile aufweisen (vgl. Abbildung 1-2).

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>+ Flexibilität gegenüber unterschiedlichen Bauteilgeometrien und Fertigungstoleranzen</li><li>+ Formstabilität der aufgetragenen Raupe</li><li>+ Transportstabilität im nicht ausgehärteten Zustand</li><li>+ Geringe Verschmutzungsgefahr durch Fließen nach dem Auftrag</li><li>+ Auftrag und Verbau auf schiefen Ebenen möglich</li><li>+ Automatisierter Auftrag möglich</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>⇒ Ungenauigkeiten beim Auftrag werden nicht durch "Nachfließen" ausgeglichen</li><li>⇒ Starker Einfluss der rheologischen Eigenschaften auf das Prozeßergebnis</li><li>⇒ Umgebungstemperatur hat starken Einfluß auf die Qualität des Raupenauftrags</li></ul>

Abbildung 1-2: Vor und Nachteile flüssiger, hochviskoser Dichtstoffe

Die Aufbringung dieser Substanzen kann dabei entweder manuell oder automatisiert mit geeigneten Handhabungs- und Dosiergeräten erfolgen. Dabei wird das in Behältern bereitgestellte Medium über Fördereinrichtungen durch einen Zuführstrang zur Dosiereinheit befördert. Durch die vom Handhabungsgerät erzeugte Relativbewegung zwischen der Dosiereinheit und dem Bauteil wird das Medium aufgetragen (vgl. Abbildung 1-3). Die Steuerung des Handhabungsgerätes übernimmt dabei häufig auch die Ansteuerung der Dosiereinrichtung.

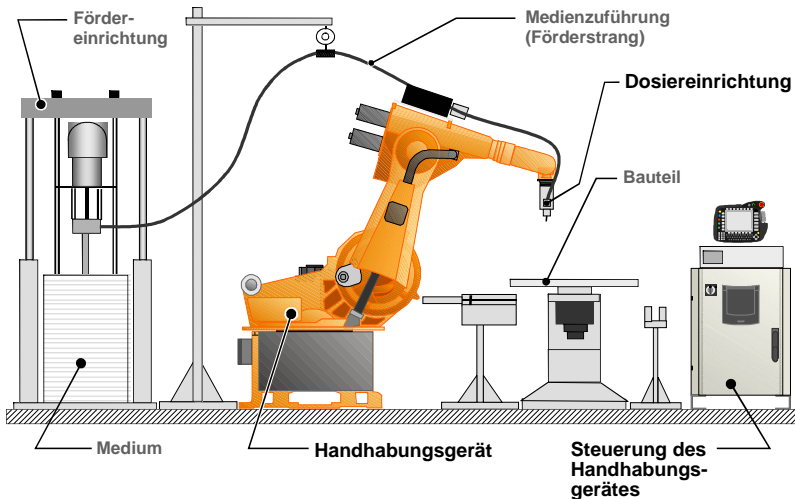


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der Komponenten beim automatisierten Medienauftrag

Durch adäquate Programmierung des Handhabungsgerätes und Abstimmung der Dosierparameter kann die Verteilung des Dichtmaterials auf unterschiedlichste Bauteilgeometrien angepasst werden.

Für den Auftrag der Dichtstoffe auf vorwiegend ebene Flanschgeometrien haben sich kartesische Handhabungssysteme durchgesetzt (Abbildung 1-4).

Für Bauteile mit komplexeren Geometrien kommen häufig Sechssachsen-Knickarmroboter zum Einsatz. Vor allem in der Automobilproduktion werden diese Handhabungsgeräte zum Auftragen von Klebdichtstoffen im Karosseriebereich (vgl. Abbildung 1-5) oder von Dichtstoffen für die Scheibenmontage (vgl. Abbildung 1-6) eingesetzt, da sich diese Handhabungsgeräte durch ein günstiges Verhältnis von Kosten zu Arbeitsraum auszeichnen.

## 1.1 Vor- und Nachteile hochviskoser Klebdichtstoffe

---

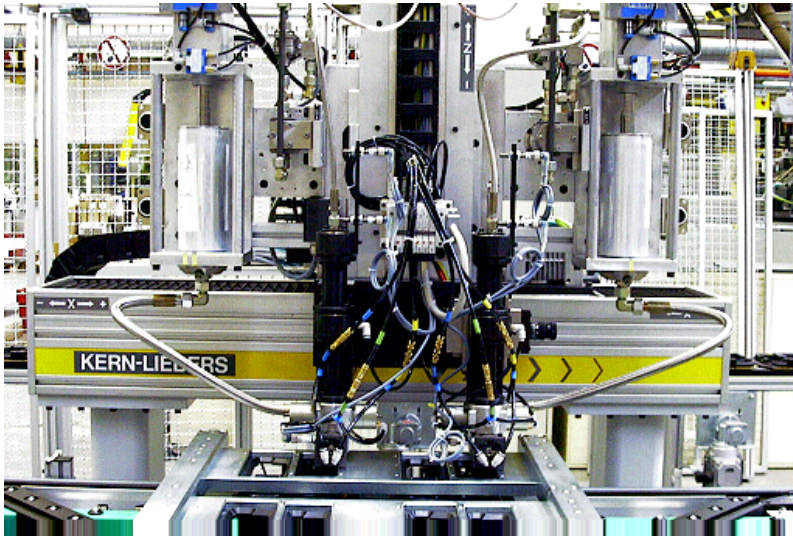


Abbildung 1-4: Kartesische Auftragsanlage für viskose Klebdichtstoffe [Hugo Kern & Liebers GmbH]



Abbildung 1-5: Sechsen-Knickarm-Roboter; Nahtabdichtung [Kuka Roboter GmbH]

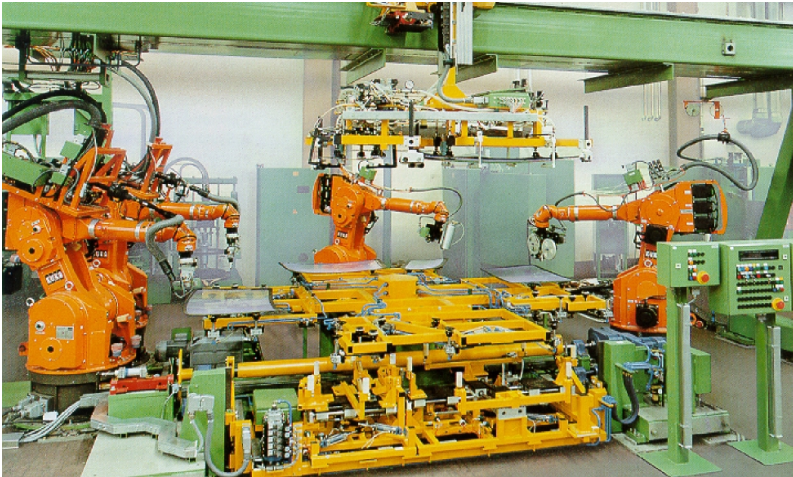


Abbildung 1-6: Sechssachsen-Knickarm-Roboter; Dichtraupenauftrag auf Windschutzscheiben [Quelle: Kuka Roboter GmbH]

Ein automatisierter Dichtstoffauftrag bietet gegenüber einer manuellen Applikation dabei folgende Vorteile:

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

Ein Problem im Hinblick auf die Prozessqualität beim Auftrag hochviskoser Dichtstoffe (Viskosität  $\geq 500.000$  Millipascalsekunden; vgl. Abbildung 1-1) ist das Auftreten von Dosierfehlern. Dabei kann zwischen zufälligen Dosierfehlern, die zum Beispiel durch Inhomogenitäten des Dichtmediums hervorgerufen werden [WERN 1993, DILTHEY ET AL. 1998, DILGER ET AL. 2000] und systematisch bedingten [DILTHEY ET AL. 1998, REINHART & GARTNER 2001] Dosierfehlern unterschieden werden. Aufgrund des unvorhersagbaren Auftretens zufälliger Dosierfehler können diese nicht gezielt vermieden werden. Ihre Auswirkungen können gegebenenfalls durch

das Einstellen eines möglichst optimalen Prozessfensters begrenzt werden.

Systematisch bedingte Dosierfehler können beispielsweise durch eine fehlerhafte Abstimmung zwischen dem Handhabungsgerät und der Dosiereinheit hervorgerufen werden. Wegen ihres systematischen Charakters können diese Dosierfehler durch eine gezielte Ursachenvermeidung bekämpft werden. Ihre Auswirkungen können somit durch

- experimentelle Abstimmung zwischen Dosier- und Verfahrensparametern und
- eine Verringerung der Verfahrensgeschwindigkeit der Auftragsanlage

begrenzt werden. Auch im Hinblick auf das Vermeiden der Auswirkungen zufälliger Dosierfehler ist eine gezielte Bekämpfung systematischer Dosierfehler notwendig, um den Auftragsprozess innerhalb des gewünschten, optimalen Prozessfensters halten zu können.

Eine experimentelle Abstimmung zwischen Dosier- und Verfahrensparametern ist technisch aufwendig, da durch iterative Auftragsversuche und Veränderung der Parameterwerte versucht wird, ein möglichst gleichmäßiges Auftragsbild herzustellen. Bei geänderten Materialeigenschaften wie beispielsweise Viskositätsänderungen oder Temperaturschwankungen, müssen die Anlagenparameter in der Regel nachjustiert werden.

Eine alleinige Verringerung der Verfahrensgeschwindigkeit während der Mediendosierung ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll und erwünscht. Somit sind die beschriebenen Abhilfemaßnahmen technisch wie wirtschaftlich aufwendig, die Ergebnisse bleiben unbefriedigend.

Eine deutliche Verbesserung ist nur bei Methoden zu erwarten, die zielgerichtet die Fehlerursachen vermeiden. Diese präventive Fehlervermeidung in Kombination mit einer geeigneten On-line-Prozessregelung kann dann als qualitätssichernde Maßnahme eingesetzt werden. Diese weitergehenden Methoden müssen erst erarbeitet werden.



### 1.2 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden Grundlagen zur Kontrolle und Überwachung des Auftragsprozesses hochviskoser Dichtmaterialien im Hinblick auf eine Qualitätssicherung erarbeitet und Möglichkeiten dargestellt mit denen die Auswirkungen systematisch verursachter Dosierfehler verringert werden können.

Mit der Verringerung der systematisch verursachten Dosierfehler wird die Prozesskontrolle verbessert. Die bessere Prozesskontrolle ermöglicht zusätzlich zu den erzielten Qualitätsverbesserungen deutliche Produktivitätssteigerungen.



## 2 Stand der Technik

Stoffschlüssige Fügeverfahren wie Schweißen, Löten und Kleben erfüllen in der Regel die Forderung, eine dichte Verbindung herzustellen. Oftmals treten aber darüber hinaus noch zusätzliche Anforderungen an die Verbindung auf [BEITZ & GROTE 1997, BROWN 1990, ELSNER 1999, SCHMID U.A. 1981], wie

- Verbindungsmöglichkeit von unterschiedlichen Werkstoffen
- Beständigkeit gegenüber korrosiven Einflüssen
- Beständigkeit gegenüber alterungsbedingten oder thermischen Einflüssen
- Möglichkeit einer Demontage der Verbindung im Wartungs- oder Reparaturfall.

Hierfür sind stoffschlüssige Fügeverfahren zum großen Teil ungeeignet. Eine Möglichkeit, diesen Zusatzanforderungen zu genügen, ist der Einsatz form- und/oder kraftschlüssiger Fügeverfahren unter Zuhilfenahme eines Dichtelementes [vgl. NIEMANN 1981, PAHL & BEITZ 1997]. Dabei werden die Anforderungen teilweise vom Fügeverfahren, teilweise vom Dichtelement erfüllt.

Form- oder kraftschlüssige Fügeverfahren stellen durch die Übertragung von Kräften Formstabilität her, sind wieder lösbar, beständig gegen Alterung oder thermische Einflüsse und in der Lage unterschiedliche Werkstoffe zu verbinden. Das Dichtelement nimmt neben seiner dichtenden Funktion auch eine Schutzfunktion gegenüber korrosiven Einflüssen wahr.

Die konstruktive Auslegung einer solchen Dichtverbindung ist in der Regel mit einem höheren Aufwand verbunden, da nicht nur die Flanschbauteile alleine, sondern zusätzlich ein Dichtelement bei der Gestaltung der Verbindung miteinbezogen werden muss.

Die anforderungsgerechte Konstruktion einer zuverlässigen Dichtverbindung fußt auf den im Folgenden dargestellten Grundlagen.

## 2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik

Die Aufgabe einer Dichtung besteht darin, zwei Medien unterschiedlichen thermodynamischen Zustandes voneinander zu trennen [GARTNER 1999] beziehungsweise die zwischen den Medienräumen stattfindende Leckage innerhalb annehmbarer Grenzen zu halten [BROWN 1990, SCHMID U.A. 1981].

### 2.1.1 Überblick über Dichtungsarten

Grundsätzlich wird in der Dichtungstechnik zwischen dynamischen und statischen Anwendungen unterschieden (vgl. Abbildung 2-1). Dabei werden elastomere Dichtungen überwiegend bei statischen Dichtungsanwendungen eingesetzt.

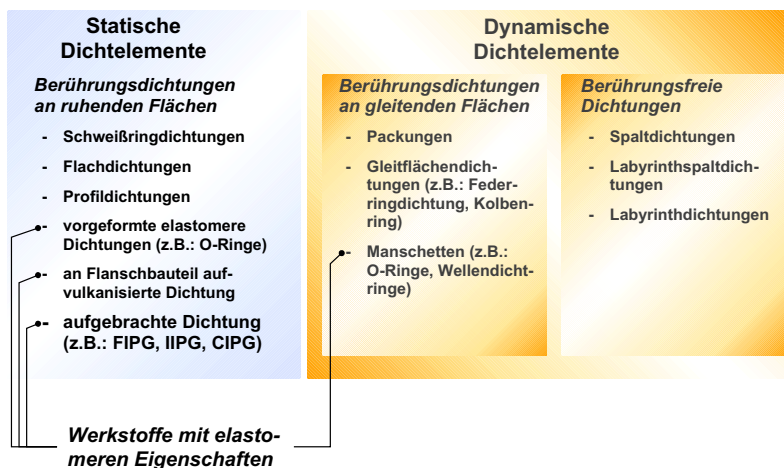


Abbildung 2-1: Einteilung von Dichtungen in Anlehnung an DIN 3750

Dynamische Dichtungen werden im Betrieb über Druckbelastung und eventuelle chemische Beanspruchungen hinaus zusätzlich mechanisch beansprucht, da zwischen den Dichtpartnern eine Relativbewegung stattfindet. Bei statischen Dichtungen findet keine makroskopisch erkennbare

Relativbewegung statt. Für die Zuverlässigkeit statischer Dichtverbindungen ist zu berücksichtigen:

- Die Dichtung muss gegenüber den abzudichtenden Medien eine ausreichende chemische Widerstandsfähigkeit aufweisen.
- Dichtung und Flanschbauteile müssen der mechanischen Belastung zum Herstellen der geforderten Dichtwirkung und den im Betrieb auftretenden Belastungen widerstehen.
- Bei der Fertigung der Flanschbauteile sind eventuell zusätzliche Dichtnuten oder Phasen anzubringen, sowie Grate zu entfernen.
- Die Montage der Dichtung muss mit hoher Präzision erfolgen um die geforderte Verformung der Dichtung sicherstellen und keine „Vorschädigung“ der Dichtung hervorzurufen.

Um den Einfluss der Verbindungsgestaltung auf die Zuverlässigkeit der Dichtverbindung zu erläutern, wird im Folgenden die Funktionsweise statischer Dichtverbindungen dargestellt.

### 2.1.2 Funktionsweise statischer Dichtelemente

Bei der Beanspruchung einer Verbindung zweier Flanschbauteile durch Druck- oder Konzentrationsunterschiede ist eine geringe, ungewollte Mediendurchlässigkeit durch den Fügespalt nicht zu verhindern. Ursache für diese unerwünschten Leakageströme sind Leakagestege die sich aufgrund von Oberflächenrauigkeiten oder fehlender Planparallelität zwischen den jeweiligen Bauteilen ergeben [ENDLICH 1990, KEULERT 1994, SCHMID U.A. 1981].

Die Aufgabe statischer Dichtelemente besteht darin, die vorhandenen Leakagestege zu beseitigen oder zu verringern. Dies geschieht durch eine Verformung des Dichtelementes und/oder der gegeneinander abzudichtenden Flanschflächen (vgl. Abbildung 2-3). Dabei stellt die Dichtung ei-

## 2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik

nen Strömungswiderstand gegenüber Konzentrations- oder Druckgradienten dar [BEITZ & GROTE 1997].

Während der Montage der Dichtung wird durch das Aufbringen einer geeigneten Vorspannkraft an den Kontaktflächen der Dichtung zu den Flanschpartnern eine Flächenpressung zwischen Dichtung und Flanschbauteilen hervorgerufen.

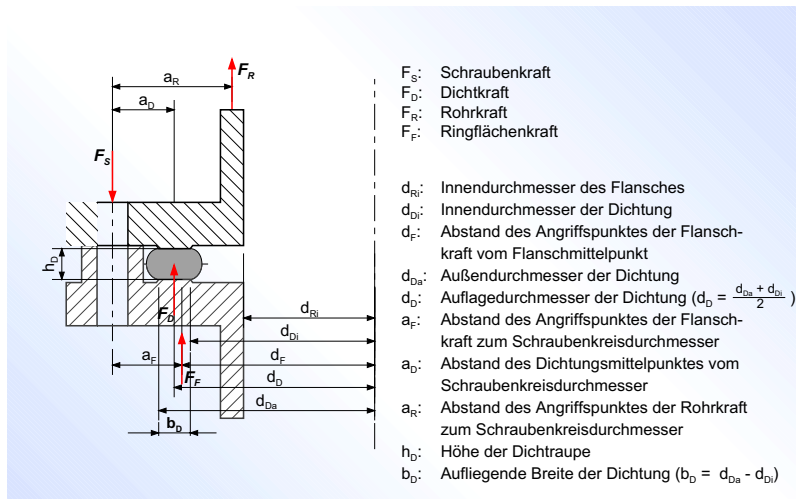


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung an einem Flansch angreifender Kräfte (angelehnt an DIN 2505 (E))

Die Auslegung einer Dichtverbindung beschränkt sich nach DIN 2505 (E) im Wesentlichen auf die Berechnung der notwendigen Dichtkraft beziehungsweise der notwendigen Schraubenkraft. Aus dem Kräftegleichgewicht am Flansch (vgl. Abbildung 2-2) folgt somit nach DIN 2505 (E):

$$\text{Gleichung 2-1: } F_S = F_F + F_R + F_D$$

Mit

$F_S$ : Schraubenkraft: Von den Schrauben auf die Dichtverbindung übertragene Kraft

- $F_F$ : Ringflächenkraft: Entsteht durch den Innendruck auf der Ringfläche zwischen Rohrinneindurchmesser und Dichtungsdurchmesser
- $F_R$ : Rohrkraft: Resultiert aus der vom Rohr auf die Flanschverbindung übertragenen Kraft, die durch den Innendruck oder Biegemomente hervorgerufen wird
- $F_D$ : Dichtkraft: Die Dichtkraft muss eine hinreichende Vorverformung der Dichtung und eine ausreichende Dichtwirkung im Betrieb sicherstellen

Dabei stellt die Dichtkraft das Produkt aus der Flächenpressung und der Auflagefläche der Dichtung dar, und muss durch die Schraubenkraft aufgebracht werden. Zur Ermittlung einer für eine hinreichende Abdichtung ausreichende Flächenpressung, kann die erforderliche Flächenpressung durch Gleichung 2-2 [DIN 2505 (E), TÜCKMANTEL 1990] berechnet werden (vgl. Abbildung 2-2).

$$\text{Gleichung 2-2: } \sigma_v = \sigma_{\text{erf}} = \left[ \left( \frac{d_D}{4 \cdot b_D} + m \right) \cdot p + \frac{F_{Rz}}{d_D \cdot \pi \cdot b_D} \right] \cdot U_{S0} \cdot \frac{E_0}{E_{\vartheta}} + \frac{F_{Rd}}{d_D \cdot \pi \cdot b_D}$$

Mit

- $\sigma_v / \text{erf}$ : Mindestflächenpressung bzw. erforderliche Flächenpressung  $\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$
- $d_D$ : Auflagedurchmesser der Dichtung [mm]
- $b_D$ : Tragende Breite der Dichtung [mm]
- $p$ : Betriebsdruck  $\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$
- $E_0 / \vartheta$ : Elastizitätsmodul bei Einbau- beziehungsweise Betriebstemperatur  $\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$
- $m$ : Verhältniszahl zwischen Innendruck und Flächenpressung  $[1 < m < 1,8]$
- $U_{S0}$ : Unsicherheitsfaktor hinsichtlich der wahren Schraubenkraft
- $F_{Rz}$ : Komponente der Rohrkraft die zu einer Belastung der Schrauben führt [N]
- $F_{Rd}$ : Komponente der Rohrkraft die zu einer Entlastung der Schrauben führt [N]

## 2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik

---

Je nach Höhe der Flächenpressung, die durch form- und/oder kraftschlüssige Verbindungselemente erzeugt wird, und der eingesetzten Materialpaarung zwischen Dichtungs- und Flanschwerkstoff kann eine Verformung

- die Dichtung alleine oder
- die Dichtung und das Flanschbauteil

betreffen, und dabei elastischer und/oder plastischer Natur sein (vgl. Tabelle 2-1).

	Verformung des Bauteils <sup>1</sup>	Verformung der Dichtung
Feststoffdichtung	<i>elastisch bis plastisch</i>	<i>elastisch bis plastisch</i>
Elastomere Dichtung	<i>keine Verformung</i>	<i>elastisch bis elastoplastisch</i>
Nassverbaute Dichtung	<i>keine Verformung</i>	<i>keine Verformung</i>

Tabelle 2-1: Verformungsarten von Dichtung und Bauteilen bei unterschiedlichen Dichtungsarten

Bei Feststoffdichtungen zu denen neben Flachdichtungen wie beispielsweise Scheiben- und Ringdichtungen auch Profildichtungen wie Linsen- und Ring Joint-Dichtungen gehören, wird durch die aufgebrachte Flächenpressung das Oberflächenrelief von Dichtung beziehungsweise Flanschwerkstoff verformt, so dass Rauigkeitsspitzen verringert werden.

---

<sup>1</sup> an der Kontaktfläche zur Dichtung



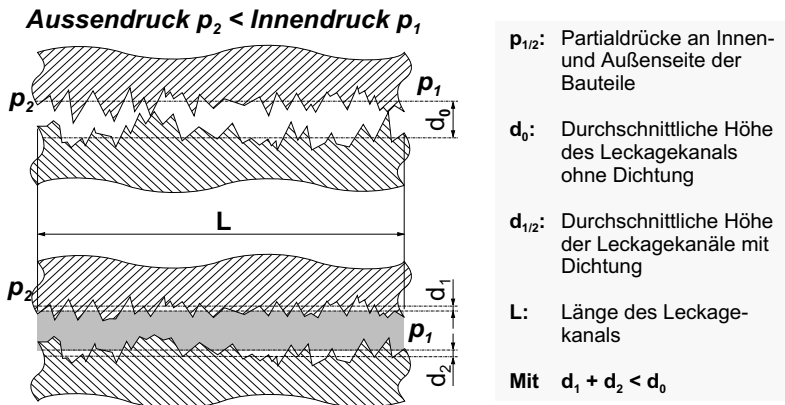


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer statischen Dichtung

Zwar gehören elastomere Dichtungen ebenfalls zu den Feststoffdichtungen, aufgrund ihres geringen Verformungswiderstandes und ihrer hohen Verformungsfähigkeit findet jedoch keine Verformung der Flanschoberfläche statt. In allen Fällen wird die gewünschte Dichtwirkung dadurch erreicht, dass die Gesamthöhe der Leckagekanäle verringert wird (vgl. Abbildung 2-3). Allerdings verbleibt eine von Flächenpressung und Größe der Kontaktfläche abhängige Restdurchlässigkeit, die zu einem Leckagestrom führen kann. Aus strömungsmechanischer Sicht wird durch die Verringerung der Spaltweite der Strömungswiderstand entlang des bestehenden Druck- beziehungsweise Konzentrationsgradienten zwischen den zu trennenden Medien erhöht.

Eine Erhöhung des Strömungswiderstandes kann auch durch eine Verlängerung der Dichtspaltbreite erreicht werden. Daher sollen

- Dichtungen eine möglichst breite Auflage zu den Kontaktebenen einschließen [DIN 2505 (E), Tücmantel 1990]
- beziehungsweise die Flächenpressungen zwischen Dichtung und Flanschbauteil möglichst hoch sein [THIER 1993, SCHMID U.A. 1981, TÜCKMANTEL 1990],

damit sich für Leckageströmungen ein möglichst hoher Strömungswiderstand ergibt. Die Größe der Verformung der Dichtung ist neben der Höhe der aufgetragenen Kraft von den mechanischen Werkstoffeigenschaften der Flanschbauteile und insbesondere der Dichtung abhängig.

Vor allem durch den Einsatz elastomerer Dichtungen kann ein hohes Maß an Dichtigkeit und Zuverlässigkeit der Dichtverbindung erreicht werden. Die Gründe hierfür sind neben ihrer hohen chemischen Resistenz in ihren speziellen Werkstoffeigenschaften zu suchen.

### 2.1.3 Werkstoffeigenschaften elastomerer Dichtungen

Da bei elastomeren Werkstoffen der Elastizitätsmodul von der Spannung beziehungsweise dem Verformungsgrad abhängt (vgl. Abbildung 2-4 und Gleichung 2-3) können die bei konventionellen Feststoffdichtungen angewandten Vorgehensweisen und Normen nicht auf elastomere Werkstoffe übertragen werden.

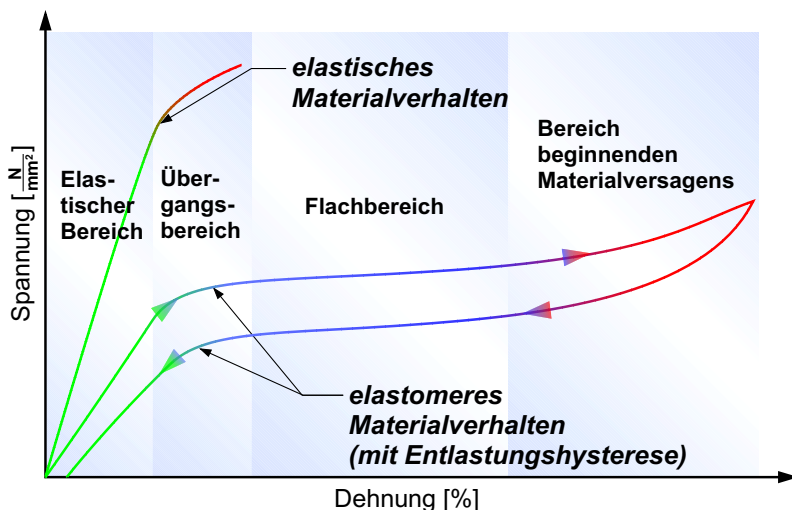


Abbildung 2-4: Schematischer Vergleich elastischen und elastomeren Materialverhaltens (angelehnt an DIN 53537)

Gleichung 2-3:  $\sigma = E_{(\sigma, \varepsilon)} \cdot \varepsilon$

$\varepsilon$ : Relative Verformung des Werkstoffes [%]

$E_{(\sigma, \varepsilon)}$ : Verformungs- bzw. spannungsabhängiger Elastizitätsmodul  
des Werkstoffes  $\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$

$\sigma$ : Resultierende Spannung innerhalb des Werkstoffes  $\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$

Grundsätzlich unterscheiden sich die Spannungs-Dehnungsdiagramme linear-elastischer Festkörper und elastomerer Stoffe in folgenden Punkten:

- Elastomere zeichnen sich durch eine starke Verformungsfähigkeit aus (vgl. Abbildung 2-4).
- Das Spannungs-Dehnungsdiagramm von Elastomeren zeigt einen charakteristischen Flachbereich (vgl. Abbildung 2-4).

In der Praxis auftretende Leckageraten zwischen  $10^{-8} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{m} \cdot \text{s}}$  und  $10^{-4} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{m} \cdot \text{s}}$  werden bei elastomeren Dichtungen mit geringeren Flächenpressungen ( $\leq 2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  bis  $15 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ) als bei Feststoffdichtungen ( $> 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  bis  $600 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ) erreicht [TÜCKMANTEL 1990].

Bezüglich der Temperaturbedingungen und Einsatzbereiche sowie der spezifischen Werkstoffeigenschaften<sup>2</sup> wird innerhalb der DIN eine Rücksprache mit den Herstellern empfohlen [DIN 3771–3]. Allgemeingültige Richtlinien im Hinblick auf eine Auslegung gibt es nicht.

Dies liegt vorwiegend daran, dass es zum einen eine hohe Anzahl unterschiedlicher Grundstoffe für elastomere Dichtungen gibt, zum anderen unterschiedliche Füllstoffbeimengungen in herstellerspezifischen Konzentrationen beigemischt werden. Die Art des elastomeren Grundstoffes und die Art und Konzentration der Füllstoffbeimischungen legen die physikalisch-mechanischen Werkstoffeigenschaften, sowie die Beständigkeit der Dichtung gegenüber chemischen und thermischen Belastungen fest.

---

<sup>2</sup> z.B. chemische Resistenz gegen abzudichtende Medien, mechanische Belastbarkeit

Die resultierende hohe Anzahl möglicher Elastomere lässt eine systematische Beschreibung ihrer Eigenschaften nicht zu.

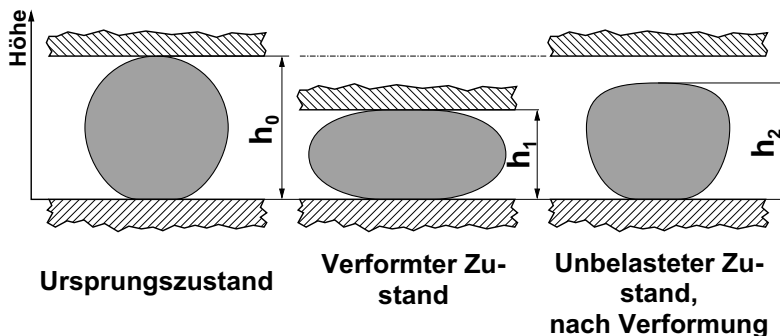


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung zur Bestimmung des Druckverformungsrestes (DVR) und der Vorpressung (V)

Die jeweiligen Hersteller elastomerer Dichtungen geben spezifische Auslegungsanleitungen vor. Dabei erweist sich der nach DIN 53517 definierte Druckverformungsrest als wichtiges werkstoffspezifisches Kriterium zur Auslegung einer geeigneten Vorpressung [vgl. Abbildung 2-5, Gleichung 2-4a und Gleichung 2-4b].

Gleichung 2-4a: 
$$\text{DVR} = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1}$$

Gleichung 2-4b: 
$$V = \frac{h_0 - h_2}{h_0}$$

Mit

DVR: Druckverformungsrest [%]

V: Vorpressung [%]

$h_0$ : Ausgangshöhe bzw. -Durchmesser des Dichtungsquerschnitts [mm]

$h_1$ : Höhe bzw. Durchmesser bei eingebrachter Verformung [mm]

$h_2$ : Höhe bzw. Durchmesser nach Entlastung

Von Angst und Pfister [ANGST + PFISTER 1996], Busak und Shamban [BUSAK + SHAMBAN 1996] werden dabei Vorpressungen zwischen 15% und 30%, bei Schmid [SCHMID U.A. 1981] von 30% bis 35% des Aus-

gangsdurchmessers als ideal angesehen. Schuller [SCHULLER 1998] weist darauf hin, dass die Herkunft dieser Werte unbegründet bleibt.

Neben diesen Richtlinien und Empfehlungen zur Auslegung von Dichtungen muss beim Einsatz statischer Dichtelemente deren Einbausituation berücksichtigt werden. Prinzipiell können Dichtungen sowohl im Kraftnebenschluss (KNS) als auch im Krafthauptschluss (KHS) eingebaut werden (vgl. Abbildung 2-6). Da elastomere Dichtungen aufgrund ihrer hohen Verformungsfähigkeit bereits bei niedrigen Anpressdrücken eine hohe Dichtigkeit erreichen, durch starke mechanische Belastungen jedoch beschädigt werden, sollten sie prinzipiell als Kraftnebenschlussdichtung eingesetzt werden [SCHMID U.A. 1981, SCHULLER 1998].

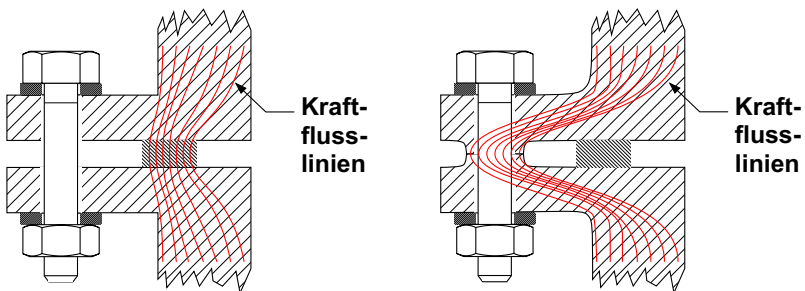


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung von Einbaumöglichkeiten einer Dichtung im Krafthauptschluss (links) und im Kraftnebenschluss (rechts) [angelehnt an SCHMID U.A. 1981]

Durch den Einbau der Dichtung im Kraftnebenschluss kommt das konstruktive Prinzip der sogenannten „**Aufgabenteilung**“ zur Geltung. Dieses gestattet eine bessere Nutzung der einzelnen Bauteile [PAHL & BEITZ 1997].

Durch die Auflösung der kraftübertragenden Funktion innerhalb des Dichtelementes kann bei der Gestaltung des Dichtungsquerschnittes eine „**selbsthelfende Konstruktion**“ umgesetzt werden [NIEMANN 1981, PAHL & BEITZ 1997] (vgl. Abbildung 2-7). Eine herkömmliche Flansch-Schraube-Verbindung (vgl. Abbildung 2-2) kann als selbstschadend be-

## 2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik

zeichnet werden, da die Flächenpressung der Dichtung im Betriebsfall abnimmt. Bei den in Abbildung 2-7 skizzierten Lösungen wird die Flächenpressung im Betriebsfall verstärkt. Dies gilt aufgrund ihrer hohen Verformungsfähigkeit besonders für elastomere Dichtungen.

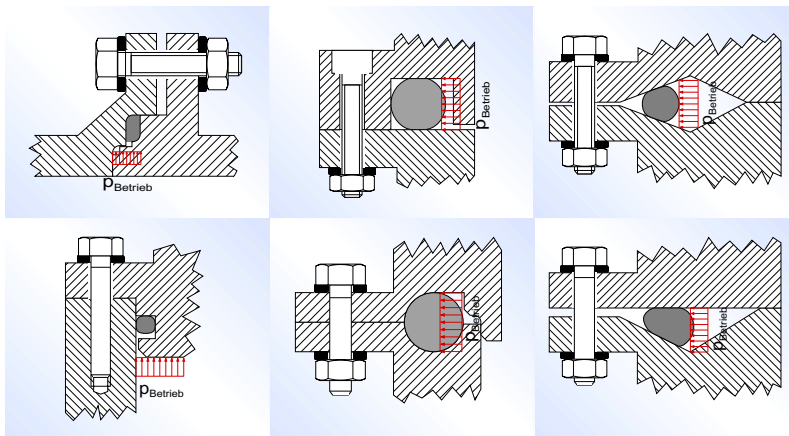


Abbildung 2-7: Beispiele geeigneter, selbsthelfender Gestaltung dichtender Flanschverbindungen nach PAHL & BEITZ 1997

Bei elastomeren Dichtungen kann zwischen vulkanisierten profilierbaren Elastomerdichtungen, die sowohl als Berührungsdichtungen an gleitenden als auch an ruhenden Flächen eingesetzt werden (vgl. Abbildung 2-1), und flüssig aufgetragenen Dichtungen unterschieden werden.

### 2.1.4 Unterscheidungsmerkmale flüssig aufgetragener, statischer Dichtungen

Eine Unterscheidung zwischen flüssig aufgetragenen, elastomeren Dichtungen kann anhand der Reihenfolge nachstehender Einzelschritte erfolgen (vgl. Abbildung 2-8).

- Dichtungsauftrag: Das flüssige Dichtmedium wird mit mindestens einem der beiden Flanschbauteile in Verbindung ge-

bracht, beispielsweise durch einen Raupenauftrag auf ein Bauteil

- Aushärten der Dichtung: Durch chemische oder physikalische Reaktionsmechanismen vernetzt die Dichtmasse und „härtet aus“
- **Montage der Dichtverbindung:** Durch Montieren und gegebenenfalls Verschrauben der beiden Flanschbauteile wird die Dichtung in ihren endgültigen Zustand gebracht

Dabei können im wesentlichen drei unterschiedliche „Verbauarten“ unterschieden werden.

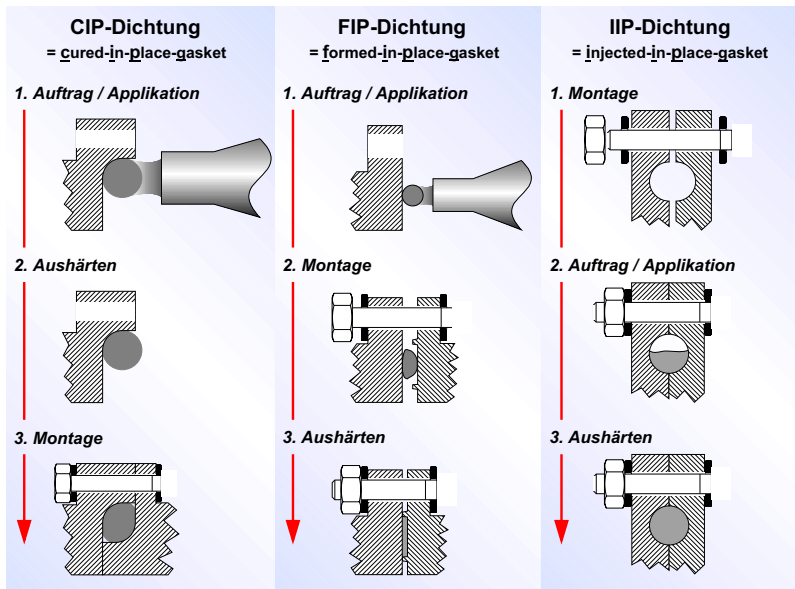


Abbildung 2-8: Einteilung der CIP-, FIP- und IIP-Dichtungen nach der Reihenfolge der Prozesse Dosierung, Montage, Aushärtung

Sogenannte **CIP-Dichtungen** (CIP: cured in place) werden flüssig auf eines der beiden Flanschbauteile aufgetragen. Die Montage der zusammen-

mengehörigen Bauteile findet nach der Vernetzung der Dichtraupe statt (vgl. Abbildung 2-8).

Flüssig aufgetragene Dichtungen können als **FIP-Dichtungen** (FIP: formed in place) auch im noch „nassen“ beziehungsweise unvernetzten Zustand verbaut werden. Erfolgt dabei die Montage unmittelbar nach dem Dichtmassenauftrag, wird das noch flüssige Dichtelement im Dichtspalt verquetscht. Dabei werden die Vertiefungen des Oberflächenreliefs der beiden Fügeteile ausgefüllt. Durch die anschließende Vernetzung kommt es zu einer adhäsiven Verbindung der Dichtung mit den beiden Flanschbauteilen. Aufgrund dieser adhäsiven Verbindung erfolgt die Dichtwirkung ohne jegliche elastische oder plastische Verformung (vgl. Abbildung 2-8). Die Übertragung von Kräften an der Verbindungsstelle muss jedoch durch zusätzliche separate mechanische Verbindungselemente erreicht werden.

Bei eingespritzten Dichtungen, sogenannten **IIP-Dichtungen** (IIP: injected in place), einer Variante des Nassverbaus, erfolgt das Einspritzen der Dichtmasse nach der Montage in eine dafür vorgesehene Dichtnut oder einen Dichtkanal (vgl. Abbildung 2-8). Auch hier beruht die Dichtwirkung auf der adhäsiven Bindung der vernetzten Dichtmasse mit den Flanschbauteilen.

Charakteristischerweise geht bei fluiden Dichtungen der Herstellungsprozess der Dichtgeometrie in enger zeitlicher Folge mit der Montage der Dichtung auf einem Bauteil einher. Der Herstellvorgang besteht dabei im wesentlichen aus einem sogenannten **Auftrags-** beziehungsweise **Applikationsprozess**. Dabei wird während der Auftragsbewegung durch einen kontinuierlichen, der Auftragsgeschwindigkeit angepassten Dosiervorgang ein möglichst gleichmäßiges „Auftragsbild“ angestrebt.

Besondere Beachtung unter den flüssig verbauten Dichtungen verdienen hierbei CIP-Dichtungen da bei dieser häufig vorkommenden Dichtungsart der Auftragsprozess einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der späteren Dichtverbindung hat. Die noch flüssige Dichtung muss durch den Auftragsprozess in ihrer Endlage auf das Bauteil aufgebracht werden, da Form- und Lagefehler durch ein Verquetschen der noch feuchten



Dichtung nicht ausgeglichen werden können, und die Funktionsweise der Dichtung beeinträchtigen würden.

### **2.2 Anforderungsspektrum und Randbedingungen beim Einsatz von CIP-Dichtungen**

An hochviskose, flüssig aufgetragene, trockenverbaute Dichtmedien werden Anforderungen im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Auftragsprozesses als auch auf die erreichbare Qualität der aufgetragenen Dichtung beziehungsweise der Dichtverbindung gestellt. Allerdings erschweren die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Dichtstoffe die Möglichkeit, die gestellten Anforderungen hinreichend zu erfüllen.

Daher werden im Folgenden die Anforderungen an die Genauigkeit hochviskos aufgetragener, trockenverbauter Dichtungen abgeleitet, Abweichungen vom erwünschten Auftragsergebnis dargestellt, und die Ursachen für die unerwünschten Abweichungen, die sich auf physikalische Medieneigenschaften zurückführen lassen, charakterisiert.

#### **2.2.1 Form- und Lagegenauigkeit**

Für die Auslegung hochviskos aufgetragener, elastomerer Dichtungen gibt es keine allgemein gültigen Richtlinien oder Normen (vgl. ANGST + PFISTER 1996, BUSAK + SHAMBAN 1996, SCHULLER 1998, DIN 3771–3). Da viskos aufgetragene, nassverbaute Dichtungsmassen (FIP-Dichtungen) während des Montageprozesses im feuchten Zustand in ihre endgültige Form gebracht werden können, sind nur Lageabweichungen möglich, die jedoch durch eine geeignete Flanschgestaltung vermeidbar sind (SCHULLER 1998). Bei trockenverbauten CIP-Dichtungen fehlt jegliche Korrekturmöglichkeit, da diese Dichtungen nach dem Auftrag auf eines der Flanschbauteile aushärten müssen und erst anschließend verbaut und verpresst werden.

## 2.2 Anforderung an CIP-Dichtungen

Aufgrund der Ähnlichkeit in ihrer Funktionsweise werden daher an CIP-Dichtungen ähnliche Anforderungen wie an elastomere vorgeformte Dichtungen gestellt.

Das Diagramm zeigt zwei kreisförmige Querschnitte einer CIP-Dichtung, die nebeneinander angeordnet sind. Die horizontale Abstände zwischen den Mittelpunkten sind mit  $d_1$  und  $d_2$  beschriftet. Die vertikale Abstände zwischen den Mittelpunkten sind mit  $d_2$  beschriftet.

$d_1$		$d_2$					$d_1$		$d_2$				
	zul. Abw.	$1,80 \pm 0,08$	$2,65 \pm 0,09$	$3,55 \pm 0,10$	$5,30 \pm 0,13$	$7,00 \pm 0,15$		zul. Abw.	$1,80 \pm 0,08$	$2,65 \pm 0,09$	$3,55 \pm 0,10$	$5,30 \pm 0,13$	$7,00 \pm 0,15$
1,8	$\pm 0,13$	x					38,7	$\pm 0,37$		x	x		
2,0	$\pm 0,13$	x					40,0	$\pm 0,38$			x	x	
...	...	...					...	...			...	...	
2,8	$\pm 0,14$	x					200,0	$\pm 1,55$			x	x	
...	...	...					206,0	$\pm 1,59$				x	x
14,0	$\pm 0,19$	x	x				...	...				...	...
...	...	...	...				400,0	$\pm 2,84$				x	x
17,0	$\pm 0,21$	x	x				412,0	$\pm 2,91$					x
18,0	$\pm 0,21$		x	x			...	...					...
...	...		...	...			670,0	$\pm 4,46$					x

Tabelle 2-2: DIN 3771–1: Innendurchmesser, Querschnittsdurchmesser und zulässige Abweichungen für allgemeine Industrieanwendungen (Auszug)

Zwar gibt es für diese Dichtungen Richtlinien beziehungsweise Normen für den jeweiligen Einsatzzweck (DIN 3771–3) zur Kennzeichnung (DIN 3750; DIN 3771–2), zulässige Maße und Toleranzfelder der Dichtungen (DIN 3760, DIN 3761, DIN 3771–1, DIN 3771–4), der zugehörigen Einbauräume und Vorschläge für Berechnungsverfahren (DIN 3771–5).

Für CIP-Dichtungen eignen sich diese Normen jedoch nur bedingt, da diese über andere mechanische Werkstoffkennwerte verfügen, und ihr

Herstellungsprozess deutlich von Herstellungsprozess elastomer, vorgeformter Dichtungen abweicht. Dennoch werden an die Genauigkeit der hochviskos aufgetragenen Dichtraupen ähnliche Anforderungen wie bei O-Ringen im Hinblick auf Maß- beziehungsweise Formgenauigkeit gestellt (vgl. Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3), um beim späteren Einsatz die vorgesehene Dichtigkeit erreichen zu können.

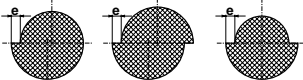
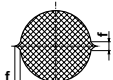
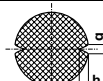
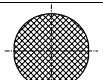
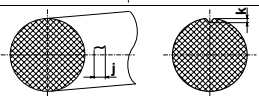
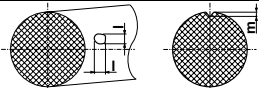
Arten der Abweichung	Schematische Darstellung	Abmessung	Sortenmerkmal N				
			d <sub>2</sub> nach DIN 3771 Teil 1				
			1,80	2,65	3,55	5,30	7,00
			Größtmaß				
Versatz und Formabweichungen		e	0,08	0,10	0,13	0,15	0,15
Wulst, Grat, Versatz kombiniert		f	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18
Einkerbung		g	0,18	0,27	0,36	0,53	0,70
		h	0,08	0,08	0,10	0,10	0,13
Entgratungsbereich		-	Abweichungen vom runden Querschnitt sind zulässig, wenn die Abflachung übergangslos in die Rundung eingeht und d <sub>2</sub> eingehalten wird.				
Fließlinien (radiale Ausdehnung ist nicht zulässig)		j	0,05 · d <sub>1</sub> oder				
		k	1,50	1,50	6,50	6,50	6,50
Vertiefungen, Einzugsstellen		l	0,60	0,80	1,00	1,30	1,70
		Tiefe m	0,08	0,08	0,10	0,10	0,13
Fremdkörper	-	-	nicht zulässig				

Tabelle 2-3: DIN 3771–4 Toleranzfelder für Form- und Oberflächenabweichungen von O-Ringen (Auszug)

Bei vorgeformten Elastomerdichtungen stellt die Herstellung der Dichtgeometrie einen eigenständigen Prozess dar. Wechselwirkungen zu nachfolgenden Prozessen, wie der Dichtungsmontage existieren bei vorgeformten Dichtungen normalerweise nicht. Bei viskos aufgetragenen E-

lastomerdichtungen geht der Herstellvorgang der Dichtungsgeometrie mit dem Montagevorgang der Dichtung auf dem Bauteil einher. Dabei kommt es aufgrund der Eigenschaften des für den Auftrag eingesetzten Handhabungsgerätes zu starken Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Einzelprozessen. Ungeachtet der Frage, ob derartig hohe Genauigkeitsanforderungen für die erwünschte Dichtigkeit der Verbindung notwendig sind, orientiert man sich beim Einsatz von CIP-Dichtungen häufig an diesen Toleranzfeldern. Somit stellen diese an die Form- und Maßhaltigkeit flüssig aufgetragener, elastomerer Dichtungen sehr hohe Anforderungen an den Applikationsvorgang.

Durch die Automatisierung des Dosier- und Auftragsprozesses, den sogenannten Applikationsvorgang, wird versucht diesen hohen Anforderungen gerecht zu werden. Die dadurch entstehenden, zusätzlichen Kosten sollen bei gleichbleibender Prozessergebnisqualität bei möglichst geringen Taktzeiten erreicht werden. Dadurch soll die Wirtschaftlichkeit eines automatisierten Auftragsprozesses gewährleistet werden.

### 2.2.2 Form- und Lagefehler

Abweichungen der angestrebten Raupenform und ihrer Lage relativ zum Flanschbauteil werden als „**Dosierfehler**“ bezeichnet [BRANDENBURG 1996, SCHULLER 1998]. Als eine Hauptursache von Dosierfehlern werden dabei eine falsche Kombination der Verfahrensparameter des Handhabungsgerätes mit den Parametern der Dosiersteuerung genannt.

Nach Schuller und Brandenburg [SCHULLER 1998, BRANDENBURG 1996] lassen sich die Ursachen für Form- und Lagefehler auf

- die Eigenschaften des aufzutragenden Dichtmediums,
- die Eigenheiten des eingesetzten Dosiersystems und
- das Zusammenwirken des Dosiersystems und des Handhabungssystems

zurückführen.










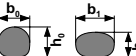
<b>Form- und Lagefehler</b>	<b>Ursache</b>	<b>Beispiele zur Abhilfe</b>
Unter- dosierung  Über- dosierung 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- falsche Parameterkombination</li> <li>- falsche Zellenkomponenten</li> <li>- dynamisches Verhalten des Industrieroboters (= IR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abstimmung Dosierparameter</li> <li>- Kompensation systematischer Dosierfehler / dynamisches Verhalten des IR</li> </ul>
Anfangs- klecks  End- klecks 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dosiersystem</li> <li>- dynamisches Verhalten des IR</li> <li>- Rheologie des Dichtstoffes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- volumetrische Dosierung</li> <li>- Abstimmung Dosier-/Bahnparameter</li> </ul>
Einschnürungen, Verdickungen 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schwankungen der Rheologie</li> <li>- nicht steuerbares Dosiersystem</li> <li>- dynamisches Verhalten des IR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhöhung der Förder-Steiifigkeit</li> <li>- Kompensation systematischer Dosierfehler / dynamisches Verhalten des IR</li> </ul>
Fadenbildung 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materialeigenschaften</li> <li>- Auftragsnadel (zu dick)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Programmgestaltung</li> <li>- Nadelgeometrie</li> </ul>
Raupenlage 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Programmgestaltung</li> <li>- Werkstücktoleranzen</li> <li>- Schwerkraft</li> <li>- dynamisches Verhalten des IR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgleichsbewegung</li> <li>- Simulation</li> <li>- Kompensation systematischer Dosierfehler</li> </ul>
Nahtstelle 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ansteuerzeitpunkt</li> <li>- Totzeiten im Dosiersystem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Programmgestaltung</li> <li>- konstruktive Maßnahmen (Platzangebot, Aussparung)</li> </ul>
Unterbrechungen 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medienförderung</li> <li>- Mediendosierung</li> <li>- Einschlüsse, Luftblasen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geeignete Komponenten</li> <li>- Abdichtung des Systems</li> <li>- Sensoreinbindung</li> </ul>
Falsches Breiten- Höhenverhältnis (Aspect-Ratio) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materialverhalten</li> <li>- Düsenabstand / -durchmesser</li> <li>- Applikationsparameter</li> <li>- dynamisches Verhalten des IR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abstimmung Dosierparameter</li> <li>- Kompensation systematischer Dosierfehler / dynamisches Verhalten des IR</li> </ul>

Abbildung 2-9: Form- und Lagefehler von hochviskosen, aufgetragenen Dicht-  
raupen und deren Ursachen (erweitert nach SCHULLER 1998)

Dabei kann ein Großteil der Form- und Lagefehler auf das Verhalten des Handhabungsgerätes und/oder der Dosiereinheit beziehungsweise ihres Zusammenspiels zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 2-9). Das Auftreten von Dosierfehlern findet bezeichnenderweise meist in der Nähe von stark gekrümmten oder geknickten Bahnkonturen statt (vgl. Abbildung 2-10).

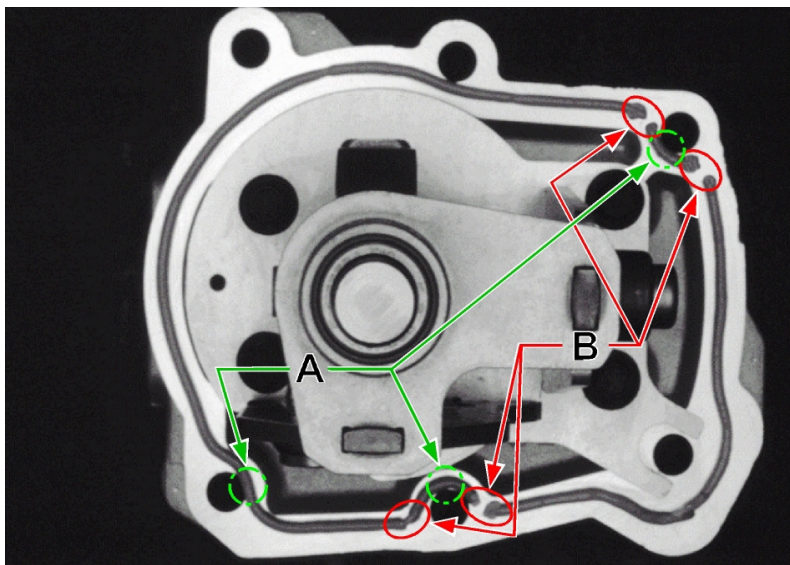


Abbildung 2-10: Auftragsergebnis mit charakteristischen Dosierfehlern.

A: Lageabweichungen der Raupe, Ursache: Unterdosierung;

B: Abreißen der Dichtraupe, Ursache: Unterdosierung

### 2.2.3 Rheologische Randbedingungen

Die für den Durchfluss und somit für das aufgebrachte Klebstoffvolumen wichtigste Größe ist die Viskosität des Dichtmediums. Bei sogenannten newtonschen Flüssigkeiten besteht zwischen Verformungsgeschwindigkeit und Schubspannung ein linearer Zusammenhang.

In der Regel handelt es sich bei hochviskosen Kleb- und Dichtstoffen nicht um newtonsche Flüssigkeiten. Dabei weisen Kleb- und Dichtstoffe zumeist thixotropes oder strukturviskoses Verhalten auf, gelegentlich stellen sie Bingham-Medien dar, seltener können rheopexe oder dilatante Eigenschaften beobachtet werden [DILGER ET AL. 2000, DILTHEY ET AL. 1998, DIN 1342-2 (E), DIN 1342-3 (E)].

Bei strukturviskosen Medien nimmt mit steigender Schergeschwindigkeit die Viskosität ab, bei dilatanten Medien nimmt diese zu (vgl. Abbildung 2-11). Bei thixotropen Medien nimmt die Fließfähigkeit bei gleichbleibender Scherbeanspruchung mit der Zeit zu, bei rheopenen Medien nimmt es ab [CHURCHILL 1988, CONSTANTINESCU 1995].

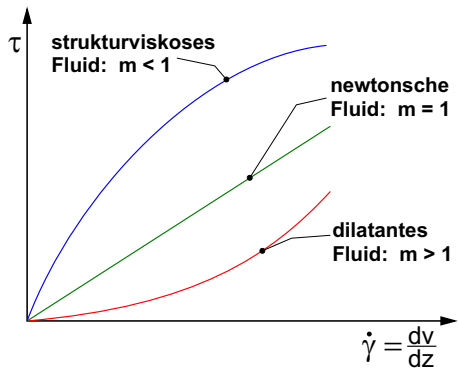


Abbildung 2-11: Darstellung der Fließkurven dilatanter, newtonscher und strukturviskoser Fluide

Eine allgemeine angenäherte Beschreibung der Fließkurve

kann dabei durch das Potenzgesetz nach Ostwald-de-Waele für große Schubspannungen nach Gleichung 2-5 [DIN 1342-3 (E), BEITZ & GROTE 1997] angegeben werden (vgl. Abbildung 2-11):

Gleichung 2-5:  $\tau = \kappa \cdot |\dot{\gamma}|^{m-1} \cdot \dot{\gamma}$

$$\tau > 0$$

**m < 1: Strukturviskoses Verhalten**

**m = 1, Newtonsches Verhalten**  
 $\kappa = \eta$

**m > 1: Dilatantes Verhalten**

Mit

$\tau$ : Schub- bzw. Scherspannung  $\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$

$\dot{\gamma}$ : Verformungs- bzw. Schergeschwindigkeit  $\left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$

$\kappa, m$ : Stoffkonstanten

Bei einer druckgesteuerten Mediendosierung kann in Abhängigkeit des aufgetragenen Dosierdruckes der geförderte Volumenstrom nach Gleichung 2-6 [DIN 1342-3 (E), STICHELMAIR 1995, BEITZ & GROTE 1997] berechnet werden. Dabei können Änderungen der Stoffeigenschaften zum Auftreten von Dosierfehlern führen.

## 2.2 Anforderung an CIP-Dichtungen

---

Gleichung 2-6: 
$$V = \kappa \cdot \frac{2 \cdot \pi}{2^m} \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right)^m \cdot \frac{r^{m+3}}{(m+1) \cdot (m+3)}$$

Mit

$V$  : Volumenstrom  $\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$

$\frac{\partial p}{\partial z}$  : Druckgradient in Strömungsrichtung  $\left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right]$

$\kappa, m$  : Materialgesetzabhängige Stoffkonstanten (vgl. Gleichung 2-5)

$r$  : Durchströmter Querschnittsradius [m]

Dilthey [DILTHEY ET AL. 1998] schließt eine Berechnung der rheologischen Eigenschaften aus, da ein Materialgesetz, das die Medieneigenschaften während des Auftrags mit hinreichender Genauigkeit beschreibt, nicht vorhanden ist. Neben den Unsicherheiten im Hinblick auf die Beschreibung des Materialverhaltens ist in der Regel weder Art noch Höhe der Belastung der Medien in der Dosieranlage bekannt [DILTHEY ET AL. 1998, JEPSEN 1988]. Gegenüber der druckgesteuerten Dosierung ist eine volumengesteuerte Mediendosierung beispielsweise mit Zahnrad- oder Exzenterschneckenpumpen vorteilhafter, da die Förderrate unabhängig von den rheologischen Medieneigenschaften ist [CHURCHILL 1988, CONSTANTINESCU 1995].

Neben diesen einzelnen rheologischen Materialgesetzen treten bei realen Kleb- und Dichtstoffen oftmals Mischformen der oben geschilderten Materialcharakteristika auf. Zusätzlich erschwert wird eine rheologische Beschreibung durch den starken Einfluss steigender Temperaturen welche sinkende Viskositäten der jeweiligen Medien bewirken (vgl. PAWLOVSKI 1971, PAWLOVSKI 1991, ZLOKARNIK 1993).

Verantwortlich für die Rheologie der eingesetzten Stoffe ist die chemische Zusammensetzung der Medien, die sich aus Basispolymer, Füllstoffen, Weichmachern und weiteren Bestandteilen zusammensetzen (vgl. Abbildung 2-12). Bei der Entwicklung der jeweiligen Kleb- und Dichtstoffe haben die Medienhersteller in den allermeisten Fällen die Eigenschaften des fertig vernetzten Mediums im Rahmen einer Anforderungsliste zu erfüllen (vgl. WACHINGER 1999).



Die wichtigsten Anforderungen an vernetzte Medien sind:

- mechanische Belastbarkeit
- chemische Beständigkeit und
- thermische Beständigkeit

Medieneigenschaften, die sich auf den noch flüssigen, unvernetzten Zustand beziehen, werden in der Regel nicht beachtet oder müssen in den Hintergrund treten (vgl. BOSCH 1999, WACHINGER 1999, GARNICH & LITZEL 1999).

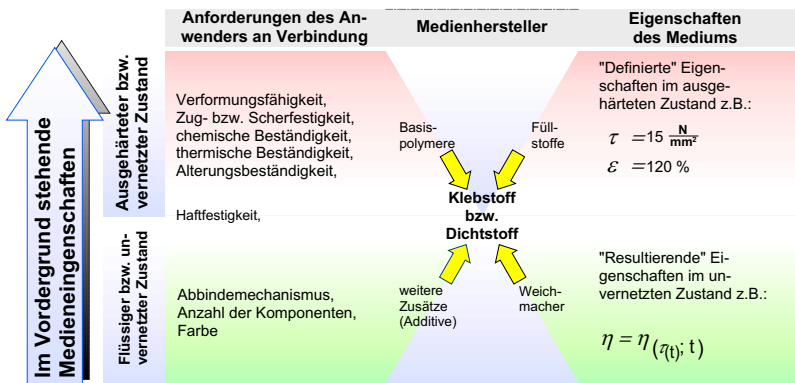


Abbildung 2-12: Einteilung und Entstehung der Medieneigenschaften aus anwendungstechnischem Blickwinkel

Eine Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften des flüssigen, unvernetzten Mediums im Hinblick auf einen robusten Auftragsprozess wird vom Medienhersteller vernachlässigt, da für ihn die Eigenschaften des vernetzten Mediums im Vordergrund stehen (vgl. Abbildung 2-12). Aufgrund der vielfältigen Anzahl von Einzelbestandteilen der Kleb- und Dichtstoffe und deren starker Einflussnahme auf die Eigenschaften des unvernetzten und vernetzten Mediums weist Wachinger [WACHINGER 1999] in diesem Zusammenhang auf die Chargenabhängigkeit des Materialverhaltens hin, das eine genaue Beschreibung des rheologischen Medienverhaltens während der Dosierung nahezu unmöglich macht. Auch

Brandenburg [BRANDENBURG 1996] weist auf das instabile Prozessverhalten beim Dosieren hochviskoser Medien hin. Brandenburg führt dies sowohl auf rheologische Eigenschaften der jeweiligen Medien als auch auf Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten der Auftragsanlage zurück.

Daher muss das dynamische Verhalten des Handhabungsgerätes 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 Erfahrungen des jeweiligen Anwenders und mit Hilfe von Auftragsversuchen durchgeführt. Dadurch kann ein sogenannter „stabiler Betriebspunkt“ der Auftragsanlage erreicht werden, an dem Dichtraupen mit hinreichender Qualität auf das Bauteil aufgetragen werden. Automatisierungsgeräte verlassen jedoch im Lauf der Zeit diesen „stabilen Betriebspunkt“ und somit besteht der Bedarf, Modelle und Methoden zu entwickeln, mit denen

- entweder eine dauerhafte Einhaltung eines „stabilen Betriebspunktes“ oder zumindest
- eine schnelle, systematische Rückführung auf einen „stabilen Betriebspunkt“

erreicht werden kann.

## 2.3 Applikation von Dichtungen

Aufgrund der im Kapitel 2.2.1 beschriebenen hohen Anforderungen an die Form- und Lagegenauigkeit werden flüssige Dichtstoffe zumeist automatisiert auf Bauteile aufgebracht. Neben der höheren Reproduzierbarkeit, die durch eine Prozessautomatisierung erreicht werden kann, sind die Taktzeiten bei automatisiertem Dichtmedienauftrag im Regelfall geringer als bei einer manuellen Applikation. Das Dichtmedium wird dabei zumeist in Form einer Dichtraupe auf das Bauteil aufgetragen.

Nach Beginn der Mediendosierung wird die notwendige Relativbewegung zwischen Bauteil und Dosiereinrichtung durch die Verfahrbewegung eines entsprechenden Handhabungssystems erzeugt. Dabei kann das Handhabungssystem

- sowohl das Bauteil
- als auch die Dosiereinheit

führen. Theoretisch kann zwar in der Massenfertigung durch eine aufwendige, starre Anpassung der Geschwindigkeitscharakteristik des Handhabungssystems an die Fördercharakteristik des Dosiersystems die gewünschte streckenkonstante Medienförderung erreicht werden. Aber selbst im Dauerbetrieb der Massenfertigung kommt es zu Abweichungen in der Verfahrcharakteristik des Handhabungsgerätes. Aufgrund der vorgegebenen Fördercharakteristik der Dosiereinheit führen diese Geschwindigkeitsabweichungen zu nicht tolerierbaren Ungenauigkeiten bei der Dosierung. Daher ist in beiden, oben genannten Fällen eine Abstimmung der Auftragsgeschwindigkeit des Dosierstromes mit der Verfahrgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes in Echtzeit erforderlich [WERN 1993, WÖLFLE 1999].

Nur durch eine möglichst gute Abstimmung zwischen Verfahr- und Dosierparametern kann eine ausreichende Form- und Lagegenauigkeit der aufgetragenen Dichtraupe erreicht werden [REINHART & SCHULLER 1996, HARTMANN 1999, DILGER ET AL. 2000].

Der Geschwindigkeitsverlauf über der Bauteilbahn kann dabei sowohl konstant als auch in großen Bereichen variabel sein (vgl. Abbildung 2-13). In beiden Fällen wird allerdings von einem proportionalem Verhältnis zwischen der Verfahrgeschwindigkeit der Auftragsanlage und der geförderten Menge des Dichtmediums ausgegangen. Über- und Unterdosierungen werden

- entweder auf zufällige Störgrößen, wie beispielsweise Lufteinschlüsse zurückgeführt,
- oder ihr Ursprung wird einer falschen Parameterkombination von Verfahr- und Dosierparametern zugeschrieben.

## 2.3 Applikation von Dichtungen

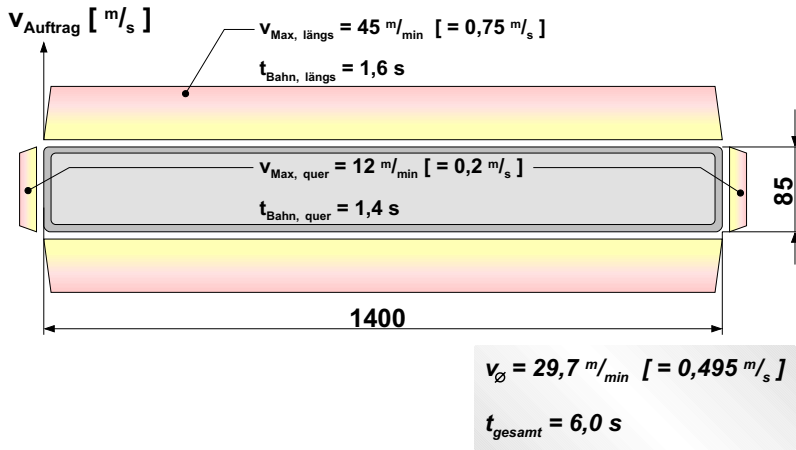


Abbildung 2-13: Beispielhafte Darstellung eines variablen Geschwindigkeitsprofils über der Auftragsbahn [Quelle: Hugo Kern & Liebers GmbH]

Dabei sind bei der Abstimmung der Verfah- und Dosierparameter folgende Punkte zu beachten:

- Die Medienviskosität ist während des Auftragsprozesses mit den in Abschnitt 2.2.3 erörterten, starken Veränderungen behaftet [Dilthey et al. 1998].
- Die Geschwindigkeit längs der Bearbeitungsbahn ist nicht konstant [Dilthey et al. 1998].
- Der Volumenstrom ist das einzige Prozessmerkmal, welches hinreichende Rückschlüsse auf die Existenz sowie eingeschränkte Rückschlüsse auf die Form- und Lagegenauigkeit und somit auf die Qualität der aufgetragenen Dichtraupe zulässt [Wern 1993, Gartner 1999].
- Am Anfang der Dosierung - bei Schussbeginn - und bei unsteuiger Dosierung, sogenannter schussweiser Applikation ist wegen der plötzlich aufgebrachten Verformung und der damit verbundenen rheologischen Antwort des Mediums häufig eine

Prozessfähigkeit nicht gewährleistet [Wern 1993].

- Aufgrund der Kompressibilität der eingesetzten Medien und deren Viskosität gibt es zwischen einem Signal zur Ansteuerung der Dosiereinheit und deren Reaktion gewisse trägheitsbedingte Verzögerungen [BRANDENBURG 1996, SCHULLER 1998].

Daher ist im Rahmen dieser Arbeit die Aufgabenstellung, trotz der oben genannten Punkte, die einen gleichmäßigen Raupenauftrag behindern, ein möglichst gleichmäßiges Klebstoffauftragsbild zu erreichen. Im Hinblick auf eine möglichst hohe Qualität der aufgetragenen Dichtraupe erweist sich die Annahme, dass bei Auswahl eines geeigneten Handhabungsgerätes und einer geeigneten Dosiereinheit zwischen der Auftragsgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes und der geförderten Medienmenge eine Proportionalität besteht, als unzulässig.

### 2.3.1 Anforderungen an die Steuerung des Handhabungsgerätes

Schuller [SCHULLER 1998] misst bei der automatisierten Applikation hochviskoser Medien dem Handhabungsgerät eine hohe Bedeutung zu. Ausgehend von den Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Form- und Lagegenauigkeit der Dichtraupe können für die **Steuerung des Handhabungsgerätes** folgende Mindestanforderungen abgeleitet werden [SCHULLER 1998]:

- Dynamische Maximalwerte wie beispielsweise Bahngeschwindigkeit beziehungsweise -beschleunigung, Orientierungsgeschwindigkeit etc. müssen innerhalb des Bearbeitungsprogrammes vorgeben werden können.
- Die Steuerung muss über die Möglichkeit einer Linear- und Zirkular- beziehungsweise Spline-Interpolation verfügen.
- Im Rahmen der geforderten Interpolation zwischen mehreren Punkten muss die Steuerung des Handhabungsgerätes in der Lage sein, Punkte zu „überschleifen“.

- Die Steuerung muss zur Ansteuerung von Peripheriegeräten bahn- und zeitspezifizierte Schaltfunktionen sowohl synchron als auch zeitversetzt, orts- und zeitabhängig sowie proportional zur Geschwindigkeit ausgeben können.
- Von Sensoren eingehende Messsignale müssen von der Steuerung verwertet werden können.
- Eine Positionsausgabe muss in Echtzeit sowohl zeit- als auch ortssynchron möglich sein.

Neben diesen Anforderungen an die Funktionalität der Steuerung treten Anforderungen an das **kinematische Verhalten des Handhabungsgerätes** wie beispielsweise

- eine möglichst hohe Bahngenaugkeit,
- Schwingungsfreiheit und
- ein möglichst dynamisches aber dennoch gleichmäßiges Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten.

Dabei scheinen moderne Handhabungsgeräte und deren Steuerungen die oben genannten Anforderungen großteils zu erfüllen. Allerdings müssen aufgrund physikalischer Randbedingungen Einschränkungen hinsichtlich des kinematischen Verhaltens des Handhabungsgerätes hingenommen werden. Neben der Qualität der eingesetzten Getriebe und Antriebe kommt hierbei dem Interpolationstakt<sup>3</sup> eine hohe Bedeutung zu. Dieser beträgt bei modernen Steuerungen in der Regel zwischen 10 und 20 Millisekunden. Bei einem Interpolationstakt von 10 Millisekunden bedeutet dies für die Bahngenaugkeit, dass bei Verfahrensgeschwindigkeiten zwischen  $0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bis  $0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , wie sie abhängig von der Viskosität des eingesetzten Mediums und der Geometrie der Auftragsbahn üblich sind, Bahnabweichungen von 0,1 bis 3 Millimetern auftreten können. Diese Bahnabweichungen sind neben Ungenauigkeiten der Getriebe und An-

---

<sup>3</sup> Der Interpolationstakt ist der zeitliche Abstand, innerhalb dessen ein Abgleich der aktuellen Ist-Position des Handhabungsgerätes mit der vorgegebenen Soll-Position erfolgt.

triebe Hauptursache für das dynamische Schwingungsverhalten des Handhabungsgerätes, und beeinflussen die Qualität der aufgetragenen Dichtraupen in negativer Weise. Zusätzlich ist die Frequenz des Interpolationstaktes ein Maß für die zeitliche Verzögerung innerhalb derer Daten von externen Sensorsignalen oder Betriebszuständen des Handhabungsgerätes erfasst und an die Steuerung der Dosiereinheit weitergegeben werden können. Eine zeitliche Verzögerung zwischen veränderten Betriebszuständen des Handhabungsgerätes und der Ansteuerung der Dosiereinheit kann sowohl zu Abweichungen der Form als auch der Lage der aufzutragenden Dichtraupen führen.

### **2.3.2 Anforderungen an Dosiereinrichtungen zum Auftrag hochviskoser Medien**

Neben der Länge des Interpolationstaktes können Elastizitäten der Antriebe, die Kompressibilität des Mediums und die Trägheit der Ventile zu einem zusätzlichen Phasenversatz zwischen dem zeitlichen Verlauf der wirklichen Geschwindigkeit der Dosierspitze und dem geschwindigkeitsproportional dosierten Volumenstrom führen (vgl. Abbildung 2-14).

Dabei können die letztgenannten Verzögerungen durch den Einsatz geeigneter Dosiereinrichtungen verringert werden, so dass der auf den Auftragsprozess verbleibende Einfluss vernachlässigbar bleibt [BRANDENBURG 1996, SCHULLER 1998]. Werden zur Dosierung Exzenterschneckenpumpen eingesetzt erfolgt die Mediendosierung derart, dass der Sollwert beziehungsweise die Sollfunktion direkt an die Dosierpumpe übergeben wird. Durch die kontinuierliche, pulsationsfreie Förderung bleibt der geförderte Volumenstrom auch bei Veränderungen der Druckverhältnisse konstant.

## 2.3 Applikation von Dichtungen

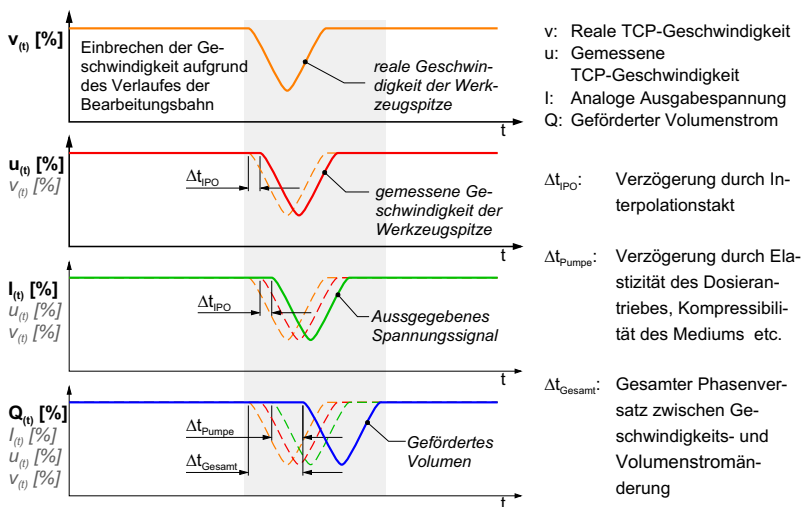


Abbildung 2-14: Schematische Darstellung der Entstehung des Phasenversatzes zwischen Änderungen der Geschwindigkeit und des geförderten Volumenstroms (angelehnt an SCHULLER 1998)

Durch diese sogenannte Pumpendosierung ergeben sich folgende Vorteile:

- Bei der Ventildosierung, bei der die Durchflussmenge über den Öffnungsgrad des Auslassventils gesteuert wird, haben die Kompressibilitäten der beteiligten Medien einen hohen Einfluss. Mit der Kompressibilität ist bei Druckänderungen in aller Regel Dissipation verbunden. Dadurch kommt es zu Differenzen zwischen der Sollvorgabe des Förder- bzw. Dosierdruckes und dem tatsächlichen Druckniveau. Prozessregelmaßnahmen zur Kompensation dieses Verhaltens sind in der Regel mit Totzeiten des zugehörigen Regelkreises behaftet, und führen zur Zunahme des zeitlichen Versatzes zwischen realer Auftragsgeschwindigkeit und dosiertem Volumenstrom [Brandenburg 1996].



- Bei der Pumpendosierung kann das Auslassventil als einfaches Auf/Zu-Ventil ausgeführt sein, wobei es zu Prozessbeginn vollständig geöffnet und am Prozessende vollständig geschlossen wird. Durch den Öffnungs- und Schließvorgang verursachte Totzeiten des Ventils haben daher während eines kontinuierlichen Auftragsprozesses keinen Einfluss auf den Phasenversatz zwischen realer Auftragsgeschwindigkeit und dosiertem Medienstrom [Brandenburg 1996].
- Die Steifigkeit der eingesetzten Antriebe ist bei Exzentrerschneckenpumpen in der Regel hoch. Die verbleibende Elastizität ist demzufolge gering und wirkt sich nur beim Anfahren der Pumpe aus dem Stillstand aus. Die zur Anpassung an variable Bahngeschwindigkeiten notwendigen, vom Pumpenantrieb aufzubringenden Beschleunigungs- beziehungsweise Verzögerungsrampen während eines kontinuierlichen Auftragsprozesses sind in der Regel so klein, dass die Elastizität des Antriebes während des Prozesses keinen Einfluss auf das Auftragsergebnis hat [SCHULLER 1998].

Trotz der Möglichkeit präventiver Qualitätssicherungsmaßnahmen kommt beim Auftrag hochviskoser Dichtstoffe der unmittelbaren Prozesskontrolle und -steuerung eine entscheidende Rolle zu.

### **2.3.3 Sensorische Qualitätssicherung während des Auftragsprozesses**

Durch Erfassung verschiedener Prozessgrößen wird versucht, Rückschlüsse auf den Anlagenzustand oder das Prozessergebnis zu bekommen, um im Rahmen von Prozessregelkreisen eine gleichbleibende, hohe Qualität zu erreichen. Bei der Erfassung der Parameter wird zwischen passiver und aktiver sensorischer Überwachung unterschieden.

- Passive Sensorik lässt dabei lediglich eine quantitative Aussage über die Prozeßstabilität und Produktqualität zu. Prozessfehler können somit entdeckt, geeignete Nachbearbeitungs-

strategien eingeleitet beziehungsweise Ausschussteile aus dem Produktionsprozess ausgeschleust werden [Reinhart u.a. 1996].

- Aktive Sensorik verfügt über die zusätzliche Möglichkeit, durch geeignete Regelstrategien in den Prozess einzugreifen. Dadurch kann die Prozessqualität innerhalb eines tolerierbaren Bereiches gehalten werden [REINHART U.A. 1996, SCHULLER 1998].

Im Rahmen einer Qualitätssicherung muss nach Wern [WERN 1993] auf den Dosierstrom als „alleiniges Produktmerkmal“ zurückgegriffen werden.

Nach Schuller [SCHULLER 1998] bieten sich bei der Applikation viskoser Medien vier physikalische Größen zur Prozessüberwachung an:

- Druck (z.B.: Materialdruck, Steuerdruck, Prüfdruck),
- Mediendurchfluss (z.B.: Massenstrom, Volumenstrom),
- Förderleistung der Dosiereinheit (z.B.: Überwachung der Dosierbewegungen, Drehzahl, Hub, Ventilöffnung),
- geometrische Abmessungen der Raupe (z.B.: Breiten-/Höhenverhältnis der Raupe, Lage der Raupe am Flansch, Abstand der Auslassvorrichtung zum Flansch).

Zur Überwachung dieser einzelnen, für das Auftragsergebnis entscheidenden Einflussgrößen können jeweils unterschiedliche sensorische Messprinzipien eingesetzt werden (vgl. Tabelle 2-4). „Aus wirtschaftlichen und technologischen Erwägungen ist es nicht sinnvoll, sämtliche prozessrelevanten Parameter zu überwachen. Vielmehr müssen anhand der gegebenen Abhängigkeiten einige wenige Einflussgrößen erfasst und mit Hilfe geeigneter Prozeduren Aussagen zur Ergebnisqualität abgeleitet werden“ [SCHULLER 1998, S. 69].

		Dosierung						Förderung	
		Prozess			Produkt			Volumenstrom	Leitungs- verschlüsse
		Einschlüsse	Volumenstrom	Luftblasen	Anwesenheit	Rauperform	Rauperlage		
mechanisch	Druck (In-Process)	0	0	0	+	-	-	0	+
	Ultraschall (In-Process)	0	0	0	-	-	-	0	0
	Drehzahl (In-Process)	+	0	0	+	-	-	+	+
	Dehnungsmessstreifen (In-Process)	0	0	0	0	-	-	0	0
thermisch	Kalorimetrisch (In-Process)	0	0	0	0	-	-	0	0
	Thermoluminiszenz (Post-Process)	-	-	-	+	0	+	-	-
elektrisch	Kapazität (In-Process)	0	1	1	-	-	-	0	-
	spezifischer Widerstand (In-Process)	-	0	0	-	-	-	-	-
magnetisch	Induktivität (In-Process)	-	0	0	-	-	-	0	0
optisch	Reflexlicht- / Fluoreszenztaster (Post-Process)	-	-	-	+	-	0	-	-
	Höhensensor (Post-Process)	-	-	-	+	0	0	-	-
	Kontrastleser (Post-Process)	-	-	-	+	-	0	-	-
	Farbesensor (Post-Process)	-	-	-	+	-	0	-	-
	Industrielle Bildverarbeitung: Zeilenkamera (Post-Process)	-	-	-	+	0	0	-	-
	Industrielle Bildverarbeitung: CCD-Kamera (Post-Process)	-	-	-	+	+	+	-	-

-: nicht geeignet  
 0: bedingt geeignet  
 +: gut geeignet

Tabelle 2-4: Beispiele aktiver Sensorik zur Prozessüberwachung und Regelung beim Auftrag hochviskoser Medien

Der Einsatz aktiver Sensorik beschränkt sich bei Schuller auf eine reine Zustandsüberwachung der Handhabungs-, Förder- und Dosiereinheit. Sensorik, die eine Aussage über Form- und Lage der aufgetragenen

Dichtraupe zulässt wird lediglich passiv eingesetzt. Die Gründe hierfür sind, dass an die von Schuller verwendete Steuerung des Handhabungsgerätes nur eine stark eingeschränkte datentechnische Ankopplung komplexer Bildverarbeitungssensorik möglich war. Eine Anbindung einfacher Sensoren wie beispielsweise Reflextaster liefern hingegen nicht genügend Informationen für eine wirkungsvolle Prozessregelung.

Es ist technisch möglich, an modernen Steuerungen industrielle Bildverarbeitung und die damit verbundene optische Kontrolle nach erfolgtem Auftragsprozess anzubinden. Allerdings weisen Kontrollen nach erfolgtem Prozess basierend auf der zeitlichen Abfolge der Einzelschritte Auftrag, kontrollierende Datenerfassung und Auswertung folgende Schwachpunkte auf [GARNICH & LITZEL 1999, BRABENDER 1999, KRÜGER 1999]:

- Eine Erfassung und Auswertung der Qualität der aufgetragenen Dichtraupe kann erst nach ihrer Applikation am Bauteil erfolgen. Da sich eventuelle Dosierfehler schon auf dem Bauteil befinden, können sie während des Auftragsprozesses nicht vermieden werden.
- Daher erfolgt die Prozessregelung quasistatisch. Eine notwendige Verbesserung eines noch ordnungsgemäßen Prozessergebnisses durch eine Anpassung der Dosier- und Verfahrensparameter kann lediglich zwischen zwei Auftragsvorgängen durchgeführt werden.
- Bauteile, bei denen ein nicht ordnungsgemäßes Prozessergebnis festgestellt wird, können durch den Einsatz geeigneter Arbeitsschritte nachgebessert werden. Dieses Vorgehen ist aber nach gängigen Qualitätsnormen unzulässig, da durch erneute Dosiervorgänge auf bereits vorhandene Raupenabschnitte sogenannte Anfahr- und Endkleckse sowie Nahtstellen zwischen den einzelnen Raupenfragmenten entstehen. Dadurch können die Genauigkeitsanforderungen, die an CIP-Dichtungen gestellt werden, nicht eingehalten werden.

- Eine echtzeitfähige Prozessregelung während des Auftragsprozesses kann durch eine nachträgliche Kontrolle einer am Bauteil befindlichen Raupe nicht erreicht werden.

Zur Prozesskontrolle beim Auftragen hochviskoser Medien weist die optische Prozesskontrolle somit erhebliche Schwachstellen auf.

Im Rahmen einer möglichst effizienten Qualitätssicherung muss sich die Prozessüberwachung und -regelung auf die Erfassung des Volumenstroms konzentrieren. Dabei ist eine Überwachung des Dosierstromes im Rahmen einer Prozessregelung mit heutigen Messeinrichtungen nur bis zu Viskositäten von 14.500 bis 25.000 Millipascalsekunden möglich [WERN 1993, DILGER ET AL. 2000]. Brandenburg [BRANDENBURG 1996] nennt als Einsatzgrenzen für Zahnradzähler 100.000 Millipascalsekunden, bei Schraubenvolumetern 500.000 Millipascalsekunden, weist jedoch auf die Problematik hin, dass bei steigenden Viskositäten die Druckverluste innerhalb der Messzelle stark zunehmen und die Genauigkeit der Messergebnisse abnimmt [LOCTITE 1999].

Eine kontinuierliche Durchflussüberwachung und -regelung bei hochviskosen (Viskosität  $\geq 1.000.000$  Millipascalsekunden) Dichtmedien ist daher mit heutigen Mitteln nicht durchführbar. Insofern kann eine kontinuierliche On-line-Prozesskontrolle und -regelung während des Auftrages hochviskoser Medien durch Einbindung sensorischer Parametererfassung nicht sinnvoll realisiert werden.

### 2.4 Schwachstellenanalyse

Zusammenfassend ist bei der Gestaltung automatisierter Auftragsprozesse hochviskoser Dichtstoffe zu beachten:

- Standardisierte Richtlinien zur konstruktiven Gestaltung von flüssig aufgetragenen, trockenverbauten Dichtungen sind nicht vorhanden [SCHULLER 1998, BOSCH 1999].

- Ebenso wenig gibt es Richtlinien zur Auswahl des für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Dichtmediums. Die Auswahl des jeweiligen Dichtmittels muss mit Herstellern erarbeitet werden [BOSCH 1999, WACHINGER 1999].
- Das notwendige Wissen zur Auswahl geeigneter Anlagenbestandteile wie beispielsweise Förder-, Dosier- und Handhabungskomponenten zum Auftrag hochviskoser Dichtmittel ist zwar größtenteils vorhanden, wird aber von Anlagenherstellern und Anwendern wenig genutzt [SCHULLER 1998].
- Die Wechselwirkungen der einzelnen prozessbeeinflussenden Größen sind zum Teil nicht bekannt [BRANDENBURG 1996, SCHULLER 1998].
- In jedem einzelnen Anwendungsfall muss eine Abstimmung der Verfahrbewegung des Handhabungssystems mit den Dosierparametern durch Versuche erfolgen [HARTMANN 1999, WÖLFLE 1999].
- Eine wirksame Prozessüberwachung und –regelung durch den Einsatz von Sensoren kann bei hochviskosen Medien nicht erfolgen [WERN 1993, SCHULLER 1998, GARNICH & LITZEL 1999, BRABENDER 1999].

Aufgrund dieser Feststellungen ist eine übergreifende Qualitätssicherung und Qualitätsüberwachung bei der Applikation hochviskoser Medien nur unter starken Einschränkungen möglich [KRÜGER 1999]. Dosierfehler bleiben oft unbemerkt (vgl. Abbildung 2-9). Hierdurch kann die Qualität der aufgetragenen Raupe beziehungsweise die Qualität des späteren Endproduktes unbrauchbar werden.

### 3 Dosierfehler als Ursache von Qualitätsproblemen

Mit Hilfe sensorischer Qualitätssicherungsmaßnahmen kann wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, keine wirkungsvolle Qualitätsverbesserung des Applikationsergebnisses erreicht werden. Da sensorische Maßnahmen nicht zum Aufbau von Prozessregelkreisen herangezogen werden können, müssen Ursachen vorhandener Qualitätsprobleme ermittelt werden, um diese anschließend zu beseitigen oder deren Auswirkungen zu verringern oder ganz zu vermeiden.

#### 3.1 Ursachen von Qualitätsproblemen bei CIP-Dichtungen

Undichtigkeiten können im wesentlichen drei Hauptursachen zugeordnet werden.

Eine **falsche Lage** der Dichtung relativ zu den Flanschbauteilen führt zu einer unzureichenden Flächenpressung und in der Folge zu Undichtigkeiten (vgl. Abbildung 3-1). Ursachen einer falschen Lage können einerseits durch eine ungenaue Programmierung der Bewegungsbahn des Handhabungsgerätes hervorgerufen werden. Andererseits kann bei hochviskosen Medien durch eine ungenügende Abstimmung der Dosierparameter mit den Verfahrensparametern zu einer fehlerhaften Lage der Raupe am Bauteil führen. Wird beispielsweise an einer Bahnkurve von der Dosiereinheit zu wenig Dichtmedium gefördert, wird die Dichtraupe in Richtung der Bearbeitungsbahn entlanggezogen und „schneidet“ die vorgesehene Auftragsbahn. Bei einer Überdosierung weicht die Raupe nach unregelmäßigen Mustern von der vorgesehenen Auftragsbahn ab.

### 3.1 Ursachen von Qualitätsproblemen bei CIP-Dichtung

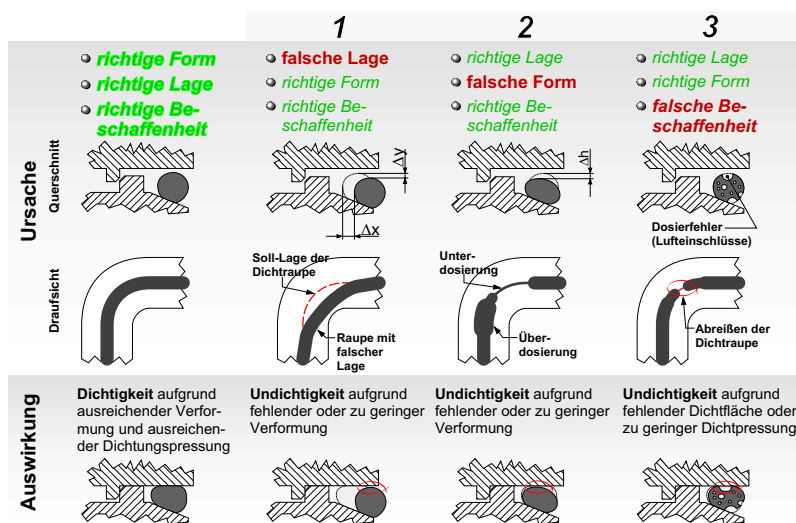


Abbildung 3-1: Mögliche Leckageursachen durch falsche Form, falsche Lage oder falsche Beschaffenheit der Dichtung

Eine **falsche Form** der Dichtung, vor allem beim Unterschreiten einer geforderten Mindesthöhe, führt dazu, dass sie bei der Montage nicht genügend verpresst werden kann. Zu geringe Flächenpressungen führen wiederum zu Undichtigkeiten (vgl. Abbildung 3-1). Form- und Lagefehler sind im Regelfall gut zu erkennen. Form- und Lagefehler werden entweder durch zufällige Ereignisse wie durch größere Luft einschüsse im dosierten Medium hervorgerufen, oder sie resultieren aus einer ungenügenden Abstimmung zwischen der Bearbeitungsgeschwindigkeit des Auftragsgerätes und dem geförderten Volumenstrom der Dosiereinrichtung.

Die zu beobachtende Häufung von Form- und Lagefehlern an stark gekrümmten oder geknickten Bauteilabschnitten lässt auf systematische Fehlerursachen schließen. Insbesondere da beide Dosierfehler auf eine unzureichende Abstimmung zwischen der Geschwindigkeit des Handhabungsgerätes und der Förderleistung der Dosiereinrichtung zurückgeführt werden können.



Eine **falsche Beschaffenheit** der Dichtraupe kann durch ungewollte Lufteinschlüsse während des Auftragsprozesses entstehen. Je nach Größe von Lufteinschlüssen und ihrer Lage innerhalb der Dichtraupe kann es zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften oder zu einer perforierten Oberflächenstruktur der ausgehärteten Dichtschnur kommen (vgl. Abbildung 3-1). Eine poröse Oberflächenstruktur stellt eine Formabweichung der Dichtraupe dar.

Das Auftreten ungewollter Lufteinschlüsse innerhalb der Dichtraupe kann folgende Ursachen haben:

- Anaerob (unter Luftabschluss) vernetzende Medien müssen vor ihrer Verarbeitung mit Luft beaufschlagt sein, um deren ungewolltes Vernetzen zu verhindern. Vor der Dosierung auf die Flanschbauteile werden anaerobe Medien durch spezielle Entgasungseinrichtungen von der Luftbeladung befreit. Es können vor allem bei hohen Durchflussraten Gasblasen im Medium verbleiben.
- Aufgrund strömungsmechanischer Ursachen kann bei unzureichender Abdichtung Luft in den Dichtmittelstrom geraten. Daher muss auf eine sorgsame Abdichtung der Förder- und Dosiereinheit sowie der dazwischen liegenden Zuführleitungen geachtet werden.

Bei einer visuellen Überprüfung der Dichtraupe nach ihrem Auftrag können Lufteinschlüsse im Inneren nicht erkannt werden, führen aber mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Versagen der Dichtung. Sie stellen deshalb ein höheres Risiko dar als Form- und Lagefehler.

## 3.2 Einflüsse auf die Qualität von Dichtungen

Von Schuller [SCHULLER 1998] wurde eine umfassende Darstellung möglicher Einflussparameter des Applikationsprozesses und deren Wechselwirkungen untereinander erstellt (vgl. Tabelle 3-1).

## 3.2 Einflüsse auf die Qualität von Dichtungen

		Beeinflussende Faktoren		Beeinflusste Faktoren	
Auftragsprozess	Dosierrung	Förderung	Fügepartner	Medium	Vernetzungscharakteristik des Mediums
					Viskosität des Mediums (der Medien)
					Physikalische Eigenschaften des Mediums
					.....
					Gestaltung des Flanschquerschnittes
					Werkstoffe der Fügepartner
					Gestaltung der Bahnkontur
					.....
					Förderleistung des Fördermittels
					Druck(-verlauf) im Förderbereich
					Geometrie der Zuführleitungen
					Druck im Bereich der Dosierzuführung
					Geometrie der Auftragsdüse
					Aufgebrachter Volumenstrom
					Kinematik / Steuerung des Auftragsgerätes
					Formgenauigkeit der Raupe
					Formstabilität der aufgetragenen Raupe
					Lagegenauigkeit der Raupe
					.....
					kritische Beeinflussung durch andere Faktoren
					starke Beeinflussung durch andere Faktoren
					geringe Beeinflussung durch andere Faktoren
					.....
					Anzahl der Faktoren mit kritischer Beeinflussung
					Anzahl der Faktoren mit starker Beeinflussung
					Anzahl der Faktoren mit geringer Beeinflussung
					Kritische Beeinflussung: 3
					Hohe Beeinflussung: 2
					Geringe Beeinflussung: 1
					Keine Beeinflussung: 0

Tabelle 3-1: Einflussparameter und deren Wechselwirkungen beim Auftrag hochviskoser Medien (angelehnt an SCHULLER 1998)

In Anlehnung an die Aufstellung von Schuller [SCHULLER 1998] werden mögliche Einflussfaktoren, welche die Qualität der herzustellenden Dichtverbindung beeinflussen können, und ihre gegenseitige Wechselwirkungen innerhalb Tabelle 3-1 bewertet.

Für eine effiziente Qualitätssicherung ist es sinnvoll, aus den unterschiedlichen Einflussfaktoren diejenigen auszuwählen, die einen starken, wenn auch nicht genau zu quantifizierenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Güte der späteren Dichtung haben.

Die in den hervorgehobenen Spalten von Tabelle 3-1 angegebenen Einflussfaktoren können dabei als Kriterien zur Beurteilung der Qualität der Dichtverbindung herangezogen werden. Merkmal der markierten Spalten ist, dass sie einen Einfluss auf die Funktion der späteren Verbindung haben und somit ein Abweichen dieser Einflussgrößen von vorgegebenen Sollwerten zwangsläufig mit Qualitätseinbußen der Dichtverbindung verbunden ist, wie im folgenden kurz dargestellt wird.

- Gestaltung des Flanschquerschnittes: Bestimmt mit welcher Bearbeitungsbahn die Raupe aufgetragen werden muss, ob eine selbsthelfende oder selbstschadende Konstruktion vorliegt und beinhaltet zusätzlich die Auslegung der Verbindung.
- Werkstoffe der Fügepartner: Bestimmt die Haftfähigkeit und Lagestabilität der unvernetzten aufgetragenen Dichtraupe auf einem Flanschbauteil.
- Formgenauigkeit der Raupe: Ist das Verhältnis von Raupenhöhe zu Raupenbreite unmittelbar nach dem Auftrag des Dichtmediums. Die Formgenauigkeit bestimmt die im Rahmen der Montage stattfindende Verformung der Raupe.
- Formstabilität der aufgetragenen Raupe: Stellt die verbleibende Formgenauigkeit der Raupe nach der Vernetzungszeit dar. Durch eine ungewollte Verringerung der Raupenhöhe kann bei der späteren Montage die erforderliche Flächenpressung zwischen Flansch und Dichtung nicht mehr erreicht werden (vgl. Abbildung 3-1).
- Lagegenauigkeit der Raupe: Stellt die relative Lage der aufgetragenen Dichtraupe zum Bauteil dar. Bei unzulässigen Abweichungen der Raupe auf dem Flanschquerschnitt kann eine ausreichende Verpressung nicht gewährleistet werden (vgl. Abbildung 3-1).

Damit stellt bei den genannten Einflussgrößen eine Abweichung von deren jeweiligem Sollwert eine Beeinträchtigung der Funktion der späteren Dichtung und somit der Qualität der Dichtverbindung dar.

### 3.2 Einflüsse auf die Qualität von Dichtungen

Einflussgröße	Detektierbarkeit	Häufigkeit	Beeinflussbar	Einfluss auf Dichtungsqualität
Vernetzungscharakteristik des Mediums	Nein	Mittel	Nein	4
Viskosität des Mediums (der Medien)	Bedingt	Mittel	Nein	8
Physikalische Eigenschaften des Mediums	Bedingt	Gering	Nein	4
<b>Gestaltung des Flanschquerschnittes</b>	Ja	Mittel	Ja	5
Werkstoffe der Fügepartner	Ja	Gering	Ja	3
<b>Bahnkontur der Dichtung</b>	Ja	Gering	Ja	5
Druck(-verlauf) im Förderbereich	Ja	Mittel	Ja	3
Druck im Bereich der Dosierzuführung	Bedingt	Hoch	Nein	5
Geometrie der Auftragsdüse	Ja	Mittel	Ja	4
Aufgebrachter Volumenstrom	Ja	Hoch	Ja	2
<b>Kinematik / Steuerung des Auftragsgerätes</b>	Ja	Hoch	Ja	7
Formgenauigkeit der Raupe	Bedingt	Hoch	Nein	1
Formstabilität der aufgetragenen Raupe	Ja	Hoch	Nein	2

Tabelle 3-2: Detektierbarkeit, Häufigkeit und Höhe der Qualitätsbeeinflussung der Einflussgrößen nach Tabelle 3-1; 8: Hohe Beeinflussung; 1: Geringe Beeinflussung

Zwischen diesen Beurteilungskriterien, die eine Aussage über die Qualität der Verbindung zulassen, und weiteren, für den Auftragsprozess wichtigen Einflussparametern kommt es während des Auftrags zu Wechselwirkungen. Beispielsweise geht bei nicht-newton'schen Fluiden eine Erhöhung des Volumenstroms mit einer gleichzeitigen Veränderung der Medienviskosität einher.

Aufbauend auf Tabelle 3-1 zeigt Tabelle 3-2 zusammenfassend, wie stark die Einflussgrößen auf die Qualität der Dichtverbindung einwirken und ob sie beeinflussbar sind. Der Grad der Einwirkung auf die Qualität der

Dichtverbindung wurde dabei durch Aufsummieren der jeweiligen Einzelbewertungsziffern aus Tabelle 3-1 bewertet, und im Hinblick auf deren Detektierbarkeit und Häufigkeit qualitativ ergänzt.

Die wesentlichen, qualitätsrelevanten Einflussparameter auf die eingewirkt werden kann, sind:

- Gestaltung des Flanschquerschnittes:  
Im Prozessvorfeld kann durch eine dichtungsgerechte Konstruktion des Flanschquerschnittes, zum Beispiel durch eine selbsthelfende Dichtungsanordnung die Qualität der späteren Verbindung verbessert werden.
- Konstruktive Gestaltung der Bahnkontur:  
Bei Bahnverläufen, die ein möglichst geringes Maß an Bahnkrümmung aufweisen, wird der steuerungsseitige Anpassungsaufwand zwischen den Verfahrensparametern des Handhabungssystems und den Dosierparametern gering gehalten.
- Kinematik und Steuerung des Handhabungsgerätes:  
Kinematik und Steuerung des Handhabungsgerätes haben während des Applikationsvorgangs einen wesentlichen Einfluss auf das Auftragsergebnis. Neben der Bahnplanung übernimmt die Steuerung die Festlegung der Verfahrensgeschwindigkeit. Zusätzlich stimmt die Steuerung die Verfahrensgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes mit der Durchflusssteuerung der Dosiereinheit ab.

Aufgrund der Häufung von Form- und Lagefehlern an stark gekrümmten oder geknickten Bauteilabschnitten (vgl. Abbildung 2-10) muss die Ursache systematischer Fehldosierungen steuerungstechnischer Herkunft sein, wie im weiteren noch gezeigt werden wird.

Dabei soll festgestellt werden,

- was die steuerungstechnischen Ursachen systematischer Dosierfehler sind,
- von welchen Einflussgrößen diese Dosierfehler abhängen

### 3.3 Ursachen der systematischen Fehldosierung

---

- durch welche Maßnahmen deren Auswirkungen verringert werden können.

### 3.3 Ursachen der systematischen Fehldosierung

Um beim automatisierten Auftragsprozess (vgl. Abbildung 3-2) eine Dicht-raupe mit gleichbleibendem Durchmesser auf das Bauteil entlang der Bearbeitungsbahn auftragen zu können, muss ein geschwindigkeitsproportionaler Dichtmittelauftrag erreicht werden.

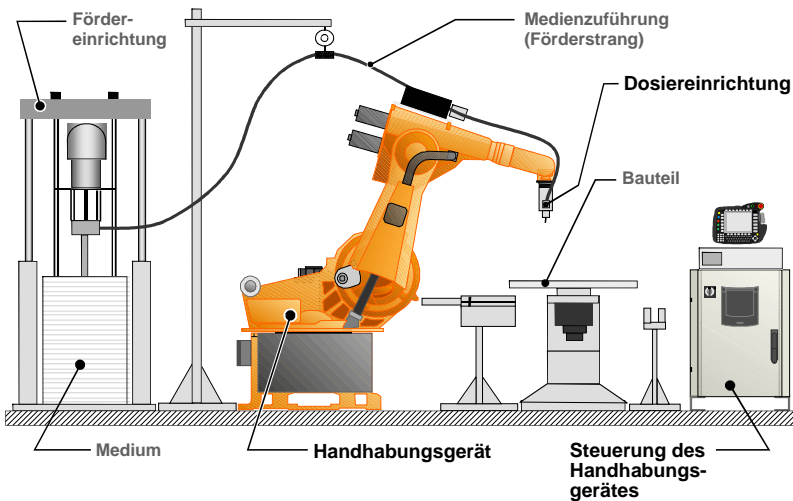


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Komponenten beim automatisierten Medienauftrag

Die Dosierdüse wird dabei in aller Regel orthogonal zur Bauteiloberfläche geführt. Zur Abstimmung der Dosieranlage mit dem Handhabungsgerät wird in der Regel als Eingangsgröße zur Ansteuerung der Dosiereinheit die aktuelle Geschwindigkeit der Werkzeugspitze nach Multiplikation mit einem Skalierungsfaktor verwendet (vgl. Gleichung 3-1).

Gleichung 3-1:  $V_{(t)} \approx n_{(t)} \approx U_{(t) \text{ Analog}} = P \cdot v_{(t) \text{ Aktuell}}$

Mit

$t$ : Betrachtungszeitpunkt [s]

$V_{(t)}$ : Geförderter Volumenstrom der Dosiereinheit zum Zeitpunkt  $t$  [ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ]

$n_{(t)}$ : Drehzahl der Exzentrerschneckenpumpe [ $\frac{1}{\text{s}}$ ]

$U_{(t) \text{ Analog}}$ : Analoge Spannung zur Drehzahlsteuerung der Dosierpumpe [V]

$P$ : Proportionalitätskonstante zwischen Geschwindigkeit der Dosiernadelspitze und Volumenstrom

$v_{(t) \text{ Aktuell}}$ : Aktuelle Ist-Geschwindigkeit der Dosiernadel über der Bauteiloberfläche [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

Dadurch kann theoretisch eine streckenkonstante Dosierung erreicht werden. Das Ergebnis des Raupenauftrags bei Verwendung hochviskoser Stoffe ist aufgrund systematischer Fehldosierungen jedoch oft unbefriedigend. Die wesentlichen Ursachen hierfür werden im Folgenden erläutert.

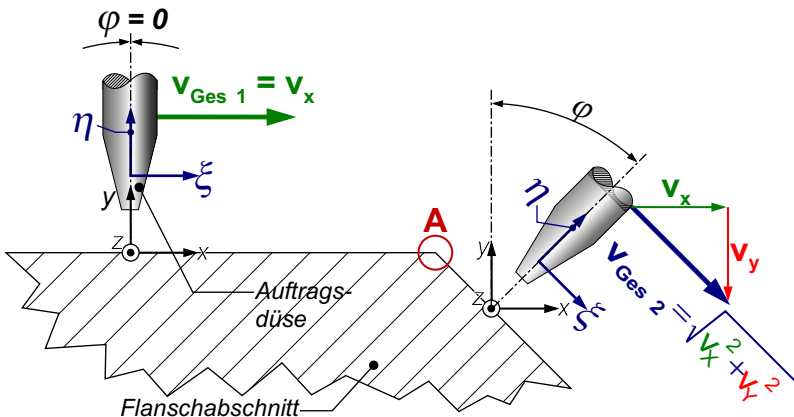


Abbildung 3-3: Darstellung der Geschwindigkeitskomponenten und des Umorientierungswinkels bei nicht ebenem Flanschverlauf

### 3.3 Ursachen der systematischen Fehldosierung

---

Bei geknickten oder stark gekrümmten Bahnen kann eine konstante Bearbeitungsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Einhaltung der vorgegebenen Sollbahn nicht verwirklicht werden, da eine Veränderung in der Bearbeitungsrichtung eintritt (Abbildung 3-3). Sowohl die Richtung des Geschwindigkeitsvektors als auch die Orientierung der Auftragsdüse muss dem Bahnverlauf angepasst werden (Abbildung 3-3).

Für die Umorientierung der Auftragsdüse muss eine Winkelbeschleunigung nach Gleichung 3-2, für die Richtungsänderung des Geschwindigkeitsvektors eine Bahnbeschleunigung erzeugt werden. Die Bahnbeschleunigung kann in eine Komponente tangential zur Bearbeitungsbahn (Gleichung 3-3a) und normal zur Bearbeitungsbahn (Gleichung 3-3b) zerlegt werden.

Gleichung 3-2:  $\omega = \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$

Gleichung 3-3a:  $a_t = \frac{\partial v}{\partial t}$

Gleichung 3-3b:  $a_n = \frac{v^2}{R}$

Mit

t: Zeit [s]

$a_t$ : Tangentialbeschleunigung (parallel zur Bahnrichtung) [ $\frac{m}{s^2}$ ]

$a_n$ : Normalbeschleunigung (senkrecht zur Tangentialbeschleunigung) [ $\frac{m}{s^2}$ ]

v: Bahngeschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]

R: Krümmungsradius der Bahnkurve [m]

$\varphi$ : Relativer Winkel des Bearbeitungswerkzeuges gegenüber einem feststehendem Koordinatensystem

$\omega$ : Winkel- / Umorientierungsgeschwindigkeit [ $\frac{1}{s}$ ]

Für starke Krümmungen, Knicke der Bearbeitungsbahn (kleiner Krümmungsradius) oder hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten bedeutet dies nach Gleichung 3-3b, dass für eine Richtungsänderung hohe Normalbeschleunigungen notwendig sind. Die in Abbildung 3-3, Punkt A notwendige Umorientierung des Werkzeuges soll bei vorgegebener, gleichblei-



bender Geschwindigkeit vollzogen werden. Gemäß Gleichung 3-2 können Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung beliebig hohe Werte annehmen, die von den Antrieben des Handhabungsgerätes nicht mehr erzeugt werden können.

Bei gleichbleibender Geschwindigkeit ist ein unzulässiges Abweichen von der Sollbahn unvermeidlich. Um die Sollbahn einhalten zu können, muss die Bahngeschwindigkeit herabgesetzt, und die Dosierleistung angepasst werden. Je höher die dabei vorgegebene Sollgeschwindigkeit, desto größer ist der notwendigerweise auftretende Geschwindigkeitsrückgang. Basierend auf den vorangegangenen Überlegungen wird der Geschwindigkeitseinbruch durch folgende Effekte verursacht:

- **Rotatorischer Effekt:** Durch die notwendige Rotation beziehungsweise Umorientierung des Werkzeuges verursachte Verzögerung in der translatorischen Bewegung des Handhabungssystems
- **Translatorischer Effekt:** Durch den notwendigen Richtungswechsel des Geschwindigkeitsvektors, der parallel zur vorgegebenen Auftragsbahn sein muss, entstehende Verzögerung in der translatorischen Bewegung des Handhabungsgerätes

Die Erfassung der Geschwindigkeit und die Anpassung der Dosierleistung wird von der Steuerung des Handhabungsgerätes durchgeführt. Dabei ergibt sich zwischen dem Zeitpunkt der Geschwindigkeitserfassung und der Anpassung der zugeordneten Analogspannung zur Steuerung der Dosierleistung eine Zeitverzögerung in der Größenordnung von ca. 100 Millisekunden – 140 Millisekunden. Diese Verzögerung führt in der Folge zu systematischen Dosierfehlern (vgl. Abbildung 3-4).

### 3.3 Ursachen der systematischen Fehldosierung

---

Bei einer Verringerung der Bahngeschwindigkeit kommt es zu einer Überdosierung, da zur Berechnung der Ausgangsspannung und zur Ansteuerung der Dosiereinheit ein vorangegangener, höherer Geschwindigkeitswert herangezogen wird. Entgegengesetzt dazu ergeben sich bei einer anschließenden Beschleunigung auf die vorgegebene Sollgeschwindigkeit in der Folge Unterdosierungen. Bei hochviskosen Medien führt eine Unterdosierung in der Regel zum Abreißen der Dichtraupe oder zu einer Lageabweichung und ist daher wesentlich kritischer im Hinblick auf die Ergebnisqualität als eine Überdosierung.

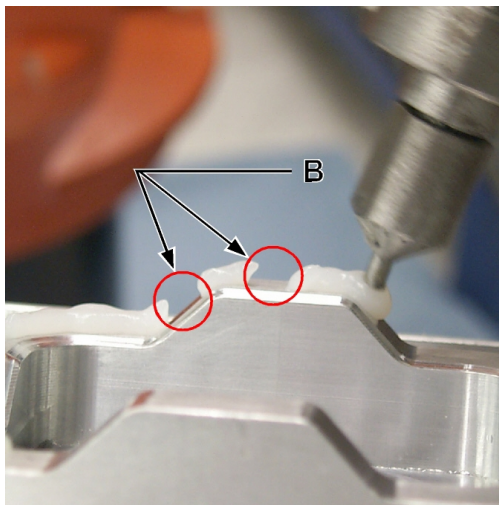


Abbildung 3-4: Fehldosierung während des Auftrags; B: Raupenabriss nach gekrümmtem Konturelement (Unterdosierung)

#### 3.3.1 Einflussgrößen systematischer Fehldosierungen

Als maßgebliche Einflussfaktoren auf systematische Fehldosierungen können folgende Parameter identifiziert werden:

- **Geometrie der Auftragsbahn:** Die Geometrie der Auftragsbahn legt die notwendige Größe der jeweiligen Umorientierungswinkel und -geschwindigkeiten während der Applikation fest. Je weniger Bahnrichtungs- und Orientierungsänderungen zum Abfahren der Auftragsbahn notwendig sind, umso weniger Verzögerungs- und Beschleunigungsphasen ist das

Handhabungsgerät unterworfen und um so geringer sind die systematischen Fehldosierungen.

- **Vorgegebene Sollgeschwindigkeit:** Abhängig von der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit und der Höhe der notwendigen Bahnrichtungs- und Orientierungsänderung muss das Handhabungsgerät gemäß der vorgegebenen Leistungsfähigkeit seiner Getriebe und Antriebe verzögert werden. Je geringer die vorgegebene Sollgeschwindigkeit ist, umso geringer sind die notwendigen Verzögerungen und Beschleunigungen, die damit verbundenen Geschwindigkeitsänderungen und die daraus resultierenden Dosierfehler.
- **Interpolationsgeschwindigkeit der Robotersteuerung:** Je höher die Interpolationsgeschwindigkeit der Robotersteuerung ist, umso geringer ist der zeitliche Versatz zwischen der Erfassung der Bahngeschwindigkeit und der berechneten Spannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit und umso geringer sind die als Folge des zeitlichen Versatzes entstehenden Dosierfehler. Die Interpolationsgeschwindigkeit der Robotersteuerung kann normalerweise nicht beeinflusst werden.

Im Rahmen einer vollfaktoriellen Versuchsplanung [REINHART U.A. 1996] müssen deshalb Untersuchungen durchgeführt werden, mit deren Hilfe das Ausmaß der Fehldosierung in Abhängigkeit von den oben beschriebenen Einflussgrößen ermittelt werden kann.

Als zu beeinflussende Parameter stehen zunächst die Geometrie der Auftragsbahn, sowie die Auftragsgeschwindigkeit zur Verfügung.

#### 3.3.2 Berechnung der systematischen Fehldosierung

Neben der Erfassung der tatsächlichen Bahngeschwindigkeit und der Höhe der zugeordneten Spannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit muss die systematische Fehldosierung während eines Applikationsvorgangs ermittelt werden, um Aussagen über

### 3.3 Ursachen der systematischen Fehldosierung

---

- die Art,
- den Zeitpunkt beziehungsweise Zeitraum
- und die Höhe

des jeweiligen Dosierfehlers treffen zu können.

Entsprechende Versuche müssen bei unterschiedlichen Auftragsgeschwindigkeiten und Bauteilgeometrien durchgeführt werden, um geeignete Applikationsstrategien zu entwickeln, welche die Höhe der Fehldosierung und die daraus resultierenden Dosierfehler verringern.

Nach Brandenburg [BRANDENBURG 1996] ergibt sich der pro Zeiteinheit aufgetragene Volumenstrom nach Gleichung 3-4 zu:

$$\text{Gleichung 3-4: } Q_i = \frac{V_i}{t_i} = \frac{m_i \cdot v_{\text{Linear}}}{\rho_i \cdot l_i}$$

Mit

$Q_i$ : von der Dosiereinheit pro Zeiteinheit geförderter Volumenstrom [ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ]

$V_i$ : aufgetragenes Volumen [ $\text{m}^3$ ]

$t_i$ : betrachtetes Zeitinkrement [s]

$m_i$ : Aufgetragene Masse des Dichtmediums [kg]

$v_{\text{Linear}}$ : Durchflussgeschwindigkeit des Mediums [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

$\rho_i$ : Dichte des aufgetragenen Mediums [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]

$l_i$ : Betrachtetes Streckeninkrement der Bearbeitungsbahn [m]

Um ein gleichmäßiges Auftragsbild zu erhalten muss dabei die Durchflussgeschwindigkeit des Mediums zu jedem Zeitpunkt der Dosierung der relativen Bearbeitungsgeschwindigkeit der Dosierspitze über dem Bauteil entsprechen. Daher kann für die Sollmenge des geförderten Volumenstroms in Anlehnung an Gleichung 3-4 nach Gleichung 3-5 berechnet werden:

Gleichung 3-5:  $Q_{i; \text{Soll}} = A_{\text{Düse}} \cdot v_{\text{Düse}}$

Mit

$Q_{i; \text{Soll}}$ : von der Dosiereinheit pro Zeiteinheit zu fördernder Volumenstrom [ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ]

$A_{\text{Düse}}$ : Querschnittsfläche der Dosierdüsenöffnung [ $\text{m}^2$ ]

$v_{\text{Düse}}$ : Geschwindigkeit der Dosierdüse über dem Bauteil [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

Differenzen zwischen der Durchflussgeschwindigkeit des Mediums und der Bearbeitungsgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes führen daher zu Volumenstromabweichungen, sogenannten „**Dosierfehlern**“ (vgl. BRANDENBURG 1996, SCHULLER 1998). Es ist ersichtlich, dass die für einen automatisierten Auftrag notwendige, regelungstechnische Kopplung zwischen der Steuerung des Handhabungsgerätes und der Ansteuerung des Dosiermechanismus in Gleichung 3-4 nicht berücksichtigt wird. Daher besitzt Gleichung 3-4 nur dann Gültigkeit, wenn jegliche Tot- und/oder Ansprechzeiten zwischen der Geschwindigkeitserfassung des Handhabungsgerätes und der geförderten Menge der Dosiereinheit vernachlässigbar sind. Bei einem automatisierten, kontinuierlichen Raupenauftrag muss zwischen dem dosierten Volumenstrom und der Auftragsgeschwindigkeit des Handhabungssystems eine Korrelation gemäß Gleichung 3-1 bestehen, um ein gleichmäßiges Auftragsbild zu erhalten. Aufgrund der geschilderten Geschwindigkeitsabweichungen des Handhabungsgerätes und der verzögerten Ansteuerung der Dosiereinheit ist diese notwendige Korrelation nicht gegeben. Für die Berechnung der in Folge dieses Sachverhaltes auftretenden Dosierfehler werden die notwendigen mathematischen Grundlagen zur Berechnung von Fehldosierungen hergeleitet.

Um bereits während des Medienauftrags Aussagen über die Art und Höhe der systematischen Fehldosierung machen zu können, muss die translatorische Auftragsgeschwindigkeit in ein Verhältnis zur Dosierleistung oder einer ihr proportionalen Größe gesetzt werden. So besteht zwischen der zur Ansteuerung der Dosiereinheit verwendeten elektrischen Spannung und der Drehzahl beziehungsweise der Förderleistung einer Exzentrerschneckenpumpe Proportionalität (vgl. Gleichung 3-1).

### 3.3 Ursachen der systematischen Fehldosierung

---

Geht man idealisierter Weise von einer konstanten Bahngeschwindigkeit des Handhabungsgerätes und von einer „starren“ Fördercharakteristik der Dosiereinheit aus, kann gemäß Gleichung 3-1 aus der ermittelten Geschwindigkeit die resultierende elektrische Spannung beziehungsweise die dazu proportionale Drehzahl der Exzentrerschneckenpumpe berechnet werden. Durch Vergleich der tatsächlichen Werte der Geschwindigkeit des Handhabungsgerätes und der tatsächlich ausgegebenen Analogspannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit mit den vorgegebenen Sollwerten, erhält man dimensionslose Größen. Mit Hilfe der dimensionslosen Geschwindigkeit  $\bar{v}_{\text{Ist}}$  und Drehzahl  $\bar{n}_{\text{Ist}}$  kann nach Gleichung 3-7 die relative Abweichung des geförderten Volumenstroms von dessen Vorgabewert errechnet werden.

Gleichung 3-6a:  $\bar{v}_{\text{Ist}} = \frac{v_{\text{Ist}}}{v_{\text{Soll}}}$

Gleichung 3-6b:  $\bar{n}_{\text{Ist}} \approx \bar{U}_{\text{Ist}} = \frac{U_{\text{Ist}}}{U_{\text{Soll}}}$

Gleichung 3-7:  $\Delta Q_{\text{Rel}} = \frac{n_{\text{Ist}} - n_{\text{Soll}}}{n_{\text{Soll}}} = \frac{U_{\text{Ist}} - U_{\text{Soll}}}{U_{\text{Soll}}} = \frac{\bar{U}_{\text{Ist}} - P \cdot \bar{v}_{\text{Ist}}}{P \cdot \bar{v}_{\text{Ist}}}$

Mit

$\bar{v}_{\text{Ist}}$ : Dimensionslose Ist-Geschwindigkeit [%]

$\bar{n}_{\text{Ist}}$ : Dimensionslose Ist-Drehzahl der Exzentrerschneckenpumpe [%]

$\bar{U}_{\text{Ist}}$ : Dimensionslose Analogspannung zum Ansteuern der Exzentrerschneckenpumpe [%]

$v_{\text{Ist}} / v_{\text{Soll}}$ : Ist- / Sollgeschwindigkeit der Auftragsdüse [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

$n_{\text{Ist}} / n_{\text{Soll}}$ : Ist- / Solldrehzahl der Exzentrerschneckenpumpe [ $\frac{1}{\text{s}}$ ]

$U_{\text{Ist}} / U_{\text{Soll}}$ : Ist- / Sollspannung zum Ansteuern der Exzentrerschneckenpumpe [V]

$\Delta Q_{\text{Rel}}$ : Relative Volumenstromabweichung [%]

P: Proportionalitätskonstante zwischen Geschwindigkeit und Volumenstrom (vgl. Gleichung 3-1)

Durch eine kontinuierliche Erfassung der Geschwindigkeitswerte und der Analogspannung während des Applikationsvorganges und eine dimensi-

onslose Darstellung mit Hilfe der Gleichungen 3-6a bis 3-7 können Aussagen über die Beeinflussung des Dosiervorganges durch das steuerungstechnische Verhalten des Handhabungsgerätes getroffen werden.

Die sich aus Gleichung 3-7 ergebende Volumenstromabweichung kann für Aussagen hinsichtlich der Qualität der aufgetragenen Dichtraupe nicht direkt herangezogen werden. Dies liegt an Folgendem:

- Nach Gleichung 3-7 bezieht sich der zugeordnete Dosierfehler auf einen Volumenstrom und ist nur zu einem bestimmten Zeitpunkt gültig.
- Die Qualität der dosierten Dichtraupe ist abhängig vom dosierten Volumen und erfordert damit eine Integration der Fehldosierung über einen gewissen Zeitraum. Aufgrund der Kompressibilität der eingesetzten Medien können Über- und Underdosierung, die zu einem einzelnen Zeitpunkt stattfinden durch die vorhergegangene und nachfolgende Dosierung zum Teil kompensiert werden.

Daher muss für ein Abreißen der Dichtraupe

- ein gewisser Mindestwert der Fehldosierung auftreten („**kritische Underdosierung**“) und
- diese Fehldosierung muss für eine gewisse Zeitspanne aufrecht erhalten werden („**kritischer Zeitwert**“).

Das kritische Mindestmaß für die Höhe und Dauer der Fehldosierung ist von der Kompressibilität, der Viskosität, der Temperatur und zum Teil von der Oberflächenspannung der eingesetzten Medien abhängig.

Um die tatsächlich am Bauteil stattfindende Fehldosierung zu erhalten, muss das Integral mehrerer, zeitlich aufeinanderfolgender Dosierfehler betrachtet werden. Der mittlere Dosierfehler ergibt sich durch Division des Integrals durch die Länge des betrachteten Zeitraumes (Gleichung 3-8).

### 3.3 Ursachen der systematischen Fehldosierung

---

Gleichung 3-8: 
$$\overline{\Delta Q_{\text{Rel}}} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_t^{t+\Delta t} \frac{\overline{U}_{\text{Ist}} - P \cdot \overline{v}_{\text{Ist}}}{P \cdot \overline{v}_{\text{Ist}}} \cdot dt$$

Mit

$\overline{\Delta Q_{\text{Rel}}}$ : Relative Volumenstromabweichung [%]

$\Delta t$ : betrachteter Zeitraum [s],

$\overline{U}_{\text{Ist}}$ : Dimensionslose Analogspannung zum Ansteuern der  
Exzentrerschneckenpumpe [%]

$\overline{v}_{\text{Ist}}$ : Dimensionslose Ist-Geschwindigkeit [%]

$\overline{v}_{\text{Soll}}$ : Dimensionslose Soll-Geschwindigkeit [%]

P: Proportionalitätskonstante zwischen Geschwindigkeit und  
Volumenstrom

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen und eingesetzten Medien (vgl. Kapitel 1.1), konnte ein Abreißen der Dichtraupe beobachtet werden, wenn

- die relative Unterdosierung mehr als 10 % betrug und gleichzeitig
- die Dauer der Unterdosierung größer als 0,2 s war (vgl. auch Kapitel 5.1.3, Abbildung 5-11).

Diese Werte können jedoch mit dem jeweiligen Fließverhalten des eingesetzten Mediums variieren. Ein allgemeingültiger formaler Zusammenhang zwischen dem rheologischen Verhalten der jeweils eingesetzten Medien und den für eine Fehldosierung kritischen Werten wäre erstrebenswert. Im Rahmen dieser Arbeit sollen jedoch Möglichkeiten erarbeitet werden, die Ursachen systematischer Fehldosierungen zu identifizieren und deren Auswirkungen zu verringern.

Durch die Bildung eines Mittelwertes mehrerer, zeitlich aufeinanderfolgender Messwerte kann in Anlehnung an Gleichung 3-8 der integralen Betrachtung dieses Sachverhaltes genüge getan werden. Bei den im Rahmen dieser Versuche eingesetzten Medien wurde zur Berechnung



und Darstellung der Fehldosierung der Mittelwert fünf aufeinanderfolgender Werte des Volumenstroms herangezogen (Gleichung 3-9).

$$\text{Gleichung 3-9: } \overline{Q}_{(t_n)_{\text{rel}}} = \frac{1}{t_{n+2} - t_{n-2}} \cdot \sum_{t=t_{n-2}}^{t_{n+2}} \frac{\overline{U}_{\text{Ist}} - P \cdot \overline{V}_{\text{Ist}}}{P \cdot \overline{V}_{\text{Ist}}}$$

Mit

$\overline{Q}_{(t_n)_{\text{rel}}}$  : Relative Volumenstromabweichung zum Zeitpunkt  $t_n$  [%]

$t_n$  : Betrachteter Zeitpunkt  $t_n$  [s]

$t_{n\pm 1/2}$  : dem Zeitpunkt  $t_n$  vor- bzw. nachgelagerte Interpolationszeitpunkte [s]

$\overline{U}_{\text{Ist}}$  : Dimensionslose Analogspannung zum Ansteuern der Exzenter-schneckenpumpe [%]

$\overline{V}_{\text{Ist}}$  : Dimensionslose Ist-Geschwindigkeit [%]

$\overline{V}_{\text{Soll}}$  : Dimensionslose Soll-Geschwindigkeit [%]

P: Proportionalitätskonstante zwischen Geschwindigkeit und Volumenstrom

Durch Bildung des Mittelwertes jeweils fünf aufeinanderfolgender Volumenstromwerte kann bei einem Interpolationstakt der Steuerung des Handhabungsgerätes von 14 bis 16 Millisekunden ein Zeitinkrement von etwa 0,1 Sekunden betrachtet werden. Dies entspricht in etwa der Hälfte des „**kritischen Zeitwertes**“, der im Falle einer „**kritischen Unterdosierung**“ zu einem Abriss der Dichtraupe führt.

## 3.4 Zusammenfassung und Konsequenzen für die Versuchsmethodik

Ziel dieser Arbeit ist, Möglichkeiten zu erschließen um die Qualität automatisiert aufgetragener Dichtraupen zu verbessern und durch die verbesserte Prozesskontrolle Produktivitätssteigerungen zu erreichen. Daher wurden basierend auf den Anforderungen, die an hochviskose Dichtungen gestellt werden, auftretende Fehler charakterisiert und deren Ur-

sprung beschrieben. Zusätzlich wurden aus der Menge der bekannten Parameter, die einen Einfluss auf das Prozessergebnis beim automatisierten Dichtstoffauftrag haben, fünf Merkmale identifiziert, die eine Aussage über die Qualität der aufgetragenen Dichtraupe zulassen:

- Gestaltung des Flanschquerschnittes
- Werkstoffe der Fügepartner
- Formgenauigkeit der Raupe
- Formstabilität der aufgetragenen Raupe
- Lagegenauigkeit der Raupe

In einem weiteren Schritt konnten im Hinblick auf den Auftragsprozess drei Einflussgrößen charakterisiert werden, welche die oben genannten Qualitätsmerkmale stark beeinflussen. Diese Einflussgrößen sind

- die Geometrie der Auftragsbahn,
- die vorgegebene Sollgeschwindigkeit und
- die Interpolationsgeschwindigkeit der Robotersteuerung.

Durch Vergleich real auftretender Dosierfehler, deren möglichen Ursachen und den oben genannten Faktoren können als eine Hauptursache von Dosierfehlern sogenannte systematische Dosierfehler identifiziert werden. Nach der Klärung der Ursachen und Bestimmung der Einflussgrößen systematischer Dosierfehler wurden Grundlagen zu deren Berechnung hergeleitet.

Das in Abbildung 3-5 dargestellte Vorgehensmodell verdeutlicht den Zusammenhang und ist ein mögliches, im weiteren angewandtes Vorgehen bei der Bestimmung systematischer Dosierfehler.

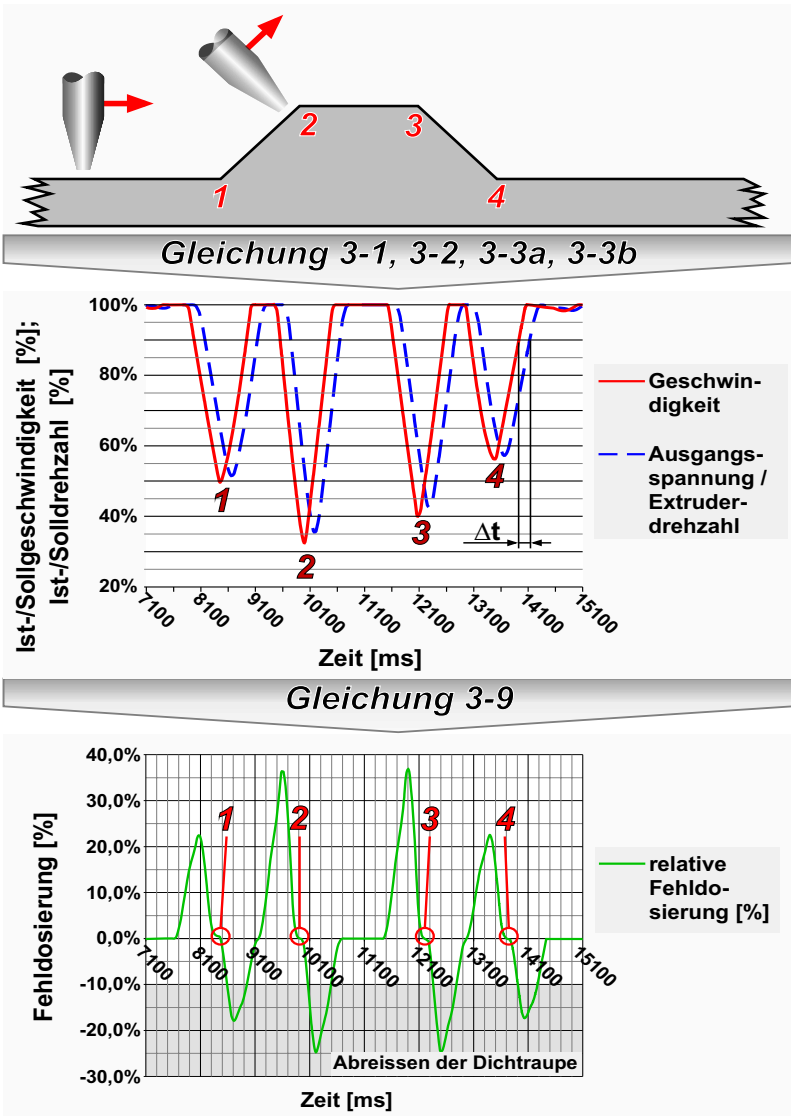


Abbildung 3-5: Zusammenhang zwischen Bauteilgeometrie, Geschwindigkeitseinbruch, IPO-Takt und Berechnung der Fehldosierung

### 3.4 Zusammenfassung und Konsequenzen für die Versuchsmethodik

---

Im Rahmen dieser Vorgehensweise muss während des Applikationsvorgangs eine kontinuierliche Erfassung

- der Auftragsgeschwindigkeit und
- des zugehörigen analogen Spannungssignals zur Ansteuerung der Dosiereinheit

erfolgen.

Basierend auf den ermittelten Daten können die Auswirkungen des zeitlichen Versatzes zwischen der Erfassung der Bahngeschwindigkeit und Ansteuerung der zugeordneten Dosiereinheit auf die Höhe der systematischen Fehldosierung berechnet und anhand geeigneter Auftragsversuche verifiziert werden. Außerdem muss innerhalb dieser Auftragsversuche der Grad der Einflussnahme

- der vorgegebenen Auftragsgeschwindigkeit und
- der Geometrie der Auftragsbahn

auf die Höhe der auftretenden systematischen Fehldosierung bestimmt werden. Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen sollen Methoden entwickelt werden, welche die Ursachen der systematischen Dosierfehler verringern oder deren Auswirkungen begrenzen.

### 4 Versuchsplanung

Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit werden die Auswirkungen der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Einflussgrößen

- Geometrie der Auftragsbahn
- vorgegebene Sollgeschwindigkeit und
- Interpolationsgeschwindigkeit der Robotersteuerung

auf die Ausprägung systematischer Dosierfehler untersucht. Aufgrund ihres systematischen Charakters sind derartige Fehldosierungen unvermeidbar und können die Qualität des Applikationsergebnisses von Dichtmaterialien negativ beeinflussen.

Daher muss das Ziel einer Versuchsplanung sein

- die Art der Einflussgrößen auf das Auftragsergebnis festzustellen und
- die Höhe der Einflussnahme der bekannten Einflussparameter zu bestimmen
- durch die Wahl einer geeigneten Variation der Parameter deren jeweilige Grenzen zu finden, innerhalb der ein robuster Auftragsprozess gewährleistet ist.

Im weiteren sollen Möglichkeiten erarbeitet werden, mit deren Einsatz es möglich ist, bestehende Prozessgrenzen zu erweitern.

Bei vorgegebener Viskosität konnten als Einflussparameter auf die Qualität der dosierten Dichtung

- die Auftragsgeschwindigkeit,
- die Geometrie der Bauteile und
- die Interpolationsgeschwindigkeit der Steuerung des Handhabungsgerätes

## 4 Versuchsplanung

---

identifiziert werden (vgl. Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2). Die Interpolationsgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes kann dabei nicht variiert beziehungsweise beeinflusst werden.

Um in einem ersten Schritt Art und Höhe der Beeinflussung der genannten Parameter zu bestimmen, wurden anhand geplanter Versuchsreihen [REINHART U.A. 1996] Dosierversuche mit zwei unterschiedlichen Bauteilgeometrien und drei unterschiedlichen Auftragsgeschwindigkeiten durchgeführt (vgl. Tabelle 4-1).

Geschwindigkeit			Geometrie	
$v=0,01 \text{ m/s}$	$v=0,02 \text{ m/s}$	$v=0,05 \text{ m/s}$	rund	eckig
X	–	–	X	–
–	X	–	X	–
–	–	X	X	–
X	–	–	–	X
–	X	–	–	X
–	–	X	–	X

Tabelle 4-1: Versuchsplanung zur Ermittlung des Einflusses von Geschwindigkeit und Bauteilgeometrie

Die für Dosierversuche notwendige Applikationsumgebung wurde dabei zur Validierung der hergeleiteten Berechnungsgrundlagen für systematische Fehldosierungen benötigt. Des weiteren wurden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Strategien zur Verbesserung der Dosiergenauigkeit innerhalb der realen Auftragsanlage getestet.

Daher werden im Folgenden

- die eingesetzten Medien,
- die Bauteile, auf welche die Medien aufgetragen werden
- das eingesetzte Handhabungssystem und
- die Simulationsumgebung

eingehender beschrieben.

### 4.1 Eingesetzte Medien

Für die Ausprägung systematischer Dosierfehler ist das rheologische Verhalten der aufzutragenden Medien von entscheidender Bedeutung (vgl. Kapitel 2.2.3 und 3.3). So kann eine Erhöhung der Geschwindigkeit des Handhabungsgerätes bei gleichbleibender Medienförderung bei hochviskosen Medien zu einem Abreißen der Dichtraupe führen. Bei Medien geringer Viskosität kann eine Unterdosierung zum Teil durch die Fließeigenschaften ausgeglichen werden.

Daher sind die Anforderungen an die Dosiergenauigkeit bei hochviskosen Medien größer als bei Medien geringerer Viskosität.

#### 4.1.1 Hochviskose Dichtmedien

Im Rahmen dieser Arbeit werden Dosierfehler, insbesondere Unterdosierungen betrachtet, da diese einen qualitätskritischeren Einfluss auf das Auftragsergebnis haben. Vor allem bei hochviskosen Dichtmedien, die aufgrund ihrer eingangs genannten Vorteile in der industriellen Anwendung häufig eingesetzt werden, kommt es bei Unterdosierungen häufig zu einem unerwünschten Abreißen der Dichtraupe. Bei Medien geringerer Viskosität ( $\leq 200 \text{ Ns/m}^2$ ) können Unterdosierungen zum Teil durch das Fließverhalten der jeweiligen Stoffe ausgeglichen werden, bei hochviskosen Stoffen ( $> 500 \text{ Ns/m}^2$ ) führt eine Unterdosierung zu einem klar erkennbaren Abriss oder Lagefehler der Dichtraupe. Dabei wird in der industriellen Praxis das Materialverhalten viskoser Substanzen nach ASTM durch sogenannte Extrusionsraten (Menge des dosierten Mediums pro Zeiteinheit in  $\text{g/min}$ ) beschrieben. Dieses Maß für die Viskosität ist für die Beschreibung der Medieneigenschaften ausreichend, da die Messung der Extrusionsraten zusätzlich Implizite Informationen über das rheologische Stoffverhalten enthält.

Ein Vertreter hochviskoser Dichtstoffe sind beispielsweise hochviskose, raumtemperaturvernetzende, einkomponentige Silikone (RTV-1 Silikone)

die deshalb im Rahmen der Dosiersversuche eingesetzt werden (Tabelle 4-2).

Bezeichnung	Viskosität <sup>4</sup> (nach ASTM)
Loctite 5900	20 – 80 [ $\frac{g}{min}$ ]
Loctite 5083	130 – 160 [ $\frac{g}{min}$ ]

Tabelle 4-2: Eingesetzte Silikone und deren Extrusionsraten (nach ASTM)

Für die Auftragsversuche wurden auch geeignete Ersatzsubstanzen mit entsprechenden Viskositäten eingesetzt.

### 4.1.2 Ersatzsubstanz

Im Rahmen von Auftragsversuchen kann anstelle von Silikonen auch eine Ersatzsubstanz verwendet werden. Neben der Skalierbarkeit der Viskosität weist die Ersatzsubstanz weitere Vorteile auf:

- **Ökologische Unbedenklichkeit:** Aufgrund ihres Aufbaus – aus Stärke und Wasser – ist die Ersatzsubstanz sowohl ökologisch als auch physiologisch unbedenklich. Eine Entsorgung „nicht ausgehärteter“ Reste kann daher über den normalen Restmüll erfolgen.
- **Wasserlöslichkeit im Reinigungsfall:** Beim Einsatz realer Dichtstoffe kommt es teilweise zur Verstopfung der Förder- oder Dosiereinrichtung. Nach einer Vernetzung realer Dichtmittel sind diese wasserunlöslich. Durch eine Vernetzung des Dichtmediums in der Statoreinheit der Exzentrerschneckenpumpe kann es zur Beschädigung des Stators kommen. Das wasserlösliche Ersatzmedium härtet nicht irreversibel aus und kann mit Hilfe warmen Wassers gelöst und entfernt werden.

---

<sup>4</sup> Laut Herstellerangaben



- Geringere Kosten:** Die Kosten für Dichtstoffe aus RTV-1 Silikon liegen in der Regel zwischen 5 €/l und 25 €/l. Da im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen eine Reihe von Auftragsversuchen durchgeführt werden muss, kann das Ersatzmedium mit Kosten von ca. 0,8 €/l als kostengünstige Alternative herangezogen werden.

Im Rahmen der durchgeführten Dosierversuche wurden Medien mit Extrusionsraten zwischen 25 g/min und 125 g/min hergestellt, um den Viskositätsbereich der für CIP-Dichtungen eingesetzten RTV-1 Silikone abzubilden. Die eingesetzte Ersatzsubstanz besteht aus einer Lösung von Stärke in Wasser. Durch ein nachfolgendes Aufkochen dieser Lösung kann diese eingedickt werden. Je nach Anteil der gelösten Stärke kann die Viskosität dieser Substanz in einem weiten, den Viskositätsbereich der eingesetzten Silikone umfassenden Bereich, variiert werden (vgl. Tabelle 4-2 und Abbildung 4-1).

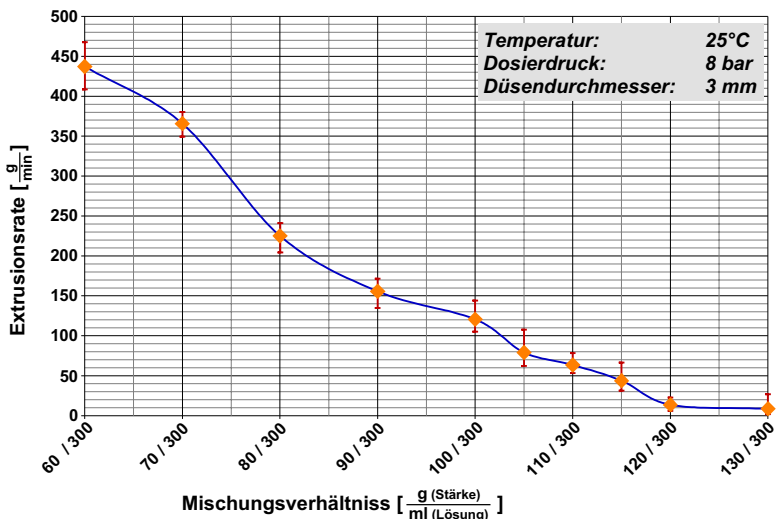


Abbildung 4-1: Extrusionsrate der Ersatzsubstanz (nach ASTM) in Abhängigkeit von der Stärkekonzentration

Die Schwankungen der Extrusionsraten ergeben sich aus zwei gegenläufigen Effekten, sind allerdings in der gleichen Größenordnung wie Viskositätsschwankungen bei realen Dichtstoffen. Bei der in Abbildung 4-1 dargestellten Abhängigkeit der Viskosität von der Stärkekonzentration kann es je nach Befeuchtungsgrad der Stärke zu Abweichungen von der dargestellten Kurve kommen.

Diese liegen einerseits in einer Befeuchtung des Stärkepulvers begründet, und können durch einen vorgelagerten Trocknungsschritt beseitigt werden. Der Feuchtigkeitsgehalt des Stärkepulvers kann dabei zu einem Abweichen der Konzentration der Lösung in den niederviskosen Bereich führen. Andererseits wird diese Viskositätserniedrigung durch die Menge des während des nachfolgenden Kochvorgangs verdampfenden Wassers, meist kompensiert.

## 4.2 Beschreibung der Versuchsbauteile

Beim automatisierten Auftrag hochviskoser Dichtmassen auf dreidimensionale Bauteile ist ein gleichmäßiges Auftragsbild nur mit verhältnismäßig hohem Aufwand erreichbar. Im Rahmen der dargestellten Untersuchungen wurden daher Bauteile hergestellt, welche die Anforderungen der industriellen Praxis im Hinblick auf die Prozessbeherrschung übertreffen. Durch die Betrachtung dieses „Worst-case“ kann eine möglichst sichere Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf die industrielle Praxis erfolgen.

Daher wurden aus Aluminium jeweils zwei Versuchsbauteile gemäß Abbildung 4-2 („eckiges Bauteil“) und Abbildung 4-3 („rundes Bauteil“) hergestellt. Die konstruktiven Merkmale der Bauteilstellen, an denen das Handhabungsgerät umorientieren muss, wurden aufgrund der verhältnismäßig geringen Auftragsgeschwindigkeit dabei bewusst so konzipiert, dass ein Geschwindigkeitseinbruch und das Auftreten von Dosierfehlern provoziert wird.

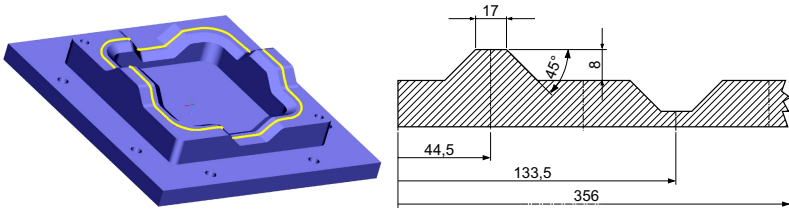


Abbildung 4-2: Darstellung des Testbauteiles mit trapezförmigen Konturelementen (mit angedeuteter Auftragsbahn) und der Abwicklung der Auftragsbahn; „**eckiges Bauteil**“

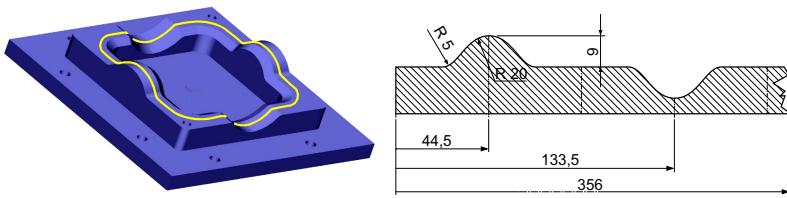


Abbildung 4-3: Darstellung des Testbauteiles mit runden Konturelementen (mit angedeuteter Auftragsbahn) und der Abwicklung der Auftragsbahn; „**rundes Bauteil**“

Durch die Gegenüberstellung runder und trapezförmiger Konturelemente kann der Einfluss der Bahngeometrie auf die Höhe von Geschwindigkeitsänderungen und der damit verbundenen Fehldosierungen ermittelt werden.

Aufgrund der geringen Bauteilgröße und dem begrenzten Beschleunigungsvermögen des Roboters kann ein bahngenauer Auftrag bis zu Auftragsgeschwindigkeiten von etwa  $0,05 \frac{m}{s}$  erreicht werden.

### 4.3 Eingesetztes Handhabungsgerät und Steuerung

Beim Auftrag hochviskoser Medien werden an das Handhabungssystem unter anderem folgende Anforderungen gestellt:

- Hohes Beschleunigungs- und Verzögerungsvermögen
- Ausreichender Arbeitsraum
- Ausreichende Beweglichkeit
- Hohe Wiederhol- und Bahngenauigkeit
- Möglichkeit zur Ansteuerung der Dosiereinheit
- Tragfähigkeit muss zur Aufnahme eines Werkzeugwechselsystems, der Dosiereinrichtung sowie eventuell zusätzlicher Einrichtungen zur Medienförderung ausreichen

Im Rahmen der Untersuchungen wurde als Handhabungsgerät ein Kuka KR 15/2-Industrieroboter mit einer KR-C1-Steuerung eingesetzt.

Seine maximale Last an der sechsten Achse beträgt 15 Kilogramm. Das ist für die Aufnahme eines Greiferwechselsystems, einer Exzentrerschneckenpumpe und der Dosiereinheit ausreichend. Der Roboter verfügt wegen seines geringen Eigengewichts über ein hohes Beschleunigungs- und Verzögerungsvermögen. Dies ist für den Auftrag hochviskoser Dichtmassen auf dreidimensionale Bauteile bedeutsam, da der Roboter in der Lage ist, enge Bahnradien bei relativ geringem Geschwindigkeitsrückgang abzufahren.

Aufgrund seiner geringen Größe und der Genauigkeit der Getriebe beträgt die Bahngenauigkeit des Handhabungsgerätes laut Hersteller etwa 0,1 Millimeter, das ist für den Auftrag hochviskoser Dichtmassen ausreichend.

Die Ansteuerung der Dosiereinheit wird durch analoge Ausgangskarten vorgenommen, die mit der Steuerung des Handhabungsgerätes datentechnisch verbunden sind. Neben der Abfrage der jeweiligen Robotergeräteschwindigkeit und entsprechender Ansteuerung der analogen Ausgangs-

karten verfügt die PC-basierte Steuerung des Roboters sowohl über die Möglichkeit schneller Point-to-Point-Bewegungen als auch der für die Bahnbearbeitung notwendigen Interpolationsmöglichkeit zum Abfahren linearer und zirkularer Bewegungssätze (vgl. Abbildung 4-4).

Neben der Möglichkeit Bahnbewegungen mit vorgegebenen Geschwindigkeiten abzufahren, können innerhalb der Steuerung sowohl orts- als auch zeitabhängige Bahnschaltfunktionen ausgeführt werden. Die Steuerung ist darüber hinaus mittels der Programmiersprache KRL frei programmierbar. Damit können Systemvariablen wie beispielsweise die Zykluszeit, die aktuelle Roboterposition und die Geschwindigkeit ausgelesen und im Rahmen von Unterprogrammen weiterverarbeitet werden.

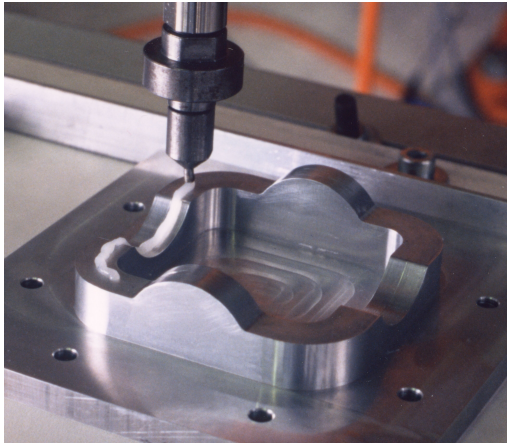


Abbildung 4-4: Auftragsprozess an der Auftragsanlage auf „rundem Bauteil“

### 4.4 Simulationsumgebung

Im Rahmen der Untersuchungen von systematischen Dosierfehlern kommt neben der realen Auftragsanlage zusätzlich eine kinematische Simulationsumgebung zum Einsatz. Die Gründe für den Einsatz der kinematischen Simulationsumgebung sind folgende:

- Die kinematische Simulationsumgebung soll zur Erstellung von Verfahrensprogrammen verwendet werden, da durch eine Off-line-Programmierung der komplexen Bahnbewegungen und eine anschließende Anpassung des Bewegungspro-

gramms an die reale Anlage exaktere, reproduzierbare Bewegungsabläufe des Handhabungsgerätes sowie eine höhere Bahngenauigkeit erreicht werden können.

- Durch Aufzeichnung der systematischen Fehldosierungen die sowohl von der Steuerung des realen Handhabungsgerätes als auch von der Steuerung innerhalb der Simulationsumgebung verursacht wird, soll ermittelt werden, inwieweit die an der realen Anlage erkennbaren Dosierfehler bereits innerhalb einer kinematischen Simulationsumgebung berechnet werden können.
- Unter der Voraussetzung, dass eine ausreichende Übereinstimmung zwischen realer Auftragsanlage und Simulationsumgebung besteht, soll letztere als Ausgangsplattform zur Entwicklung geeigneter Kompensationsstrategien verwendet werden. Innerhalb der Simulationsumgebung können Programme einfacher erstellt, Bewegungsabläufe ohne Kollisionsgefahr optimiert werden und anschließend an der realen Anlage angepasst werden.

Die im Rahmen der Untersuchungen eingesetzte Simulationsumgebung besteht aus einer vom Roboter abgetrennten KR-C1-Steuerung und der Software KR-SIM zur graphischen Visualisierung des oben genannten Kuka KR15/2-Industrieroboters, der Zellenperipherie, der in Abbildung 4-2 bzw. Abbildung 4-3 beschriebenen Bauteile sowie zur Vereinfachung der Offline-Programmierung der Bahnbewegungen.

## 4.5 Datenerfassung und Auswertung

Systematische Dosierfehler können auf Probleme in der Abstimmung zwischen der Förderleistung der Dosiereinheit und der Verfahrensgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes zurückgeführt werden. Grundsätzlich kann die Aufzeichnung der Geschwindigkeit des Handhabungsgerätes

und der Förderleistung der Dosierpumpe beziehungsweise einer ihr proportionalen Größe auf zwei Arten erfolgen:

- Auswertung der steuerungsinternen Geschwindigkeitswerte und der Höhe der ausgegebenen Spannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit

oder

- messtechnische Erfassung des Volumenstromes und der Verfahrgeschwindigkeit durch den Einsatz spezieller Sensorik

Bei der Auswertung steuerungsinterner 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 (vgl. Abbildung 4-5).

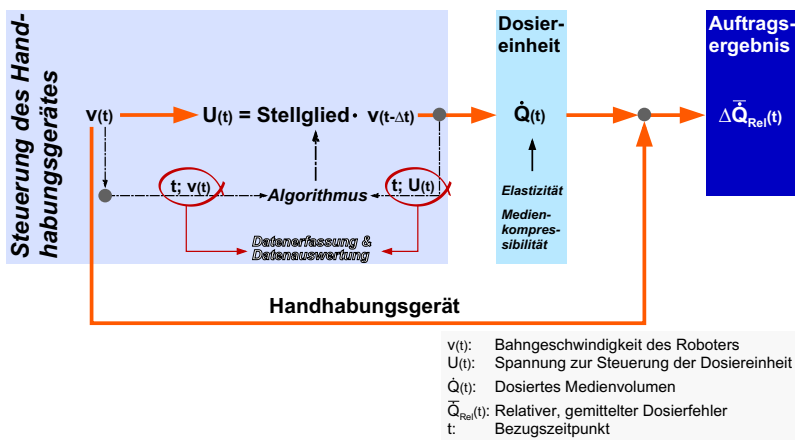


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung des Informationsflusses und Regelkreises bei steuerungsinterner Datenerfassung und Datenverarbeitung

Die Umrechnung roboterspezifischer Positionskoordinaten beziehungsweise Geschwindigkeitsinformationen in eine kartesische Koordinatenform wird dabei direkt von der Robotersteuerung durchgeführt. Eine Syn-

chronisation der erfassten Geschwindigkeits- und Spannungsdaten ist nicht notwendig, da beide Werte gleichzeitig aus der Robotersteuerung ausgelesen werden. Aus diesen Werten kann sowohl der dosierte Volumenstrom als auch der relative Dosierfehler bestimmt werden (vgl. Abbildung 4-5).

Im Vergleich zur Erfassung und Verarbeitung steuerungsinterner Informationen ist die Messung und Verarbeitung externer Sensordaten wesentlich aufwendiger. Geschwindigkeit und Dosierleistung müssen über spezielle Sensorik gemessen werden. So kann die Geschwindigkeit des Roboters beispielsweise über mindestens 6 Beschleunigungssensoren ermittelt werden. Anhand der Beschleunigungsdaten kann über komplexe Berechnungsalgorithmen, wie sie auch in der Robotersteuerung abgelegt sind, die kartesische Geschwindigkeit der Auftragsdüse berechnet werden (vgl. Abbildung 4-6).

Die Ermittlung und Berechnung der jeweiligen Geschwindigkeit mit Hilfe von Beschleunigungssensoren ist im Vergleich zur direkten Erfassung steuerungsinterner Daten nachteilig da:

- Zur Erfassung der Beschleunigungen sehr genaue, kostspielige Sensoren sowie zugehörige Elemente zur Datenerfassung notwendig sind.
- Zur Ermittlung der Geschwindigkeit aus den einzelnen Beschleunigungswerten der Sensoren komplexe Berechnungsalgorithmen nötig sind.
- Neben den Beschleunigungswerten der Sensoren zusätzlich die Geometriedaten des Handhabungsgerätes hinterlegt werden müssen.
- Aufgrund der Komplexität der Algorithmen eine echtzeitfähige Erfassung, Auswertung und Nutzbarmachung der Daten für die Robotersteuerung mit konventionellen Messmethoden nicht erreichbar ist.



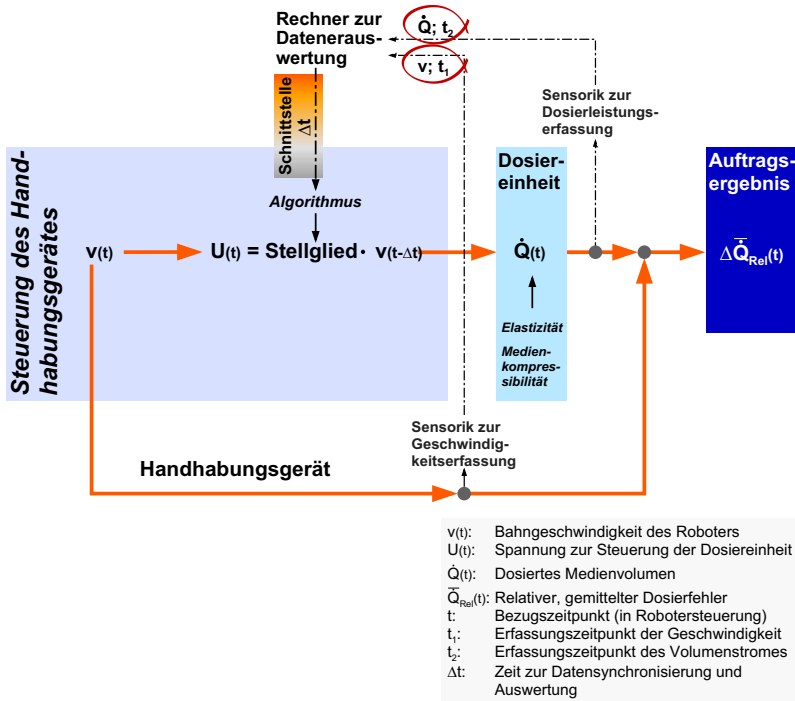


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des Informationsflusses und Regelkreises bei Datenerfassung durch Sensoren und Datenverarbeitung durch externen Rechner

Zur Erfassung der Dosierleistung liegt der Einsatz von Durchflussmessgeräten nahe. Da beim Einsatz hochviskoser Fluide die Messgenauigkeit relativ gering ist, ist auch die Aussagekraft über Auftreten und Ausprägung möglicher Dosierfehler gering. Die mit Hilfe von Beschleunigungs- und Durchflusssensoren erfassten Daten müssen anschließend für einen Bezugszeitpunkt synchronisiert, von einem zusätzlichen Rechner datentechnisch verarbeitet, und durch einen Regelkreis der Steuerung des Handhabungsgerätes zur Verfügung gestellt werden.

Der gesamte zusätzliche Aufwand für den Einsatz sensorischer Messtechnik wäre gerechtfertigt, wenn

- die Genauigkeit der erfassten Daten ausreichend gut wäre,
- ihre Verarbeitung und Nutzbarmachung innerhalb eines Regelkreises schneller erfolgen könnte als bei der Verarbeitung steuerungsinterner Informationen und
- eine dauerhafte Wirtschaftlichkeit trotz des höheren geräte-technischen und datentechnischen Aufwands erreicht werden kann.

Vor diesem Hintergrund ist die direkte Erfassung steuerungsinterner Informationen vorteilhafter. Die Erfassung der Verfahrensgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes und der Dosierleistung zur Ermittlung systematischer Dosierfehler wird über die Nutzung steuerungsinterner Signale durchgeführt.

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden daher innerhalb der Bewegungsprogrammierung die Abarbeitung zeitlich wiederkehrender Unterprogramme implementiert. Aufgabe dieser Unterprogramme ist es, während der laufenden Bahnbewegung in kurzen zeitlichen Abständen (zwischen 24 Millisekunden und 36 Millisekunden) die zur Berechnung der Fehldosierung notwendigen Werte wie

- die Prozesszeit,
- die aktuelle Position,
- die aktuelle Bahngeschwindigkeit und
- die Höhe der ausgegebenen Analogspannung

aufzuzeichnen und zur datentechnischen Auswertung in eine Datei zu schreiben. Diese Datei wird bei wiederholter Ausführung des Bewegungsprogramms vom Unterprogramm aktualisiert.

### **5 Systematische Dosierfehler und deren Beeinflussungsfaktoren**

Durch den Einsatz kinematischer Simulationsumgebungen können Bewegungsabläufe, Informationen und Strategien für den späteren, realen Prozess simuliert werden. Für den Einsatz einer kinematischen Simulationsumgebung zur Erfassung der Einflussparameter systematischer Fehldosierungen müssen sämtliche, für die Bahnberechnung und die Ansteuerung der Dosiereinheit benötigten, steuerungsinternen Algorithmen und Daten identisch mit denen der simulierten Applikationsanlage sein.

Dennoch sind zwangsläufig geringfügige Abweichungen von Ergebnissen der Simulationsumgebung und der realen Auftragsanlage zu erwarten. So ist die Simulationsumgebung beispielsweise nicht der Trägheit bewegter Massen oder Fertigungstoleranzen von Bauteilen unterworfen. Des Weiteren bietet sie die Möglichkeit einer exakteren Bahnprogrammierung im Vergleich zur realen Offline-Programmierung.

#### **5.1 Qualifikation der Simulationsumgebung durch Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen mit der realen Anlage**

Neben Versuchen innerhalb einer realen Auftragszelle wurden gleichzeitig mit den Geometriedaten der in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 dargestellten Bauteile mit einer vom Roboter abgetrennten Steuerung innerhalb einer Simulationsumgebung Messungen durchgeführt.

Aus Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 beziehungsweise Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 geht hervor, dass die Ergebnisse der Simulationsumgebung im Hinblick auf Geschwindigkeitsänderungen und zeitlicher Verzögerter Spannungsausgabe mit den Resultaten der realen Auftragsanlage vergleichbar sind.

### 5.1.1 Geschwindigkeitsänderungen beim Bauteil mit trapezförmigen Konturelementen

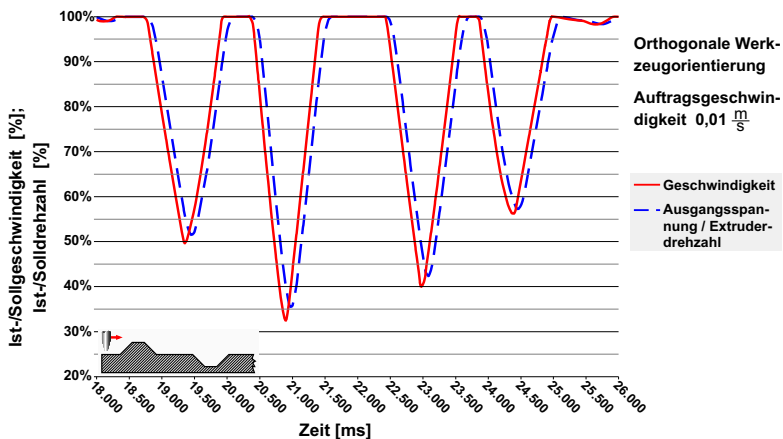


Abbildung 5-1: Reale Auftragsanlage; ausschnittsweise Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes und der analogen Ausgangsspannung

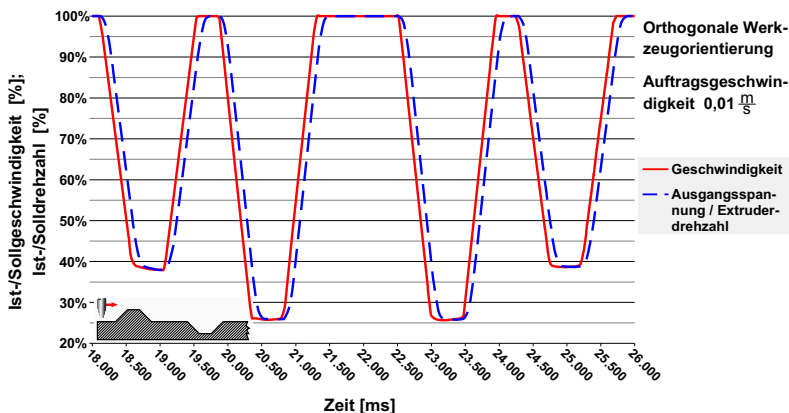


Abbildung 5-2: Simulationsumgebung; ausschnittsweise Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes und der analogen Ausgangsspannung

### 5.1.2 Geschwindigkeitsänderungen beim Bauteil mit runden Konturelementen

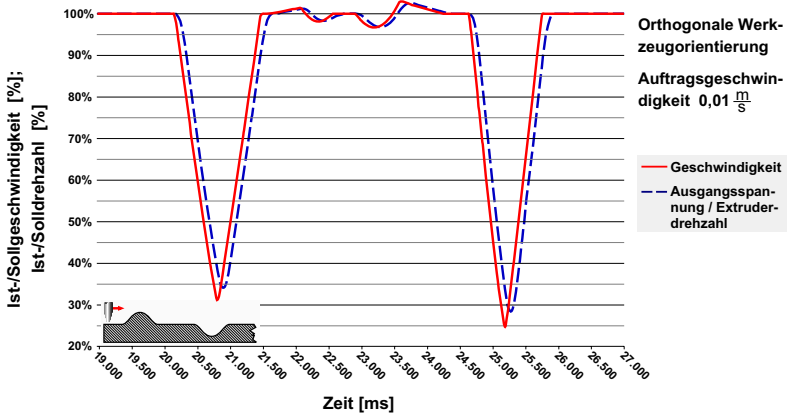


Abbildung 5-3: Reale Auftragsanlage; ausschnittsweise Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes und der analogen Ausgangsspannung

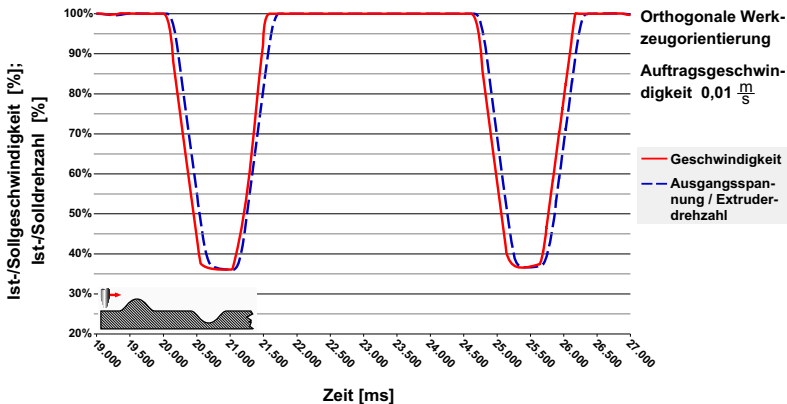


Abbildung 5-4: Simulationsumgebung; ausschnittsweise Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes und der analogen Ausgangsspannung

### 5.1.3 Ergebnis

Bei einem Vergleich der Profile von Geschwindigkeit und ausgegebener Analogspannung an der realen Anlage (vgl. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-3) mit der Simulationsumgebung (vgl. Abbildung 5-2 und Abbildung 5-4) ergibt sich bei einer Bahngeschwindigkeit von  $0,01 \frac{m}{s}$ :

- Die maximale Reduzierung der Geschwindigkeit bzw. des zugeordneten analogen Spannungssignals beträgt bei Bauteilen gemäß Abbildung 4-2 an der realen Anlage 67%, in der Simulationsumgebung 74%.
- Die maximale Reduzierung der Geschwindigkeit bzw. des zugeordneten analogen Spannungssignals beträgt bei Bauteilen gemäß Abbildung 4-3 an der realen Anlage 75%, in der Simulationsumgebung 64%.
- Geschwindigkeits- und Spannungsverlauf weisen unabhängig von der Bauteilgeometrie sowohl an der realen Anlage als auch in der Simulationsumgebung einen zeitlichen Versatz von ca. 100 Millisekunden auf.

Grund für die leicht unterschiedlichen Kurvenverläufe ist, dass der ideale Bahnverlauf in der Simulationsumgebung exakter vorgegeben werden kann als dies an der realen Anlage möglich ist (vgl. Abbildung 5-5).

Daher unterscheiden sich die Bearbeitungsbahnen, und somit das Einbruchverhalten der Geschwindigkeit geringfügig.

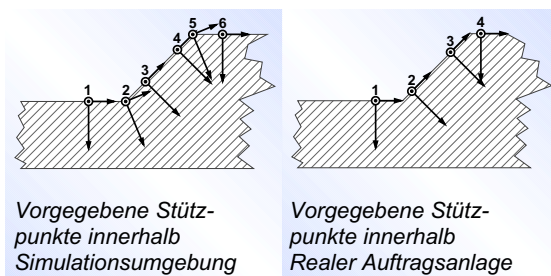


Abbildung 5-5: Bewegungsprogrammierung in Simulationsumgebung und realer Anlage

Dennoch kann zwischen realer Auftragsanlage und Simulationsumgebung ein hoher Übereinstimmungsgrad des Geschwindigkeitsverhaltens des Roboters festgestellt werden (siehe auch Abbildung 5-11). Aufgrund des hohen Übereinstimmungsgrades der Ergebnisse aus der Simulationsumgebung mit den Ergebnissen der realen Anlage ist die Simulation zur Analyse systematischer Fehldosierungen und zur Entwicklung von Strategien zu deren Verringerung geeignet.

Aufgrund der exakten und reproduzierbaren Vorgabe einzelner Bahnpunkte und zugehöriger Bewegungssätze innerhalb der Simulationsumgebung sind folglich die erhaltenen Ergebnisse hinsichtlich der Geschwindigkeitsänderungen reproduzierbarer als an der realen Auftragsanlage. Da bei der eingesetzten Simulationsumgebung sämtliche Verfahrdaten sowie Werte zur Ansteuerung der Dosiereinrichtungen von einem Robotersteuerungsrechner übernommen werden, sind bei einer Übertragung von offline generierten Programmen lediglich Anpassungen durchzuführen, die sich aufgrund von Bauteil- oder Fertigungstoleranzen innerhalb der realen Anlage ergeben.

Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Simulationsumgebung als vollwertiger Ersatz zur realen Auftragszelle hinsichtlich der Informationsgewinnung über systematische Dosierfehler betrachtet. Innerhalb der Simulationsumgebung werden Bewegungsprogramme erstellt, steuerunginterne Daten ermittelt und der resultierende Dosierfehler berechnet. Zur Verifikation der Ergebnisse werden ebenfalls Auftragsversuche an der realen Auftragszelle durchgeführt.

### **5.2 Einfluss der Bauteilgeometrie auf die systematische Fehldosierung**

Um den Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Art und das Ausmaß der Fehldosierung genauer zu erkennen, sind in Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 bei einer Auftragsgeschwindigkeit von  $0,01 \text{ m/s}$  die unterschiedlichen Ausmaße der Fehldosierungen bei Bauteilen gemäß Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 dargestellt.

## 5.2 Einfluss der Bauteilgeometrie

Dabei wurden neben Untersuchungen innerhalb der Simulationsumgebung (Abbildung 5-6) auch Messungen innerhalb der realen Auftragsanlage (Abbildung 5-7) durchgeführt.

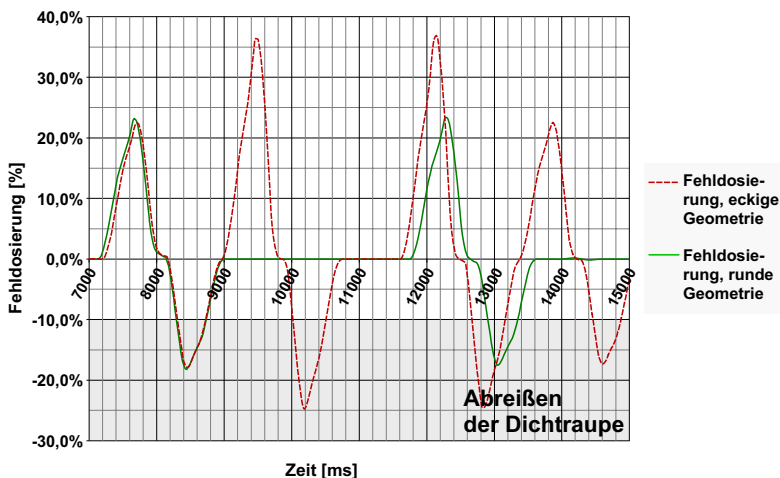


Abbildung 5-6: Orthogonale Werkzeugorientierung; Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Fehldosierung; Simulationsumgebung; Auftragsgeschwindigkeit:  $0,01 \text{ m/s}$

Auch hier konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und realer Anlage festgestellt werden. Durch einen gleichmäßigeren Bahnverlauf der Bauteilgeometrie kann der Geschwindigkeitsrückgang verringert werden. In der Folge vermindert sich die Größe der systematischen Dosierfehler und gleichzeitig verkürzen sich die Taktzeiten.



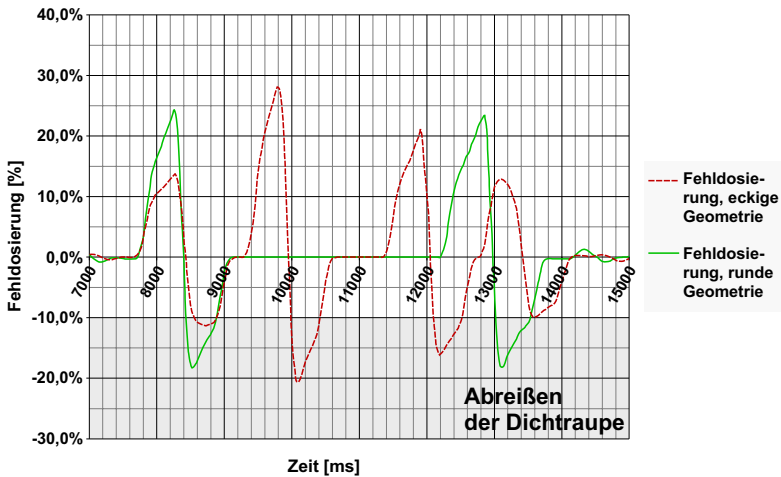


Abbildung 5-7: Orthogonale Werkzeugorientierung: Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Fehldosierung; reale Auftragsanlage; Auftragsgeschwindigkeit:  $0,01 \text{ m/s}$

### 5.3 Einfluss der Bahngeschwindigkeit auf die systematische Fehldosierung

Gemäß denen im Abschnitt 3.3 identifizierten Ursachen und Einflussparametern für die systematischen Fehldosierungen, wurde durch Versuchsreihen zunächst der Einfluss der Bahngeschwindigkeit auf die Höhe der Dosierfehler ermittelt.

Mit steigender Sollgeschwindigkeit nimmt die prozentuale Geschwindigkeitsabweichung an geknickten oder gekrümmten Bahnabschnitten stark zu. Dieses Verhalten ist in Abbildung 5-8 beispielhaft dargestellt.

Gemäß Gleichung 3-9 ergibt sich, dass der Grad der Abweichung von der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit auch ein Maß für die Größe der stattfindenden Fehldosierung ist.

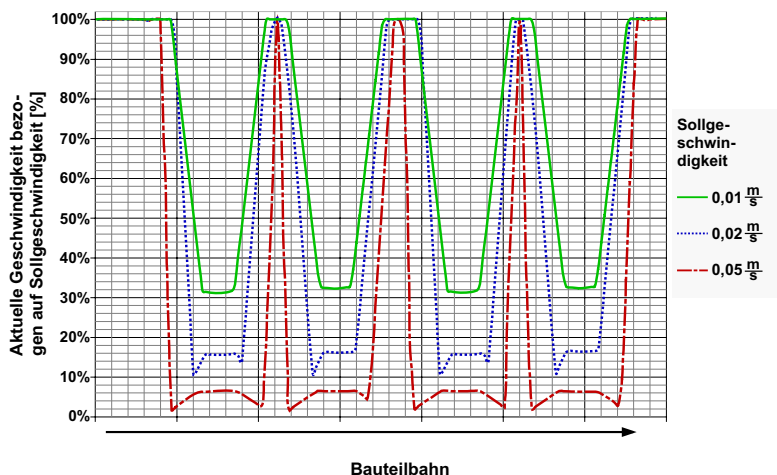


Abbildung 5-8: Orthogonale Werkzeugorientierung: Abweichungen von der Sollgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Auftragsgeschwindigkeiten; Simulationsumgebung; eckiges Bauteil

In den folgenden Abbildungen ist der Einfluss unterschiedlicher Bahngeschwindigkeiten auf Art und Höhe der stattfindenden Fehldosierungen dargestellt.

### 5.3.1 Fehldosierungen beim Bauteil mit trapezförmigen Konturelementen

Die vier charakteristischen Überdosierungen mit nachfolgender Unterdosierung können den vier Umorientierungspunkten beim Abfahren der trapezförmigen Erhebung zugeordnet werden (vgl. Abbildung 5-9).

Ebenfalls erkennbar ist der Einfluss der vorgegebenen Bahngeschwindigkeit auf die Taktzeit. Da bei höheren Auftragsgeschwindigkeiten der Geschwindigkeitseinbruch stärker ausfällt, besteht zwischen der Größe der vorgegebenen Geschwindigkeit und der benötigten Prozesszeit kein linearer Zusammenhang.

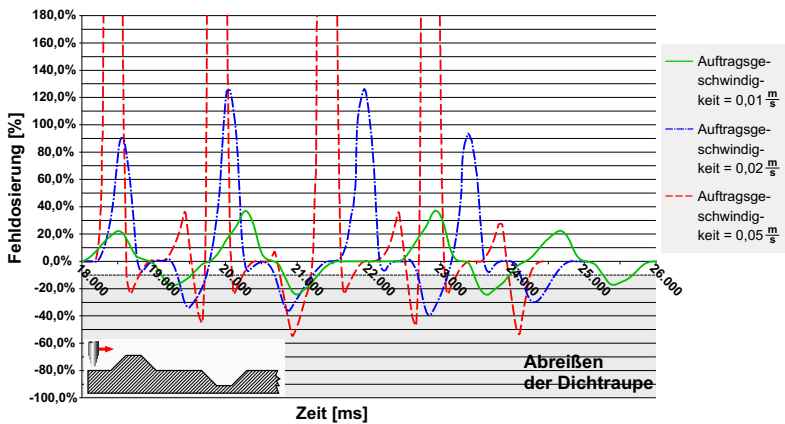


Abbildung 5-9: Orthogonale Werkzeugorientierung: Einfluss der Bahngeschwindigkeit auf die Fehldosierung beim eckigen Bauteil

### 5.3.2 Fehldosierungen beim Bauteil mit runden Konturelementen

Tendenziell ergibt sich durch eine Abrundung der Geometrie ein stetiger Bahnverlauf und als Folge eine geringere notwendige Umlenkgeschwindigkeit. Dies liegt vor allem daran, dass zum Abfahren der halbkreisförmigen Konturelemente lediglich an jeweils zwei Stellen eine Umlenkung der Dosiereinheit an stark gekrümmten Bahnkonturen erfolgen muss. Zwischen diesen beiden Stellen ist der durch eine notwendige Umlenkung bedingte Geschwindigkeitsrückgang deutlich kleiner. Dieser Zusammenhang kann in Abbildung 5-10 erkannt werden.

## 5.4 Ergebnis

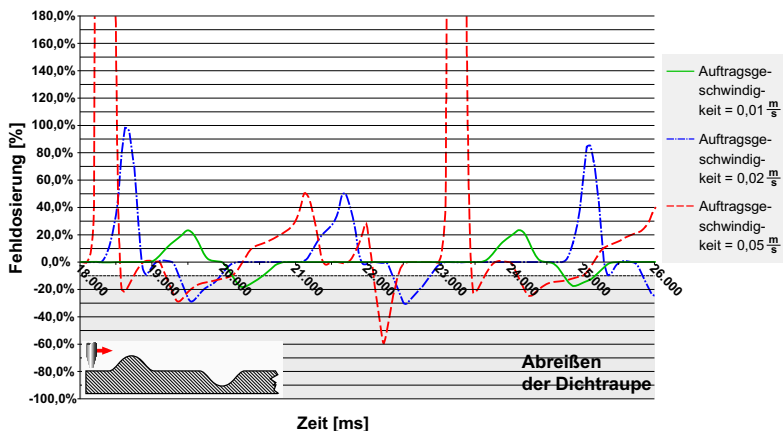


Abbildung 5-10: Orthogonale Werkzeugorientierung; Einfluss der Bahngeschwindigkeit auf die Fehldosierung beim runden Bauteil

Da bei runden Konturelementen die Anzahl der notwendigen Punkte an denen eine starke Umorientierung erfolgen muss, geringer ist, fallen Über- als auch Unterdosierungen sowohl hinsichtlich Größe als auch Häufigkeit geringer als bei unstetigeren Bahnverläufen aus (vgl. Abbildung 5-10).

## 5.4 Ergebnis

Mit den in diesem Kapitel beschriebenen, durchgeführten Versuchen konnte ein hoher Übereinstimmungsgrad zwischen Ergebnissen der realen Auftragsanlage und den Ergebnissen der Simulationsumgebung festgestellt werden.

Sowohl die Geometrie der Auftragsbahn als auch die vorgegebene Bahngeschwindigkeit (vgl. Tabelle 5-1) hat einen großen Einfluss auf die Größe auftretender Geschwindigkeitsänderungen und die damit verbundenen, systematischen Fehldosierungen. In Tabelle 5-1 sind die auf die gesamte Bauteilbahn bezogenen Mittelwerte der einzelnen Unter- beziehungsweise Überdosierungen dargestellt. Diese können als Anhaltspunkt

dienen, das Ausmaß der am Bauteil stattfindenden Dosierfehler abzuschätzen. Der Mittelwert der Fehldosierung bezieht sich auf die Höhe der Dosierfehler über der gesamten Bauteilbahn. In Verbindung mit den Mittelwerten der Über- und Unterdosierungen ist dieser Wert ein indirektes Maß für die Dauer der stattfindenden Fehldosierungen.

		Bauteil mit eckigen Konturelementen			Bauteil mit runden Konturelementen		
		0,01 $m/s$	0,02 $m/s$	0,05 $m/s$	0,01 $m/s$	0,02 $m/s$	0,05 $m/s$
Relative Fehldosierung	Mittelwert Unterdosierungen	-6,7%	-10,8%	-17,3%	-4,3%	-5,7%	-13,5%
	Mittelwert Überdosierungen	6,5%	57,5%	245,1%	2,6%	21,1%	85,5%
	Mittelwert der Fehldosierung	4,4%	28,2%	135,5%	3,2%	10,4%	49,1%

Tabelle 5-1: Mittelwerte der Fehldosierungen; Simulationsumgebung

Durch die Erfassung steuerungsinterner Daten können neben den Ursachen der systematischen Fehldosierungen auch deren Art und Größe bestimmt werden. Bei den für die Dosiersuche eingesetzten Bauteilen gemäß Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 und den eingesetzten Medien (vgl. Kapitel 4.1.2) kann festgehalten werden:

- **Relative Überdosierungen von 10 % bis 20 % führen zu keinen sichtbaren Dosierfehlern am Bauteil.**
- **Ein Abreißen der Dichtraupe tritt auf, wenn die relative Unterdosierung mehr als 10 % beträgt und gleichzeitig**
- **die Dauer der Unterdosierung größer als 0,2 s ist (vgl. Abbildung 5-11).**

Diese Werte können jedoch mit dem jeweiligen Fließverhalten des eingesetzten Mediums variieren. Bei Auftragsgeschwindigkeiten von 0,01  $m/s$  kann daher bei den eingesetzten Bauteilgeometrien kein sicherer Auftragsprozess gewährleistet werden (vgl. Abbildung 5-11).

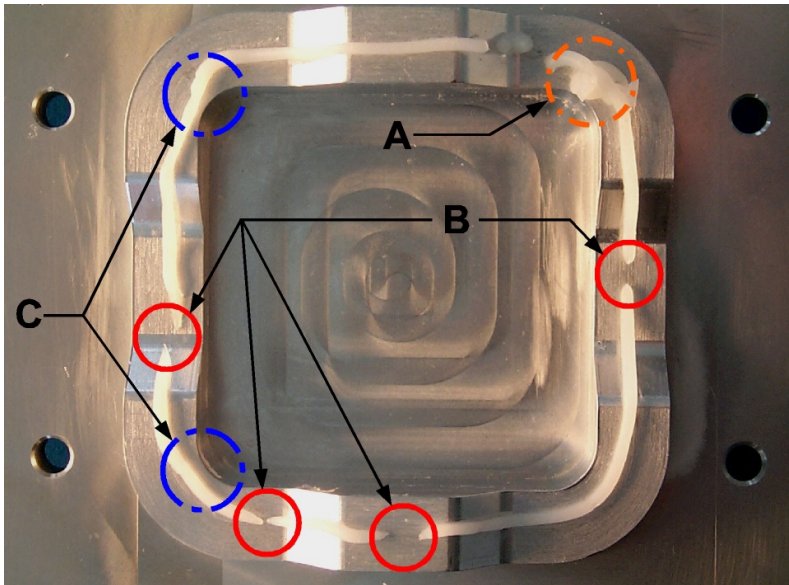


Abbildung 5-11: Verifikation der berechneten systematischen Fehldosierungen anhand eines durchgeführten Auftragsbeispiels; Medium: 50 g Stärke auf 200 ml Wasser; Bauteil gemäß Abbildung 4-2; Auftragsgeschwindigkeit  $0,01 \text{ m/s}$

**A:** Formabweichung der Raupe am Dosierbeginn bzw. Dosierende

**B:** Abreißen der Dichtraupe; Ursache: Unterdosierung

**C:** Lageabweichungen der Raupe; Ursache: Unterdosierung

Bei einem Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe ergibt sich, dass runde Konturen, deren Krümmungsradius größer als vier Millimeter ist, eckigen beziehungsweise stark gekrümmten Bahnkonturen im Hinblick auf Qualität des erreichbaren Applikationsergebnisses vorzuziehen sind. Dadurch kann eine Reduzierung der Geschwindigkeitsverringerung um etwa 5% bis 10% bei gleichzeitiger Verbesserung der Dosiergenauigkeit erreicht werden. Die Bahngeometrie beeinflusst die Dosiergenauigkeit dadurch, dass eine Verringerung der notwendigen Umorientierung am jeweiligen Bauteilelement zu einer Abnahme des Geschwindigkeitsrückganges und

der damit verbundenen systematischen Fehldosierung führt (vgl. Gleichung 3-2).

Wesentlich größeren Einfluss auf die Höhe der Geschwindigkeitsveränderungen und die daraus resultierenden Fehldosierungen hat die vorgegebene Bahngeschwindigkeit (vgl. Tabelle 5-1). Um die Bearbeitungsbahn innerhalb noch tolerierbarer Bahnabweichungen abfahren zu können, muss die Geschwindigkeit des Handhabungsgerätes angepasst werden (vgl. Kapitel 3). Dabei ist mit steigender Bahngeschwindigkeit eine überproportionale Erhöhung der Dosierfehler festzustellen. Zwischen der Höhe der Sollgeschwindigkeit des Handhabungsgerätes und dem Geschwindigkeitsrückgang an kritischen Konturelementen besteht ein nicht-linearer Zusammenhang.

Dieser kann dadurch erklärt werden, dass nach

Gleichung 3-3b: 
$$a_n = \frac{v^2}{R}$$

die an geknickten oder gekrümmten Bahnverläufen resultierende Normalbeschleunigung vom Quadrat des Geschwindigkeitswertes abhängt.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die Herabsetzung der Bahngeschwindigkeit keine geeignete Maßnahme, um die Auswirkungen systematischer Dosierfehler während des Auftragsprozesses hochviskoser Dichtmedien zu verringern. Ebenso wenig kann eine beliebige Anpassung der Bauteilgeometrie erfolgen, da diese durch die Notwendigkeit der Funktionserfüllung und anderen Randbedingungen stark eingeschränkt wird. Daher müssen Lösungsansätze gefunden werden, wie systematische Dosierfehler kompensiert, und das Applikationsergebnis verbessert werden kann.





## 6 Strategien zur Verringerung systematischer Dosierfehler

Grundsätzlich können die im Folgenden dargestellten Strategien in Maßnahmen eingeteilt werden, welche die Ursachen von Geschwindigkeitsveränderung vermeiden beziehungsweise verringern (Ursachenvermeidung bzw. Ursachenreduktion) und Methoden welche deren Auswirkungen auf die Dosiergenauigkeit verringern (Auswirkungsbegrenzung).

### 6.1 Verringerung von Geschwindigkeitsveränderungen durch die antizipierte Orientierungsänderung

Anstelle der Verringerung der Bahngeschwindigkeit stellt die Strategie der antizipierten (= vorweggenommenen) Orientierungsänderung eine wirtschaftlichere Möglichkeit zur Verringerung von Geschwindigkeitsveränderungen und der daraus resultierenden Fehldosierung dar, wie im Folgenden dargestellt wird. Bereits Bauer [BAUER 1998] beschreibt die Wirksamkeit von Bearbeitungsstrategien bei der Laserbearbeitung, welche zu einer Verringerung der Orientierungsänderung an kritischen Konturelementen führen. Auch Schuller [SCHULLER 1998] erkennt in der antizipierten Orientierungsänderung eine Möglichkeit, die Dosiergenauigkeit durch eine Verringerung der notwendigen Umoorientierung der Werkzeugspitze zu verbessern. Für eine praktische Umsetzung dieser Bearbeitungsstrategien werden weder bei Bauer, noch bei Schuller konkrete Anhaltspunkte gegeben, da für deren Umsetzung „aufwendige Rechenschritte“ notwendig sind.

#### 6.1.1 Darstellung der Strategie der antizipierten Orientierungsänderung

Bei Anwendung der antizipierten Orientierungsänderung verringert sich durch eine vorzeitige, teilweise Umoorientierung des Dosierwerkzeuges vor der gekrümmten oder geknickten Bahnkontur die Höhe des Um-

## 6.1 Antizipierte Orientierungsänderung

orientierungswinkels am kritischen Konturelement (vgl. Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2).

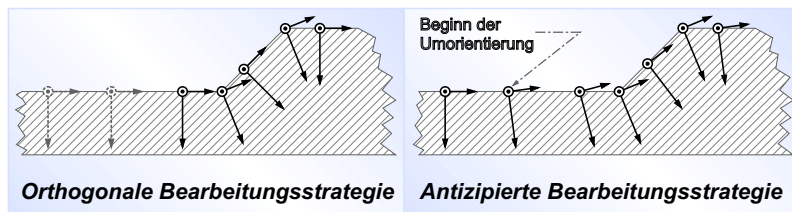


Abbildung 6-1: Schematische Gegenüberstellung der orthogonalen und der antizipierten Werkzeugorientierung

Die in Abbildung 6-1 dargestellten Pfeilspitzen symbolisieren dabei den Umorientierungsvorgang des Werkzeugkoordinatensystems beziehungsweise der Dosierspitze. Bei einer orthogonalen Führung der Auftragsdüse steht diese zur Oberfläche der Auftragsbahn senkrecht. Änderungen des Bahnverlaufes bedingen neben einer translatorischen Richtungsänderung eine Umorientierung der Auftragsdüse.

Bei der antizipierten Orientierungsänderung findet die beim Bahnrichtungswechsel notwendige Umorientierung teilweise vor dem betrachteten Konturelement statt, so dass gemäß

Gleichung 3-2: 
$$\omega = \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$$

die Winkelgeschwindigkeiten beziehungsweise Winkelbeschleunigungen reduziert werden. Die durch die Umorientierung verursachte Komponente der Bahnverzögerung beziehungsweise der anschließenden Bahnbeschleunigung und die damit verbundene Höhe der Überdosierung beziehungsweise Unterdosierung wird verringert. Vor allem bei hohen Bahngeschwindigkeiten tritt dieser Effekt deutlich hervor (siehe auch Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4).

Zur Auswahl einer geeigneten Umsetzung der antizipierten Orientierungsänderung wurden am Versuchsbauteil mit trapezförmigen Kontur-

elementen (vgl. Abbildung 4-2; 16 Stellen mit einer Umorientierung von jeweils  $45^\circ$ ) Versuche durchgeführt, mit denen beurteilt werden konnte,

- wie hoch der Einfluss des Vororientierungswinkels und der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit auf die Höhe der Geschwindigkeitsveränderung ist,
- welchen Einfluss eine Verringerung der Geschwindigkeitsveränderung auf die Länge der Bearbeitungszeit hat und
- wie hoch der Anteil der Geschwindigkeitsveränderung ist, die sich aufgrund der notwendigen Umorientierung ergibt.

Die Ergebnisse dienen als Grundlage zur praktischen Optimierung der antizipierten Orientierungsänderung.

### **6.1.2 Einfluss der Bahngeschwindigkeit und des Vororientierungswinkels**

Neben dem orthogonalen Auftrag wurden beim Bauteil gemäß Abbildung 4-2, das Schrägen im Winkel von  $45^\circ$  gegenüber der horizontalen Ebene aufweist, Vororientierungswinkel von  $2^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  und  $22,5^\circ$  gewählt. Die Vororientierung wurde gemäß Abbildung 6-2 in zwei Schritten vollzogen. Bereits 10,8 Millimeter vor dem Erreichen der Bauteilschräge wurde die Dosiereinheit um den halben Vororientierungswinkel geschwenkt. Der angegebene Abstand resultiert dabei aus der Lage eines von der Simulationsumgebung vorgegebenen Punktes. Während der nachfolgenden Bewegung wurde die Vororientierung 3,4 Millimeter vor dem Erreichen der Schräge abgeschlossen. Während der anschließenden Bewegung bis zum Fußpunkt der Schräge wurde die verbleibende Orientierungsänderung abgeschlossen. Die während dieser Bewegung erreichte Umorientierungsgeschwindigkeit wurde bis 3,4 Millimeter nach dem Fußpunkt der Schräge beibehalten.

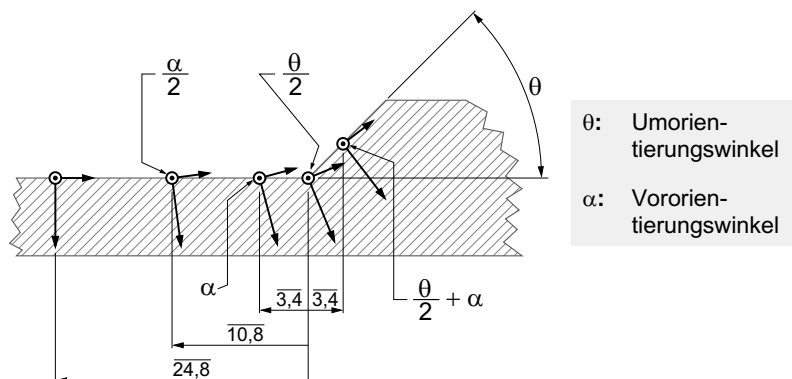


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der schrittweisen Umorientierung der Auftragsdüse über einem Abschnitt der Bauteilbahn

Dabei stellt eine Vororientierung von  $22,5^\circ$  den Grenzfall dar, da 3,4 Millimeter vor dem Konturelement bis 3,4 Millimeter nach dem Konturelement keinerlei Umorientierung stattfindet.

Aus Abbildung 6-3 ergibt sich, dass bis zu einem Grenzwert des Vororientierungswinkels mit dessen Zunahme das Einbrechen der Geschwindigkeit verringert werden kann. Der geringste Geschwindigkeitseinbruch erfolgt bei einem Grenzwert des Vororientierungswinkel bei dem eine Minimierung des sogenannten rotatorischen Effektes auftritt. Dieser kann als „optimaler“ Vororientierungswinkel betrachtet werden.

An den Versuchsergebnissen mit unterschiedlichen Vororientierungswinkeln und Bahngeschwindigkeiten ist abzulesen, dass es grundsätzlich einen bestmöglichen Vororientierungswinkel gibt. So nimmt bei einer Auftragsgeschwindigkeit von  $0,02 \text{ m/s}$  der Geschwindigkeitsrückgang mit steigendem Vororientierungswinkel bis zu einem Wert von  $15^\circ$  kontinuierlich ab. Bei Zunahme des Vororientierungswinkels über  $15^\circ$  hinaus, nimmt der Geschwindigkeitsrückgang wieder zu (vgl. Abbildung 6-3).

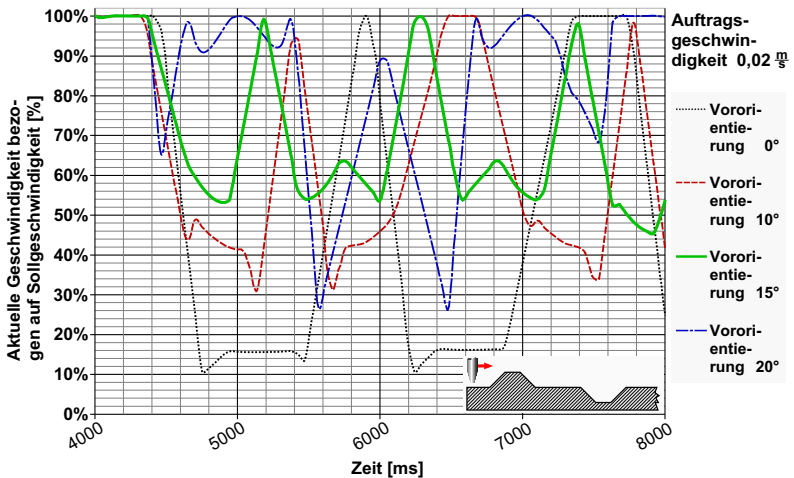


Abbildung 6-3: Antizipierte Werkzeugorientierung: Geschwindigkeitsabweichung bei unterschiedlichen Vororientierungswinkeln

Zusätzlich nimmt die Größe des „bestmöglichen“ Vororientierungswinkels mit steigenden Bahngeschwindigkeiten zu (vgl. Tabelle 6-1).

Geschwindigkeitsrückgang		Vororientierungswinkel						
		$0,0^\circ$	$2,0^\circ$	$7,0^\circ$	$10,0^\circ$	$15,0^\circ$	$20,0^\circ$	$22,5^\circ$
Sollgeschwindigkeit	$0,01 \frac{m}{s}$	74,2%	55,6%	43,0%	36,5%	39,8%	39,9%	41,8%
	$0,02 \frac{m}{s}$	97,3%	86,5%	77,4%	74,7%	67,1%	76,9%	79,6%
	$0,05 \frac{m}{s}$	99,6%	97,5%	96,2%	95,3%	92,2%	92,0%	95,8%
	$0,10 \frac{m}{s}$	99,8%	99,2%	99,0%	98,7%	97,8%	95,9%	98,7%
	$0,20 \frac{m}{s}$	99,9%	99,6%	99,5%	99,4%	99,1%	97,9%	99,4%

Tabelle 6-1: Maximaler Geschwindigkeitseinbruch in Abhängigkeit von Bahngeschwindigkeit und Vororientierungswinkel (Bauteil gemäß Abbildung 4-2)

Auch aus Tabelle 6-1 ist erkennbar, dass bei einer Vergrößerung des Vororientierungswinkels über den „optimalen“ Wert hinaus, die Höhe des Geschwindigkeitsrückganges wieder zunimmt. Dies ist erläutungsbe-

dürftig, da bei dem in Abbildung 6-2 beschriebenen Umorientierungsvorgang mit einem Vororientierungswinkel von  $22,5^\circ$  am „kritischen“ Bahnelement keinerlei Umorientierung stattfindet. Damit müsste der rotatorische Anteil des Geschwindigkeitseinbruches wegfallen, und ein Minimum annehmen.

Dazu muss der kinematische Aufbau des eingesetzten 6-Achsen-Knickarm-Roboters betrachtet werden. Aufgrund seiner sechs rotatorischen Freiheitsgrade macht ein unstetiger Verlauf innerhalb einer translatorischen Bewegung zusätzliche Bewegungen der Handachsen notwendig. Bei Wegfall der rotatorischen Komponente innerhalb dieser Bewegung tritt eine Vergrößerung der notwendigen Bewegungen der Handachsen auf. Wegen ihrer kleiner dimensionierten Antriebe sind die Handachsen für die maximal erreichbare Bahngeschwindigkeit des Roboters geschwindigkeitsbestimmend [Bauer 1998]. Daher ist der mathematisch optimale Vororientierungswinkel bei 6-Achsen-Knickarm-Kinematiken abhängig vom jeweiligen Bahnverlauf der Bearbeitungsaufgabe.

Bearbeitungszeiten		Vororientierungswinkel						
		0,0°	2,0°	7,0°	10,0°	15,0°	20,0°	22,5°
Sollgeschwindigkeit	0,01 m/s	46.248	40.512	38.976	38.784	36.672	36.480	36.672
	0,02 m/s	32.640	28.176	27.264	25.344	23.232	20.736	21.888
	0,05 m/s	26.496	24.960	22.656	21.312	19.968	16.512	13.248
	0,10 m/s	24.576	23.616	21.696	20.352	18.432	15.936	12.864
	0,20 m/s	24.000	23.232	21.504	20.160	18.624	16.128	11.952

Tabelle 6-2: Bearbeitungszeit [ms] in Abhängigkeit von Bahngeschwindigkeit und Vororientierungswinkel (Bauteil gemäß Abbildung 4-2)

Die Verringerung des Geschwindigkeitsrückganges erlaubt bei der Anwendung der antizipierten Orientierungsänderung höhere durchschnittliche Auftragsgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 6-3). Ein zusätzlicher Zeitgewinn ergibt sich aus der teilweisen Parallelisierung der translatorischen und rotatorischen Bewegungsabläufe. Bei den eingesetzten Bau-

teilen ist eine Auftragsgeschwindigkeit von  $0,02 \text{ m/s}$  wegen der geringen auftretenden Dosierfehler praxistauglich.

Die antizipierte Orientierungsänderung führt zu erheblichen Verkürzungen der Bearbeitungszeit, wie aus Tabelle 6-2 zu erkennen ist. Eine Verringerung der Bearbeitungszeit mit Hilfe der antizipierten Orientierungsänderung (20,7 Sekunden) ist effektiver als eine zehnfach höhere Auftragsgeschwindigkeit (24,0 Sekunden) ohne Vororientierung.

Vor allem führt eine Reduzierung des Geschwindigkeitsrückganges zu einer gewünschten, deutlichen Verringerung der Überdosierungen (vgl. Abbildung 6-4) und Unterdosierungen vgl. (Abbildung 6-5).

Die Dosierfehler wurden dabei gemäß

Gleichung 3-9: 
$$\bar{Q}_{(t_n)rel} = \frac{1}{t_{n+2} - t_{n-2}} \cdot \sum_{t=t_{n-2}}^{t_{n+2}} \frac{\bar{U}_{Ist} - P \cdot \bar{V}_{Ist}}{P \cdot \bar{V}_{Ist}}$$

berechnet.

Abbildung 6-4 zeigt in graphischer Darstellungen die Ergebnisse der durchgeführten Versuche. Bereits eine Vororientierung von  $2^\circ$  führt vor allem bei hohen Auftragsgeschwindigkeiten zu einem starken Rückgang der systematischen Überdosierung. Zum Erreichen einer möglichst geringen Überdosierung bei Bauteilen gemäß Abbildung 4-2 erhält man unabhängig von der gewählten Geschwindigkeit einen optimalen Vororientierungswinkel von  $20^\circ$ .

Unterdosierungen sind im Hinblick auf die Dichtung qualitätskritischer als Überdosierungen, da die Gefahr des Abreißens der Dichtraupe besteht. Die systematische Unterdosierung und das Abreißen der hochviskosen Medien kann bei Auftragsgeschwindigkeiten von unter  $0,05 \text{ m/s}$  bereits bei  $7^\circ$  Vororientierung vermieden werden. Generell sind zur Vermeidung von Unterdosierungen beim Bauteil gemäß Abbildung 4-2 Vororientierungswinkel von  $15^\circ$  zu bevorzugen, da bei diesem Winkel unabhängig von der Auftragsgeschwindigkeit die stärkste Verringerung der Unterdosierung ermittelt werden konnte (vgl. Abbildung 6-5).

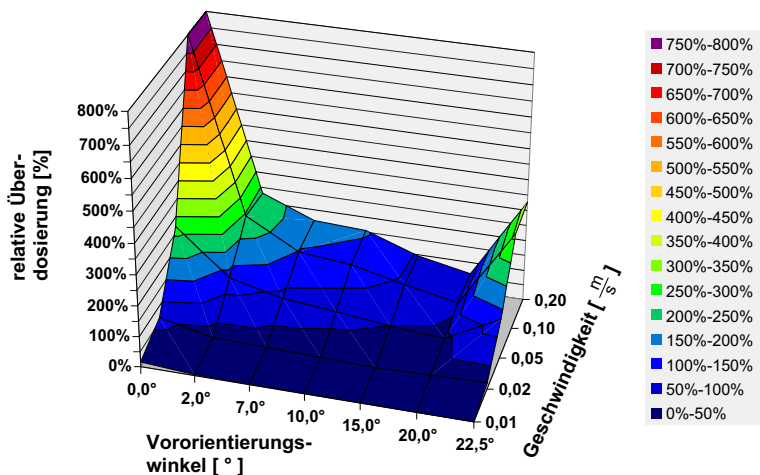


Abbildung 6-4: Gemittelte relative Überdosierung in Abhängigkeit von Bahngeschwindigkeit und Vororientierungswinkel

Ein genereller Vergleich der Auswirkung der Vororientierung auf Über- und Unterdosierung (vgl. Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5) verdeutlicht, dass die antizipierte Orientierungsänderung stärkere Wirkung bei der Vermeidung von Überdosierungen zeigt, als bei der Vermeidung von Unterdosierungen. Zusätzlich zeigt sich, dass beim gewählten Bauteil mit schrägen Konturelementen von 45° ein Vororientierungswinkel von 15° das beste Ergebnis zur Vermeidung von Unterdosierungen und gute Ergebnisse zur Verringerung der Überdosierung liefert.



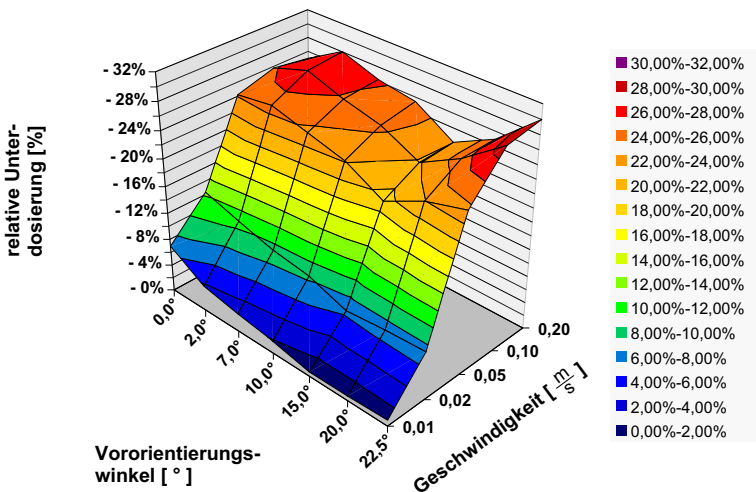


Abbildung 6-5: Gemittelte relative Unterdosierung in Abhängigkeit von Bahngeschwindigkeit und Vororientierungswinkel

Für weitere Versuche mit der antizipierten Orientierungsänderung wurde deshalb ein Vororientierungswinkel von 15° gewählt.

### 6.1.3 Ergebnisse

Mit der antizipierten Orientierungsänderung wird durch Optimierung des Bewegungsprogramms der Rückgang der Bahngeschwindigkeit an stark gekrümmten oder geknickten Bahnelementen verringert. Dadurch wird eine Ursache der systematischen Fehldosierung verringert.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden die systematischen Dosierfehler bei orthogonalem Auftrag und beim Einsatz der antizipierten Orientierungsänderung gegenübergestellt. Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7 zeigen dabei die Höhe der relativen Fehldosierung über einen Ausschnitt der Bauteilbahn. In Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 sind die Mittelwerte der dabei auftretenden Überdosierungen, Unterdosierungen und der gemittelten Fehldosierung während des gesamten Applikations-

vorgangs den entsprechenden Werten beim orthogonalen Auftrag gegenübergestellt. Die antizipierte Orientierungsänderung erweist sich als sehr wirkungsvoll, da dadurch die Höhe der mittleren Fehldosierung um mindestens 50 % gegenüber dem orthogonalen Bahnauftrag verringert werden kann (vgl. Abbildung 6-6 mit Tabelle 6-3 und Abbildung 6-7 mit Tabelle 6-4). Da jedoch sowohl bei Bauteilen mit trapezförmigen Kontur-elementen (vgl. Abbildung 4-2) als auch bei Bauteilen mit runden Kontur-elementen (vgl. Abbildung 4-3) bei Auftragsgeschwindigkeiten von  $0,02 \text{ m/s}$  Unterdosierungen von über 10 % innerhalb eines Bereichs von 0,2 Sekunden auftreten (vgl. auch Kapitel 3.3.2) kann nur bei Bahngeschwindigkeiten von  $0,01 \text{ m/s}$  ein sicherer Auftragsprozess gewährleistet werden.

Mit Hilfe einer kinematischen Simulationsumgebung kann das Bearbeitungsprogramm abgekoppelt von der realen Auftragsanlage (offline) erstellt werden. Dadurch können ein exakterer Bahnverlauf vorgegeben und die Rüstzeiten an der realen Auftragszelle verringert werden. Der Anpassungsaufwand beim Übergang von der Simulation zur realen Anlage beschränkt sich auf den Ausgleich von Fertigungstoleranzen des Bauteiles. Die Umsetzung der antizipierten Orientierungsänderung innerhalb der realen Auftragsanlage ist allerdings mit einem höheren Programmier- beziehungsweise Teach-Aufwand verbunden als eine orthogonale Bearbeitung. Aus Abbildung 6-1 geht hervor, dass mit dem Einsatz der antizipierten Orientierungsänderung die Anzahl der notwendigen, vom Bediener zu erzeugenden Bahnpunkte stark zunimmt. Neben den damit verbundenen erhöhten Rüstzeiten der Anlage, kann bei schwer zugänglichen Bauteilen aufgrund der Kollisionsgefahr oftmals keine Vorwegnahme der Orientierung erfolgen.

Aus diesen Gründen sind neben Methoden der Bewegungsoptimierung, die zu einem Rückgang der Geschwindigkeitsveränderung führen, weitere Methoden zu entwickeln und darzustellen, die in der Lage sind, den zeitlichen Versatz zwischen Geschwindigkeitsänderung und Änderung der zugehörigen Analogspannung zu verkleinern um die Auswirkungen systematischer Dosierfehler zu verringern.

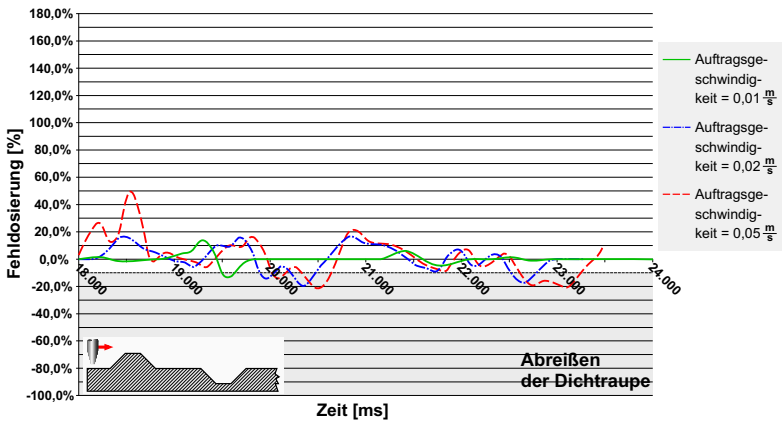


Abbildung 6-6: Antizipierte Werkzeugorientierung ( $15^\circ$ ): Einfluss der Bahngeschwindigkeit auf die Fehldosierung; Simulationsumgebung

		Orthogonale Ausrichtung			Antizipierte Orientierung		
		$0,01 \frac{m}{s}$	$0,02 \frac{m}{s}$	$0,05 \frac{m}{s}$	$0,01 \frac{m}{s}$	$0,02 \frac{m}{s}$	$0,05 \frac{m}{s}$
Relative Fehldosierung	Mittelwert Unterdosierung	-6,7%	-9,8%	-17,3%	-1,0%	-4,4%	-8,7%
	Mittelwert Überdosierung	6,5%	36,6%	245,1%	0,8%	7,5%	12,8%
	Mittelwert der Fehldosierung	6,6%	30,0%	143,6%	1,0%	6,8%	13,0%

Tabelle 6-3: Dosierfehler über der gesamten Auftragsbahn beim orthogonalen Auftrag und mit antizipierter Orientierungsänderung; eckiges Bauteil

### 6.1 Antizipierte Orientierungsänderung

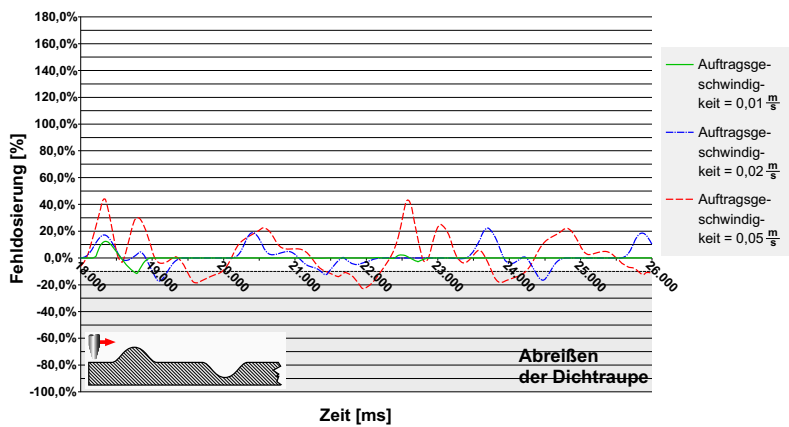


Abbildung 6-7: Antizipierte Werkzeugorientierung (15°): Einfluss der Bahngeschwindigkeit auf die Fehldosierung; Simulationsumgebung

			Orthogonale Ausrichtung			Antizipierte Orientierung		
			0,01 $\frac{m}{s}$	0,02 $\frac{m}{s}$	0,05 $\frac{m}{s}$	0,01 $\frac{m}{s}$	0,02 $\frac{m}{s}$	0,05 $\frac{m}{s}$
Relative Fehldosierung	Mittelwert	Unterdosierung	-4,4%	-6,0%	-15,7%	-0,6%	-3,3%	-12,3%
	Mittelwert	Überdosierung	2,7%	22,8%	89,0%	0,3%	8,5%	17,3%
	Mittelwert	der Fehldosierung	3,3%	11,0%	51,6%	0,4%	5,1%	15,1%

Tabelle 6-4: Dosierfehler über der gesamten Auftragsbahn beim orthogonalen Auftrag und mit antizipierter Orientierungsänderung; rundes Bauteil

### 6.2 Verringerung des Zeitversatzes zwischen Bahngeschwindigkeit und Signalausgabe mittels steuerungsinterner Algorithmen

Unter Vernachlässigung des zeitlichen Versatzes besteht nach

Gleichung 3-1: 
$$V_{(t)} \approx n_{(t)} \approx U_{(t) \text{ Analog}} = P \cdot v_{(t) \text{ Aktuell}}$$

Proportionalität zwischen der aktuellen Bahngeschwindigkeit und der Spannung des zugehörigen analogen Ausgangssignals. Neben Geschwindigkeitsänderungen während des Auftragsprozesses ist dieser zeitliche Versatz die Hauptursache von Fehldosierungen.

Einige Hersteller von Handhabungsgeräten bieten im Rahmen der Steuerungsfunktionalität spezielle Bahnschaltfunktionen an, die diesen zeitlichen Versatz verringern.

#### 6.2.1 Einsatz unterschiedlicher Bahnschaltfunktionen

Durch sogenannte Bahnschaltfunktionen können zeitliche Verzögerungen kompensiert werden. Bahnschaltfunktionen können als look-ahead-Funktionen aufgefasst werden, die aufgrund der ihnen bekannten Maschinendaten und der vorausberechneten Bahnplanung vorausseilende Schaltaktionen ausführen können.

Der Interpolationstakt ist für die Genauigkeit dieser Bahnschaltfunktionen verantwortlich, die der Robotersteuerung durch die Vorgabe von orts- (Ortskriterium, vgl. Abbildung 6-8) oder zeitbezogenen (Zeitkriterium, vgl. Abbildung 6-9) Referenzwerten den Ausführungsmoment der jeweiligen Schaltaktion vorgeben.

Die Schaltaktion kann während einer kontinuierlichen Bahnbewegung ausgeführt werden.

Für eine **ortsabhängige** Ansteuerung des Schaltpunktes misst die Steuerung kontinuierlich die aktuelle Ist-Position der Werkzeugspitze und berechnet die Distanz zum folgenden Bahnpunkt. Unterschreitet während

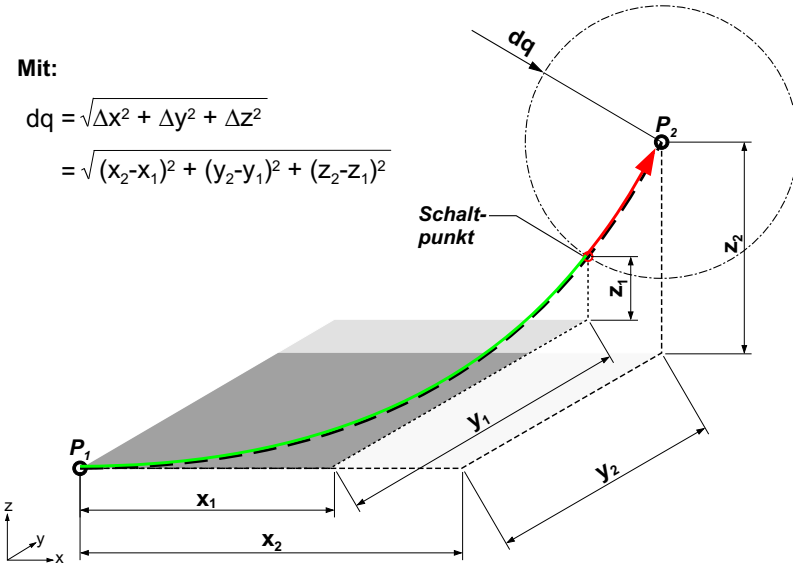


Abbildung 6-8: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer ortsbezogenen Bahnschaltfunktion

eines Interpolationstaktes die Werkzeugspitze die definierte Distanz zum angegebenen Bahnpunkt, das sogenannte **Distanzkriterium**, wird die Schaltfunktion beim nächsten Stützpunkt ausgeführt (vgl. Abbildung 6-8). Je geringer dabei der Interpolationstakt ist, desto geringer ist die geometrische Abweichung zwischen der tatsächlichen und der theoretisch exakten Schaltposition. Einer ungewollten, vom Interpolationstakt verursachten Verzögerung der Schaltaktion kann durch eine Vergrößerung des Distanzkriteriums entgegengewirkt werden. Der Einsatz ortsabhängiger Bahnschaltfunktionen zur Kompensation des zeitlichen Phasenversatzes zwischen Änderungen der Geschwindigkeit und der zugeordneten Analogspannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit scheitert am hohen ex-

perimentellen Aufwand zur Bestimmung des geeigneten Distanzkriteriums.

Bei einer **zeitabhängigen** Bahnschaltfunktion wird der Schalterpunkt im allgemeinen durch das Festlegen einer Zeitspanne bis zum Erreichen des nächsten Bahnpunktes beziehungsweise der Zeitspanne nach Erreichen eines Bahnpunktes definiert. Bei Unterschreitung beziehungsweise Überschreiten der zeitlichen Distanz, dem sogenannten **Zeitkriterium**, wird die vorgegebene Schaltfunktion beim nächsten Stützpunkt ausgeführt (vgl. Abbildung 6-9).

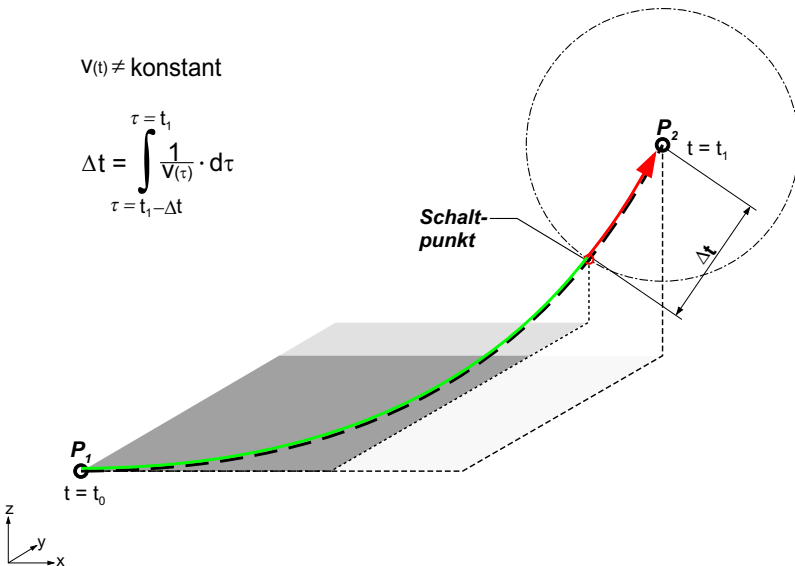


Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer zeitbezogenen Bahnschaltfunktion

Dieses Schaltkriterium wird stark vom Verlauf der Bahngeschwindigkeit beeinflusst. Da bei gekrümmten Bahnen die Geschwindigkeit in aller Regel nicht konstant bleibt, kann der Schaltzeitpunkt bei bekanntem Bahnverlauf und bekannter Bahngeschwindigkeit durch Lösen der impliziten Gleichung 6-1 bestimmt werden.

Gleichung 6-1: 
$$\Delta t = \int_{\tau=t_1-\Delta t}^{\tau=t_1} \frac{1}{v(s)} \cdot d\tau$$

Mit

$\Delta t$ : Zeitlicher Abstand zu nächstem Bahnpunkt  $P_2$  [s]

$t_1$ : Zeitpunkt an dem der nächste Bahnpunkt erreicht werden würde [s]

$v(s)$ : Bahnabhängige Geschwindigkeit  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$ds$ : inkrementelle Wegelemente der Bahn [m]

$\tau$ : Integrationsvariable

Anhand Gleichung 6-1 ist erkennbar, dass die Genauigkeit des Zeitpunktes der Schaltaktion bei zeitabhängigen Bahnschaltfunktionen stark vom zeitlichen beziehungsweise örtlichen Verlauf der Bahngeschwindigkeit abhängt. Wie bei ortsabhängigen Bahnschaltfunktionen ist die Größe des Interpolationstaktes maßgebend für die korrekte zeitliche Einhaltung des Schaltzeitpunktes verantwortlich. Eine Anpassung des Zeitkriteriums kann durch empirische Versuche erfolgen. Grundsätzlich wäre die Anwendung zeitbezogener Bahnschaltfunktionen die nächstliegende Lösung zur Kompensation systematischer Fehldosierungen.

### 6.2.2 Feststellung des zeitlichen Versatzes

Sowohl innerhalb der Simulationsumgebung als auch an der realen Auftragsanlage besteht zwischen dem Verlauf der Geschwindigkeit und dem Verlauf der analogen Ausgangsspannung über der Zeitachse, ein zeitlicher Versatz von ca. 120 Millisekunden. Durch eine Vorbelegung der zeitabhängigen Bahnschaltfunktion mit einem negativen Zeitwert von 120 Millisekunden müsste der Phasenversatz zwischen Geschwindigkeits- und Spannungsverlauf vernachlässigbar sein. Versuche an der realen Anlage zeigten jedoch, dass trotz der Vorbelegung der Bahnschaltfunktion mit einem negativen Verzögerungswert des Schaltzeitpunktes von 120 Millisekunden ein Phasenversatz von ca. 30 Millisekunden zwischen der Spannung zur Ansteuerung der Dosierleistung und der aktuellen Geschwindigkeit verbleibt (vgl. Abbildung 6-10).



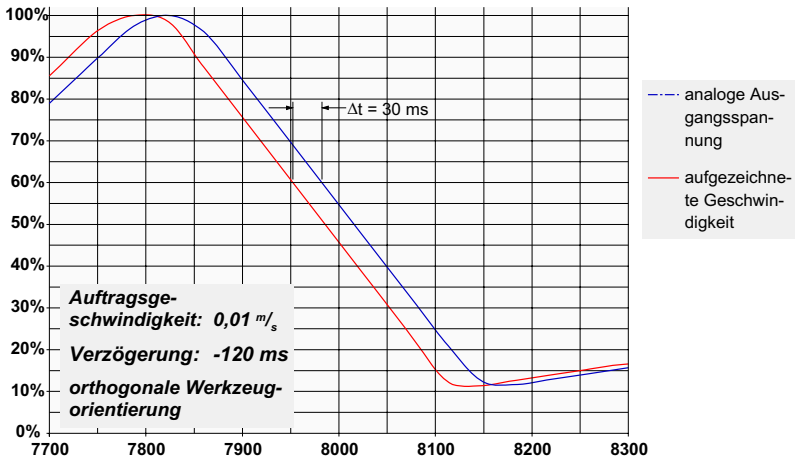


Abbildung 6-10: Steuerungsinternen Verzögerungsfunktion: Reale Auftragsanlage; Verzögerung:  $-120 \text{ ms}$

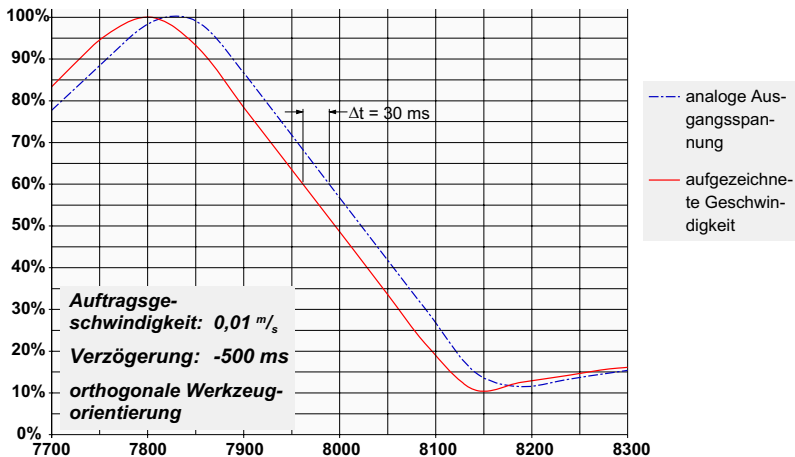


Abbildung 6-11: Steuerungsinternen Verzögerungsfunktion: Reale Auftragsanlage; Verzögerung:  $-500 \text{ ms}$

Auch bei einer Vergrößerung des zeitlichen Verzögerungswertes auf 500 Millisekunden bleibt der Phasenversatz von 30 Millisekunden zwi-

schen der erfassten aktuellen Geschwindigkeit und dem ausgegebenen Spannungsausgang bestehen (vgl. Abbildung 6-11). Die Vermutung liegt nahe, dass für die Erfassung der aktuellen TCP-Geschwindigkeit und die Belegung des Analogen Spannungssignales zur Ansteuerung der Dosiereinheit von der Robotersteuerung jeweils ein IPO-Takt von 14 Millisekunden benötigt wird.

Daher kann mit steuerungsinternen, zeitbezogenen Bahnschaltfunktionen nur eine teilweise Kompensation des Phasenversatzes erreicht werden. Aufgrund der Differenz des ursprünglichen Phasenversatzes (ca. 120 Millisekunden) und des gleichbleibenden Phasenversatzes von ca. 30 Millisekunden nach Anwendung steuerungsinterner Bahnschaltfunktionen ist die Kompensation des Phasenversatzes durch die Einstellung eines vorweggenommenen Zeitkriteriums bei der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Steuerung nur innerhalb enger Grenzen (ca. 90 Millisekunden) möglich.

Der verbleibende Phasenversatz zwischen Änderung der Auftragsgeschwindigkeit und der Spannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit besitzt die Größenordnung von etwa zwei Interpolationstakten und liegt in steuerungstechnischen Ursachen begründet.

### 6.2.3 Ergebnisse

Mit den steuerungsinternen zeitbezogenen Bahnschaltfunktionen kann nur eine teilweise Kompensation des zeitlichen Versatzes erreicht werden. Eine vollständige Kompensation des zeitlichen Versatzes zwischen Geschwindigkeitsänderung und Änderung der zugehörigen Analogspannung kann aus steuerungstechnischen Gründen mit den zur Verfügung stehenden Anlagen nicht erreicht werden. Zur Untersuchung der trotz eingesetzter Bahnschaltfunktion verbleibenden Fehldosierung wurde ein zeitlicher Verzögerungswert von 500 Millisekunden verwendet, und die Dosierfehler über einem Bahnabschnitt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgezeichnet (vgl. Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13). Zusätzlich wurde der Mittelwert der Über-, Unter- sowie der mittleren Fehldosierung über der gesamten Bearbeitungsbahn errechnet und den

entsprechenden Werten beim orthogonalen Auftrag ohne Bahnschaltfunktion gegenübergestellt. (vgl. Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6).

Die in den Abbildungen deutlich erkennbaren Überdosierungen sind das Ergebnis der Geschwindigkeitsabweichungen an den vier Umorientierungspunkten jeweils eines Konturelementes. Diese Fehldosierung ist die Folge der starken Verzögerung der Roboterbewegung am Umorientierungspunkt. Nach Erreichen des Umorientierungspunktes erfolgt eine Anpassung der Robotergergeschwindigkeit auf den vorgegebenen Sollwert, und in der Folge sind Unterdosierungen erkennbar. Dabei findet die Geschwindigkeitsverringerrung mit großen Verzögerungsrampen statt. Zur Rückführung der Geschwindigkeit auf den vorgegebenen Sollwert stehen geringere Beschleunigungsrampen zur Verfügung. In der Folge sind Überdosierungen stärker ausgeprägt als Unterdosierungen.

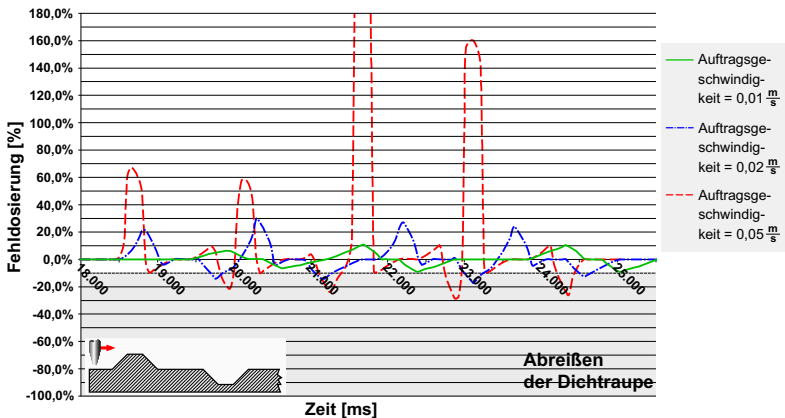


Abbildung 6-12: Steuerungsinterne Verzögerungsfunktion; Simulationsumgebung; Verzögerung: -500 ms; orthogonale Werkzeugorientierung

Darüber hinaus hängt die Höhe der Geschwindigkeitsabweichungen und damit das Ausmaß der Fehldosierung neben der Geometrie der Auftragsbahn auch von der relativen Lage der Bearbeitungsbahn zum Handhabungsgerät ab. Dies führt zu zusätzlichen Asymmetrien beim Verzögern

und Beschleunigen des Handhabungsgerätes und zu unterschiedlichen Größen der jeweiligen Fehldosierung.

		Ohne Bahnschaltfunktion			Bahnschaltfunktion: Zeitliche Verzögerung -500 ms		
		0,01 $\frac{m}{s}$	0,02 $\frac{m}{s}$	0,05 $\frac{m}{s}$	0,01 $\frac{m}{s}$	0,02 $\frac{m}{s}$	0,05 $\frac{m}{s}$
Relative Fehldosierung	Mittelwert Unterdosierung	-6,7%	-9,8%	-17,3%	-2,2%	-3,7%	-8,0%
	Mittelwert Überdosierung	6,5%	36,6%	245,1%	1,8%	7,9%	36,2%
	Mittelwert der Fehldosierung	6,6%	30,0%	143,6%	5,2%	8,1%	24,6%

Tabelle 6-5: Dosierfehler über der gesamten Auftragsbahn; Einfluss der steuerungsinternen Verzögerungsfunktion beim orthogonalen Auftrag; eckiges Bauteil

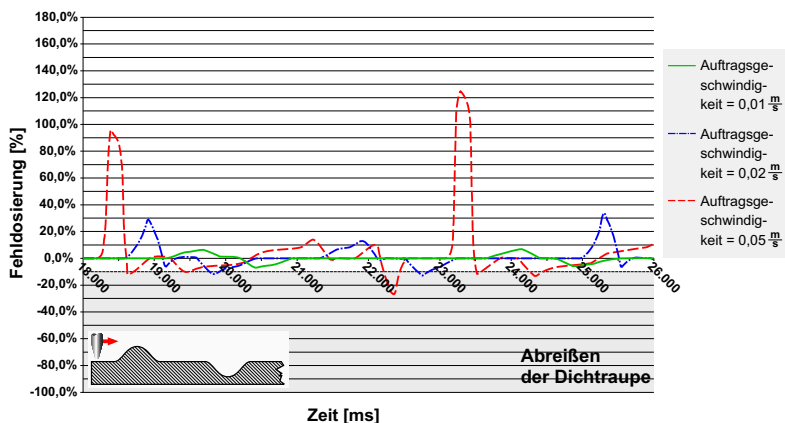


Abbildung 6-13: Steuerungsinterne Verzögerungsfunktion: Simulationsumgebung; Verzögerung: -500 ms; orthogonale Werkzeugorientierung

		Ohne Bahnschaltfunktion			Bahnschaltfunktion: Zeitliche Verzögerung -500 ms		
		0,01 $\text{m/s}$	0,02 $\text{m/s}$	0,05 $\text{m/s}$	0,01 $\text{m/s}$	0,02 $\text{m/s}$	0,05 $\text{m/s}$
Relative Fehldosierung	Mittelwert Unterdosierung	-4,4%	-6,0%	-15,7%	-1,8%	-2,6%	-8,1%
	Mittelwert Überdosierung	2,7%	22,8%	89,0%	0,9%	8,0%	18,6%
	Mittelwert der Fehldosierung	3,3%	11,0%	51,6%	1,2%	4,2%	13,6%

Tabelle 6-6: Dosierfehler über der gesamten Auftragsbahn; Einfluss der steuerungsinternen Verzögerungsfunktion beim orthogonalen Auftrag; rundes Bauteil

Bereits bei Auftragsgeschwindigkeiten von  $0,02 \text{ m/s}$  besteht die Gefahr von Unterdosierungen, die zu einem Abreißen der Dichtraupe führen (vgl. Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13). Um die Unterdosierung weiter zu verringern, müssen weitergehende Strategien entwickelt werden.

### 6.3 Verringerung des Zeitversatzes durch automatisiert selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen

Ziel weiterführender Kompensationsmethoden ist, die durch den Zeitversatz entstehenden Fehldosierungen weiter zu verringern um die Qualität der aufgetragenen Dichtraupen zu erhöhen und gegebenenfalls höhere Auftragsgeschwindigkeiten zu erreichen. Eine Verringerung der durch den Zeitversatz bedingten, systematischen Fehldosierung durch automatisiert selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen unterteilt sich in drei Einzelschritte:

- **Erfassung der Bahndaten:** Während des Applikationsvorgangs werden von der Steuerung des Handhabungsgerätes neben der aktuellen Prozesszeit die aktuelle Geschwindigkeit,

die aktuelle Position<sup>5</sup> und die ausgegebene Analogspannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit abgelegt und zur Verfügung gestellt.

- **Datenauswertung:** Aus den erfassten Daten werden für jeden einzelnen Zeitpunkt aus der aktuellen Geschwindigkeit und dem ausgegebenen Spannungssignal nach

Gleichung 3-6a:  $\bar{v}_{\text{Ist}} = \frac{v_{\text{Ist}}}{v_{\text{Soll}}}$  und

Gleichung 3-6b:  $\bar{n}_{\text{Ist}} \approx \bar{U}_{\text{Ist}} = \frac{U_{\text{Ist}}}{U_{\text{Soll}}}$

deren entsprechende, dimensionslose Werte berechnet. Daraus lässt sich gemäß

Gleichung 3-9: 
$$\bar{Q}_{(t_n) \text{rel}} = \frac{1}{t_{n+2} - t_{n-2}} \cdot \sum_{t=t_{n-2}}^{t_{n+2}} \frac{\bar{U}_{\text{Ist}} - P \cdot \bar{v}_{\text{Ist}}}{P \cdot \bar{v}_{\text{Ist}}}$$

die jeweilige systematische Fehldosierung berechnen. Zusätzlich zur Fehldosierung wird die Bahnbeschleunigung berechnet.

- **Parameterveränderung:** Ausgehend von der jeweiligen Bahnbeschleunigung und der Bahngeschwindigkeit für die einzelnen Zeitpunkte wird durch eine iterativ ermittelte Parameterfunktion (vgl. Gleichung 6-4) eine abweichend von

Gleichung 3-1:  $V_{(t)} \approx n_{(t)} \approx U_{(t) \text{Analog}} = P \cdot v_{(t) \text{Aktuell}}$

überproportionale Erhöhung oder Verringerung der Spannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit vorgenommen.

Im Folgenden wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren näher beschrieben.

---

<sup>5</sup> Die aktuellen Positionswerte wurden zur Überprüfung der ermittelten, aktuellen Geschwindigkeit während der ersten Versuchsreihen aufgezeichnet. Dabei ergab sich erwartungsgemäß eine Übereinstimmung zwischen der errechneten und erfassten Geschwindigkeit.

### 6.3.1 Erläuterung des Verfahrens

Ausgehend von Gleichung 3-1 besteht zwischen der Geschwindigkeit und der zur Ansteuerung der Dosiereinheit ausgegebenen Analogspannung Proportionalität (vgl. Abbildung 6-14), unter Beibehaltung eines konstanten Proportionalitätsgliedes.

Aus steuerungstechnischen Gründen gibt es jedoch zwischen der Bestimmung der tatsächlichen Bahngeschwindigkeit der Auftragsdüse und dem Zeitpunkt zur Ansteuerung der Analogspannung für die zugehörige Dosiereinheit einen zeitlichen Versatz, welcher in der Folge zu einer Fehldosierung führt (vgl. Kapitel 3.3).

Aufgrund dieses zeitlichen Versatzes kann Gleichung 3-1:

$$V_{(t)} \approx n_{(t)} \approx U_{(t)_{\text{Analog}}} = P \cdot v_{(t)_{\text{Aktuell}}}$$

um ein Totzeitglied, wie in Gleichung 6-2 dargestellt, erweitert werden.

$$\text{Gleichung 6-2: } V_{(t)} \approx n_{(t)} \approx U_{(t)_{\text{Analog}}} = P \cdot v_{(t-\Delta t)_{\text{Aktuell}}}$$

Mit

$t$ : Betrachtungszeitpunkt [s]

$\Delta t$ : Totzeitglied aufgrund des zeitlichen Versatzes zwischen Geschwindigkeit und zugehöriger Spannung [s]

$V_{(t)}$ : Geförderter Volumenstrom der Dosiereinheit zum Zeitpunkt  $t$  [ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ]

$n_{(t)}$ : Drehzahl der Exzentrerschneckenpumpe [ $\frac{1}{\text{s}}$ ]

$U_{(t)_{\text{Analog}}}$ : Analoge Spannung zur Drehzahlsteuerung der Dosierpumpe [V]

$v_{(t)_{\text{Aktuell}}}$ : Aktuelle Ist-Geschwindigkeit der Dosiernadel über der Bauteiloberfläche [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

$P$ : Proportionalitätskonstante zwischen Geschwindigkeit und Volumenstrom

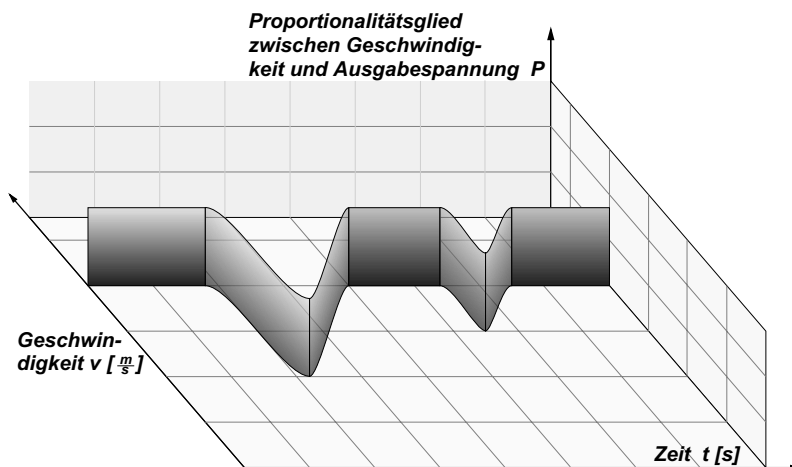


Abbildung 6-14: Schematische Darstellung der Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und analoger Ausgabespannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit gemäß Gleichung 3-1

Innerhalb der Steuerung wird zuerst der Geschwindigkeitswert ausgelesen, und das zugehörige analoge Spannungssignal mit einer Totzeit ausgegeben. Diese zeitliche Verzögerung stellt bei konstanten Auftragsgeschwindigkeiten kein Problem dar. Bei gekrümmten oder geknickten Bahngeometrien kommt es jedoch zwangsläufig zu Abweichungen von der vorgegebenen Auftragsgeschwindigkeit, die in Verbindung mit der zeitlichen Verzögerung zu systematischen Dosierfehlern führen. Trotz der theoretisch möglichen Ermittlung der Totzeit kann eine Ausgabe des Spannungssignals mit einem in der Zukunft liegenden Geschwindigkeitswert nicht erfolgen. Auch beim Einsatz sogenannter look-ahead Funktionen, durch die eine vorweggenommene Ansteuerung des Spannungswertes erfolgen soll, verbleiben Fehldosierungen, die zum Abreißen der Dichtraupe führen können (vgl. Kapitel 6.2).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb eine geeignete Möglichkeit entwickelt, den zeitlichen Versatz zwischen der Geschwindigkeit des Handhabungsgerätes und des zugehörigen Ausgabewertes durch bahndatenabhängige Parameterfunktionen wirksam zu kompensieren. Diese neuar-



tige Methode ist effizient und bildet die Grundlage zur Entwicklung steuerungsinterner, sich automatisch selbst optimierender Kompensationsfunktionen. Gegenüber der herkömmlichen Sichtweise, dass zwischen der Auftragsgeschwindigkeit und einem zugeordneten Ausgabesignal zur Ansteuerung der Dosiereinheit ein konstantes Proportionalitätsverhältnis besteht, geht der im Folgenden dargestellte Ansatz von einem variablen, funktionalen Zusammenhang zwischen den beiden Größen aus.

**Das in Gleichung 6-2 vorkommende, konstante Proportionalitätsglied P wird als eine frei programmierbare, zweckmäßigerweise von Bahndaten abhängige Parameterfunktion aufgefasst.**

Da das Ausmaß systematischer Fehldosierungen von der **Höhe der vorgegebenen Auftragsgeschwindigkeit** und dem davon abhängigen **Beschleunigungs-** beziehungsweise **Verzögerungsverhalten** des Roboters abhängig ist, wird als Ansatz zur Bestimmung einer möglichen Parameterfunktion der in Gleichung 6-3 beschriebene funktionale Zusammenhang gewählt.

$$\text{Gleichung 6-3: } V_{(t)} \approx U_{(t)\text{Analog}} = P \cdot v_{(t-\Delta t)\text{Aktuell}} \cong P \left( v_{\text{Aktuell}} + \frac{\partial v_{\text{Aktuell}}}{\partial t} \right) \cdot v_{(t)\text{Aktuell}}$$

Mit

**P:** **Veränderlicher** Proportionalitätsfaktor beziehungsweise Proportionalitätsfunktion zwischen Geschwindigkeit und Volumenstrom

**t:** Betrachtungszeitpunkt [s]

**$\Delta t$ :** Zeitlicher Versatz zwischen Geschwindigkeit und zugehöriger Spannung [s]

**$V_{(t)}$ :** Geförderter Volumenstrom der Dosiereinheit zum Zeitpunkt t [  $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  ]

**$n_{(0)}$ :** Drehzahl der Exzentrerschneckenpumpe [  $\frac{1}{\text{s}}$  ]

**$U_{(t)\text{Analog}}$ :** Analoge Spannung zur Drehzahlsteuerung der Dosierpumpe [V]

**$v_{(t)\text{Aktuell}}$ :** Aktuelle Ist-Geschwindigkeit der Dosiernadel über der Bauteiloberfläche [  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  ]

**$\frac{\partial v_{\text{Aktuell}}}{\partial t}$ :** Verzögerung bzw. Beschleunigung des Handhabungsgerätes [  $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  ]

### 6.3 Kompensation durch bahndatenabhängigen Parameterfunktionen

Für das Auffinden passender Funktionen werden im Folgenden einige theoretische Vorüberlegungen angestellt.

Da bei einer Verringerung der Robotergeschwindigkeit eine systematische Überdosierung auftritt, muss die Proportionalitätsfunktion bei geringer werdenden Geschwindigkeiten kleinere Werte annehmen. Der Unterdosierung und dem resultierenden Abreißen des Dichtmittelflusses muss bei beschleunigten Bahnbewegungen durch eine Vergrößerung der Proportionalitätsfunktion Rechnung getragen werden. Der qualitative Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsverlauf und Größe der Proportionalitätsfunktion ist in Abbildung 6-15 (vgl. auch Abbildung 6-14) dargestellt. Die notwendige Größe des Verhältnisses zwischen aktueller Geschwindigkeit und ausgegebener Analogspannung ist neben der Geschwindigkeit selbst auch von der Beschleunigung beziehungsweise Verzögerung des Handhabungsgerätes abhängig.

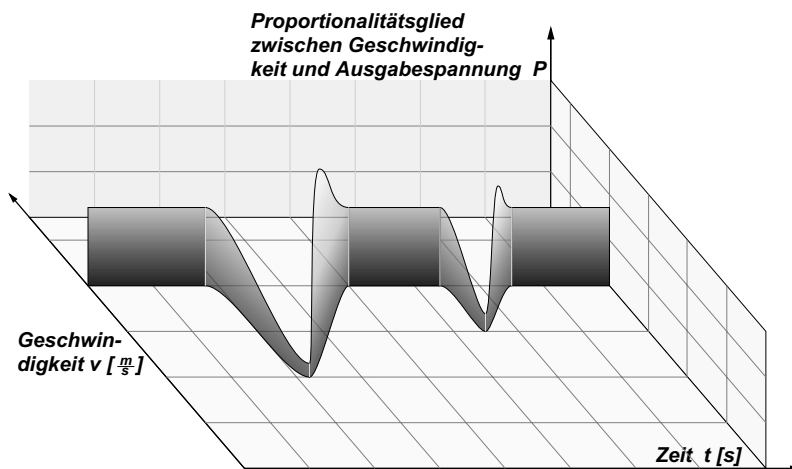


Abbildung 6-15: Schematische Darstellung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und analoger Ausgabespannung zur Ansteuerung der Dosiereinheit gemäß Gleichung 6-3

Für die Funktion der Stellgröße zwischen der Auftragsgeschwindigkeit und der analogen Ausgangsspannung zur Ansteuerung der Exzentrerschneckenpumpe wird zunächst eine konstante Bahnbeschleunigung angenommen.

Der funktionale Zusammenhang dieser Stellgröße kann dadurch ermittelt werden, dass zu  $n$  unterschiedlichen Werten der Auftragsgeschwindigkeit jeweils ein Funktionswert der Stellgröße definiert wird. Dieser numerische Zusammenhang muss anschließend innerhalb der Robotersteuerung durch eine mathematische Funktion übernommen werden.

Fasst man im regelungstechnischen Sinn die analoge Ausgangsspannung als zu regelnde Ausgangsgröße auf, sind die gemessene Geschwindigkeit und deren zeitliche Ableitung die Eingangsgrößen eines Regelkreises. Aufgrund der zeitlichen Verzögerung bei der Erfassung der aktuellen Geschwindigkeit und der Belegung des zugehörigen Spannungssignals entstehen Störgrößen. Da die Ausgangsgröße von zwei Eingangsgrößen abhängt, und der Einfluss der Störgrößen sich einer mathematisch anwendbaren, exakten Formalisierung verschließt, ist eine hinreichende Kompensation der Störgrößen durch den Einsatz von konventionellen Regelgliedern nicht möglich. Durch eine adaptive Regelung kann eine ausreichende Kompensation der unbekannten Störgrößen erfolgen. Dabei können von der adaptiven Regelung mehrere Störgrößen gleichzeitig erfasst, und der Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen, Störgrößen und der gewünschten Ausgangsgröße auch ohne genaue Kenntnis über Wirkzusammenhänge durch beliebige funktionale Wertzuweisungen ausgegeben werden.

Prinzipiell stehen für eine Zuordnung von  $n$  Werten auf  $n$  Funktionswerte mehrere Möglichkeiten für eine mathematische Beschreibung zur Verfügung. Dabei werden üblicherweise Polynomreihenentwicklung unterschiedlicher Funktionstypen, wie beispielsweise

- trigonometrische Funktionen,
- Exponentialfunktionen oder
- Polynomfunktionen

angewandt. Durch Nachweis in der komplexen Zahlenebene, können Reihenentwicklungen dieser unterschiedlichen Funktionstypen in eine entsprechende Reihenentwicklung eines anderen Funktionstypen umgewandelt werden.

Im Rahmen der vorgenommenen Versuche wurde für die Beschreibung des beschleunigungs- und geschwindigkeitsabhängigen Proportionalitätsgliedes eine Funktion gemäß Gleichung 6-4 gewählt. Die Abhängigkeit des Proportionalitätsgliedes von der Beschleunigung beziehungsweise Verzögerung des Handhabungsgerätes wird durch abschnittsweise Gültigkeitsbereiche der Funktion erfüllt.

$$\text{Gleichung 6-4: } P\left(v; \frac{\partial v}{\partial t} = \zeta_i\right) = A_{\zeta_i} \cdot (v)^2 + B_{\zeta_i} \cdot (v) + \frac{C_{\zeta_i}}{(v + v_0)^2} + \frac{D_{\zeta_i}}{(v + v_0)} + E_{\zeta_i}$$

Mit

- P: **Veränderliches**, von Bahngeschwindigkeit und Beschleunigung abhängiges Proportionalitätsglied zwischen Geschwindigkeit und Volumenstrom
- v: Aktuelle Ist-Geschwindigkeit der Dosiernadel über der Bauteiloberfläche [ $\frac{m}{s}$ ]
- $v_0$ : Funktionales Hilfsglied zur Anpassung des funktionalen Zusammenhangs bei hohen Geschwindigkeitseinbrüchen [ $\frac{m}{s}$ ]
- A – E: Hinsichtlich der Dimension angepasste Funktionsparameter
- $\frac{\partial v}{\partial t} = \zeta_i$ : Diskretes Intervall für die Verzögerung bzw. Beschleunigung, innerhalb dessen die Funktionsparameter gültig sind [ $\frac{m}{s^2}$ ]

Die im Rahmen der Untersuchungen vorgenommenen Fallunterscheidungen bezüglich der Beschleunigungs- beziehungsweise Verzögerungswerte, sowie die Belegung der Funktionsparameter sind in Abhängigkeit von der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit in Tabelle 6-7 bis Tabelle 6-9 wiedergegeben.

Sollgeschwindigkeit 0,01 m/s		Parameter der Kompensationsfunktion nach Gleichung 6-4					
Beschleunigung [ $\frac{\partial v}{\partial t}$ ]		A	B	C	D	E	$v_0$
$<< 0$	$[-10,0 \cdot 10^{-6}; -\infty[$	14,717	-34,100	3,114	-18,774	50,376	0,1
$< 0$	$] -6,0 \cdot 10^{-6}; -10,0 \cdot 10^{-6}[$	14,717	-34,100	3,114	-18,774	50,376	0,1
$\approx 0$	$[-6 \cdot 10^{-6}; 2 \cdot 10^{-6}]$	0	0	0	0	17,5	0,0
$> 0$	$]2,0 \cdot 10^{-6}; 10,0 \cdot 10^{-6}[$	7,143	-20,036	1,273	-8,441	38,014	0,1
$>> 0$	$[10,0 \cdot 10^{-6}; \infty[$	3,135	-25,504	3,702	-20,319	57,032	0,1

Tabelle 6-7: Funktionsparameter in Abhängigkeit der Beschleunigung bei einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit von 0,01 m/s

Sollgeschwindigkeit 0,02 m/s		Parameter der Kompensationsfunktion nach Gleichung 6-4					
Steigung [ $\frac{\partial v}{\partial t}$ ]		A	B	C	D	E	$v_0$
$<< 0$	$[-32,0 \cdot 10^{-6}; -\infty[$	38,175	-69,889	1,942	-19,937	65,233	0,1
$< 0$	$] -3,0 \cdot 10^{-6}; -32,0 \cdot 10^{-6}[$	0,515	12,870	-1,549	9,363	-3,619	0,1
$\approx 0$	$[-3 \cdot 10^{-6}; 3 \cdot 10^{-6}]$	0	0	0	0	17,5	0,0
$> 0$	$]3,0 \cdot 10^{-6}; 10,0 \cdot 10^{-6}[$	-2410,7	1069,6	-0,012	1,195	-107,24	-0,1
$>> 0$	$[10,0 \cdot 10^{-6}; \infty[$	-8,283	-177,96	847,20	-1529,6	758,23	1,0

Tabelle 6-8: Funktionsparameter in Abhängigkeit der Beschleunigung bei einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit von 0,02 m/s

### 6.3 Kompensation durch bahndatenabhängigen Parameterfunktionen

Sollgeschwindigkeit 0,05 m/s		Parameter der Kompensationsfunktion nach Gleichung 6-4					
Steigung $[\frac{\partial v}{\partial t}]$		A	B	C	D	E	$v_0$
$<< 0$	$[-40,0 \cdot 10^{-6}; -\infty[$	129,722	242,04	523,721	1500,8	620,32	-2,0
$< 0$	$] -3,0 \cdot 10^{-6}; -40,0 \cdot 10^{-6}[$	14,524	-30,881	0,905	-8,994	40,786	0,1
$\approx 0$	$[-3 \cdot 10^{-6}; 10 \cdot 10^{-6}]$	0	0	0	0	17,5	0,0
$> 0$	$]10,0 \cdot 10^{-6}; 40,0 \cdot 10^{-6}[$	-16,632	35,828	-0,526	9,680	-8,928	0,1
$>> 0$	$[40,0 \cdot 10^{-6}; \infty[$	24,564	-1,348	-31,266	180,36	-104,56	0,5

Tabelle 6-9: Funktionsparameter in Abhängigkeit der Beschleunigung bei einer vorgegebenen Sollgeschwindigkeit von 0,05 m/s

Diese Funktionswerte wurden durch iterative Experimente in der Simulationsumgebung bestimmt, und an der realen Anlage verifiziert. Dabei hängt die Anzahl der notwendigen Iterationen von der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit und der Erfahrung des Programmierers ab. In der Regel liegt die Anzahl zwischen 5 und 8 Iterationszyklen.

Durch die hyperbolischen Funktionsglieder kann die Funktion des Proportionalitätsgliedes nach Gleichung 6-4 auch bei niedrigen Geschwindigkeiten und einer beschleunigten Bewegung die zur Kompensation einer Unterdosierung notwendigen, hohen Werte annehmen.

### 6.3.2 Anpassung der Koeffizienten

#### 6.3.2.1 Manuelle Anpassung der Koeffizienten

Ausgehend von der vorhandenen Fehldosierung beim orthogonalen Auftrag wurde eine Unterteilung des Geschwindigkeitsverlaufes in insgesamt fünf unterschiedliche Beschleunigungsbereiche vorgenommen.

Mit Ausnahme des Bereiches für konstante Geschwindigkeiten, wurde innerhalb der anderen Bereiche den fünf unterschiedlichen Geschwindigkeitswerten jeweils ein zugehöriger Wert der Proportionalitätsfunktion zugeordnet. Der Funktionsparameter  $v_0$  wurde jeweils mit einem Anfangswert von  $0,1 \text{ m/s}$  belegt.

Durch Lösungsmethoden für lineare Gleichungssysteme können die Funktionsparameter A bis E aus Gleichung 6-4 errechnet werden. Durch Belegung des Verfahrsprogramms mit den gefundenen Parametern und weitere Dosierversuche können die Funktionsparameter iterativ angepasst werden (vgl. Abbildung 6-16).

Für die Einteilung der fünf unterschiedliche Wertebereiche der Parameterfunktion können anhand des Zeit-Geschwindigkeit-Diagramms die Bereiche maximaler Beschleunigung und Verzögerung hinsichtlich ihres Wertebereiches festgelegt werden. Die Festsetzung des Bereiches gleichbleibender Geschwindigkeit sowie der angrenzenden Übergangsbereiche ergibt sich durch Iteration. Sinn der Übergangsbereiche ist es, zwischen den Bereichen mit maximaler Beschleunigung beziehungsweise Verzögerung und dem Bereich konstanter Geschwindigkeit einen möglichst stetig differenzierbaren Verlauf der Proportionalitätsfunktion über den gesamten Geschwindigkeitsbereich zu erreichen.

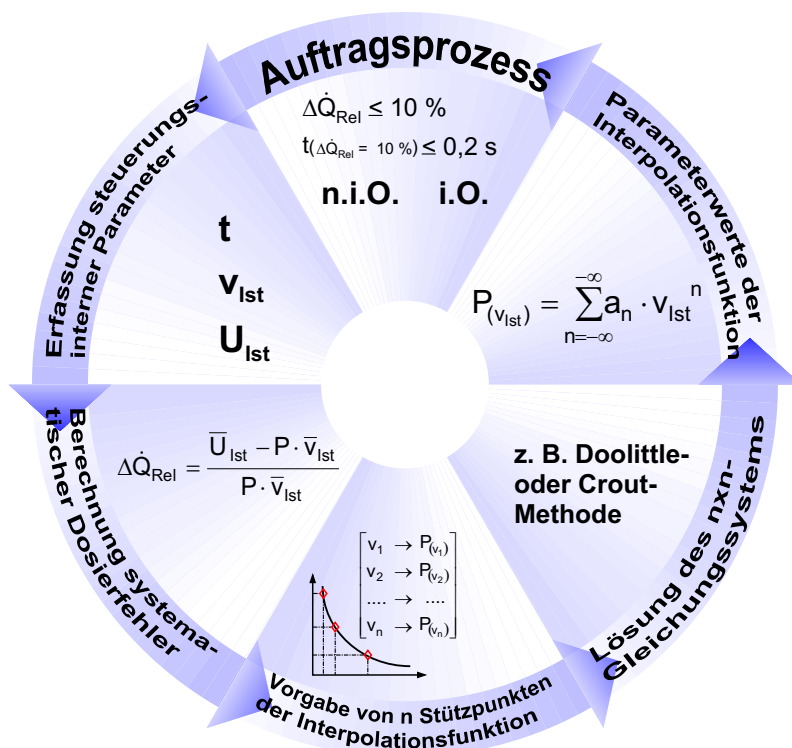


Abbildung 6-16: Schematische Darstellung der iterativen Vorgehensweise zur Bestimmung der Funktionsparameter

Bei einem unstetigen Verlauf kann es sonst zu Spannungsspitzen in der Ansteuerung der Dosiereinheit kommen, was ebenfalls zu Fehldosierungen führen kann.

Die Genauigkeit der Abgrenzung der Übergangsbereiche vom Bereich konstanter Geschwindigkeit selbst, hat nur geringen Einfluss auf die erreichbare Dosiergenauigkeit.



### 6.3.2.2 Möglichkeit der automatisierten Anpassung der Koeffizienten

Die vom Unterprogramm während des Auftrags erzeugte Datei mit den Zeit-, Geschwindigkeits- und Spannungswerten (siehe auch Kapitel 1.1) steht zur datentechnischen Auswertung nach jedem abgeschlossenen Dosiervorgang erneut zur Verfügung. Das bedeutet, dass von der Steuerung des Handhabungsgerätes nach jedem Dosiervorgang eine Berechnung der stattfindenden Dosierfehler durchgeführt werden kann. Dabei kann eine iterative Anpassung sowohl in der Simulation als auch an der realen Anlage erfolgen. Basierend auf der datentechnischen Auswertung erfolgte im Rahmen dieser Arbeit eine iterative, manuelle Anpassung des Verlaufes des Interpolationspolynoms (vgl. Abbildung 6-16). Mit den hier erarbeiteten Grundlagen und der zusätzlichen Implementierung geeigneter Algorithmen kann die bisher, im Rahmen dieser Arbeit manuell durchgeführte Anpassung der Interpolationsfunktion zukünftig selbsttätig durch die Steuerung des Handhabungsgerätes vorgenommen werden.

Bei einer Implementierung einer automatisierten Anpassung der Koeffizienten innerhalb einer realen Auftragsanlage, würde nach jedem einzelnen Dosiervorgang eine Überprüfung des Dosierergebnisses basierend auf den steuerungsinternen Daten erfolgen. Nach Anpassung der Koeffizienten ergibt sich bei der nachfolgenden Dosierung auf ein weiteres, gleichartiges Bauteil ein besseres Dosierergebnis, welches bei Bedarf selbsttätig von der Steuerung des Handhabungsgerätes weiter optimiert wird.

### 6.3.3 Ergebnisse

Die Anwendung selbst optimierbarer, bahndatenabhängiger Parameterfunktionen zur Ansteuerung der Dosiereinheit ist eine wirkungsvolle Methode zur Verringerung der Ursachen systematischer Dosierfehler und deren Auswirkungen.

Der lineare Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und zugeordneter Analogspannung wurde durch eine frei programmierbare, von Bahndaten

### 6.3 Kompensation durch bahndatenabhängigen Parameterfunktionen

abhängige Parameterfunktion ersetzt (vgl. Gleichung 6-4). So kann ein beliebiger funktionaler Zusammenhang zwischen der aktuellen Auftragsgeschwindigkeit und der zugeordneten Analogspannung hergestellt werden. Weiterhin kann bei Geschwindigkeitsänderungen durch den kontinuierlichen, frei wählbaren Verlauf der Proportionalitätsfunktion der zeitliche Versatz zwischen Geschwindigkeit und Analogspannung beeinflusst werden. Durch iterative Versuche wurden die Koeffizienten der interpolierenden Proportionalitätsfunktion an die vorgegebenen Bearbeitungsgeschwindigkeiten angepasst und die Dosierleistung entsprechend gesteuert.

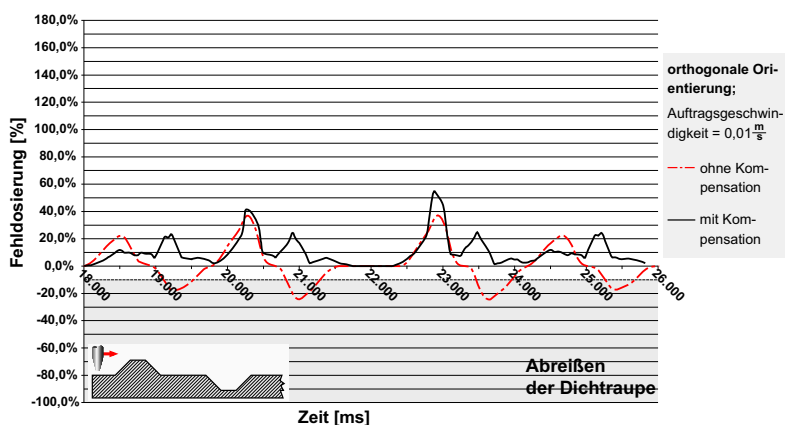


Abbildung 6-17: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung;  
Auftragsgeschwindigkeiten: 0,01  $\frac{m}{s}$ , eckiges Bauteil

Da Unterdosierungen qualitätskritischer als Überdosierungen sind, war das Ziel der Koeffizientenanpassung Unterdosierungen zu beseitigen.

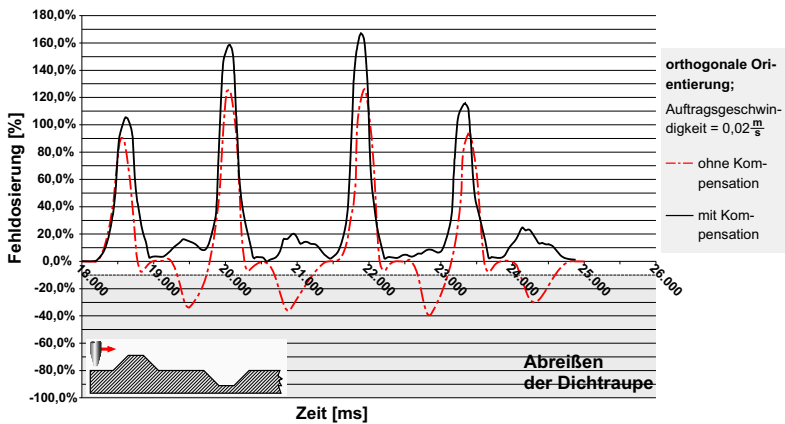


Abbildung 6-18: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung; Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,02 \frac{m}{s}$ , eckiges Bauteil

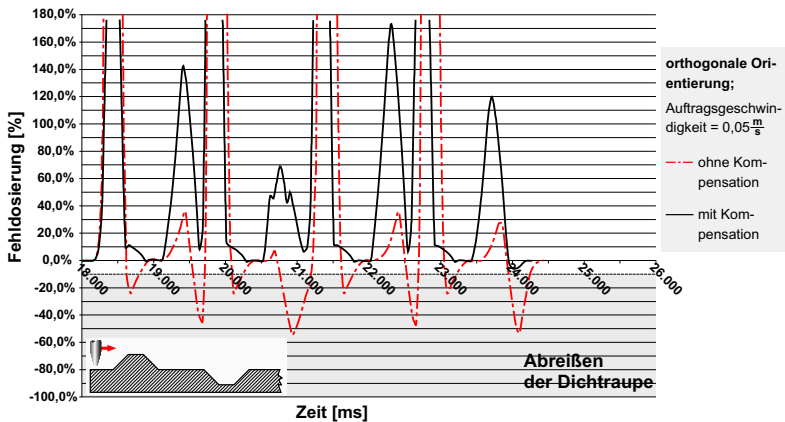


Abbildung 6-19: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung; Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,05 \frac{m}{s}$ , eckiges Bauteil

Diese Fehldosierungen konnten beim Bauteil an den kritischen trapezförmigen Geometrieelementen (Abbildung 6-17 bis Abbildung 6-19 und Tabelle 6-10) deutlich verringert werden. Wegen der hohen Verzögerung des Handhabungsgerätes an den Punkten mit kritischen Umorientierung

### 6.3 Kompensation durch bahdatenabhängigen Parameterfunktionen

gen kann es zu einer Erhöhung der Überdosierung kommen. Aufgrund der Zielsetzung, Unterdosierungen zu vermeiden und der niedrigen mathematischen Ordnung der eingesetzten Funktion genügt deren Anpassungsfähigkeit nicht um Überdosierungen zu verringern.

Auch beim Bauteil mit runden Konturelementen kann durch den Einsatz der vorausberechneten Ansteuerung der Dosiereinheit das Auftragsergebnis deutlich verbessert werden (Abbildung 6-20 bis Abbildung 6-22 und Tabelle 6-10). Da beim Bauteil mit runden Konturelementen eine langsamere Verzögerung an den Umorientierungspunkten stattfindet, wird durch die eingesetzte Parameterfunktion keine Erhöhung der Überdosierung hervorgerufen.

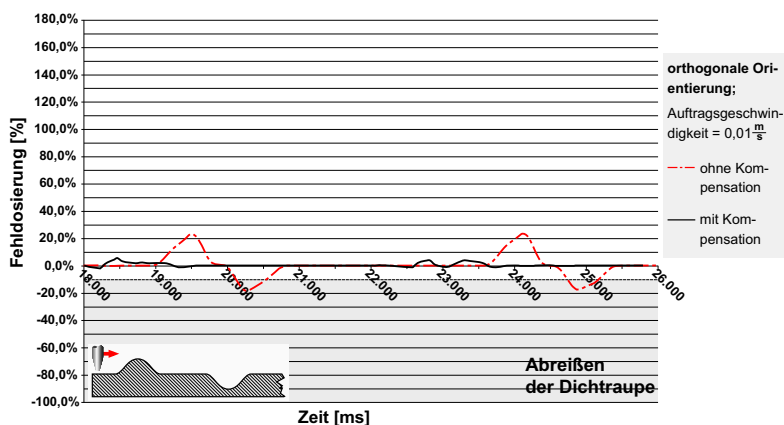


Abbildung 6-20: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung;  
Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,01 \frac{m}{s}$ , rundes Bauteil

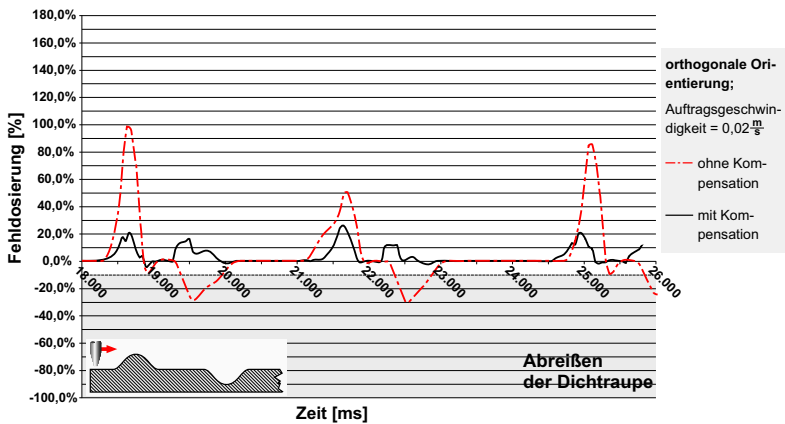


Abbildung 6-21: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung; Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,02 \frac{m}{s}$ , rundes Bauteil

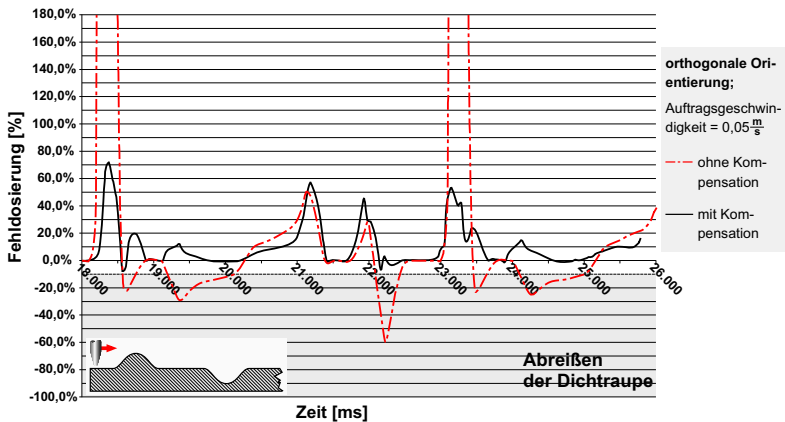


Abbildung 6-22: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung; Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,05 \frac{m}{s}$ , rundes Bauteil

Legt man die in Kapitel 5.4 für einen Abreißen der Dichtraupe ermittelte kritische Fehldosierung von 10 % zu Grunde, kann bei einer vorausberechneten Ansteuerung der Dosiereinheit eine Unterdosierung bis zu Auftragsgeschwindigkeiten von  $0,05 \frac{m}{s}$  vermieden werden.

### 6.3 Kompensation durch bahndatenabhängigen Parameterfunktionen

Zum besseren Vergleich ist in den Abbildungen 6-17 bis 6-19 (Abbildungen 6-20 bis 6-22) die Fehldosierung mit und ohne Kompensationsstrategie für jeweils eine Geschwindigkeit beim Bauteil mit trapezförmigen Konturelementen (runden Konturelementen) gegenübergestellt.

Eine abschließende, über der ganzen Auftragsbahn gemittelte Gegenüberstellung der Dosierfehler beim Auftrag mit orthogonaler Düsenorientierung und unterschiedlichen Auftragsgeschwindigkeiten befindet sich in Tabelle 6-10.

			Eckiges Bauteil			Rundes Bauteil		
			0,01 $\text{m/s}$	0,02 $\text{m/s}$	0,05 $\text{m/s}$	0,01 $\text{m/s}$	0,02 $\text{m/s}$	0,05 $\text{m/s}$
Relative Fehldosierung	Mittelwert	Unter-	0,0%	0,0%	-4,3%	-0,7%	-1,1%	-4,7%
	Mittelwert	Über-	6,9%	30,3%	107,1%	0,7%	9,2%	20,7%
	Mittelwert	der	6,1%	36,9%	93,9%	0,7%	4,6%	15,4%
Fehldosierung								

Tabelle 6-10: Dosierfehler über der gesamten Auftragsbahn mit Kompensation des zeitlichen Versatzes bei runder und eckiger Bauteilgeometrie; orthogonaler Auftrag

Die verbleibenden Überdosierungen, die optisch zwar sichtbar sind, aber kaum einen störenden Einfluss auf die Qualität der Dichtverbindung besitzen, können durch Kombination mit der Methode der antizipierten Orientierungsänderung verringert werden.

#### 6.3.4 Kombination der antizipierten Orientierungsänderung mit selbst optimierbaren, bahndatenabhängigen Parameterfunktionen

Durch die Kombination der Strategie der antizipierten Orientierungsänderung mit bahndatenabhängigen Parameterfunktionen können auch bei geometrisch anspruchsvollen Bauteilgeometrien Dichtraupen hoher Qua-

lität mit vergleichsweise hohen Auftragsgeschwindigkeiten erzeugt werden (vgl. Abbildung 6-23 bis Abbildung 6-28 und Abbildung 6-30).

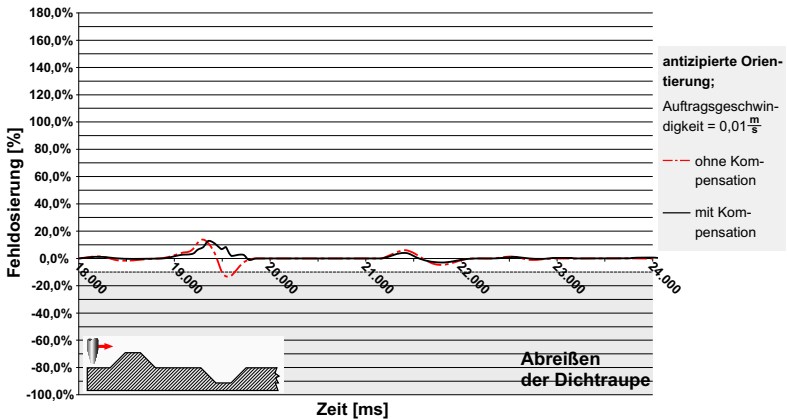


Abbildung 6-23: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung; Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,01 \frac{m}{s}$ , eckiges Bauteil

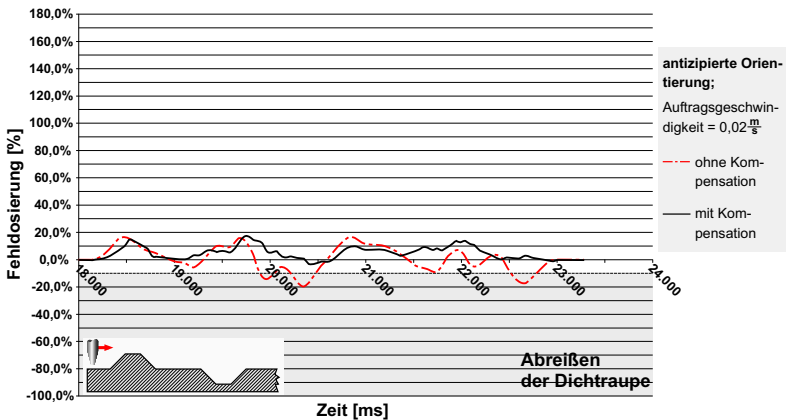


Abbildung 6-24: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung; Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,02 \frac{m}{s}$ , eckiges Bauteil

### 6.3 Kompensation durch bahndatenabhängigen Parameterfunktionen

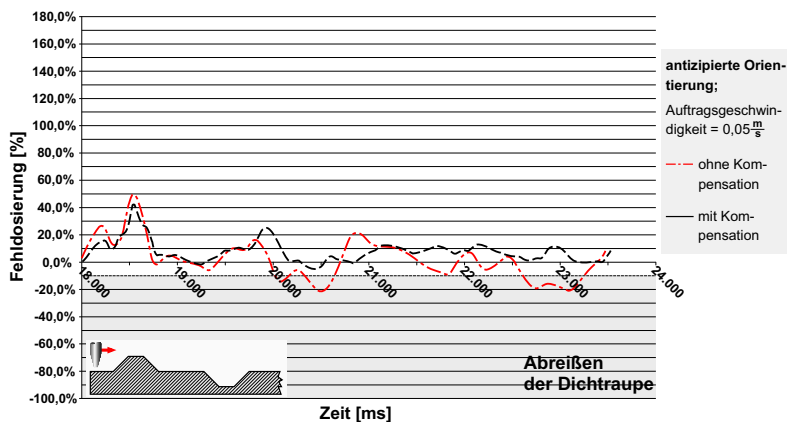


Abbildung 6-25: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehlodosierung;  
Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,05 \frac{m}{s}$ , eckiges Bauteil

Auch eine Gegenüberstellung der Kompensation mit Hilfe steuerungsin-  
terner Verzögerungsfunktionen (vgl. Abbildung 6-12 mit Abbildung 6-17  
bis Abbildung 6-19 beim eckigem Bauteil und Abbildung 6-13 mit  
Abbildung 6-20 bis Abbildung 6-22 beim rundem Bauteil) und der Kom-  
pensation durch selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameter-  
funktionen zeigt, dass die Bearbeitungszeiten bei Bauteilen gemäß  
Abbildung 4-3 um etwa 60 %, bei Bauteilen gemäß Abbildung 4-2 bis zu  
80 % reduziert werden können.



## 6 Strategien zur Verringerung systematischer Dosierfehler

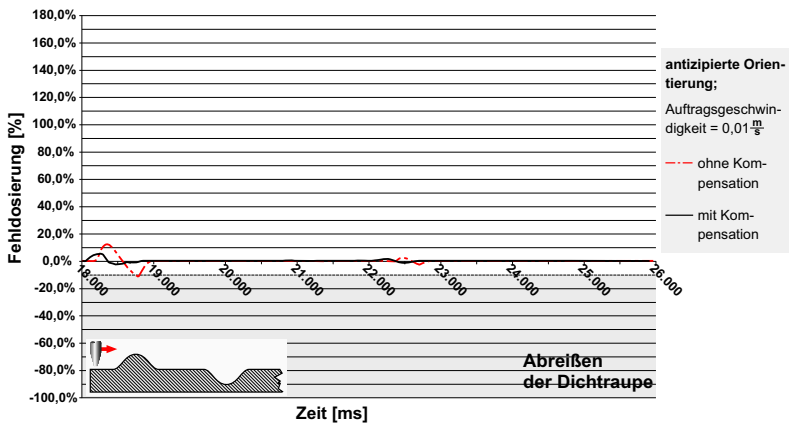


Abbildung 6-26: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung; Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , rundes Bauteil

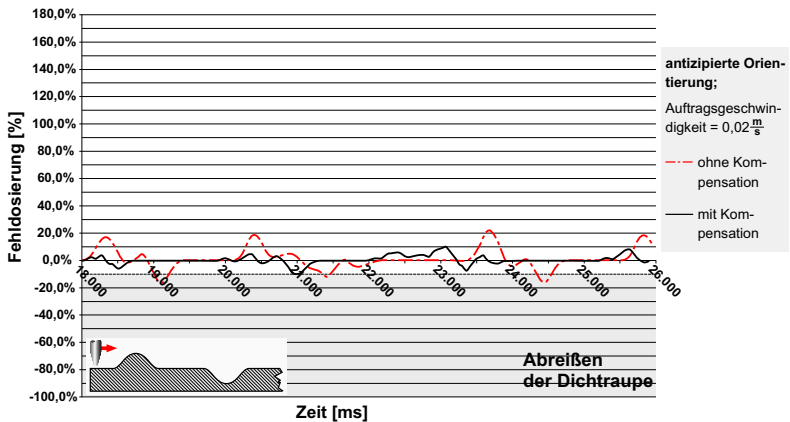
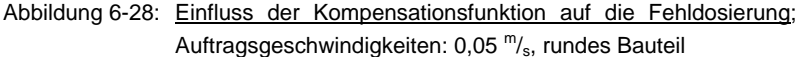


Abbildung 6-27: Einfluss der Kompensationsfunktion auf die Fehldosierung; Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,02 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , rundes Bauteil



Auftragsgeschwindigkeiten:  $0,05 \text{ m/s}$ , rundes Bauteil

Tabelle 6-11: Dosierfehler über der gesamten Auftragsbahn mit Kompensation des zeitlichen Versatzes bei runder und eckiger Bauteilgeometrie; antizipierter Auftrag

tion des zeitlichen Versatzes bei runder und eckiger Bauteil-  
geometrie; antizipierter Auftrag

136

### 6.3.5 Optischer Vergleich der Qualitätsverbesserung durch das entwickelte Kompensationsverfahren

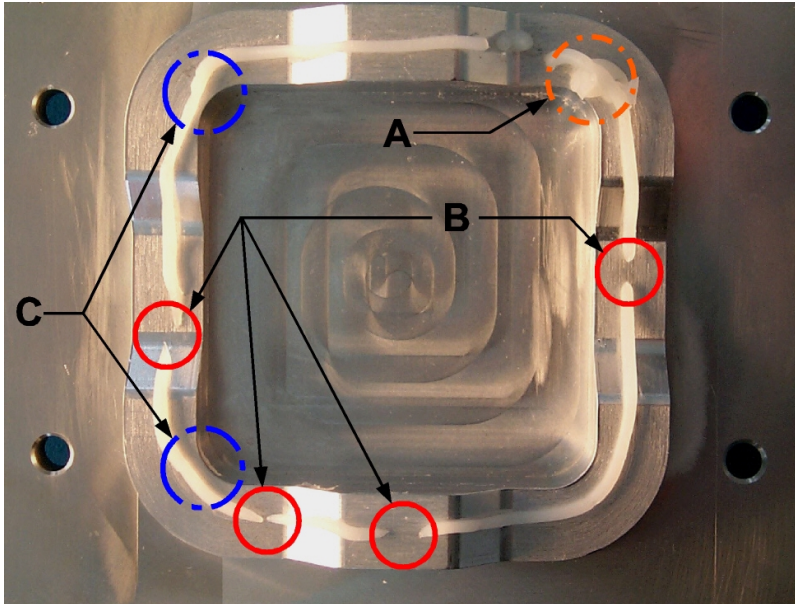


Abbildung 6-29: Auftragsergebnis ohne Kompensationsstrategie; Auftragsgeschwindigkeit:  $0,01 \text{ m/s}$ ; Bauteil gemäß Abbildung 4-2; Medium: 50 g Stärke auf 200 ml Wasser

**A:** Formabweichung der Raupe am Dosierbeginn bzw. Dosierende

**B:** Abreißen der Dichtraupe; Ursache: Unterdosierung

**C:** Lageabweichungen der Raupe; Ursache: Unterdosierung

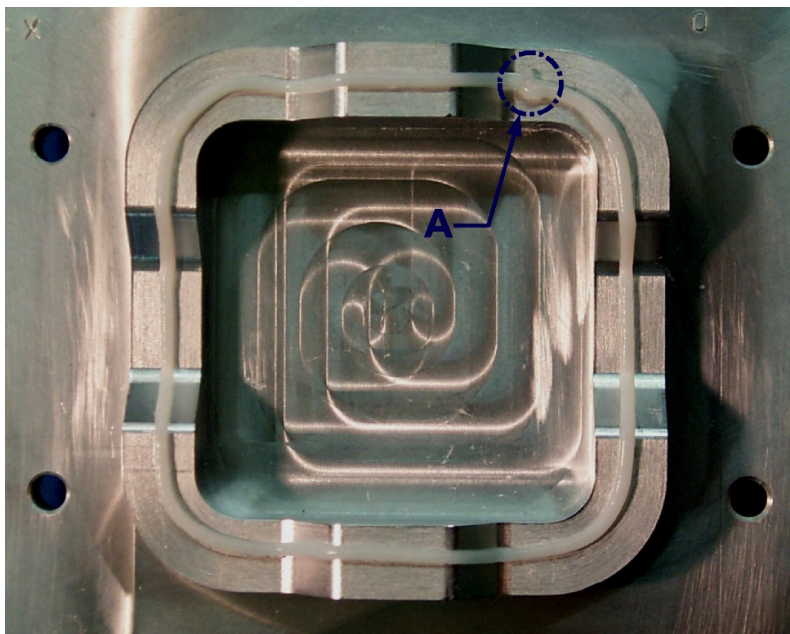


Abbildung 6-30: Auftragsergebnis mit antizipierter Orientierungsänderung und Kompensation durch bahndatenabhängige Parameterfunktionen; Auftragsgeschwindigkeit:  $0,03 \text{ m/s}$ ; Medium: 50 g Stärke auf 200 ml Wasser; Bauteil gemäß Abbildung 4-2;  
**A:** Formabweichung der Raupe am Dosierbeginn bzw. Dosierende

### 6.3.6 Verbesserungspotential durch Spline-Interpolation

Die in Gleichung 6-4 dargestellte Kompensationsfunktion verfügt über sechs frei wählbare Funktionsparameter (A, B, C, D, E und  $v_0$ ). Für den Verlauf dieser Funktion können somit maximal sechs Punkte beziehungsweise funktionsbestimmende Bedingungen vorgegeben werden. Durch das anschließende Lösen eines linearen Gleichungssystems sechster Ordnung werden die Funktionsparameter errechnet.

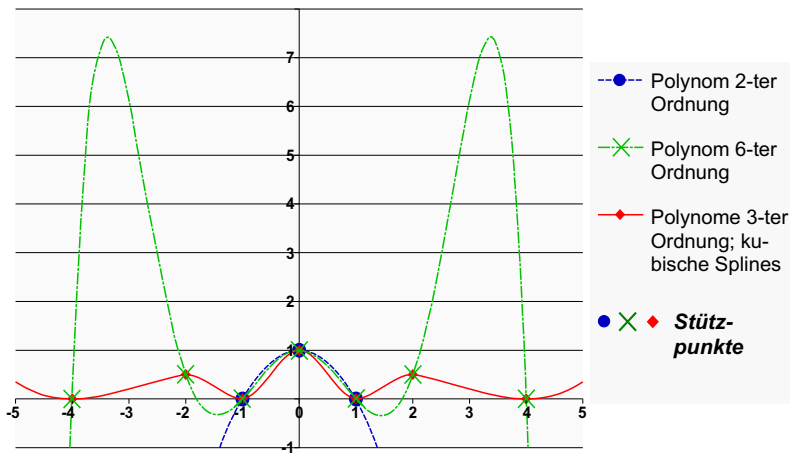


Abbildung 6-31: Gegenüberstellung des Schwingungsverhaltens der Spline-Interpolation und der Polynominterpolation

Zur Näherung beliebiger Funktionsverläufe werden in der Literatur [BRONSTEIN UND SEMENDJAJEW 1991, KREYSZIG 1993] kubische Spline-Funktionen anstelle von Polynomen höherer Ordnung vorgeschlagen. Da Interpolationspolynome höherer Ordnung vor allem zum Intervallende hin beträchtlich schwingen [BRONSTEIN UND SEMENDJAJEW 1991] (vgl. Abbildung 6-31).

Dadurch kann es

- zu unerwünschten Funktionsverläufen des Interpolationspolynoms an mindestens einem Intervallende kommen und
- zu einem unstetigen Verlauf der Proportionalitätsfunktion kommen.

Dies wird durch die abschnittsweise, von den Beschleunigungs- beziehungsweise Verzögerungswerten abhängige Gültigkeit des Interpolationspolynoms verursacht in deren Folge es an den Intervallenden zu Unstetigkeiten kommt. In der Folge kommt es zu Fehldosierungen.

## 6.3 Kompensation durch bahndatenabhängigen Parameterfunktionen

Somit führt eine höhere Ordnung des in Gleichung 6-4 dargestellten Interpolationspolynoms nicht zwingend zu einer besseren Annäherung an den theoretisch zu erreichenden Funktionsverlauf. Durch den Einsatz kubischer Spline-Funktionen können diese Nachteile der Polynominterpolation beseitigt werden.

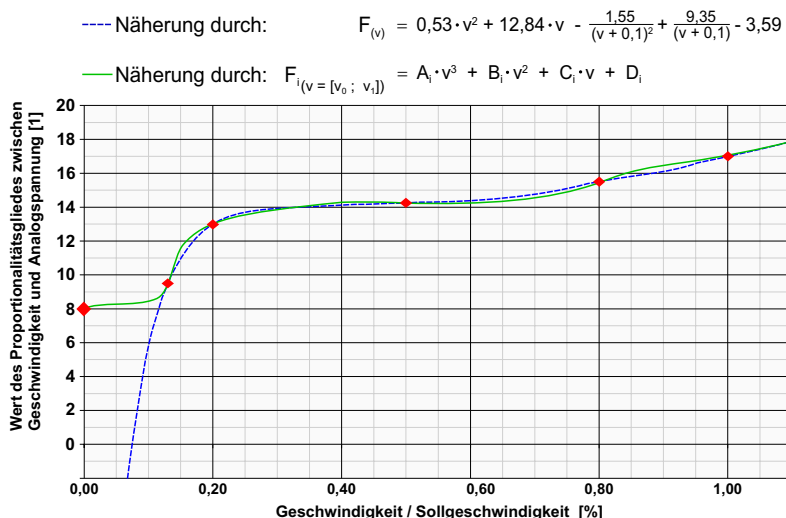


Abbildung 6-32: Verbesserung der Proportionalitätsfunktion durch Spline-Interpolation der Funktionswerte

So kann durch eine Spline-Interpolation auch bei hohen Verzögerungen und geringen Geschwindigkeiten der in Abbildung 6-32 dargestellte, angestrebte Funktionsverlauf erreicht werden.

### 6.3.7 Verbesserungspotential durch Messung des aufgenommenen Dosierpumpenstromes

Neben der Kompensation der steuerungsinternen Verzögerung zur Erfassung der Geschwindigkeit und der Ausgabe eines zugehörigen analogen Spannungssignals zur Ansteuerung der Dosiereinheit, können durch selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen weitere

Dosierfehler kompensiert werden. So ist beispielsweise die Kompensation der Antriebselastizitäten der Dosierpumpe denkbar, wenn zusätzlich zu den bisher erfassten Bahndaten die Stromaufnahme des Dosierantriebes durch einen zugeordneten Spannungseingang an die Steuerung des Handhabungsgerätes übermittelt wird.





## **7 Bewertung der Strategien zur Verringerung systematischer Dosierfehler**

### **7.1 Technische Bewertung und Potentiale der Methoden**

Innerhalb der technischen Bewertung wird das zur Umsetzung erforderliche Prozess- und Anlagenwissen und die Fähigkeit der einzelnen Strategien zur Verringerung der Auswirkung der einzelnen Fehldosierung berücksichtigt.

#### **7.1.1 Orthogonaler Auftrag mit geringer Bearbeitungsgeschwindigkeit**

Da die Höhe der systematischen Fehldosierung stark von der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit abhängt, wird diese soweit herabgesetzt, dass die Auswirkungen der systematischen Fehldosierung vernachlässigbar werden.

Basierend auf den im Kapitel 5 durchgeführten Untersuchungen wird geschlossen, dass bei einem orthogonalen Auftrag eine maximale Auftragsgeschwindigkeit von  $0,005 \text{ m/s} = 5 \text{ mm/s}$  zulässig ist.

Gegen den Einsatz dieser Strategie sprechen wirtschaftliche Gründe, auf die später eingegangen wird.

#### **7.1.2 Antizipierte Orientierungsänderung**

Durch den Einsatz der antizipierten Orientierungsänderung kann zielgerichtet die Höhe der Geschwindigkeitsänderungen an stark gekrümmten oder geknickten Bahnkonturen verringert werden. Diese Strategie erlaubt bei den im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Bauteilen Auftragsgeschwindigkeiten von bis zu  $0,01 \text{ m/s} = 10 \text{ mm/s}$ .

Vor gekrümmten oder geknickten Bahnabschnitten müssen zusätzliche Bahnpunkte für eine vorweggenommene Orientierungsänderung in die Bewegungsprogrammierung aufgenommen werden. Dies bedeutet einen höheren Programmieraufwand.

Durch den Einsatz einer kinematischen Simulationsumgebung kann die Bewegungsprogrammierung beschleunigt durchgeführt werden.

### 7.1.3 Steuerungsinterne Verzögerungsfunktion

Beim Einsatz steuerungsinterner Verzögerungsfunktionen konnten im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen maximale Auftragsgeschwindigkeiten von  $0,01 \text{ m/s} = 10 \text{ mm/s}$  erreicht werden. Zusätzlicher Aufwand während der Bewegungsprogrammierung fällt nicht an.

### 7.1.4 Selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen

Mit Hilfe der selbst optimierbaren, bahndatenabhängigen Parameterfunktionen wird durch eine variable Anpassung des Proportionalitätsgliedes zwischen Auftragsgeschwindigkeit und geförderttem Mediendurchfluss die zeitliche Verzögerungen der Steuerung des Handhabungsgerätes kompensiert. Diese Strategie ist speziell zur Vermeidung von Unterdosierungen, die zu einem Abreißen der Dichtraupe führen geeignet. Es konnten Auftragsgeschwindigkeiten von  $0,02 \text{ m/s} = 20 \text{ mm/s}$  realisiert werden. Zur zusätzlichen Vermeidung von Überdosierungen kann diese Methode mit der antizipierten Orientierungsänderung kombiniert werden, um noch höhere Applikationsgeschwindigkeiten zu erreichen.

Da die Anpassung der Koeffizienten ein iterativer Vorgang ist, verlängert sich die notwendige Rüstzeit. Aufgrund der komplexen steuerungstechnischen Zusammenhänge und der mathematischen Algorithmen, die zur Bestimmung der Funktionsparameter von Gleichung 6-4 benötigt wird, ist eine höhere Mitarbeiterqualifikation erforderlich.

Die Ermittlung der Funktionsparameter gestaltet sich vergleichsweise aufwendig. Zusätzlich verbleiben Fehldosierungen trotz vorausberechneter Ansteuerung der Dosiereinheit bei geringen Bahngeschwindigkeiten und gleichzeitig hohen Bahnbeschleunigungen beziehungsweise -verzögerungen (vgl. Abbildung 7-1).

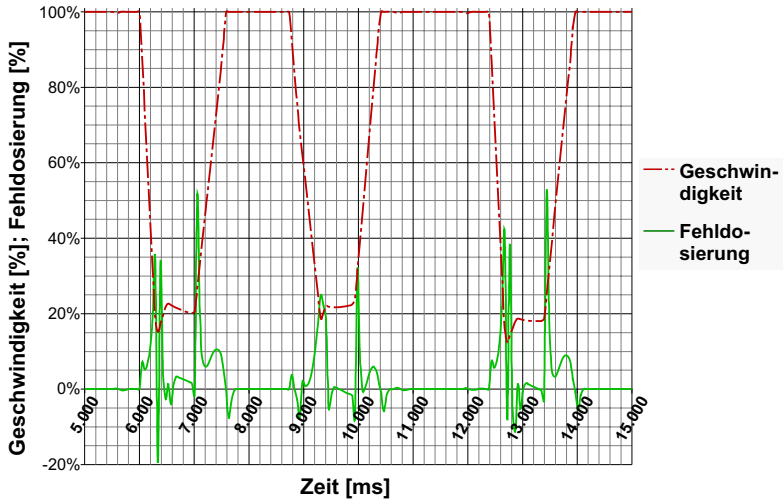


Abbildung 7-1: Gegenüberstellung der Fehldosierung und der Geschwindigkeit

Auf Möglichkeiten zur Abhilfe dieses Sachverhalts wurde in Kapitel 6.3.6 und 6.3.7. eingegangen.

### 7.2 Wirtschaftliche Bewertung der Methoden

Für einen wirtschaftlichen Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten und entwickelten Strategien, eignen sich die fixen Kosten der Anlage, die beim Auftrag einer bestimmten Raupenlänge anfallen. Um bei den einzelnen Strategien von den gleichen Voraussetzungen auszugehen, wird vereinfachend angenommen, dass die Gerätetechnische Ausstattung identisch ist, und aus einer Auftragsstation und einer kinematischen Simulationsumgebung besteht.

Als Kosten, die im Rahmen des Raupenauftrags anfallen, werden die Lohnkosten des Mitarbeiters und die pro Stunde anfallenden Kapitalkosten wie Abschreibungen und Zinsen berücksichtigt, da diese bei höherer Produktivität der Anlage degressiven Charakter aufweisen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit eines Vergleichs der unterschiedlichen Strategien durch die Angabe prozentualer Einsparungspotentiale. Damit ist dieser Vergleich unabhängig von den aktuellen Kostenniveaus der einzusetzenden Betriebsmittel.

Um eine dimensionslose, prozentuale Kennzahl für die Kosteneinsparung zu erhalten, wird die wirtschaftlich ungünstigste Methode, der orthogonale Auftrag mit verminderter Bearbeitungsgeschwindigkeit, als Referenzfall verwendet, und zunächst der Quotient aus deren fixen Kosten und der maximal erreichbaren Auftragsgeschwindigkeit gebildet (vgl. Gleichung 7-1).

$$\text{Gleichung 7-1: } P_D = \frac{K_A + K_Z + K_L}{V_{\text{Max}}}$$

Mit:

$P_D$ : Kosten pro Meter aufgetragene Dichtraupe  $\left[\frac{\text{€}}{\text{mm}}\right]$

$K_L$ : Lohnkosten pro Betrachtungsintervall  $\left[\frac{\text{€}}{\text{s}}\right]$

$K_A$ : Abschreibungsbetrag pro Betrachtungsintervall  $\left[\frac{\text{€}}{\text{s}}\right]$

- $K_Z$ : Kalkulatorische Zinsen pro Betrachtungsintervall [ $\frac{\text{€}}{\text{s}}$ ]
- $v_{\text{Max}}$ : Sollgeschwindigkeit, die abhängig von der Kompensationsmethode vorgegeben werden kann, ohne dass Fehldosierungen Einfluss auf die Qualität der aufgetragenen Dichtraupe haben [ $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ ]

Für die konkurrierenden Strategien wird in gleicher Weise verfahren. Das mögliche Kosteneinsparungspotential gegenüber dem Referenzprozess kann dimensionslos als prozentuale Einsparung dargestellt werden und ergibt sich gemäß Gleichung 7-2.

$$\text{Gleichung 7-2: } \Delta K = \frac{P_{\text{Referenzprozess}} - P_{\text{Bearbeitungsstrategie}}}{P_{\text{Referenzprozess}}}$$

Mit:

- $\Delta K$ : Einsparungspotential der eingesetzten Bearbeitungsstrategie gegenüber dem betrachteten Referenzprozess [%]
- $P_{\text{Index}}$ : Kostenkennzahl des betrachteten Prozesses gemäß Gleichung 7-1

Da lediglich die an der realen Anlage anfallenden Kosten betrachtet werden, vereinfacht sich Gleichung 7-2 zu:

$$\text{Gleichung 7-3: } \Delta K = \frac{\frac{1}{v_{\text{Referenzprozess}}} - \frac{1}{v_{\text{Bearbeitungsstrategie}}}}{\frac{1}{v_{\text{Referenzprozess}}}} \cdot 100 \%$$

$$\Delta K = \left[ 1 - \frac{v_{\text{Referenzprozess}}}{v_{\text{Bearbeitungsstrategie}}} \right] \cdot 100 \%$$

Mit:

- $\Delta K$ : Einsparungspotential der eingesetzten Bearbeitungsstrategie gegenüber dem betrachteten Referenzprozess [%]
- $v_{\text{Index}}$ : Maximale Sollgeschwindigkeit des betrachteten Prozesses [ $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ ]

Somit ergibt sich für die betrachteten Strategien das in Tabelle 7-1 dargestellte Ergebnis.

## 7.2 Wirtschaftliche Bewertung

---

Strategie	maximale Bahngeschwindigkeit	Kosteneinsparungspotential
Orthogonal mit verringerter Geschwindigkeit	0,005 $\text{m/s}$	0 %
antizipierte Orientierungsänderung; Umsetzung an realer Anlage	0,010 $\text{m/s}$	50 %
antizipierte Orientierungsänderung; Umsetzung mit Simulationsumgebung	0,010 $\text{m/s}$	50 %
Steuerungsinterne Verzögerungsfunktion	0,010 $\text{m/s}$	50 %
optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen; Umsetzung an realer Anlage	0,020 $\text{m/s}$	75 %
optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen und antizipierte Orientierungsänderung; Umsetzung mit Simulationsumgebung	0,030 $\text{m/s}$	83 %

Tabelle 7-1: Vergleich des möglichen Kosteneinsparungspotentials

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird der automatisierte Applikationsprozess hochviskoser Dichtmedien betrachtet. Qualitätsmängel beim Auftrag hochviskoser Dichtstoffe sind im wesentlichen auf Dosierfehler zurückzuführen und beeinträchtigen die Qualität des Gesamtproduktes.

Neben Dosierfehlern, die durch Inhomogenitäten des Mediums verursacht werden, existieren systematisch bedingte. Bedingt durch den Zeitversatz zwischen der Geschwindigkeitserfassung und Ansteuerung der Dosiereinheit kommt es bei Geschwindigkeitsänderung zwangsläufig zu systematischen Dosierfehlern. Um das Ausmaß der genannten Einflussfaktoren zu quantifizieren, werden Möglichkeiten zur Berechnung von Art und Höhe der systematischen Dosierfehler hergeleitet, und sowohl innerhalb einer Simulationsumgebung als auch an einer realen Auftragsanlage Versuche durchgeführt. Ein Vergleich der an einer realen Auftragsanlage und einer Simulationsumgebung gewonnenen Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass die Simulationsumgebung geeignet ist, systematisch verursachte Dosierfehler bereits vor dem Applikationsprozess zu ermitteln und geeignete Bearbeitungsstrategien zu entwickeln. Um die Auswirkungen systematischer Dosierfehler zu verringern, wurden mehrere Bearbeitungsstrategien erarbeitet.

Durch den Einsatz der antizipierten (= vorweggenommenen) Orientierungsänderung wird die von der Auftragsbahn bedingte Änderung der Bahngeschwindigkeit reduziert. Mit dem Einsatz der antizipierten Orientierungsänderung konnten im Rahmen der in dieser Arbeit verwendeten Versuchsumgebung bei Auftragsgeschwindigkeiten von  $0,01 \text{ m/s}$  gute Applikationsergebnisse erreicht werden.

Die Verwendung steuerungsinterner Algorithmen zur Kompensation des Zeitversatzes zwischen Geschwindigkeitserfassung und Ansteuerung der Dosiereinheit führen ebenfalls zu zufriedenstellenden Applikationsergebnissen bis zu Auftragsgeschwindigkeiten von  $0,01 \text{ m/s}$ .

Neben diesen beiden Kompensationsstrategien wurden innerhalb dieser Arbeit **„selbst optimierbare, bahndatenabhängige Parameterfunktionen“** zur Kompensation systematischer Dosierfehler entwickelt. Diese Methode verbessert die Qualität des Applikationsergebnisses und die Produktivität der Auftragsanlage. Es wurden bei guten Qualitäten der aufgetragenen Dichtraupe Bearbeitungsgeschwindigkeiten von über  $0,02 \text{ m/s}$  realisiert. Darüber hinaus ist ein Einsatz dieser Kompensationsstrategie auch auf weitere Bearbeitungsaufgaben übertragbar. Ähnliche Problemstellungen wie beim automatisierten Auftragen hochviskoser Kleb und Dichtstoffe ergeben sich auch für Laserbearbeitungs- sowie für Schweißprozesse. Ein Vorteil dieser Strategie ist, dass für ihre Umsetzung im Idealfall keine zusätzlichen Hardwarekomponenten notwendig sind, und diese Strategie in der Lage ist sich selbst zu optimieren. Darüber hinaus bietet die Implementierung eines Regelungsalgorithmus in die Steuerung des Handhabungsgerätes zusätzliches Potential. So kann beispielsweise die für den Dosiervorgang notwendige Pumpenleistung direkt von der Robotersteuerung erfasst werden. Durch Erweiterung des steuerungsinernen Regelkreises können damit weitere „Totzeitglieder“ des Gesamtsystems eliminiert und die Qualität des Auftragsprozesses weiter verbessert werden.

Zukünftige Arbeiten sollten daher folgende Zielrichtungen verfolgen:

- Die Integration weiterer Prozessdaten, wie beispielsweise die von der Dosierpumpe aufgenommene Leistung, um weitere systembedingte Dosierfehler zu ermitteln und mit Hilfe bahndatenabhängiger Parameterfunktionen zu eliminieren.
- Die Implementierung eines programmtechnisch realisierten Berechnungsalgorithmus innerhalb der Steuerung des Handhabungsgerätes. Auf der Basis mehrerer abschnittsweise definierter Kompensationsfunktionen könnte eine automatische Parameteranpassung, basierend auf den ermittelbaren Prozessdaten durchgeführt werden. Dadurch kann eine bedienerunabhängige, automatisierte Anpassung der Kompensationsfunktionen erfolgen, welche neben der Vermeidung von Unter-



dosierungen auch Überdosierungen vermindert.

- Aufstellung eines mathematischen Modells, welches die rheologischen Eigenschaften der eingesetzten Medien berücksichtigt. Dadurch könnten die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werte für die Höhe kritischer Unterdosierungen sowie deren kritische Dauer auch auf andere Medien übertragen werden.

Durch diese Arbeitsschritte könnte die Kontrolle bei der Prozessführung weiter erhöht werden, und die erreichbare Produktqualität und Anlagenproduktivität weiter gesteigert werden.

Eine Bewertung der betrachteten Strategien im Hinblick auf die Möglichkeit der technischen Umsetzung, der erreichbaren Qualität und Produktivität der Auftragsstation zeigt, dass aus qualitativer Hinsicht der Einsatz einer Bearbeitungsstrategie grundsätzlich gerechtfertigt ist. Der erhöhte Aufwand für die Umsetzung ***selbst optimierbarer, bahndatenabhängiger Parameterfunktionen***, auch in Kombination mit der antizipierten Orientierungsänderung, kann durch deutliche Produktivitätssteigerungen mehr als ausgeglichen werden.



## 9 Literaturverzeichnis

### AD-B7

Verband der TÜV e.V. Essen (Hrsg): AD Merkblätter. Blatt 7: Berechnung von Druckbehältern: Schrauben. Köln: Heymans, 1992.

### AD-B8

Verband der TÜV e.V. Essen (Hrsg): AD Merkblätter. Blatt 8: Berechnung von Druckbehältern: Flansche. Köln: Heymans, 1992.

### ANGST + PFISTER 1996

Angst + Pfister: Normatec - O-Ringe. Firmenschrift. Mörsfelden: Eigenverlag, 1996.

### BAUER 1998

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

### BEITZ & GROTE 1997

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

### BOSCH 1999

Bosch, E.: Kleben und Dichten mit Silikonkautschuk in der Automobil- und Automobilzulieferindustrie. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Flexibles Kleben und Dichten – Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle. München: Utz Verlag Wissenschaft. 1999, (iwb Seminarberichte 51).

### BRABENDER 1999

Brabender, W.: Klebstoff und Dichtmittelauftrag optisch unter Kontrolle. Adhäsion 43 (1999) 4, S. 26. Friedrich Vieweg & Sohn

### BRANDENBURG 1996

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

### BROCKMANN ET AL. 2000

Brockmann, W.; Naß, J.: Anwendung der statistischen Versuchsplanung in der Klebtechnik. Adhäsion 44 (2000) 1-2, S. 33. Friedrich Vieweg & Sohn

### BRONSTEIN UND SEMENDJAJEW 1991

Grosche, G; Ziegler, D.; Ziegler, V. (Hrsg.): Taschenbuch der Mathematik / I. N. Bronstein; K. A. Semendjajew. 25. Auflage. Stuttgart - Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig & Verlag Nauka Moskau, 1991.

### BROWN 1990

Brown, M. W.: Seals and Sealing Handbook. 3. Aufl. Oxford, England: Elsevier Science Publisher Ltd., 1990.

### BUSAK + SHAMBAN 1996

Busak+Shamban: O-Ring. Firmenschrift. Stuttgart: Eigenverlag, 1996.

### CHURCHILL 1988

Churchill, S. W.: Viscous Flows – The Practical Use of Theory. Boston: Butterworth Publishers, 1988.

### CONSTANTINESCU 1995

Constantinescu, V. N.: Laminar Viscous Flow. New York: Springer-Verlag, 1995.

### DILTHEY ET AL. 1998

Dilthey, U.; Brandenburg, A.; Möller, M.: Optimierung des Klebstoffauftrags durch ein neues Steuerungskonzept für Geschwindigkeitsge-regelte Auftragsdüsen. Schweißen & Schneiden 50 (1998), 6/1998,

S. 356. Technisch wissenschaftliche Fachzeitschrift des DVS, Düsseldorf.

DILGER ET AL. 2000

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

DIN 1342-2 (E)

DIN 1342-2 (Entwurf): Viskosität – Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten. Berlin: Beuth, 1999.

DIN 1342-3 (E)

DIN 1342-3 (Entwurf): Viskosität – Teil 3: Nicht-newtonsche Flüssigkeiten. Berlin: Beuth, 1999.

DIN 2505 (E)

DIN 2505 (Entwurf): Berechnung von Flanschverbindungen. Berlin: Beuth, 1990

DIN 3750

DIN 3750: Dichtungen – Benennungen. Berlin: Beuth, 1957.

DIN 3760

DIN 3760: Radial-Wellendichtringe. Berlin: Beuth, 1996.

DIN 3761

DIN 3761, Teil 1-15: Radialwellen-Dichtringe für Kraftfahrzeuge. Berlin: Beuth, 1984.

DIN 3771–1 (E)

DIN 3771–1 (Norm Entwurf): Fluidtechnik, O-Ringe; Maße. Berlin: Beuth, 1993.

DIN 3771–1

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

### DIN 3771–2

DIN 3771–2: Fluidtechnik, O-Ringe; Prüfung, Kennzeichnung. Berlin: Beuth, 1984.

### DIN 3771–3

DIN 3771–3: Fluidtechnik, O-Ringe; Werkstoffe, Einsatzbereich. Berlin: Beuth, 1984.

### DIN 3771–4

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

### DIN 3771–5

DIN 3771–5: Fluidtechnik, O-Ringe; Berechnungsverfahren und Maße der Einbauräume. Berlin: Beuth, 1993.

### DIN 8593

DIN 8593, Teile 1 bis 8: Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth, 1985.

### DIN 16920

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

### DIN 28090

DIN 28090, Teil 1: Statische Dichtungen für Flanschverbindungen: Dichtungskennwerte und Prüfverfahren. Berlin: Beuth, 1995.

### DIN 53504

DIN 53504: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch. Berlin: Beuth, 1994.

### DIN 53517

DIN 53517: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren: Bestimmung des Druckverformungsrestes nach konstanter Verformung. Berlin: Beuth, 1995.

### DIN 53519

DIN 53519 Blatt 1: Prüfung von Elastomeren – Bestimmung der Kugeldruckhärte von Weichgummi – Internationaler Gummihärtegrad (IRHD) – Härteprüfung an Normproben. Berlin: Beuth, 1972.

### DIN 53537

DIN 53537: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung der Spannungsrelaxation unter Druck. Berlin: Beuth, 1985.

### DIN 82331

DIN 82331: Flachdichtungen für runde Flansche nach DIN 82330. Berlin: Beuth, 1989.

### DIN 86071

DIN 86071: Flachdichtungen mit Schraubenlöchern für Flansche; Nenndruck 6, 10, 16, 25. Berlin: Beuth, 1992.

### DOOBE 1999 / 1

Doobe, M. (Red.): Der Markt für Dichtmittel profitiert vom Autoboom. Adhäsion 43 (1999) 3, S. 32. Friedrich Vieweg & Sohn.

### DOOBE 1999 / 2

Doobe, M. (Red.): Der Markt für thermoplastische Elastomere wächst. Adhäsion 43 (1999) 7-8, S. 8. Friedrich Vieweg & Sohn.

### DORN ET AL. 1993

Dorn, L.; Pohl, I.; Gerstle, B.; u.a.: Qualitätssicherung in der Klebtechnik. Verlag TÜV Rheinland GmbH. 1993 (Praxiswissen für Ingenieure)

ELSNER 1999

Elsner, H.: Qualität beginnt mit der Konstruktion. Adhäsion 43 (1999) 10, S. 32. Friedrich Vieweg & Sohn

ENDLICH 1990

Endlich, W.: Kleb- und Dichtstoffe in der modernen Technik. Essen: Vulkan-Verlag, 1990.

GARNICH & LITZEL 1999

Garnich, F.; Litzel, R.: Angewandte Methoden zur on-line Qualitätssicherung. . In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Flexibles Kleben und Dichten – Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle. München: Utz Verlag Wissenschaft 1999, (iwb Seminarberichte 51).

GARTNER U.A. 1998

Gartner, J.; Schuller, R.; Trossin, H.-J.: Randbedingungen zum Einsatz statischer Dichtungen. Konstruktion 50 (1998), S. 23-26

GARTNER 1999

Gartner, J.: Konstruktion und Prozeßsicherung bei fluid aufgetragenen Elastomerdichtungen. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Flexibles Kleben und Dichten – Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle. München: Utz Verlag Wissenschaft. 1999, (iwb Seminarberichte 51).

GARTNER & MOSANDL 2000

Gartner, J.; Mosandl, T.: Eignung von Fügetechnologien für Mischverbindungen. In Reinhart, G. Mischverbindungen München: Herbert Utz. 2000 (iwb Seminarberichte 53).

GROSCHKE ET AL. 1995

Grosche, G; Zeidler, E.; Ziegler, D.; Ziegler, V. (Hrsg.): Teubner – Taschenbuch der Mathematik – Teil 2. 7. Auflage. Stuttgart - Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 1995.



### HABENICHT 1997

Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen; 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

### HARTMANN 1999

Hartmann, G.: Flexibles Auftragen von Kleb- und Dichtstoffen mit Industrierobotern in flexiblen Fertigungszellen. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Flexibles Kleben und Dichten – Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle. München: Utz Verlag Wissenschaft 1999, (iwb Seminarberichte 51).

### HENNEMANN ET AL. 1997

Hennemann, O.-D.; Brede, M.; Exner, S.; Jesse, A.; Wulf, A.: Alternativer Weg zur konstruktiven Auslegung elastischer Klebungen. Adhäsion 41 (1997) 12, S. 35. Friedrich Vieweg & Sohn.

### HOFMANN VON KAP-HERR 2000

Hoffmann von Kap-herr, K.: Entwicklung eines Modells für eine elektronische Unterstützung der Dokumentation im Qualitätsmanagement. RWTH Aachen, Diss. Aachen: Shaker Verlag, 2000, (Berichte aus der Produktionstechnik 3/2000)

### HOßMANN 1992

Hoßmann, J.: Methodik zur Planung der automatisierten Montage von nicht formstabilen Bauteilen. TU München, Diss. Berlin: Springer, 1992. (iwb Forschungsberichte 43).

### ISO 9000–1

ISO 9000–1: Quality management and quality assurance standards – Part 1: Guidelines for selection and use. Berlin: Beuth, 1994.

### ISO 9000–2

ISO 9000–2: Quality management and quality assurance standards – Part 2: Generic guidelines for the application of ISO 9001, ISO 9002 and ISO 9003. Berlin: Beuth, 1997.

### ISO 9001

ISO 9001: Quality systems – Model for quality assurance in design, development, production, installation and servicing. Berlin: Beuth, 1994.

### ISO 9002

ISO 9002: Quality systems – Model for quality assurance in production, installation and servicing. Berlin: Beuth, 1994.

### ISO 9003

ISO 9003: Quality systems – Model for quality assurance in final inspection and test. Berlin: Beuth, 1994.

### JEPSEN 1988

Jepsen, C.: Wendelströmung vernetzender hochviskoser Fluide. Universität Hannover, Diss. Hannover: 1988.

### KEULERT 1994

Keulert, P.: Dichten heute und morgen. Adhäsion 38 (1994) 12, S. 11. Friedrich Vieweg & Sohn.

### KLOCKE U. A. 1997

Klocke, F.; Ketteler, G.; Rehse, M.: Sensorlose Prozeßüberwachung mit steuerungsinternen Informationen. Werkstattstechnik 87 (1997) 7/8, S. 369-372.

### KREYSZIG 1993

Kreyszig, E.: Advanced engineering mathematics; 7<sup>th</sup> edition. New York: John Wiley & Sons. 1993

### KRÜGER 1999

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

### KOCH 1996

Koch, S.: Elastisches Kleben im Fahrzeugbau – Beanspruchung und Eigenschaften. Technische Universität München, Diss. München: Lehrstuhl für Fügetechnik. 1996.

### LAMMEL 1997

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

### LOCTITE 1995

Loctite Corporation (Hrsg.): Loctite Worldwide - Design Handbook. München: Eigenverlag 1995.

### MERKEL UND THOMAS 1994

Merkel, M.; Thomas, K.-H.: Taschenbuch der Werkstoffe; 4. Auflage. Leipzig. Fachbuchverlag Leipzig - Köln, 1994.

### NASITTA & HAGEL 1992

Nasitta, K.; Hagel, H.: Finite Elemente – Mechanik, Physik und nicht-lineare Prozesse. Berlin: Springer-Verlag, 1992

### NIEMANN 1981

Niemann, G.: Maschinenelemente, Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen (Band 1). Berlin: Springer-Verlag, 1981.

### PAHL & BEITZ 1997

Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung; 4. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

### PAWELSKI 1998

Pawelski, H.: Erklärung einiger mechanischer Eigenschaften von Elastomerwerkstoffen mit Methoden der statistischen Physik. Aachen: Shaker-Verlag, 1998.

### PAWLOVSKI 1971

Pawlovski, J.: Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung (Grundlagen und Anwendung). Berlin: Springer-Verlag, 1971.

### PAWLOVSKI 1991

Pawlovski, J.: Veränderliche Stoffgrößen in der Ähnlichkeitstheorie. Frankfurt am Main: Otto Salle Verlag, 1991.

### PETRY 1992

Petry, M.: Systematik zur Entwicklung eines modularen Programm-baukastens für robotergeführte Klebeprozesse. TU München, Diss. Berlin: Springer, 1992. (iwb Forschungsberichte 44).

### REINHART U.A. 1996

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

### REINHART & SCHULLER 1996

Reinhart, G.; Schuller, R.: Prozessüberwachung beim Auftrag hoch-viskoser Medien. Adhäsion 40 (1996) 7/8, S. 14. Friedrich Vieweg & Sohn.

### REINHART ET. AL. 2000

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

### REINHART & GARTNER 2001

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

### SAECHTLING 1998

Saechtling, H.: Kunststoffaschenbuch, 27. Ausgabe. München. Carl Hanser Verlag, 1998.

### SCHINDEL-BIDINELLI 1998

Schindel-Bidinelli, E.: Kleben – Kleben von Mischbauweisen. Schindel-Bidinelli E. (Hrsg): 12. Internationales Symposium Swiss Bonding (Tagungsunterlagen). Rapperswil: Eigenverlag, 1998.

### SCHMID U.A. 1981

Schmid, E. u. a.: Handbuch der Dichtungstechnik. Grafenau / Württemberg: expert verlag, 1981.

### SCHULLER 1995

Schuller, R.: Flexibler Auftrag hochviskoser Fluidichtungen. Adhäsion 39 (1995) 9/95, S. 14ff. Friedrich Viehweg & Sohn.

### SCHULLER 1996

Schuller, R.: Prozeßüberwachung beim Auftrag hochviskoser Dichtmedien. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe. München: Utz Verlag Wissenschaft 1996, S. 18 - 30. (iwb Seminarberichte 15).

### SCHULLER U.A. 1998

Schuller, R.; Schneider, B.; Lorenzen, J.: Auswahl und Anwendung statischer Dichtelemente. MM Maschinenmarkt 104 (1998) 3/4, S. 40 - 44.

### SCHULLER 1998

Schuller, R.: Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen. TU München, Diss. Berlin: Springer-Verlag, 1998. (iwb Forschungsberichte 117)

### SEDOV 1993

Sedov, L. I.: Similarity and dimensional methods in mechanics, 10th Edition. Florida: CRC Press Inc, 1993.

### STICHELMAIR 1995

Stichelmair, J.: Ähnlichkeitsgesetze - Möglichkeiten und Grenzen. Antrittsvorlesung, München, 1995.

### THIER 1993

Thier, B. (Bearb.): Leckagen, 1. Ausgabe. Essen: Vulkan-Verlag, 1993

### THEILIG 2000

Theilig, O.: Qualitätscontrolling in der Montage. TU Braunschweig, Diss. Essen: Vulkan-Verlag, 2000. (Schriftenreihe des IWF)

### TRUCKENBRODT 1988

Truckenbrodt, E.: Lehrbuch der angewandten Fluidmechanik; 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1988.

### TÜCKMANTEL 1990

Tückmantel, H. J.: Die Optimierung statischer Dichtungen; 3. Auflage. Oberhausen: kempchen, 1990.

### WACHINGER 1999

Wachinger, G.: Methoden zur Charakterisierung von Klebungen. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Flexibles Kleben und Dichten – Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle. München: Utz Verlag Wissenschaft 1999, (iwb Seminarberichte 51).

### WERN 1993

Wern, A.: Beitrag zur Automatisierung der Klebstoffdosierung durch Echtzeit-Volumenstrommessung. RWTH Aachen, Diss. Aachen: Shaker, 1993, (Aachener Berichte Fügetechnik 5/93).

### WILDEMANN 1995

Wildemann, H.: Kosten– und Leistungsrechnung für präventive Qualitätssicherungssysteme. München. TCW Transfer-Centrum-Verlag GmbH, 1995.

### WÖLFLE 1999

Wölflle, M.: Geschäumte Dichtungen. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Flexibles Kleben und Dichten – Produkt- & Prozeßgestaltung,

Mischverbindungen, Qualitätskontrolle. München: Utz Verlag Wissenschaft 1999, (iwb Seminarberichte 51).

ZLOKARNIK 1993

Zlokarnik, M.: Dimensional Analysis and Scale-up in Chemical Engineering. Berlin: Springer-Verlag 1991.

### **Technische Anleitungen**

LOCTITE 1999

Funktionsbeschreibung der ON-LINE-Dosierkontrolle Z6200. Loctite GmbH. München. 1999

PRECITEC 1996

precitec GmbH: Lasermatic II. Betriebsanleitung Version 2.0 bis 2.6, BA C30 / 825 / 301. Schramberg: Eigenverlag, 1996.





# 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. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*  
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 *Reikhofer, 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 *Groha, 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 *Wiba, P.*  
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelschäuser, 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 Einschnürungen 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 Programmbaukastens 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 *Schrüfer, N.*  
**Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wiesbacher, 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 Zustandesregelung 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 *Helml, 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 *Strohmayer, R.*  
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von  
Zubringereinrichtungen**  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer  
Zellenrechnersoftware**  
1993 · 80 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*  
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur  
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, 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 *Kugelman, F.*  
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen  
Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
**Simulationsgestützte CAD/CAM-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 *Raith, 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 *Romanow, 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 *Linner, 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 *Deutsche, 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 Qualitätsmanagment 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 *Krönert, 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 *Lindnermaier, 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 *Plöb, E.*  
**Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen**  
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
**Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen**  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iw b

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

Seminarberichte iw b 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 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement · der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Analysen und Konzepte**  
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 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
- 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
- 31 **Engineering Data Management (EDM) · Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 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 · Produktivitätsteigerung 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 Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3

# 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.com](mailto:utz@utzverlag.com)*

- 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 Mößner, 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 Partnerverbünden**  
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 Produktionsptimierung 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 · lieferbar ab ca. 02/01
- 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  
 lieferbar ab ca. 09/01
- 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